



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Estudos para Aviação do Hoje e do Amanhã

TED n. 11525720240005-003882/2024

PRODUTO 1

# Estudo de Novas Soluções de Gestão do Tráfego Aéreo para a Integração de Operações de Mobilidade Aérea Avançada no Espaço Aéreo







## Histórico de versões:

<i>Versão</i>	<i>Data</i>	<i>Responsável</i>	<i>Descrição da Alteração</i>
1.0	22 dez 2025	Profa. Dra. Mayara Condé Rocha Murça	Versão inicial do Produto 1







**Coordenação Geral**

Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves  
claudioj@ita.br

**Gerente da Etapa**

Profa. Dra. Mayara Condé Rocha Murça  
mayara@ita.br





### **Equipe ITA**

Profa. Dra. Mayara Condé Rocha Murça

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres

Prof. Dr. Daniel Alberto Pamplona

M.Sc. Lucas Orbolato Carvalho

Igor Galhano Gomes







# Produto 1

Meta 2 | Etapa 7: Sigma-Sky

Relatório de Revisão da Literatura





## Sumário Executivo

O presente Produto faz parte da relação de entregas da Etapa 7 da Meta 2 - do Termo de Execução Descentralizada (TED) n. 1525720240005-003882/2024, firmado pela Secretaria de Aviação Civil, cujo número de Processo é 50020.008564/2024-14. Tal TED foi decorrente de estruturação entre a Secretaria de Aviação Civil (SAC) e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com foco em “*Estudos para Aviação de Hoje e do Amanhã*”. O ITA respondeu à demanda da SAC e o TED citado foi estruturado em 02 (duas) Metas com 16 (dezesesseis) Etapas. O citado TED foi firmado no dia 20/12/2024.

O Produto consiste em um relatório descritivo do estado da arte no que tange à gestão do tráfego aéreo para *Advanced Air Mobility (AAM)/Urban Air Mobility (UAM)*, apresentando os resultados de uma revisão sistemática de literatura que abrangeu os principais documentos estratégicos publicados por autoridades aeronáuticas, agências reguladoras, indústria e consórcios de pesquisa de diversas regiões do mundo, incluindo América do Norte (FAA, Boeing, NASA), Europa (Eurocontrol, Comissão Europeia de Regulamentação), Ásia (Japão, Coreia do Sul), América do Sul (ANAC, DECEA, EmbraerX) e Oceania (Austrália). A partir de uma análise comparativa minuciosa das publicações em sete eixos temáticos, o estudo identificou tendências convergentes, divergências conceituais e lições aprendidas relevantes para o desenvolvimento do ecossistema AAM/UAM no Brasil.





## Conteúdo

<b>Lista de Siglas</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>12</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>13</b>
<b>1 Contextualização</b>	<b>14</b>
<b>2 Abordagem Metodológica</b>	<b>16</b>
2.1 Descrição dos Documentos Analisados . . . . .	16
2.2 Diferenças de Terminologia: AAM e UAM . . . . .	21
<b>3 Gestão do Espaço Aéreo</b>	<b>24</b>
3.1 Corredores aéreos . . . . .	26
3.2 Estrutura em camadas . . . . .	27
3.3 Classificação do espaço aéreo e requisitos de utilização . . . . .	28
3.4 Segregação ou integração do espaço aéreo . . . . .	30
3.5 Zonas de exclusão ou acesso controlado . . . . .	32
3.6 Compatibilidade com o ATM convencional . . . . .	34
<b>4 Gestão do Tráfego Aéreo</b>	<b>36</b>
4.1 Provisão de separação e desconflito . . . . .	38
4.2 Balanceamento entre demanda e capacidade . . . . .	41





<b>5</b>	<b>Governança</b>	<b>45</b>
5.1	Prestadores de serviços . . . . .	46
5.2	Serviços propostos . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Regras e Regulamentos</b>	<b>54</b>
6.1	Regras de voo . . . . .	55
6.2	Regras de separação . . . . .	57
6.3	Regras de acesso ao espaço aéreo . . . . .	60
6.4	Requisitos de certificação de veículos e operadores . . . . .	62
6.5	Responsabilidades e papéis regulatórios . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Tecnologias de Suporte</b>	<b>67</b>
7.1	Comunicação, Navegação e Vigilância (CNS) . . . . .	69
7.2	Compartilhamento de dados e informações . . . . .	71
7.3	Automatização e uso de IA . . . . .	72
7.4	Observações Adicionais . . . . .	74
<b>8</b>	<b>Casos de Uso e Cenários Operacionais</b>	<b>76</b>
8.1	Operações urbanas (UAM) e regionais (RAM) . . . . .	78
8.2	Transporte de passageiros ou carga . . . . .	79
8.3	Voos programados e <i>on-demand</i> . . . . .	80
8.4	Voo tripulado, não tripulado e autônomo . . . . .	81
8.5	Cenários de operação nominal e off-nominal . . . . .	82
8.6	Estágios de evolução/maturidade . . . . .	84
8.7	Observações adicionais . . . . .	85





<b>9</b>	<b>Desempenho Operacional</b>	<b>87</b>
9.1	Segurança . . . . .	89
9.2	Eficiência . . . . .	91
9.3	Capacidade . . . . .	93
9.4	Sustentabilidade social e ambiental . . . . .	96
9.5	Equidade . . . . .	98
<b>10</b>	<b>Principais Contribuições e Lições Aprendidas</b>	<b>102</b>
<b>11</b>	<b>Desafios, Limitações e Pontos em Aberto</b>	<b>106</b>
<b>12</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>108</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>114</b>





## Lista de Siglas

**4DT** *Four-Dimensional Trajectory*

**5G** Quinta Geração de Telecomunicações Móveis

**6G** Sexta Geração de Telecomunicações Móveis

**AAM** *Advanced Air Mobility*

**AATMSP** *AAM Air Traffic Management Service Provider*

**ACAS** *Airborne Collision Avoidance System*

**ADS-B** *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*

**AFO** *Automated Flight Operations*

**AFR** *Automated Flight Rules*

**AGL** *Above Ground Level*

**AIRAC** *Aeronautical Information Regulation And Control*

**AMC-GM** *Acceptable Means of Compliance - Guidance Material*

**AMU-LED** *Air Mobility Urban - Large Experimental Demonstrations*

**ANAC** Agência Nacional de Aviação Civil

**ANS** *Air Navigation Services*

**ANSP** *Air Navigation Service Provider*

**ASTM** *American Society for Testing and Materials*

**ATC** *Air Traffic Control*

**ATFM** *Air Traffic Flow Management*

**ATM** *Air Traffic Management*

**ATS** *Air Traffic Services*





**BUBBLES** *Defining the Building Basic Blocks for a U-Space Separation Management Service*

**BVLOS** *Beyond Visual Line of Sight*

**C2** *Command and Control*

**CAA** *Civil Aviation Authority*

**CFM** *Cooperative Flow Management*

**CFR** *Code of Federal Regulations*

**CIS** *Common Information Service*

**CISP** *Common Information Service Provider*

**CNS** *Communication, Navigation and Surveillance*

**ConOps** *Concept of Operations*

**COP** *Cooperative Operating Practice*

**CORUS-XUAM** *Concept of Operations for European U-space Services - Extension for Urban Air Mobility*

**DAA** *Detect and Avoid*

**DAR** *Dynamic Airspace Reconfiguration*

**DCB** *Demand-Capacity Balancing*

**DECEA** *Departamento de Controle do Espaço Aéreo*

**DFR** *Digital Flight Rules*

**DGNSS** *Differential GNSS*

**DSS** *Discovery and Synchronisation Service*

**EC** *European Commission*

**ECO-UAM** *Ecosystema UAM*

**EmbraerX** *Embraer Business Innovation Center*

**EMT** *Emergency Medical Transport*

**ETA** *Estimated Time of Arrival*





**ETM** *Upper Class E Traffic Management*

**Eurocontrol** *European Organisation for the Safety of Air Navigation*

**eVTOL** *electric Vertical Takeoff and Landing vehicle*

**FAA** *Federal Aviation Administration*

**FATO** *Final Approach and Takeoff Area*

**FUA** *Flexible Use of Airspace*

**GAMZ** *Geodetic Altitude Mandatory Zone*

**GBAS** *Ground-Based Augmentation System*

**Geo-Zone** *Geographical Zone*

**GNSS** *Global Navigation Satellite System*

**GPS** *Global Positioning System*

**HAPS** *High Altitude Platform Systems*

**HOTL** *Human-on-the-loop*

**HOVTL** *Human-over-the-loop*

**HWTL** *Human-within-the-loop*

**I28** *Innovate28*

**IA** *Inteligência Artificial*

**IAIAC** *Institute for Aerospace Industry-Academia Collaboration*

**ICAO** *International Civil Aviation Organization*

**ICARUS** *Integrated Common Altitude Reference system for U-space*

**IFR** *Instrument Flight Rules*

**IM** *Interval Management*

**IMC** *Instrument Meteorological Conditions*

**INS** *Inertial Navigation System*

**ITA** *Instituto Tecnológico de Aeronáutica*





**JCAB** *Japan Civil Aviation Bureau*

**K-UAM** *Korean Urban Air Mobility*

**KOCA** *Korea Office of Civil Aviation*

**KPA** *Key Performance Area*

**KPI** *Key Performance Indicator*

**LOA** *Letter of Agreement*

**ML** *Machine Learning*

**MOLIT** *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*

**MVS** *Multi-Vehicle Supervisor*

**NAS** *National Airspace System*

**NASA** *National Aeronautics and Space Administration*

**NMAC** *Near Mid-Air Collision*

**ODM** *On Demand Mobility*

**PBN** *Performance-Based Navigation*

**PCA** *Plano do Comando da Aeronáutica*

**PIC** *Pilot in Command*

**PKI** *Public Key Infrastructure*

**PSU** *Provider of Services for UAM*

**RAM** *Regional Air Mobility*

**REA** *Rota Especial de Aeronave em Voo Visual*

**REH** *Rota Especial de Helicópteros*

**RNP** *Required Navigation Performance*

**RPIC** *Remote Pilot in Command*

**RTA** *Required Time of Arrival*





- RTCA** *Radio Technical Commission for Aeronautics*
- SAC** *Secretaria de Aviação Civil*
- SAE** *Society of Automotive Engineers*
- SAR** *Superintendência de Aeronavegabilidade*
- SARPs** *Standards and Recommended Practices*
- SBAS** *Satellite-Based Augmentation System*
- SDSP** *Supplemental Data Service Provider*
- SERA** *Standardised European Rules of the Air*
- SESAR** *Single European Sky ATM Research Programme*
- SFAR** *Special Federal Aviation Regulation*
- SGID** *Sistema de Gestão de Indicadores de Desempenho*
- SISCEAB** *Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro*
- SMS** *Safety Management System*
- SWIM** *System-Wide Information Management*
- TBO** *Trajectory-Based Operations*
- TED** *Termo de Execução Descentralizada*
- TLS** *Target Levels of Safety*
- TMA** *Terminal Maneuvering Area*
- TSP** *Third-Party Service Provider*
- U-plan** *Plano de Voo U-space*
- U-space** *Sistema Europeu de Gestão de Tráfego para Sistemas Aéreos Não Tripulados*
- UAM** *Urban Air Mobility*
- UAS** *Unmanned Aircraft System*
- UASA** *UATM Service Area*
- UATM** *Urban Air Traffic Management*





**UATMSP** *UAM Air Traffic Management Service Provider*

**UFR** *U-space Flight Rules*

**UK** *United Kingdom*

**UML** *UAM Maturity Level*

**US** *United States*

**USS** *UAS Service Supplier*

**USSP** *U-space Service Provider*

**UTM** *Unmanned Aircraft System Traffic Management*

**V2I** *Vehicle-to-Infrastructure*

**V2V** *Vehicle-to-Vehicle*

**VFR** *Visual Flight Rules*

**VHF** *Very High Frequency*

**VM** *Vertiport Manager*

**VMC** *Visual Meteorological Conditions*

**VoIP** *Voice over Internet Protocol*

**VP** *Vertiport*

**WGS84** *World Geodetic System 1984*

**xTM** *Extensible Traffic Management*





## Lista de Figuras

3.1	Estrutura do espaço aéreo brasileiro incluindo UAM e <i>Unmanned Aircraft System Traffic Management</i> (UTM). Fonte: DECEA (2024). . . . .	24
3.2	Cenário de espaço aéreo europeu com predominância de Sistema Europeu de Gestão de Tráfego para Sistemas Aéreos Não Tripulados (U-space) (volume laranja). Fonte: Eurocontrol (2023). . . . .	25
3.3	Concepção dos corredores UAM no <i>Korean Urban Air Mobility</i> (K-UAM). Fonte: UAM Team Korea (2021). . . . .	26
3.4	Exemplo de estratégia de posicionamento de keyhole. Fonte: Boeing (2023). . . . .	31
3.5	Corredor UAM em espaço aéreo controlado. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020). . . . .	32
4.1	Limites de desvios para duas trajetórias não-conflitantes em U-space. Fonte: Eurocontrol (2023). . . . .	37
4.2	Gestão de conflitos de tráfego no ambiente UAM. Fonte: DECEA (2024). . . . .	39
4.3	Time-based metering como ferramenta de separação tática. Fonte: Boeing (2023). . . . .	40
4.4	Aplicação de <i>Digital Flight</i> para produzir comportamentos auto-organizados. Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	41
4.5	Sistema de prevenção e resolução de conflitos no modo Digital Flight (DFR). Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	42
4.6	Processo representativo para auto-separação cooperativa em <i>Digital Flight</i> . Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	44
5.1	Monitoramento de conformidade de trajetória no volume de espaço aéreo UAM. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020) . . . . .	49





5.2	Práticas cooperativas no modo <i>Digital Flight</i> (DFR). Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	52
6.1	Limiares de conflito tático no conceito U-space. Fonte: Adaptado de Eurocontrol (2023). . . . .	58
6.2	Separação adaptativa baseada em performance de navegação compartilhada. Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	59
6.3	Critérios de separação variáveis baseados em performance de navegação compartilhada. Fonte: Wing et al. (2022). . . . .	60
7.1	Sistemas de comunicação necessários para AAM. Fonte: Incheon Metropolitan City (2023). . . . .	69
8.1	Casos de uso típicos para UAM. Fonte: ANAC (2023). . . . .	76
8.2	Exemplo de concepção de uso inicial de rota de helicóptero para operações UAM em <i>Han River Helicopter Corridor</i> . Fonte: UAM Team Korea (2021). . . . .	79
8.3	Rota de desvio em cenário off-nominal. Fonte: Boeing (2023). . . . .	83
8.4	Horizontes da evolução de <i>Urban Air Traffic Management</i> (UATM) segundo a <i>Embraer Business Innovation Center</i> (EmbraerX). Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020). . . . .	85
9.1	KPAs da ICAO. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020). . . . .	89





## Lista de Tabelas

2.1	Documentos revisados sobre AAM/UAM. . . . .	17
2.2	Resumo dos documentos agrupados por enfoque . . . . .	22





## 1 Contextualização

No âmbito do TED firmado entre a SAC e o ITA, foi instituído o programa SIGMA (Soluções para a Integração e Gestão da Mobilidade Aérea), no qual se insere a Etapa 7 da Meta 2, denominada SIGMA-Sky.

O Projeto SIGMA-Sky compreende o estudo de novos conceitos operacionais de gestão do tráfego aéreo para a integração segura, eficiente e escalável de operações emergentes de mobilidade aérea avançada no espaço aéreo urbano. Especificamente, o projeto visa a mapear novas abordagens de desenho do espaço aéreo, regras e serviços de gestão do tráfego aéreo e avaliar seus impactos no desempenho operacional por meio de simulação computacional, de modo a gerar recomendações para o desenvolvimento sustentável do ecossistema de Mobilidade Aérea Avançada/ Urbana (AAM/UAM) no Brasil.

Este documento constitui o Produto 1 do Projeto SIGMA-Sky, compreendendo um levantamento do estado da arte no que tange à gestão do tráfego aéreo para AAM/UAM, conforme previsto na Atividade A1. A elaboração deste relatório seguiu uma metodologia sistemática de revisão de literatura, abrangendo 15 documentos estratégicos publicados por autoridades aeronáuticas, agências reguladoras, consórcios de pesquisa e indústria entre 2020 e 2024. Entre eles, incluem-se *Concept of Operations* (ConOps), regulamentos e relatórios técnicos de entidades como *Federal Aviation Administration* (FAA), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), *European Organisation for the Safety of Air Navigation* (Eurocontrol), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), Boeing, EmbraerX e autoridades de aviação civil do Japão, do Reino Unido e da Coreia do Sul.

A análise está organizada em sete eixos temáticos principais:

- Gestão do Espaço Aéreo
- Gestão do Tráfego Aéreo
- Governança
- Regras e Regulamentos
- Tecnologias de Suporte





- Casos de Uso e Cenários Operacionais
- Desempenho Operacional

Cada eixo foi minuciosamente investigado, com comparações entre as abordagens adotadas por diferentes regiões e organizações, destacando convergências, divergências e tendências emergentes.

Este relatório não apenas consolida o estado da arte em AAM/UAM, mas também serve como base fundamentadora para as próximas etapas do projeto SIGMA-Sky, que incluirão a proposição de cenários operacionais e o desenvolvimento de metodologia para simulação de operações aéreas urbanas.

É importante destacar que as terminologias UAM e AAM são utilizadas de modo intercambiável ao longo do documento, a depender da fonte consultada. O foco principal da análise, no entanto, está nas operações de transporte de passageiros/carga em espaço aéreo urbano, utilizando novas aeronaves como eVTOLs. O escopo não abrange, portanto, a gestão de operações de sistemas aéreos não tripulados de pequeno porte (drones) em baixa altitude, tipicamente abaixo de 400 ft, abarcadas pelo *framework* UTM.

Ressalta-se que o conteúdo aqui apresentado é estritamente baseado nos documentos analisados, sem incorporar opiniões ou informações externas, assegurando, assim, um levantamento imparcial e factualmente embasado.





## 2 Abordagem Metodológica

O levantamento do estado da arte previsto na Atividade A1 seguiu uma metodologia sistemática de revisão de literatura baseada nas seguintes etapas:

- Identificação e seleção de documentos técnico-científicos relevantes;
- Leitura e elaboração de resumo dos documentos relevantes, sintetizando os principais achados por tema (gestão do espaço aéreo; gestão do tráfego aéreo; regras de operação; tecnologias de suporte etc);
- Comparação de abordagens e identificação de pontos de convergência ou divergência e das principais tendências;
- Elaboração do relatório consolidando as informações.

A análise buscou abranger os principais atores nacionais/internacionais no cenário da aviação, bem como diferentes regiões geográficas, a fim de garantir uma visão abrangente e representativa das tendências globais e regionais. Para isso, foram selecionados 15 documentos estratégicos, publicados entre 2020 e 2024, que se destacam pela sua relevância e autoridade no setor. Esses documentos incluem publicações de autoridades aeronáuticas, agências reguladoras, consórcios de pesquisa e indústria, cobrindo aspectos-chave da AAM/UAM, regulamentação do espaço aéreo, novas tecnologias e modelos operacionais.

### 2.1 Descrição dos Documentos Analisados

Na Tabela 2.1, são apresentados os trabalhos analisados em ordem decrescente de data de publicação.





Tabela 2.1: Documentos revisados sobre AAM/UAM.

<b>Título</b>	<b>Autor(es) / Organizações</b>	<b>Ano</b>	<b>Fontes / Links</b>	<b>Tipo</b>
Plano do Comando da Aeronáutica (PCA) 351-7 - Concepção Operacional UAM Nacional (DECEA, 2024)	DECEA	2024	Link	ConOps
ConOps for AAM (JCAB, 2024)	<i>Public-Private Committee for Advanced Air Mobility (Japão)</i>	2024	Link	ConOps
AAM ConOps for Incheon Metropolitan City (Incheon Metropolitan City, 2023)	MITRE e <i>Institute for Aerospace Industry-Academia Collaboration (IAIAC)</i> , em consulta com a Cidade de Incheon (Coreia do Sul)	2023	Link	ConOps
<i>U-space ConOps and Architecture (edition 4)</i> (Eurocontrol, 2023)	<i>Concept of Operations for European U-space Services - Extension for Urban Air Mobility (CORUS-XUAM) consortium, Single European Sky ATM Research Programme (SESAR) Joint Undertaking, Eurocontrol</i>	2023	Link	ConOps





<b>Títulos completos</b>	<b>Autor(es)/ Organizações</b>	<b>Anos de publi- cação</b>	<b>Fontes/ Links</b>	<b>Tipos de documentos</b>
UAM ConOps <i>Version 2.0</i> (FAA, 2023b)	<i>United States (US) Department of Transportation, FAA</i>	2023	Link	ConOps
AAM - Panorama e Perspectivas (ANAC, 2023)	ANAC - Superintendência de Aeronavegabi- lidade (SAR)	2023	Link	Relatório técnico
<i>AAM Implementation Plan (FAA, 2023a). Near-term (Innovate28) Focus with an Eye on the Future of AAM. Version 1.0</i>	FAA	2023	Link	Relatório técnico
<i>ConOps for Uncrewed UAM v2.0 (Boeing, 2023)</i>	SkyGrid, Wisk, Aurora	2023	Link	ConOps
<i>Digital Flight: A New Cooperative Operating Mode to Complement VFR and IFR (WING et al., 2022)</i>	NASA	2022	Link	Relatório técnico
<i>CAP2272: Key Considerations for Airspace Integration within an Urban Air Mobility Landscape (CAA, 2021)</i>	<i>United Kingdom (UK) Civil Aviation Authority (CAA) Innovation Hub</i>	2021	Link	Relatório técnico
<i>Commission Implementing Regulation (EU) 2021/664 (European Commission, 2021a)</i>	<i>European Commission (EC)</i>	2021	Link	Regulatório





<b>Títulos completos</b>	<b>Autor(es)/ Organizações</b>	<b>Anos de publi- cação</b>	<b>Fontes/ Links</b>	<b>Tipos de documentos</b>
<i>European Commission Implementing Regulation 2021/665 (European Commission, 2021b)</i>	EC	2021	Link	Regulatório
<i>European Commission Implementing Regulation 2021/666 (European Commission, 2021c)</i>	EC	2021	Link	Regulatório
<i>K-UAM Operation Concept (ConOps) 1.0 (UAM Team Korea, 2021)</i>	<i>UAM Team Korea, Ministry of Land, Infrastructure and Transport</i>	2021	Link	ConOps
<i>UATM CONOPS VERSION 1 (EmbraerX and Airservices Australia, 2020)</i>	<i>Airservices Australia and EmbraerX</i>	2020	Link	ConOps

O propósito principal de todos os documentos analisados converge no objetivo de estabelecer as bases conceituais, operacionais, estratégicas ou regulatórias para a integração segura e eficiente da AAM e/ou de seu subconjunto, a UAM, no espaço aéreo existente. Contudo, a natureza, o âmbito geográfico e o nível de formalidade, se é um regulamento obrigatório ou um conceito de discussão, diferem significativamente entre eles.

Os documentos regulatórios da União Europeia, *European Commission Implementing Regulations 2021/664, 2021/665 e 2021/666* (European Commission, 2021a; European Commission, 2021b; European Commission, 2021c), distinguem-se por serem os únicos a ter um propósito explicitamente regulatório e obrigatório. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a), por exemplo, estabelece regras e procedimentos para as operações seguras de *Unmanned Aircraft System (UAS)* no espaço aéreo U-space, visando a integração segura de UAS no sistema de aviação e a prestação de serviços U-space. Já o *Regulamento Europeu 2021/665* (European Commission, 2021b) introduz requisitos específicos para os prestadores de serviços de





gestão de tráfego aéreo (*Air Traffic Management (ATM)/Air Navigation Services (ANS)*) em espaço aéreo U-space controlado, visando garantir a segurança das operações em que aeronaves tripuladas e não tripuladas operam em conjunto. O *Regulamento Europeu 2021/666* (European Commission, 2021c) complementa, alterando regras para exigir que aeronaves tripuladas que operam em espaço aéreo U-space se tornem eletronicamente conspícuas para os provedores de serviços U-space, melhorando a consciência situacional.

Em contraste, os demais documentos são ConOps, planos de implementação ou relatórios técnicos, cujo propósito principal é estabelecer uma visão ou um *blueprint* para futuras ações regulatórias e implementações práticas. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) tem como foco principal apresentar um plano abrangente para a integração segura e progressiva da AAM no *National Airspace System (NAS)* dos EUA, com ênfase no trabalho necessário para permitir as operações iniciais em locais-chave até 2028 (Iniciativa Innovate28). Já o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) expande a concepção deste plano para um horizonte mais distante, sugerindo uma implementação gradual e contínua da UAM no NAS dos EUA. De forma semelhante, o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) visa estabelecer a concepção operacional para a integração da UAM no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), servindo de base para futuros projetos de implementação. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023), por sua vez, tem um foco mais institucional e estratégico, com o objetivo de registrar o contexto do setor AAM em 2023 e propor diretrizes para estruturar as ações de certificação, coordenação e comunicação da própria ANAC para o desenvolvimento orgânico das funções relativas à AAM no Brasil.

A maioria dos ConOps visa fornecer um quadro de referência comum para discussões e tomadas de decisão entre governo, indústria e outras partes interessadas. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), por exemplo, é concebido como um manual de referência para explicar o funcionamento do U-space, espaço aéreo dedicado ao tráfego UAM e UAS, e comunicar suas características a todas as partes interessadas, incorporando a evolução regulatória da União Europeia e os resultados de projetos de pesquisa e desenvolvimento. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) tem o propósito de ser globalmente aplicável, informando discussões internacionais sobre UATM e propondo um conceito operacional que demonstre como as operações iniciais poderiam ser realizadas com segurança usando as capacidades existentes de ATM, com potencial para ampliação futura.

Alguns documentos concentram-se em objetivos conceituais e tecnológicos mais disruptivos. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), por exemplo,





tem o propósito único de propor a criação do novo modo operacional *Digital Flight* e suas *Digital Flight Rules* (DFR), com o objetivo de complementar o *Visual Flight Rules* (VFR) e o *Instrument Flight Rules* (IFR) e servir como uma base técnica para deliberação da comunidade de aviação sobre esta terceira modalidade operacional comum. Por sua vez, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) concentra-se em fornecer um *blueprint* potencial para operações globais de UAM não tripuladas e altamente automatizadas, com o objetivo de facilitar o engajamento da indústria e o consenso sobre a viabilidade de tais operações.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) visa estabelecer um quadro de referência conceitual e operacional para a implantação segura e evolutiva dos serviços de UAM na Coreia do Sul, com foco na fase inicial de comercialização a partir de 2025, atuando como um plano mestre para alinhar os esforços público-privados. Similarmente, o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) visa apresentar o seu conceito nacional de operações para AAM, fornecendo informações sobre planejamento, procedimentos e requisitos para implantação, incluindo integração e segurança.

De forma mais localizada, o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) serve como um plano estratégico e roteiro para a introdução e integração da AAM na cidade com o objetivo de melhorar a conectividade, acessibilidade e sustentabilidade para os residentes. Já o *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021), resultado de um *Regulatory Sandbox*, tem como propósito compartilhar considerações-chave para a integração de UAM no espaço aéreo do Reino Unido, apoiando inovadores e ajudando a CAA a moldar futuras regulamentações, fomentando um processo de aprendizado iterativo.

Em resumo, a maioria dos documentos (ConOps e Planos) tem uma finalidade propositiva e orientativa, buscando descrever uma visão, requisitos e uma trajetória evolutiva (como o DECEA, com seus Níveis de Maturação UAM – *UAM Maturity Level* (UML), ou a FAA, com seu *AAM Evolution Framework*) para a integração da AAM/UAM, enquanto os documentos regulatórios da União Europeia - *Regulations 2021/664, 665, 666* - têm um propósito formal de estabelecer as regras obrigatórias e os requisitos para o funcionamento do espaço aéreo U-space. A Tabela 2.2 apresenta uma síntese dessas informações.

## 2.2 Diferenças de Terminologia: AAM e UAM

Com base na análise dos documentos, verifica-se que a AAM e a UAM são conceitos relacionados, porém distintos em seu escopo. A AAM é entendida como um conceito





Tabela 2.2: Resumo dos documentos agrupados por enfoque

<b>Enfoque</b>	<b>Propósito</b>	<b>Documentos</b>
Visão Operacional e Estratégica (ConOps)	Estabelecer um quadro conceitual e uma visão de evolução para a integração segura e escalável da AAM/UAM em um espaço aéreo específico.	PCA 351-7 (DECEA), Japan AAM ConOps, Uncrewed UAM ConOps v2.0 (Boeing), K-UAM ConOps (Coreia), UATM ConOps (Australia/Embraer), U-space ConOps Ed. 4 (CORUS-XUAM), FAA UAM ConOps v2.0 (EUA), Incheon AAM ConOps (Coreia).
Regulamentação e Conformidade	Estabelecer regras, requisitos e processos de certificação para operadores, serviços e espaço aéreo (U-space).	<i>European Commission Implementing Regulations 2021/664, 665 e 666</i>
Direcionamento Institucional/Regulatório	Definir ações internas ou externas para agências reguladoras (e.g., certificação de aeronaves ou preparação do setor).	ANAC Panorama AAM, AAM <i>Innovate28 (I28) Implementation Plan (FAA)</i> , <i>UK CAA CAP2272</i> (implicitamente, guiar a discussão regulatória).
Conceitos Fundamentais/Pesquisa	Propor novos modos de operação ou conceitos que sirvam como base para discussão e implementação futura, complementando os modelos existentes.	<i>NASA Technical Memorandum: Digital Flight Rules (DFR)</i>





mais amplo, que abrange uma variedade de operações aéreas avançadas. Conforme destacado no *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), a AAM é definida como um sistema de transporte que move pessoas e carga por via aérea entre dois pontos utilizando aeronaves com tecnologias avançadas, incluindo *electric Vertical Takeoff and Landing vehicles* (eVTOLs), tanto em espaço aéreo controlado quanto não controlado, enquanto a UAM é especificamente um subconjunto focado no contexto urbano. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) corrobora esta visão, definindo a UAM explicitamente como um subconjunto da AAM, focando especificamente em operações em baixa altitude dentro de ambientes urbanos.

Esta distinção é reiterada no *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), que estabelece que a AAM inclui conceitos como táxis aéreos urbanos, entrega autônoma de carga regional, operações de UAS *Beyond Visual Line of Sight* (BVLOS) e voos não tripulados de *High Altitude Platform Systems* (HAPS). A UAM, por sua vez, é apresentada como um subconjunto da AAM, focada especificamente em operações urbanas a vários milhares de pés de altitude. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) também nota que, embora algumas organizações utilizem os termos AAM e UAM de forma intercambiável para se referir a operações de mobilidade em espaço aéreo de baixa altitude, o termo UAM é predominantemente utilizado no contexto urbano.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) não faz uma distinção explícita entre AAM e UAM, centrando sua abordagem no contexto urbano (UAM) e não utilizando o termo AAM. Por outro lado, o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) faz uma distinção operacional adicional, afirmando que as operações de UAM ocorrem em ambientes urbanos para baixa altitude e distâncias pequenas, enquanto as operações de *Regional Air Mobility* (RAM), também parte do ecossistema da AAM, voam por distâncias maiores. Esta segmentação por tipo de operação e altitude dentro do conceito mais amplo da AAM reforça a noção de que a UAM é uma aplicação específica da AAM, concentrada no ambiente urbano.

De acordo com o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024), AAM é um termo abrangente que inclui a utilização de novos tipos de aeronaves em diversos contextos, como UAM, RAM, serviços públicos, entrega de cargas e uso privado, recreativo ou militar, englobando também a integração com o ambiente de UTM. Já a UAM é um subconjunto da AAM, focada especificamente em operações de transporte de passageiros ou carga em ambientes urbanos e suburbanos, utilizando aeronaves altamente automatizadas, como os eVTOLs, para viagens de curta distância e baixa altitude.



### 3 Gestão do Espaço Aéreo

Os documentos analisados propõem diferentes abordagens para a estruturação, segmentação e alocação do espaço aéreo para a integração das operações de AAM/UAM. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) propõe uma estrutura flexível e baseada em performance, definindo volumes de espaço aéreo específicos onde o conceito UAM será aplicado, em vez de corredores exclusivos fixos. A alocação considera a otimização do espaço aéreo existente e a circulação IFR tradicional. A Figura 3.1 ilustra a idealização da configuração dos ambientes operacionais de gestão do tráfego aéreo brasileiro, com a inclusão dos ambientes ATM, UAM e UTM, cada um com seus requisitos de performance e capacidade. O documento da ANAC aborda o tema de forma genérica, destacando a gestão do espaço aéreo como um pilar do ecossistema, mas não fornece detalhes sobre a estruturação ou segmentação futura.

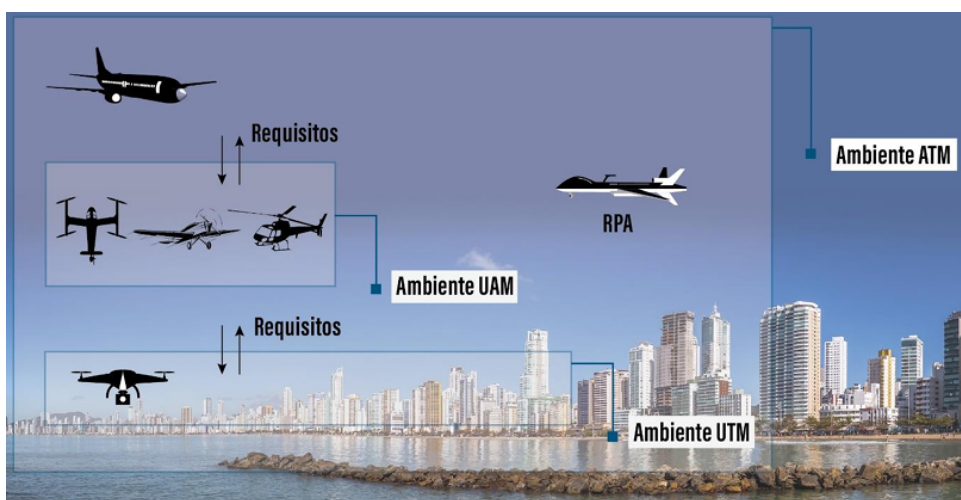


Figura 3.1: Estrutura do espaço aéreo brasileiro incluindo UAM e UTM. Fonte: DECEA (2024).

Em contraste, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) concentra-se nas operações de UAM, que serão conduzidas no espaço aéreo não controlado (Classe G) e controlado (Classes E, D, C e B), utilizando procedimentos de voo por instrumentos publicados e rotas de *Required Navigation Performance* (RNP) específicas. Já o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) estrutura o espaço aéreo com base no conceito de volumes X, Y e Z, conforme a Figura 3.2, que definem os serviços de resolução de conflitos oferecidos em cada tipo de volume, os quais podem ser designados como *U-space airspaces* ou *Geographical Zones*. O documento também contrasta a natureza dinâmica do U-space com as estruturas ATM convencionais, notando que, enquanto



as estruturas “convencionais” de espaço aéreo são alteradas com base em *Aeronautical Information Regulation And Control* (AIRAC), a regulamentação U-space permite reconfigurações e restrições dinâmicas do espaço aéreo com avisos de minutos através dos serviços de *Geo-awareness*.

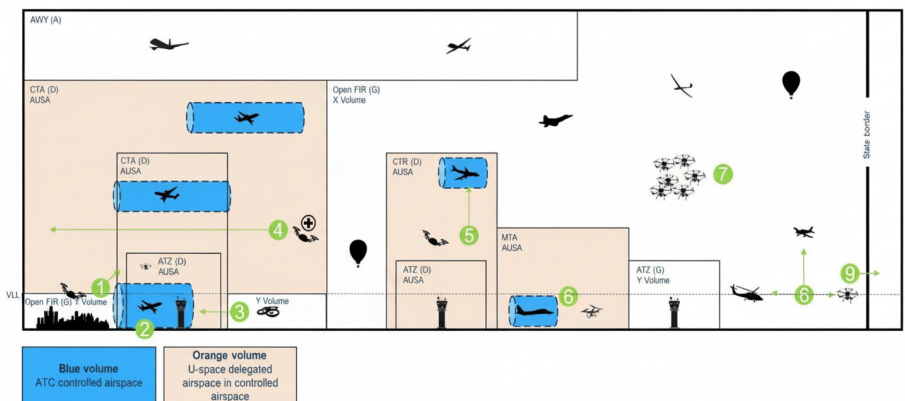


Figura 3.2: Cenário de espaço aéreo europeu com predominância de U-space (volume laranja). Fonte: Eurocontrol (2023).

A FAA, no seu ConOps (FAA, 2023b), descreve um ambiente operacional futuro que incorpora um ambiente cooperativo complementar de *Extensible Traffic Management* (xTM). Um elemento central dessa estrutura são os Corredores UAM, definidos como um tipo específico de Área Cooperativa, ou seja, um volume de espaço aéreo no qual as operações são gerenciadas de forma cooperativa. Estes corredores podem transitar por todas as classes de espaço aéreo. No entanto, o *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) não prevê a criação de corredores aéreos dedicados até 2028 para a fase inicial (Innovate28), utilizando, em vez disso, rotas cartografadas existentes ou modificadas, publicadas para operação sob VFR.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) introduz o conceito central de *UATM Service Area* (UASA), áreas de espaço aéreo definidas de forma flexível pela autoridade com base na densidade e frequência das operações. Adicionalmente, define “*Vertiport Airspace*” e estabelece a existência de Rotas UAM e, para operações densas, Corredores UAM como espaços aéreos dedicados.

Por sua vez, o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) estabelece a gestão do espaço aéreo através de um conceito central e evolutivo: a utilização de corredores aéreos dedicados (*UAM Corridors*), definidos como um volume de espaço aéreo de operação exclusiva, delineando um segmento de rota tridimensional. A arquitetura desses corredores é planejada considerando uma camada de altitude específica, conforme ilustrado na figura 3.3.

Finalmente, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe uma



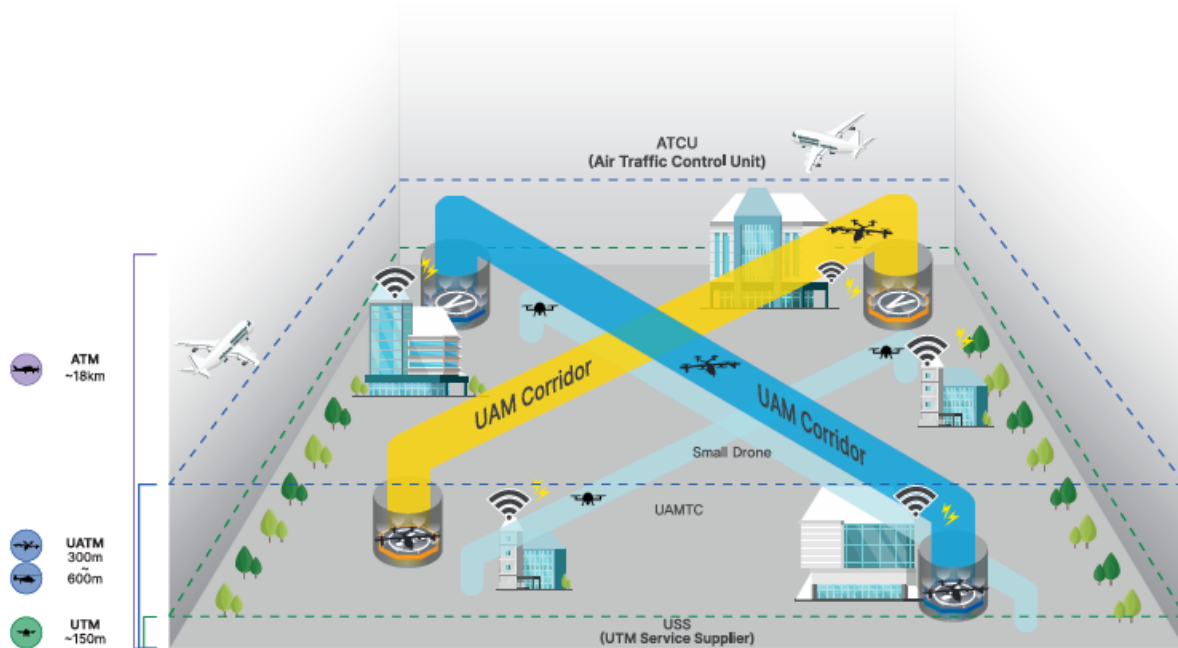


Figura 3.3: Concepção dos corredores UAM no K-UAM. Fonte: UAM Team Korea (2021).

estruturação fundamentalmente concebida em torno do princípio de integração, promovendo flexibilidade operacional através do modo DFR, que permite que as aeronaves operem dinamicamente sem estarem restritas a estruturas de rotas específicas, embora possa obrigar o respeito a corredores de chegada e partida de aeroportos maiores.

### 3.1 Corredores aéreos

Verifica-se que a definição e o papel dos corredores aéreos para operações AAM/UAM variam significativamente entre as diferentes propostas. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) introduz o conceito de corredores aéreos dinâmicos como parte do estado maduro das operações UAM, referidos como “*Dynamic Automated Flight Operations (AFO) Corridors*” que operariam com RNP 0.1. No estado intermediário, a operação ocorre principalmente em “*UAM RNP Routes*”, e o documento menciona que algumas áreas terminais podem se beneficiar de estruturas de corredores UAM ponto a ponto.

Em contraste, o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) adota uma abordagem distinta, afirmando que a concepção não prevê a criação de corredores aéreos exclusivos como solução primária, por serem considerados menos eficientes em espaços congestionados. Entretanto, admite que, dentro do volume UAM, podem haver rotas exclusivas para *electric Vertical Takeoff and Landing vehicle* (eVTOL) dependendo da existência



de outros usuários. O documento também cita a possibilidade de aproveitar rotas já existentes, como Rota Especial de Aeronave em Voo Visual (REA) e Rota Especial de Helicópteros (REH), para a integração UAM. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) menciona os corredores aéreos como uma estrutura possível para operações de transporte entre cidades ou em áreas de maior demanda, vistos como uma forma de organizar o tráfego e segregar operações de diferentes desempenhos.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) define corredores aéreos como um elemento central, descrevendo-os como um tipo específico de Área Cooperativa (CA), que é um volume de espaço aéreo dentro do qual podem ocorrer operações gerenciadas cooperativamente. Um Corredor UAM é composto por um volume de espaço aéreo que define uma rota tridimensional, possivelmente dividida em múltiplos segmentos, com requisitos de desempenho associados. De forma semelhante, o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) distingue entre Rotas UAM, que não restringem o acesso a outros usuários, e Corredores UAM, definidos como espaços aéreos dedicados onde o acesso é restrito àqueles que atendem aos requisitos específicos, estabelecidos quando as operações são particularmente densas.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) define explicitamente “UAM Corridors” como um volume de espaço aéreo de operação exclusiva, delineando um segmento de rota tridimensional destinado especificamente a garantir operações seguras de UAM. Já o *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), para a fase inicial, é claro ao afirmar que não se prevê a criação de corredores aéreos dedicados ou estruturas de espaço aéreo únicas para operações de AAM até 2028. Por fim, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) não utiliza explicitamente o termo “corredores aéreos” no contexto de estruturas físicas fixas, promovendo a flexibilidade operacional, mas refere que as aeronaves poderão ser obrigadas a respeitar corredores de chegada e partida de aeroportos maiores através de *geofencing*.

### 3.2 Estrutura em camadas

Uma outra abordagem de gestão do espaço aéreo identificada nos documentos analisados é a estrutura em camadas baseada em altitude ou tipo de operação. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) estabelece que a altitude de operação da UAM será acima do ambiente UTM (que opera até 400 ft AGL), havendo uma interseção entre eles. Este documento defende que não será estabelecida uma altitude mínima ou máxima padronizada para todo o país, sendo os limites definidos de forma flexível: a mínima como o volume acima do espaço aéreo UTM (se houver) e a máxima definida pelas trajetórias da circulação aérea IFR tradicional. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023)





não descreve uma estrutura rígida, mas menciona que as operações UAM normalmente envolvem segmentos de cruzeiro entre 1.200 e 4.000 pés acima do nível do solo (AGL).

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) aborda a estrutura em camadas indiretamente, esperando que a maioria das operações de drones ocorra abaixo de 500 pés *Above Ground Level* (AGL), enquanto operações entre cidades podem exigir corredores em altitudes mais elevadas. Por outro lado, menciona que o projeto *Air Mobility Urban - Large Experimental Demonstrations* (AMU-LED) propõe uma estrutura com duas camadas com diferentes níveis de desempenho, permitindo que operações de maior risco ocorram em altitudes superiores com requisitos mais rigorosos.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) não define uma estrutura rígida em camadas baseada apenas na altitude, fazendo a segmentação principalmente pelo tipo de operação e densidade de tráfego. No entanto, estabelece uma distinção operacional crucial: as operações de UAM (urbanas) ocorrem em baixa altitude, enquanto as operações de RAM (regionais) voam em altitudes mais altas.

A FAA, no seu *Implementation Plan* (FAA, 2023a), espera que as operações de AAM ocorram predominantemente em ou ao redor do espaço aéreo de Classe B e C, da superfície até 4.000 pés AGL, em áreas urbanas e metropolitanas. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) aborda a estrutura em camadas em termos de altitude e tipo de operação através dos diferentes conceitos de gestão de tráfego propostos pela FAA: UTM (abaixo de 400 pés), UAM (a vários milhares de pés) e *Upper Class E Traffic Management* (ETM) (acima dos 60.000 pés). Por fim, o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) estabelece que as operações de veículos UAM ocorrerão predominantemente abaixo de 1.500 pés AGL, enquanto a maioria das operações de UAS ocorre abaixo de 400 pés AGL, notando que os veículos UAM operarão no mesmo espaço aéreo que os UAS em torno de locais de vertiporto.

### 3.3 Classificação do espaço aéreo e requisitos de utilização

Verifica-se que a classificação do espaço aéreo e os requisitos de utilização para operações AAM/UAM são abordados de forma variada. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) reconhece que as classificações atuais podem não contemplar os requisitos técnicos da UAM, podendo ser necessária uma nova classificação de espaço aéreo. Inicialmente, as operações ocorrerão no espaço aéreo Classe D, sendo proposta uma “Nova Classificação” para níveis mais maduros (UML-4). O acesso aos volumes UAM





estará condicionado ao cumprimento de requisitos de capacidade e performance previamente estabelecidos para cada volume.

Já o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) estabelece que as operações UAM serão conduzidas no espaço aéreo não controlado (Classe G) e controlado (Classes E, D, C e B), utilizando IFR e exigindo autorizações do *Air Traffic Control* (ATC). O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) explica que a classificação do espaço aéreo segue tanto as classes da *International Civil Aviation Organization* (ICAO) (A–G) quanto as designações de *U-space*, sendo os espaços aéreos de *U-space* efetivamente tratados como *Restricted Areas* nos termos da ICAO, com condições específicas para operações de aeronaves tripuladas e não tripuladas.

No *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), o espaço aéreo é estruturado e segmentado com base no conceito de volumes X, Y e Z, que definem os serviços de resolução de conflitos oferecidos em cada tipo de volume. Nos volumes X, não há serviço de resolução de conflitos; nos Y, há resolução estratégica (pré-voos); e nos Z, há resolução estratégica e tática (em voos). Esses volumes podem ser designados como *U-space airspaces* ou *Geographical Zones* (Geo-Zones) conforme a regulamentação europeia, com requisitos diferentes de operação em cada um deles. Os volumes X são exclusivamente Geo-Zones e os volumes Y e Z podem ser U-spaces ou Geo-Zones. O volume Z é ainda subdividido em Za, com gerenciamento do tráfego pelo ATC; Zu, com resolução de conflitos táticos pelo U-space; e Zz, em que o U-space fornecerá um serviço de aconselhamento para a resolução tática de conflitos. O volume Za poderá existir em aeroportos.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) afirma que as operações iniciais de AAM ocorrerão sob VFR, integrando-se ao ambiente ATM existente, sendo previstas operações sob *Instrument Meteorological Conditions* (IMC) para fases mais maduras. Para operar em *UAM Corridors*, serão necessários requisitos específicos de equipamento e desempenho das aeronaves, além da adesão a procedimentos específicos. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) classifica o espaço aéreo dos corredores como de uso exclusivo e segregado para operações de UAM durante a fase inicial, em que outros usuários, como helicópteros, são obrigados a cumprir integralmente os requisitos de performance operacional desse corredor.

O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), para a fase inicial (*Innovate28*), delinea que a alocação e segmentação do espaço aéreo seguem as classificações existentes, onde as aeronaves AAM devem cumprir com os requisitos de *Communication, Navigation and Surveillance* (CNS) específicos de cada classe de espaço aéreo. Por exemplo, para operar no espaço aéreo de Classe B, é necessária uma





autorização do ATC, rádio bidirecional operacional, equipamento *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) Out, capacidade de navegação adequada e um transponder operável com capacidade de reporte de altitude.

Finalmente, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) preconiza que as operações sob o modo DFR são concebidas para serem permitidas em todas as classes de espaço aéreo (A, B, C, D, E, G). No entanto, propõe uma modificação fundamental nos requisitos de ingresso no espaço aéreo controlado para operações DFR, distinguindo entre uma “autorização específica” (*specific clearance*) emitida por um controlador para ações específicas e uma “aprovação regulatória” (*regulatory approval*) que permite a entrada no espaço aéreo controlado com base no cumprimento dos requisitos regulamentares, mas sem uma autorização de rota e altitude específica, promovendo uma flexibilidade operacional sem precedentes.

### 3.4 Segregação ou integração do espaço aéreo

Com base na análise dos documentos, observa-se que as abordagens relativas ao uso de espaço aéreo segregado ou integrado para operações de AAM/UAM variam significativamente entre os diferentes conceitos operacionais, bem como entre distintas fases de maturidade operacional. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) é explícito ao propor a solução pelo espaço aéreo integrado e compartilhado, considerando que a segregação ou o uso exclusivo de corredores pode ser menos eficiente. A solução encontrada, segundo o documento, é o compartilhamento do espaço aéreo por qualquer tipo de aeronave, desde que sejam atendidos requisitos de performance, permitindo que qualquer aeronave tripulada que cumpra os requisitos ingresse nesses volumes.

De forma similar, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) defende claramente um modelo integrado, afirmando que as operações UAM são concebidas para serem integradas e não em espaço aéreo segregado, utilizando os serviços de separação de tráfego fornecidos pelo ATC no espaço aéreo controlado. No estado maduro, espera-se que a gestão da separação seja automatizada e fornecida por Provedores de Serviços de Terceiros dentro de corredores AFO, coexistindo com os serviços de gerenciamento de tráfego aéreo legado. Nesse contexto, o documento também introduz o conceito de *keyholes* (janelas) no espaço aéreo terminal como um método para omitir o espaço aéreo acima de localizações de vertiportos da autoridade e responsabilidade do controlador da torre, permitindo uma integração mais eficiente, conforme ilustrado na Figura 3.4. A utilização de *keyholes* na *Terminal Maneuvering Area* (TMA) tem como objetivo principal remover a necessidade de prestação de serviços de separação tá-



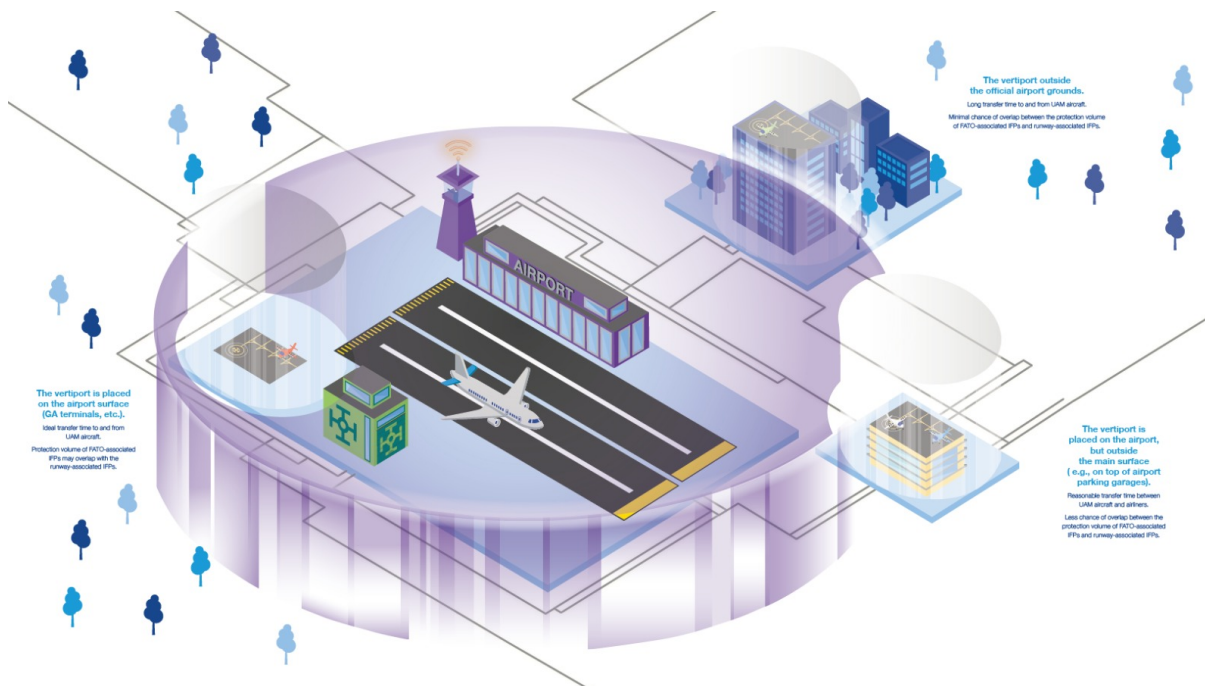


Figura 3.4: Exemplo de estratégia de posicionamento de keyhole. Fonte: Boeing (2023).

tica pelo ATC às aeronaves UAM, assegurando a escalabilidade das operações por meio de automação e requisitos de performance.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) menciona a coexistência de espaço aéreo segregado e integrado, explicando que em espaços aéreos controlados, aeronaves tripuladas e não tripuladas podem operar de forma integrada por meio de serviços colaborativos entre U-space e ATM. Além disso, introduz o conceito de *Dynamic Airspace Reconfiguration* (DAR) que permite que o ATC delegue temporariamente partes do espaço aéreo controlado para gestão por U-space.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) estabelece que, durante os testes, as operações podem ocorrer em espaço aéreo segregado para mitigar riscos. No entanto, após o início das operações, a visão é de espaço aéreo integrado, ao afirmar que “nenhuma categoria de operadores terá uso exclusivo do espaço aéreo, e prevê-se que todas as operações precisarão ser integradas”. Em contraste, o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) adota uma abordagem predominantemente segregada na fase inicial, definindo corredores UAM como um volume de espaço aéreo de operação exclusiva, concebido para ser separado das operações ATM convencionais existentes para minimizar o impacto e a complexidade iniciais.

O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) deixa claro que não é esperada a implementação de espaço aéreo segregado para AAM na fase inicial *Innovate28*,



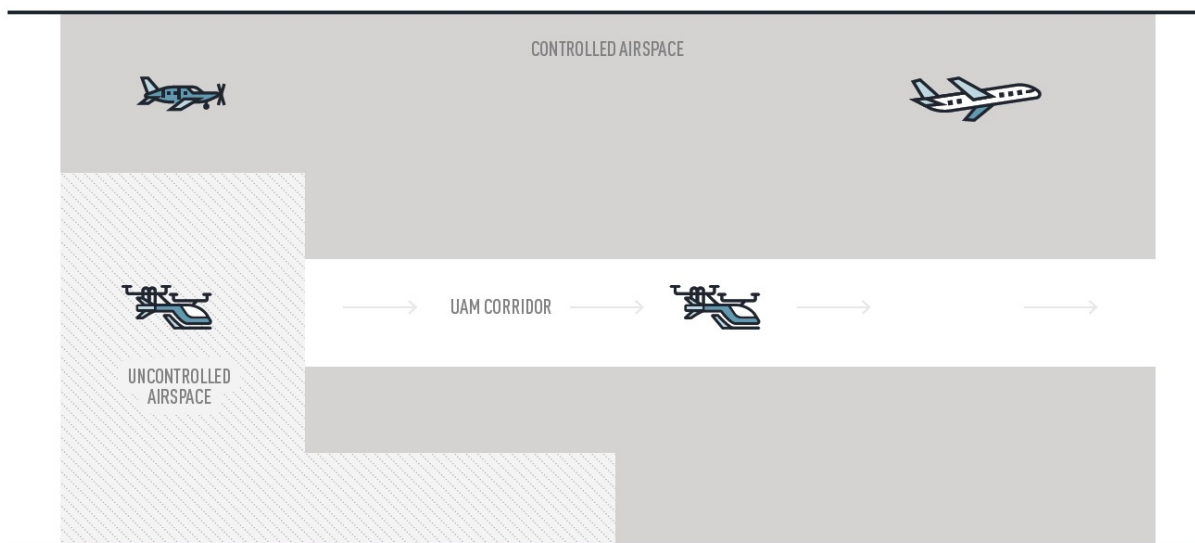


Figura 3.5: Corredor UAM em espaço aéreo controlado. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020).

ênfatisando a integração com o tráfego aéreo tradicional. Por fim, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) enfatiza fortemente a integração sobre a segregação, considerando o espaço aéreo segregado como uma limitação temporária e não escalável, e tendo como objetivo do modo DFR precisamente evitar a necessidade de segregar o espaço aéreo para os seus voos, permitindo que as operações AAM/UAM partilhem o espaço aéreo com as operações VFR e IFR existentes. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) também corrobora esta visão integracionista, afirmando que nenhuma categoria única de operadores terá uso exclusivo do espaço aéreo, e todas as operações precisarão ser integradas, embora opere com uma mistura que inclui estruturas dedicadas como corredores UAM para proporcionar separação estratégica. Na Figura 3.5, tem-se uma representação da concepção de espaço aéreo apresentada no documento.

Observa-se, portanto, que a segregação do espaço aéreo, quando adotada, é majoritariamente tratada como uma solução transitória ou estratégica, enquanto a integração progressiva com o tráfego aéreo legado constitui o objetivo final da maioria dos ConOps analisados.

### 3.5 Zonas de exclusão ou acesso controlado

Os conceitos de zonas de exclusão ou acesso controlado são abordados através de diferentes mecanismos nos diversos documentos. O *ConOps do DECEA* (DECEA,



2024) prevê o estabelecimento de *geofences (keep-out ou keep-in)*, que funcionam como limites virtuais para restringir ou proibir o acesso a um volume específico de espaço aéreo, podendo ser estáticas (permanentes) ou dinâmicas (ativadas por condições operacionais). Os limites horizontais dos volumes UAM serão determinados pelas geofences associadas, as quais poderão ser parametrizadas a partir de contornos de áreas de proteção, de exclusão e de controle do espaço aéreo previamente previstas na infraestrutura de gerenciamento do tráfego aéreo.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) define o conceito de *Geographical Zones (Geo-Zones)*, que podem ser criadas para restringir ou facilitar operações de drones, sendo estas zonas publicamente disponibilizadas por meio do serviço de *Geo-awareness*. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) prevê o estabelecimento de restrições de espaço aéreo, tanto estáticas como dinâmicas, que podem ser definidas pelas autoridades relevantes para limitar, permanente ou temporariamente, o volume de espaço aéreo dentro do espaço aéreo *U-space* onde podem ocorrer operações de UAS, podendo estas restrições ser utilizadas para criar efetivamente zonas de exclusão ou de acesso controlado.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) introduz o conceito de “*Vertiport (VP) airspace*”, um espaço aéreo controlado em torno de um vertiporto, gerido pelo seu operador, para o qual é necessária uma aprovação prévia para entrada e operação, funcionando efetivamente como uma zona de acesso controlado. O documento também enfatiza que o monitoramento em tempo real da conformidade da trajetória das aeronaves em relação ao plano de voo aprovado é crucial para prevenir incursões em zonas de exclusão aérea (*no-fly zones*). O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) detalha que o espaço aéreo imediatamente acima do vertiporto deve ser completamente protegido para as operações de pouso e decolagem.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) aborda o conceito de “espaço aéreo protegido ativo” (*active protected airspace*), que é um volume de espaço aéreo que as aeronaves devem evitar durante os períodos em que está ativo, a menos que tenham coordenado previamente a sua entrada com a autoridade controladora. Por fim, *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) prevê o estabelecimento de zonas de transição de vertiporto, que são áreas ao redor dos vertiportos destinadas à transição entre a fase de rota e as fases de partida/chegada, além de restrições dinâmicas de espaço aéreo, como Áreas Restritas Temporárias ou Restrições Temporárias de Voo, onde o acesso ao espaço aéreo pode ser alterado em curto prazo.





### 3.6 Compatibilidade com o ATM convencional

A compatibilidade com as operações ATM convencionais é uma preocupação central e um princípio fundamental na maioria dos conceitos de gestão do espaço aéreo para AAM/UAM. O documento da ANAC alerta para os desafios de implementação do gerenciamento de tráfego aéreo para AAM, destacando a “abordagem sempre cautelosa dos entes reguladores ao implementar modificações nas regras, de modo a não causar acidentes”.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) reitera que a UAM é um subconjunto do sistema ATM e que as premissas para implementação incluem explicitamente não impor carga adicional aos controladores de tráfego aéreo, não restringir as operações aéreas tradicionais e aproveitar ao máximo a infraestrutura ATC existente.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) detalha que a compatibilidade é assegurada por interfaces procedimentais e colaborativas entre U-space e ATC, devendo aeronaves tripuladas que operam em espaços aéreos U-space ser eletronicamente conspícuas, com a implementação de mecanismos para compartilhamento de dados de vigilância e coordenação de planos de voo.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) estabelece que a compatibilidade é assegurada através do uso de IFR, procedimentos publicados, e obtenção de autorizações do ATC, seguindo os procedimentos padrão. Prevê que as operações UAM serão inicialmente gerenciadas por exceção pelo ATC, com intervenções táticas raras, devido à alta previsibilidade e conformidade com planos de voo estruturados em rotas RNP, e que a dependência das comunicações de voz com o ATC será reduzida, evoluindo para comunicações digitais baseadas em *Voice over Internet Protocol* (VoIP).

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) estabelece que o ATC tem a responsabilidade primordial de manter o movimento seguro das aeronaves, garantindo a separação de aeronaves não participantes da operação cooperativa, podendo emitir avisos de tráfego sobre operações UAM conhecidas para aeronaves que recebem serviços de ATC.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) enfatiza que a integração com o sistema ATM tradicional é fundamental e inevitável, especialmente em áreas próximas a aeroportos ou em espaço aéreo controlado, propondo o uso de um sistema comum de troca de informações e um sistema de coordenadas tridimensionais único para facilitar a interoperabilidade técnica.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) especifica que a compatibilidade com o ATM tradicional é garantida através de uma interface bem definida entre





o *UAM Air Traffic Management Service Provider* (UATMSP) e os órgãos provedores de serviços de ATC. Por exemplo, em situações anômalas, como a saída não planejada de uma aeronave UAM do corredor, o UATMSP tem a obrigação de notificar imediatamente o órgão ATC relevante, transferindo a autoridade sobre a aeronave para o ATC se a saída ocorrer numa área controlada.

O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) enfatiza a integração com o tráfego aéreo tradicional, buscando garantir que o fluxo de tráfego de AAM não impacte negativamente outros fluxos de tráfego aéreo, mantendo os serviços de ATC fornecidos conforme necessário ou exigido pelos regulamentos.

Finalmente, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) destaca que a compatibilidade com as operações ATM tradicionais é um princípio central do conceito DFR. Nesse modelo, as operações DFR são transparentes para os operadores não-DFR, que continuam a ter os mesmos níveis de acesso e flexibilidade operacional, incluindo procedimentos específicos de coordenação com o ATC em espaço aéreo controlado e participação na gestão do fluxo de tráfego quando fazem uso de recursos limitados gerenciados pelo ATC.





## 4 Gestão do Tráfego Aéreo

Pela análise dos documentos, são identificadas abordagens variadas para o monitoramento, coordenação e separação do tráfego de AAM, refletindo diferentes estágios de maturidade operacional e visões conceituais. De um modo geral, observa-se uma transição progressiva de modelos dependentes dos sistemas tradicionais de ATC para arquiteturas mais automatizadas, digitais e descentralizadas.

Inicialmente, em fases de baixa densidade de tráfego, como previsto no *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) e no Horizonte 1 do *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020), o monitoramento e a separação dependem fortemente da infraestrutura existente. As aeronaves AAM operando sob VFR são tratadas como qualquer outra aeronave, com o ATC fornecendo serviços de separação em espaço aéreo controlado (ex.: Classe B) ou com o piloto mantendo a responsabilidade primária pela separação através do princípio “ver-e-evitar” em outros tipos de espaço aéreo. A vigilância utiliza sistemas como radar e ADS-B. Já o *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) aponta que a infraestrutura de radar tradicional é insuficiente para baixas altitudes em ambiente urbano, indicando a necessidade de tecnologias complementares como o ADS-B IN e OUT.

Conforme a densidade do tráfego aumenta, os conceitos operacionais preveem a introdução de sistemas especializados. A vigilância passa a ser realizada predominantemente por meios eletrônicos e cooperativos. O conceito U-space da Europa, detalhado no *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) e no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), estabelece o serviço de Identificação em Rede (*Network Identification*) como obrigatório, no qual as aeronaves reportam regularmente sua identidade e posição aos *U-space Service Provider* (USSP). Essas informações são compartilhadas entre USSP e disponibilizadas ao ATC através de serviços de intercâmbio de dados, contribuindo para a criação de consciência situacional do tráfego. De forma semelhante, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) destacam o uso de ADS-B e de sistemas de vigilância baseados na aeronave e em infraestrutura terrestre como elementos centrais para a gestão de operações em ambientes de maior densidade.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) também estabelece volumes 4D para planejamento de trajetórias (*U-plans*), onde são definidos caminhos ideais com limi-



tes de desvio aceitáveis, conforme ilustrado na Figura 4.1. Estes volumes tridimensionais consideram o tempo como a quarta dimensão, permitindo o monitoramento da conformidade da trajetória em relação ao plano de voo autorizado e a detecção de desvios que ultrapassem os limites estabelecidos.

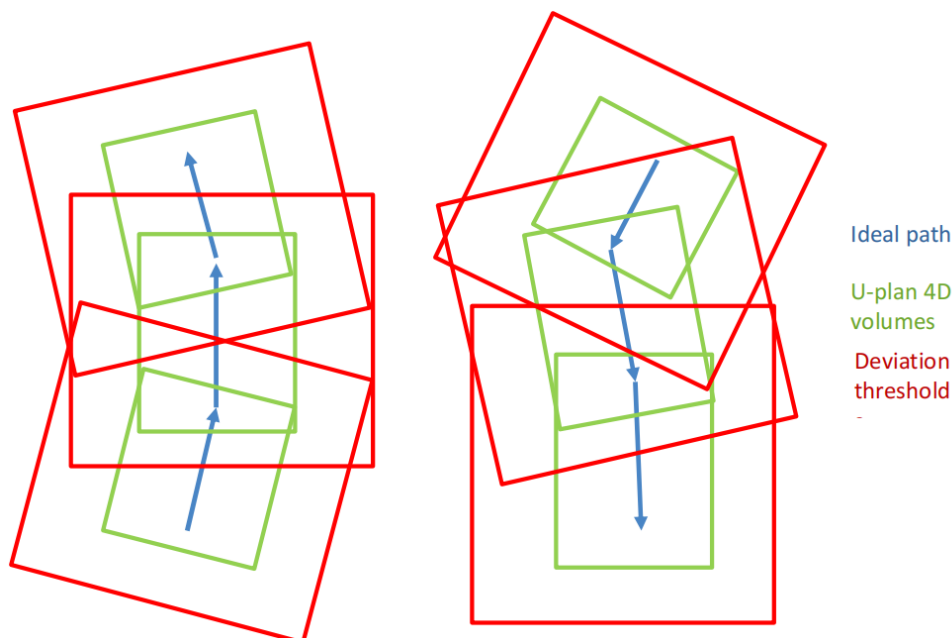


Figura 4.1: Limites de desvios para duas trajetórias não conflitantes em U-space. Fonte: Eurocontrol (2023).

A coordenação e a separação evoluem de um modelo centrado no controlador para um modelo baseado em serviços automatizados e na responsabilidade do operador. Em estágios intermediários, como no *Midterm UAM* do conceito da Boeing (Boeing, 2023), o ATC continua responsável pela separação no espaço aéreo controlado, enquanto as aeronaves empregam práticas de *autospacing* e gerenciamento de intervalos com base em procedimentos padronizados. Em estágios mais avançados, presentes em conceitos como o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) e o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), a separação estratégica (pré-voo) é realizada por serviços automatizados de autorização de voo. Esses serviços analisam as intenções de voo (*U-plans* no *U-space* e Planos de Voo Digitais no conceito brasileiro) para assegurar que não haja conflitos antes da ativação, funcionando como uma medida preventiva de segurança.

Para a separação tática (em voo), a maioria dos documentos recorre a sistemas de *Detect and Avoid* (DAA) ou Resolução de Conflitos Táticos. Estes sistemas, que podem ser baseados na aeronave, no solo ou numa combinação de ambos, monitoram o tráfego em tempo real e emitem alertas ou instruções para manobras evasivas, ajustes de velocidade, trajetória ou altitude para resolver conflitos iminentes. O *ConOps do*



DECEA (DECEA, 2024) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) detalham camadas de desconflito, que vão desde o ajuste estratégico de horários de decolagem até uma camada final de escape, onde um sistema *Airborne Collision Avoidance System* (ACAS) comanda uma manobra evasiva em caso de iminência de colisão.

A comunicação é um facilitador crucial. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) menciona as redes 5G/6G como viabilizadoras da interoperabilidade e comunicação de dados. Vários conceitos, como os propostos pelo *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) e *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), enfatizam a troca automatizada de dados entre aeronaves (*Vehicle-to-Vehicle – V2V*) e com a infraestrutura (*Vehicle-to-Infrastructure – V2I*) para permitir a consciência situacional compartilhada e a auto-separação. A comunicação por voz com o ATC, quando necessária, tende a ser pouco frequente e focada em ajustes táticos específicos, como destacado no *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023).

Em síntese, a gestão do tráfego AAM afasta-se progressivamente do paradigma tradicional de controle individual de aeronaves exercido por um controlador humano, evoluindo para um ecossistema no qual a separação passa a ser cada vez mais assegurada de forma automatizada, tanto em nível estratégico quanto tático, por meio da troca digital de informações e da atribuição compartilhada — ou delegada — de responsabilidades aos operadores e aos seus sistemas automatizados.

As seções a seguir detalham estas diferentes abordagens de gestão do tráfego aéreo para provisão de separações e balanceamento entre demanda e capacidade.

#### 4.1 Provisão de separação e desconflito

As abordagens para provisão de separação e desconflito no contexto da AAM são universalmente estruturadas em camadas, distinguindo entre medidas estratégicas (preventivas, realizadas antes do voo) e táticas (reativas, executadas durante o voo), conforme detalhado nos diversos documentos analisados e ilustrado na Figura 4.2.

A separação estratégica é alcançada principalmente durante a fase de planejamento, através da análise e ajuste das intenções de voo. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) descreve que, antes da decolagem, um sistema analisa todas as intenções de voo que pretendem ingressar no volume UAM e resolve conflitos, sugerindo alterações no horário de decolagem, rotas alternativas ou horários de passagem por pontos específicos do espaço aéreo. Esta abordagem é corroborada por outros conceitos. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) atribui esta função ao serviço de Au-



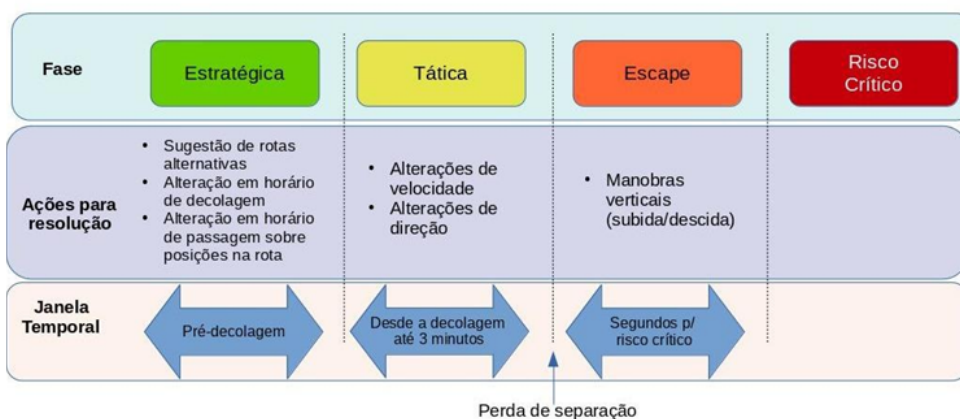


Figura 4.2: Gestão de conflitos de tráfego no ambiente UAM. Fonte: DECEA (2024).

torização de Voo (*Flight Authorisation*), que garante que os *U-plans* estarão livres de conflitos antes da sua ativação. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) menciona que a separação estratégica é obtida não apenas pelo planejamento colaborativo de voo que aplica limites na demanda de fluxo e evita trajetórias que se cruzem, mas também através do projeto de rotas RNP, concebidas para não interferir umas com as outras. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e o documento da FAA sobre UAM também enfatizam o compartilhamento da intenção operacional e a execução de práticas cooperativas - *Cooperative Operating Practice (COP)* - para o desconflito estratégico. No *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), a gestão estratégica de conflitos foca em elementos como a sincronização de tráfego para uma utilização eficiente de recursos de capacidade limitada.

Para a separação tática, após a decolagem, os documentos descrevem sistemas automatizados que monitoram os deslocamentos em tempo real. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) define uma camada tática preventiva, na qual o sistema, ao identificar um conflito futuro, emite uma correção para a navegação, como ajuste de velocidade, trajetória ou altitude. A camada final de segurança, denominada tática de escape, é acionada em situações de iminência de colisão, nas quais um módulo ACAS emite alertas e orienta a execução de manobras evasivas. Essa arquitetura de segurança em camadas é amplamente reconhecida como um consenso nos conceitos operacionais analisados. Tanto o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) quanto o *U-space* fazem referência às capacidades de DAA e aos serviços de previsão e resolução de conflitos táticos, os quais fornecem recomendações ou instruções para ajustes de trajetória em voo, por exemplo, por meio de *time-based metering*, conforme ilustrado na Figura 4.3.

No U-space, esta separação tática pode ser de natureza imperativa (Zu) ou consultiva



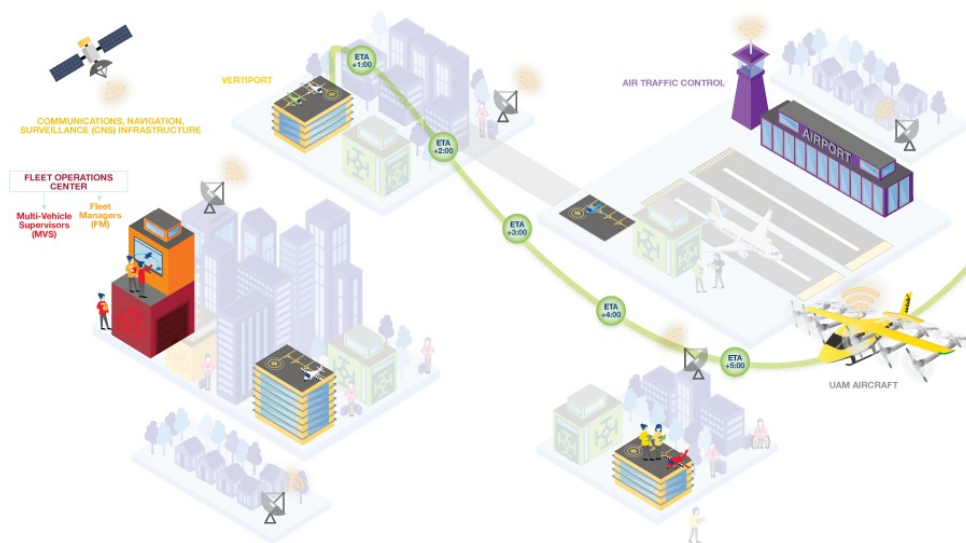


Figura 4.3: Time-based metering como ferramenta de separação tática. Fonte: Boeing (2023).

(Zz), dependendo do tipo de volume do espaço aéreo U-space. Os volumes U-space podem ser do tipo Y ou Z. O volume Y possui apenas resolução de conflitos estratégica provida pelos *U-space Service Providers* (USSPs). Os volumes do tipo Z são ainda subdivididos em Za, com gerenciamento do tráfego pelo ATC; Zu, com resolução de conflitos táticos pelo U-space; e Zz, em que o U-space fornecerá um serviço de aconselhamento para a resolução tática de conflitos. O volume Za poderá existir em aeroportos. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) atribui a separação tática à automação embarcada, que atua como instrumento do operador para a detecção de conflitos e o cálculo de ajustes de trajetória destinados à sua resolução. Essa abordagem representa uma mudança fundamental para um modelo descentralizado, conforme ilustrado nas Figuras 4.4 e 4.5, em contraste com a provisão de separação tradicionalmente centrada no controlador sob as regras IFR.

A responsabilidade pela separação também evolui com a maturidade operacional. Enquanto em fases iniciais, como no *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), a provisão de separação é uma função clara do ATC, os conceitos mais avançados preveem uma transição de responsabilidade. No estado maduro do *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), espera-se que os serviços de separação estratégica e tática sejam fornecidos por provedores de serviços para AAM - *Third-Party Service Provider* (TSP) ou *Provider of Services for UAM* (PSU). De forma semelhante, o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) estabelece que, nas fases iniciais, a responsabilidade pela separação tática permanece atribuída ao piloto, apoiada por capacidades de “ver-e-evitar” ou “detectar-e-evitar”, enquanto o serviço de monitoramento de conformidade atua de forma complemen-

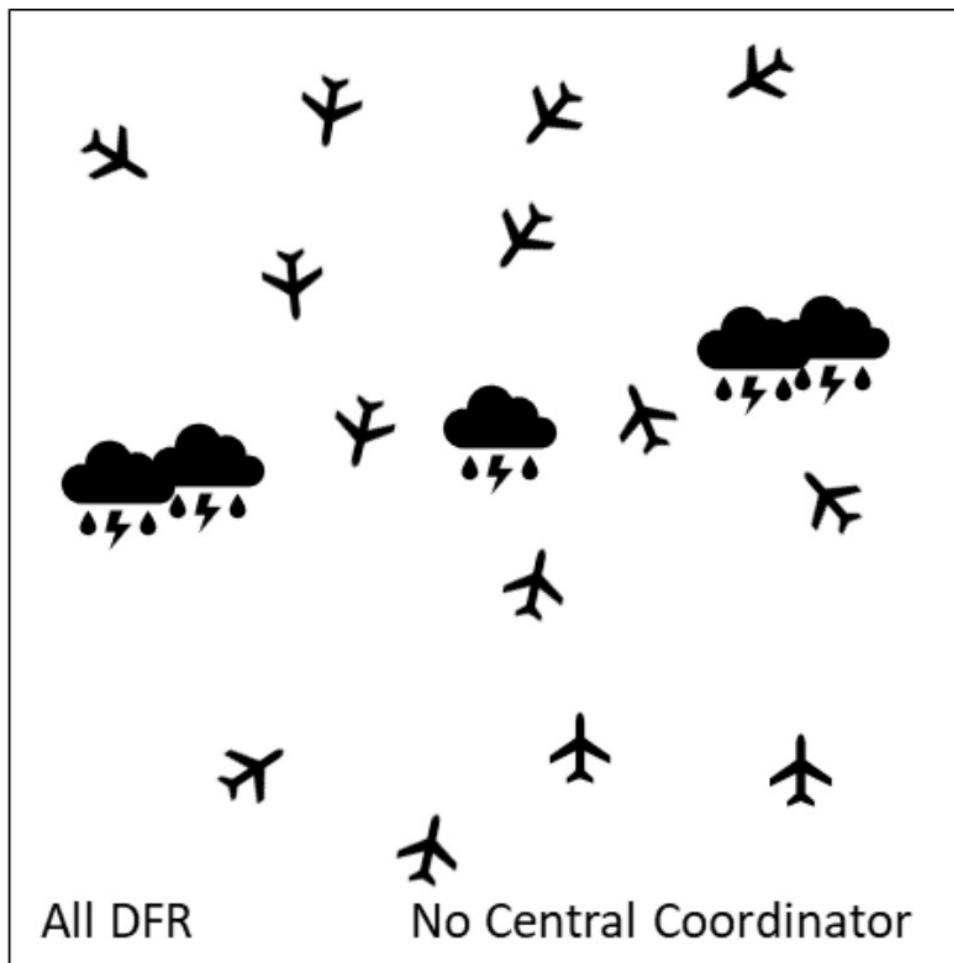


Figura 4.4: Aplicação de *Digital Flight* para produzir comportamentos auto-organizados. Fonte: Wing et al. (2022).

tar, fornecendo alertas e apoio à identificação de potenciais conflitos. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) consolida essa abordagem descentralizada ao definir o operador da aeronave como a entidade previamente designada e responsável pela provisão de separação, função exercida por meio de mecanismos de auto-separação, tecnologias digitais e do intercâmbio automatizado de informações.

## 4.2 Balanceamento entre demanda e capacidade

O balanceamento entre a demanda e a capacidade de vertiportos e do espaço aéreo é um outro aspecto fundamental para a gestão do tráfego AAM. O *Demand-Capacity Balancing (DCB)/Air Traffic Flow Management (ATFM)* aplicável às operações de AAM é tratado nos documentos analisados como um processo evolutivo, que se inicia com procedimentos locais e simplificados nas fases iniciais e progride para sistemas auto-

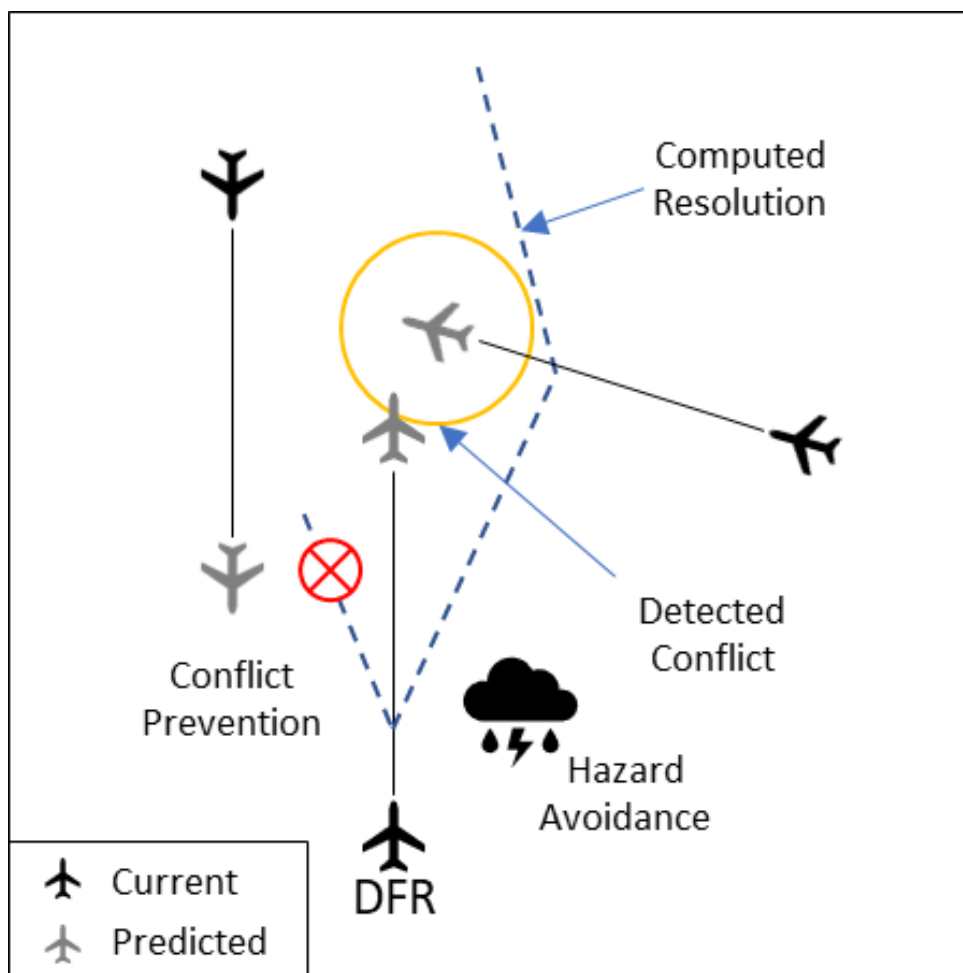


Figura 4.5: Sistema de prevenção e resolução de conflitos no modo Digital Flight (DFR). Fonte: Wing et al. (2022).

matizados e especializados nos estágios mais avançados de maturidade operacional.

Na fase inicial, como descrito no *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), o ATFM é realizado através de procedimentos locais. As operações AAM são conduzidas com horários de voo predeterminados, coordenados antecipadamente com o ATC local e demais partes interessadas. Quando os procedimentos VFR existentes se mostram insuficientes, acordos ou coordenações especiais são estabelecidos a nível local para acomodar o aumento do tráfego, idealmente de forma a reduzir a carga de trabalho do ATC. De maneira semelhante, o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) prevê uma gestão inicial simplificada, baseada principalmente na capacidade do vertiporto de destino, com a capacidade do sistema sendo expandida através da adição de novos corredores, e não por meio de uma gestão de fluxo complexa desde o início.

Conforme a escala e a complexidade das operações aumentam, a responsabilidade pelo ATFM é frequentemente atribuída a provedores de serviços especializados, apoi-



ados por sistemas automatizados. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) estabelece que o serviço de ATFM no ambiente UAM será de responsabilidade do PSU, e não do órgão gestor da aviação tradicional. É enfatizada a necessidade de um sistema capaz de gerenciar dinamicamente horários de decolagem, pouso e passagem por pontos de referência, semelhante a um sistema de slots, processamento que não pode ser feito manualmente devido ao alto volume. A execução do ATFM também requer uma conexão sistêmica entre as autoridades da aviação e os administradores de vertiportos para determinar a capacidade da infraestrutura.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) introduz o conceito de “tempo razoável para atuar” (*reasonable time to act* – RTTA), definido como um momento anterior à ativação do voo a partir do qual a demanda é considerada congelada, permitindo a aplicação de medidas como atrasos na partida ou propostas de reroteamento para assegurar que a demanda não exceda a capacidade disponível. A capacidade pode ainda ser modulada por meio da reconfiguração dinâmica do espaço aéreo, com a introdução do serviço de DAR em fases mais avançadas (U3). No *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o balanceamento é realizado predominantemente durante o planejamento de voo, pelos gestores de frota, com base em previsões de demanda, capacidades do espaço aéreo e dos vertiportos, bem como em informações de congestionamento, promovendo maior previsibilidade e integração com o ambiente ATM quando necessário.

A FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), estabelece que o DCB é aplicado quando os recursos disponíveis não conseguem acomodar a demanda agregada das intenções operacionais. No contexto dos Corredores UAM, as funções de gerenciamento de fluxo são providas por serviços de *Cooperative Flow Management* (CFM), regidos por *Cooperative Operating Practices* (COPs). Análises iniciais indicam que o desconflito estratégico realizado na fase de planejamento pode ser insuficiente em determinados cenários, tornando necessária a introdução de capacidades de DCB em nível tático para otimizar a eficiência operacional.

No *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), o ATFM é facilitado pela capacidade de “Utilização Colaborativa de Recursos Restritos”, conforme as características do modo DFR descritas na Figura 4.6. Nesse modelo, os operadores colaboram ativamente na gestão de fluxos de chegada, compartilhando antecipadamente informações como destino e *Estimated Time of Arrival* (ETA). Essa colaboração permite estimativas de demanda mais precisas e uma programação de tráfego mais eficiente. Além disso, os operadores aplicam capacidades de navegação 4D precisa, comprometendo-se com operações conformes e contribuindo para a otimização do desempenho do ATFM, seja por meio de *Required Time of Arrival* (RTA) (*Required*





*Time of Arrival*) ou de procedimentos de Interval Management (*Interval Management (IM)*).

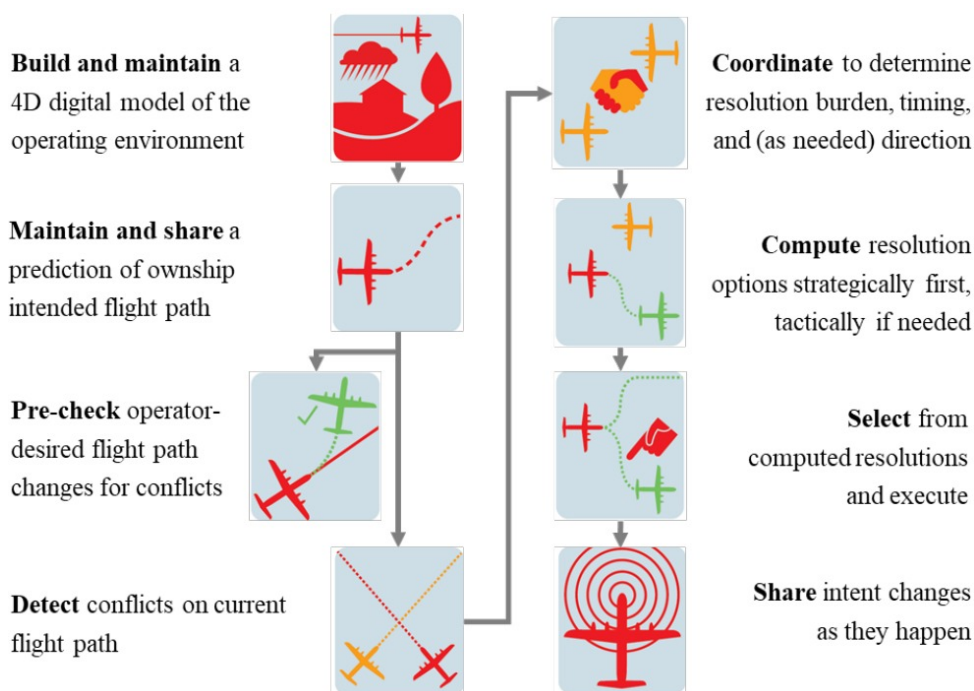


Figura 4.6: Processo representativo para auto-separação cooperativa em *Digital Flight*. Fonte: Wing et al. (2022).

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) detalha que o serviço de gestão de fluxo opera em fases estratégica, pré-tática e tática. A gestão estratégica planeja com antecedência a partir de previsões baseadas, por exemplo, na demanda histórica. A gestão pré-tática (1-2 dias antes da partida) refina o planejamento com base nos planos de voo recebidos e na disponibilidade atualizada de vertiportos. A gestão tática, que se inicia no momento da partida, avalia continuamente o plano de voo a partir de informações em tempo real, realizando ajustes em resposta a restrições de capacidade ou congestionamento.

Por fim, o *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) estabelece que o próprio processo de autorização de voo atua como um mecanismo de ATFM, recusando ou propondo alternativas a pedidos que causem conflitos, assegurando, assim, que a demanda não exceda a capacidade disponível no espaço aéreo U-space.





## 5 Governança

A governança da gestão do tráfego aéreo para a AAM apresenta um espectro de modelos, variando entre centralizado, descentralizado e híbrido, conforme a maturidade operacional e a visão estratégica de cada documento.

Em fases iniciais e em contextos específicos, prevalece um modelo centralizado. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) descreve uma governança centralizada através da própria FAA, que lidera o planejamento, desenvolvimento e implementação de soluções de espaço aéreo e gestão de tráfego aéreo. De forma semelhante, o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), citado no documento do Comitê Público-Privado, planeja um modelo centralizado onde o *Japan Civil Aviation Bureau* (JCAB) atua como *Air Navigation Service Provider* (ANSP) e como *UATM service provider*. A autoridade centralizada do ATC para a provisão de separação no espaço aéreo controlado também é reafirmada no *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023). A gestão do tráfego aéreo para o K-UAM é concebida para ser um sistema distinto, porém interligado, operando em paralelo ao sistema de gerenciamento de tráfego aéreo (ATM) tradicional. A governança deste novo sistema é descentralizada em sua operação, mas supervisionada pela autoridade de aviação, com um provedor de serviços especializado, o UATMSP, atuando como a entidade central para a coordenação do tráfego dentro dos corredores UAM. O UATMSP é responsável por estabelecer, operar e manter as instalações de segurança de navegação dentro do corredor, posicionando-se como o principal ponto de integração de informações e tomada de decisão operacional para a UAM.

No extremo oposto, modelos francamente descentralizados são propostos para operações em estágios mais avançados. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) estabelece uma governança descentralizada, onde a função de separação é distribuída pelos operadores e suas aeronaves, que são os responsáveis pela provisão de separação, contrastando com a estrutura de controle centralizado da IFR. A FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), também descreve uma governança descentralizada e baseada em cooperação, na qual a comunidade UAM desenvolve e estabelece colaborativamente as COPS como padrões para operações, cabendo à FAA aprová-las. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) implementa uma descentralização na prestação de serviços, permitindo que vários USSPs certificados operem, embora sob uma forte supervisão regulatória centralizada pelos Estados-Membros.





Entre esses dois polos, surgem modelos híbridos que combinam elementos centralizados e descentralizados. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) propõe um modelo híbrido, no qual haverá um sistema central sincronizado e interoperável (possivelmente gerido pelo DECEA ou por ele delegado) que interage com múltiplos *Providers of Services for UAM* (PSUs) operando de forma descentralizada em suas áreas geográficas. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) prevê que a governança do UATM poderá variar entre países, esperando-se que pelo menos alguns serviços sejam prestados por uma organização centralizada, como o ANSP. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) também admite variantes de implementação, onde um Estado-Membro pode designar um único *Common Information Service Provider* (CISP) para operar funções *backbone* de forma centralizada, ou pode deixar que estas funções sejam fornecidas de forma distribuída pelos próprios USSP.

Uma característica comum aos modelos descentralizados e híbridos é o papel fundamental de provedores de serviços terceirizados ou especializados. Figuras como o PSU e o USSP atuam como entidades para coordenação, troca de informações e prestação de serviços dentro do ecossistema, interagindo com a autoridade central e entre si em redes federadas ou interoperáveis.

## 5.1 Prestadores de serviços

Dentro do ecossistema da AAM, os documentos identificam uma variedade de prestadores de serviços especializados, com os PSUs, *Third-Party Service Providers* (TSPs), os USSPs e *UAM Air Traffic Management Service Provider* (UATMSPs) emergindo como entidades-chave, embora com nomenclaturas e atribuições ligeiramente diferentes entre as várias propostas.

O PSU é uma figura proeminente em vários conceitos. No *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024), o PSU é definido como a entidade central responsável pelo provimento de serviços dentro do ambiente UAM, podendo ser o próprio DECEA ou outra entidade pública ou privada, desde que certificada pelo DECEA. A FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), descreve o PSU como o principal provedor de serviços e dados para as partes interessadas da UAM e a interface entre o ecossistema UAM e a FAA. As suas funções incluem servir como ponte de comunicação, analisar e confirmar que uma Intenção Operacional UAM está estrategicamente desconflitada e distribuir notificações e dados operacionais. Um operador UAM pode atuar como seu próprio PSU, ou este pode ser uma entidade separada. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) também menciona que, no estado maduro, os serviços de separação serão fornecidos por





TSPs.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) estabelece a sua arquitetura em torno dos USSPs, entidades certificadas que fornecem os serviços U-space para AAM/UAM. O conceito japonês identifica claramente o ANSP tradicional, no seu caso o JCAB, como o provedor central dos serviços UATM. O conceito coreano, por sua vez, introduz a figura do UATMSP, atuando como o nó central para coordenação do tráfego dentro dos corredores UAM e formando redes com outros UATMSP.

O *UAS Service Supplier* (USS) é outro prestador-chave, frequentemente associado à gestão do tráfego de drones em baixas altitudes no âmbito do UTM. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) menciona o USS como uma entidade com a qual o PSU deve ser capaz de compartilhar informações, indicando a necessidade de integração entre os ecossistemas UAM e UTM. O conceito coreano K-UAM prevê a troca de informações com os USS que gerenciam o tráfego de drones abaixo de 150 m, permitindo o compartilhamento de planos de voo e ajustes para garantir a segurança. A FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), e o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) também citam os USS como entidades que irão interagir com os serviços de AAM/UAM, principalmente para apoiar operações na interface entre os ambientes UAM e UTM, como durante as fases de pouso e decolagem.

Para além do PSU e do USSP, são identificados outros prestadores de serviços especializados. Vários documentos, incluindo os da FAA (FAA, 2023b; FAA, 2023a), o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), referem-se ao *Supplemental Data Service Provider* (SDSP) como um provedor complementar, responsável pelo fornecimento de dados como informações meteorológicas especializadas, dados de terreno e obstáculos, e disponibilidade de vertiportos. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) menciona especificamente dados de cobertura de rede (conectividade) e densidade populacional como dados suplementares críticos. Já os Provedores de Serviços de Informações Comuns – CISP são um conceito central na regulação europeia (EASA/CORUS). O CISP atua como uma “fonte única de verdade” para dados essenciais (estrutura do espaço aéreo, restrições, lista de USSPs certificados). O objetivo é garantir que todos os prestadores de serviço usem a mesma base de dados para segurança e integridade. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) apresenta o ECO-UAM como uma interface de troca de dados entre os sistemas do DECEA e outros sistemas (PSU, SDSP, órgãos de segurança). Ele gerencia dados de restrição de espaço aéreo e atua como ponto de acesso às informações de operações ativas no ambiente UAM, fornecendo meios para que as partes interessadas aprovadas consultem e recebam dados sobre as operações no ambiente UAM. Por outro lado, estabelece o SDSP como provedor de serviços de dados que apoiam operado-





res de frota, PSU, administradores de vertiporto e/ou o ECO-UAM no fornecimento de informações para o gerenciamento, coordenação e programação de operações de voo.

A relação entre estes provedores é de interdependência e requer interoperabilidade. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) prevê que os sistemas UATM precisarão trocar informações com *UAS Service Suppliers* (USSs), sendo provável que alguns serviços fornecidos pelos USSs sejam adotados para o UATM. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) obriga os USSPs a estabelecerem acordos entre si e com os ANSPs convencionais para garantir a coordenação e a troca de dados operacionais, utilizando um protocolo comum de comunicação aberto, interoperável e seguro. Desta forma, a prestação de serviços para a AAM é concebida como um esforço colaborativo entre uma rede de entidades especializadas e interligadas.

## 5.2 Serviços propostos

Os serviços propostos para a gestão do tráfego de AAM são extensivamente detalhados nos documentos, revelando um conjunto comum de funcionalidades essenciais, embora com diferentes agrupamentos e nomenclaturas conforme o conceito operacional.

A arquitetura de UAM, em quase todos os ConOps, com exceção do *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), que apresenta um modelo totalmente centralizado, e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024), que apresenta um modelo híbrido, afasta-se do controle de tráfego aéreo centralizado tradicional para um modelo federado e distribuído. Nesse modelo, entidades terceiras (chamadas PSU nos EUA/Brasil ou USSP na Europa) prestam serviços aos operadores. Os serviços comuns a praticamente todos os documentos (FAA, EASA/Eurocontrol, DECEA, K-UAM) são:

- **Autorização de Voo / Gestão de Intenção Operacional:** O operador submete uma intenção de voo e o serviço verifica se ela é segura, não conflita com outras operações estratégicas e obedece às restrições do espaço aéreo.
- **Desconflito Estratégico:** Antes da decolagem, o serviço garante que a trajetória 4D planejada não intersecta com outras trajetórias já aprovadas ou áreas restritas.
- **Consciência Geoespacial (*Geo-awareness*):** Fornecimento de informações sobre





a estrutura do espaço aéreo, zonas proibidas ou restritas (*geofences*) e condições estáticas/dinâmicas do ambiente operacional.

- Identificação de Rede (*Network Identification / Remote ID*): Capacidade de identificar e localizar aeronaves em tempo real e compartilhar esses dados com partes autorizadas.
- Informação de Tráfego: Fornecimento de dados sobre outras aeronaves (tripuladas ou não) nas proximidades para evitar colisões.
- Monitoramento de Conformidade: Verifica se a aeronave está voando dentro dos limites da trajetória autorizada e gera alertas em caso de desvio, conforme ilustrado na Figura 5.1.

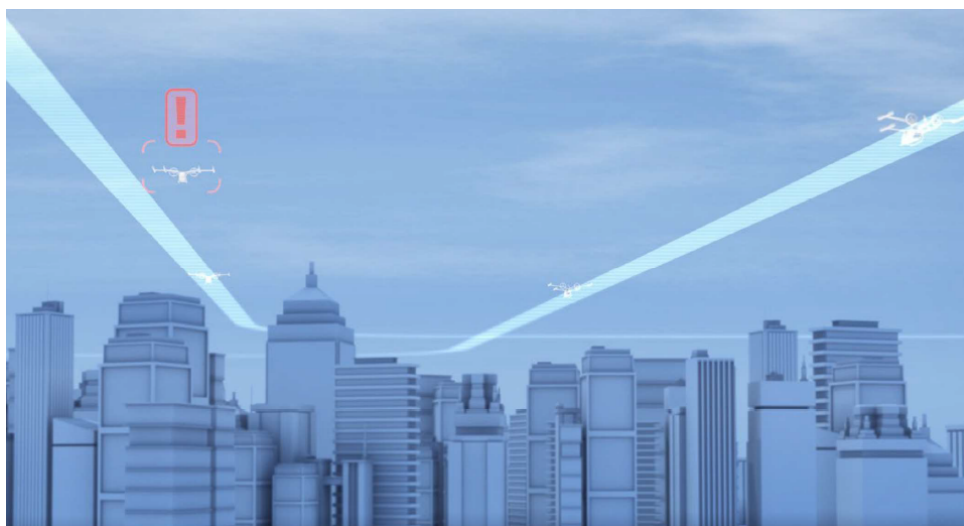


Figura 5.1: Monitoramento de conformidade de trajetória no volume de espaço aéreo UAM. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020)

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) apresenta, no artigo 72, uma lista não exaustiva de serviços que podem ser prestados pelo PSU, incluindo gestão de intenções de voo, compartilhamento de informações operacionais, desconflito de tráfego, gestão de slots em vertiportos, gestão de fluxo, monitoramento de conformidade, coordenação de acesso a aeroportos/vertiportos, e serviços de meteorologia, cartografia e informações aeronáuticas. Assim, incluem tanto serviços críticos para a operação quanto serviços complementares no rol de atribuições dos PSUs.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) enumera uma série de serviços fundamentais, sendo que o *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) torna obrigatórios quatro serviços em todos os espaços aéreos U-space:





1. Serviço de Identificação em Rede (*Network Identification Service*): Permite a identificação e rastreamento dos veículos aéreos em tempo real. Os drones ou eVTOLs reportam periodicamente sua posição e identificação para o sistema U-space, garantindo que todos os operadores e autoridades tenham consciência da situação do tráfego.
2. Serviço de Consciência Geoespacial (*Geo-Awareness Service*): Disponibiliza informações sobre zonas geográficas (como áreas restritas, zonas de exclusão, espaços aéreos *U-space*) e condições operacionais aplicáveis. Ajuda os operadores a planejar rotas seguras e conformes com as regulamentações.
3. Serviço de Autorização de Voo (*Flight Authorisation Service*): Processa e autoriza planos de voo (*U-plans*) submetidos pelos operadores. Resolve conflitos estratégicos, verifica conformidade com regras de espaço aéreo, prioridades de voo e coordenação com controle de tráfego aéreo (ATC) quando necessário.
4. Serviço de Informação de Tráfego (*Traffic Information Service*): Fornece aos operadores informações em tempo real sobre outros drones ou eVTOLs e aeronaves tripuladas nas proximidades. Inclui alertas de tráfego e dados de vigilância para auxiliar na prevenção de conflitos.

Ainda, o artigo 5 do *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) exige a disponibilização de um conjunto de informações comuns para a provisão dos serviços U-space, e os artigos 12 e 13 propõem serviços adicionais de meteorologia e monitoramento de conformidade que podem ser implementados pelos Estados-membros:

1. Serviço de Informação Comum (*Common Information Service – CIS*): Fornece informações essenciais e padronizadas sobre o espaço aéreo U-space, incluindo limites geográficos, requisitos técnicos e operacionais, prestadores de serviços certificados e restrições temporárias. Atua como uma fonte única de dados para todos os atores do U-space.
2. Serviço de Informação Meteorológica (*Weather Information Service*): Disponibiliza dados meteorológicos relevantes para a operação de drones ou eVTOLs, incluindo previsões e alertas de condições adversas. Ajuda os operadores a tomar decisões seguras antes e durante o voo.
3. Serviço de Monitoramento de Conformidade (*Conformance Monitoring Service*): Verifica se os drones ou eVTOLs estão seguindo seus planos de voo autorizados e emite alertas em caso de desvios.





Conforme detalhado no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), além dos serviços obrigatórios do *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a), há uma série de serviços adicionais previstos para fases mais avançadas do U-space (U3/U4). Dois deles são de grande importância operacional:

1. Serviço de Resolução de Conflitos Táticos (*Tactical Conflict Resolution Service*): Fornece instruções ou conselhos em tempo real para evitar colisões entre drones ou eVTOLs durante o voo, quando um conflito é detectado. Opera em volumes de espaço aéreo do tipo Zu (instruções obrigatórias) ou Zz (aconselhamento). Ativado quando o serviço de detecção de conflitos táticos identifica uma perda iminente de separação. Pode modificar trajetórias, velocidades ou altitudes de forma dinâmica.
2. Serviço de Gestão Dinâmica de Capacidade (*Dynamic Capacity Management Service*): Equilibra a demanda de tráfego com a capacidade disponível do espaço aéreo, evitando congestionamentos e garantindo a segurança. Utiliza conceitos como “*Reasonable Time to Act*” (RTTA) para ajustar planos de voo antes da ativação, podendo propor atrasos, rerroteamentos ou realocação de slots. Tem como objetivo otimizar o fluxo de tráfego em áreas de alta densidade, especialmente em cenários de UAM.

Outros serviços relevantes mencionados no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) incluem: Serviço de Conversão Vertical (*Vertical Conversion Service*) —conversão entre altitudes barométricas e geodésicas<sup>1</sup>, Serviço de Alerta e Informação Vertical (*Vertical Alert and Information Service*) — alerta sobre riscos de colisão com obstáculos, Serviço de Interface Colaborativa com ATC (*Collaborative Interface with ATC*) —permite comunicação direta entre U-space e controle de tráfego aéreo, Serviço de Monitoramento de Infraestrutura (*Infrastructure Monitoring*) —verifica o estado de comunicações, navegação e vigilância. Esses serviços refletem a evolução do U-space em direção a operações mais densas e automatizadas, especialmente voltadas para UAM.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) agrupa os serviços do UATM em seis categorias principais. Dois serviços fundamentais preparam o ambiente: o Serviço de Desenho de Espaço Aéreo e Procedimentos e o Serviço de Intercâmbio de Informações. Quatro serviços operacionais

<sup>1</sup>O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) introduz o conceito de *Geodetic Altitude Mandatory Zone* (GAMZ) proposto pelo projeto *Integrated Common Altitude Reference system for U-space* (ICARUS), onde as aeronaves devem trocar informações de altitude na forma de altura geodésica, referenciada ao elipsoide *World Geodetic System 1984* (WGS84), sendo previsto um serviço de conversão vertical para suportar esta exigência.





suportam as operações do dia-a-dia: o Serviço de Planejamento e Autorização de Voo, o Serviço de Gestão de Fluxo, o Serviço de Gestão Dinâmica de Espaço Aéreo e o Serviço de Monitoramento de Conformidade. O conceito japonês para AAM, por sua vez, lista os serviços prestados pelo UATM como: Troca/Compartilhamento de Informação (*Information Exchange/Sharing*), Gestão de Espaço Aéreo (*Airspace Management*), Gerenciamento de Conflitos (*Conflict Management*), Confirmação/Autorização de Plano de Voo (*Flight Plan Confirmation/Authorization*) e Monitoramento de Conformidade e Coordenação (*Conformance Monitoring & Coordination*).

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) organiza os serviços em torno de quatro elementos essenciais que habilitam capacidades principais. Estes elementos são: Conectividade e Serviços de Informação Digital, Consciência Situacional de Tráfego Partilhada, Práticas Cooperativas, ilustradas na Figura 5.2, e Automação de Separação. As Práticas Cooperativas (*Cooperative Practices – COPs*) são regras de comportamento operacional que governam como as aeronaves em *Digital Flight* devem interagir entre si, com aeronaves VFR e IFR, e com o ATC. Elas são baseadas na automação para garantir que sejam aplicadas de forma consistente e confiável, reduzindo a dependência da interpretação humana e aumentando a previsibilidade das operações. Em conjunto, esses elementos permitem serviços funcionais como Autosseparação do Operador, Gestão Cooperativa de Conflitos, Separação Adaptativa Par a Par, Utilização Colaborativa de Recursos Condicionados, Auto-organização e Sequenciamento e Autorregulação de Densidade e Complexidade Operacional.

ID	Cooperative Practice	Purpose
CP-A	Share and Update Intent	Increase predictability, efficiency, stability, and safety
CP-B	Take Timely Action	
CP-C	Respect Intent When Changing Intent	Minimize disruption to existing operations
CP-D	Respect VFR and IFR Aircraft	
CP-E	Navigate with Intended Precision	Increase airspace capacity; reduce actionable conflicts
CP-F	Apply Pair-Appropriate Separation	
CP-G	Respect Right-of-Way Among DFR Aircraft	Distribute separation burden; increase safety
CP-H	Coordinate Maneuvering Among DFR Aircraft	
CP-I	Coordinate with ATC in Controlled Airspace	Facilitate airspace integration; minimize controller workload; minimize disruptions
CP-J	Join in Appropriate Flow Management	
CP-K	Avoid Active Protected Airspace	
CP-L	Respect Established Operating Procedures	

Figura 5.2: Práticas cooperativas no modo *Digital Flight* (DFR). Fonte: Wing et al. (2022).

A FAA, no seu ConOps (FAA, 2023b), aborda os serviços de forma modular, sendo caracterizados em três tipos: serviços cujo uso é obrigatório para conformidade re-





regulatória e que devem ser qualificados e aprovados pela FAA; serviços que podem ser usados para atender total ou parcialmente a uma regulamentação, podendo ser individualmente qualificados; e serviços de valor agregado que não são usados para conformidade regulatória e podem atender a um padrão da indústria. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) lista serviços específicos fornecidos por TSPs, que incluem serviços de comunicação de *Command and Control* (C2), serviços DAA e serviços de dados aeronáuticos validados (como meteorologia, NOTAMs).

A evolução da prestação dos serviços por provedores especializados é também um ponto comum, com a maioria dos documentos prevendo que estes ganharão maturidade e assumirão responsabilidades crescentes à medida que a densidade do tráfego e a autonomia das operações aumentarem. A tendência global é iniciar as operações aproveitando a infraestrutura e regras de helicópteros existentes (VFR), introduzindo gradualmente os PSUs/USSPs para fornecer separação estratégica digital, e só posteriormente avançar para automação tática e voo autônomo em alta densidade.





## 6 Regras e Regulamentos

O panorama de normas, políticas e padrões para a AAM/UAM reflete um esforço global de harmonização e desenvolvimento, com diferentes regiões e entidades adotando abordagens distintas mas complementares. A ANAC (ANAC, 2023), por exemplo, não lista normas específicas em seu documento, mas destaca sua participação ativa em fóruns internacionais para o desenvolvimento de normas de consenso por organismos como *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (Comitês F37, F39, F44) e *Society of Automotive Engineers* (SAE) (Comitês E-40, G-35, G-34), com o objetivo de que estas sejam aceitas como meios de cumprimento para requisitos de certificação. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) estabelece um arcabouço inicial que considera as normas e recomendações da ICAO (Anexo 11, Doc 4444) (International Civil Aviation Organization, 2016), refletidas em normas nacionais como a *ICA 100-12* (Brasil. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2024) e a *ICA 100-37* (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2024), servindo como base para a elaboração de novas normas ou a inserção de itens normativos em regulamentos atuais.

Já a Boeing (Boeing, 2023), em colaboração com parceiros da indústria, referencia padrões técnicos específicos em seu ConOps, como a família de documentos *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA): DO-365B para sistemas DAA (RTCA, Inc., 2021), DO-377A para enlaces de C2 (RTCA, Inc., 2021), e DO-326A (RTCA, Inc., 2014) e DO-356A (RTCA, Inc., 2018) para segurança de aeronavegabilidade.

A FAA dos EUA baseia-se principalmente no quadro regulatório existente, adaptando-o para a AAM (FAA, 2023a). Isto inclui a utilização de muitos dos regulamentos baseados em performance da Parte 23 do *Code of Federal Regulations* (CFR) (Office of the Federal Register, 2025) como base de certificação e a expectativa de que os operadores comerciais sejam certificados sob a Parte 135 (Office of the Federal Register, 2025). A FAA está ativamente empenhada em processos de *rulemaking* para a integração de aeronaves do tipo *powered-lift*, incluindo a proposta de um *Special Federal Aviation Regulation* (SFAR) destinado a estabelecer requisitos específicos e transitórios para a certificação e qualificação de pilotos. O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) também introduz o conceito de COPs, práticas definidas pela indústria e aprovadas pela FAA para gerenciar operações de forma cooperativa.

O cenário regulatório na União Europeia é estruturado por um quadro robusto es-





tabelecido pelos Regulamentos Europeus 2021/664 (European Commission, 2021a), 2021/665 (European Commission, 2021b) e 2021/666 (European Commission, 2021c), complementados pelos seus *Acceptable Means of Compliance - Guidance Material* (AMC-GM). Estes trabalham em conjunto com o *Regulamento Europeu 2019/947* (European Commission, 2019b) (regras de operação) e o *Regulamento Europeu 2019/945* (European Commission, 2019a) (requisitos para sistemas de aeronaves não tripuladas). O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) ainda menciona padrões técnicos de apoio, como o *ASTM F3548-21* (ASTM International, 2021) para interoperabilidade entre prestadores de serviços U-space na detecção de conflitos e o *ASTM F3411-22A* (ASTM International, 2022) para Remote ID e Tracking.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) enfatiza a harmonização internacional e o desenvolvimento em andamento, referenciando ConOps internacionais (ex: FAA, NASA) para garantir consistência. Enquanto aguardam as *Standards and Recommended Practices* (SARPs) da ICAO para vertiportos, esperadas por volta de 2028, o Japão emitiu as “*Vertiport Design Guidelines*” como orientação provisória. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) atribui às autoridades de segurança (*safety authorities*), parte do *Korea Office of Civil Aviation* (KOCA), a responsabilidade de adotar e manter os padrões industriais relacionados à UAM.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) destaca a importância da interoperabilidade global, defendendo que o sistema de navegação aérea deve basear-se em normas globais e princípios uniformes. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe a criação de um novo conjunto de regras de voo, as DFR, que se alinham com o Conceito Operacional Global de ATM da ICAO. Por fim, a Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido e a Eve, num estudo de caso (CAA, 2021), focam na aplicabilidade dos regulamentos atuais, referenciando as *Standardised European Rules of the Air* (SERA) e a *Air Navigation Order* do Reino Unido de 2021, sem propor novas normas, mas identificando a necessidade de potenciais alterações ao conjunto de regras atual através de avaliações de risco.

## 6.1 Regras de voo

As regras de voo para AAM/UAM apresentam uma evolução conceitual significativa, afastando-se progressivamente dos regimes tradicionais de operação para incorporar novos paradigmas operacionais, mais flexíveis, digitais e orientados à automação. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) propõe que as operações não tripuladas de UAM sejam conduzidas predominantemente segundo um regime operacional ali-





nhado aos princípios do IFR, tomando como referência a Subparte B da Parte 91 do Título 14 do Código de Regulamentos Federais dos EUA (14 CFR) (Office of the Federal Register, 2025), com adaptações e disposições específicas para acomodar operações altamente automatizadas e não tripuladas. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) propõe um caminho evolutivo: as operações iniciarão sob VFR, com a transição para IFR prevista para níveis de maturidade mais avançados. Notavelmente, este documento propõe a introdução de uma nova regra de voo, as DFR, um conceito desenvolvido pela NASA (WING et al., 2022), que visa complementar o VFR e IFR utilizando informações digitais para permitir maior flexibilidade operacional em qualquer condição de visibilidade.

A visão da FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), corrobora esta evolução, indicando que as operações iniciais de UAM serão realizadas aproveitando as regras atuais de VFR e IFR. No entanto, a FAA introduz o conceito de *Automated Flight Rules* (AFR), que reflete a evolução do regime regulatório atual e leva em conta tecnologias avançadas. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe, em nível conceitual, as DFR como um novo conjunto de regras de voo distinto e complementar ao VFR e ao IFR, concebido para permitir operações digitais sustentadas por meio de automação, intercâmbio contínuo de dados e autoseparação, aplicáveis tanto em *Visual Meteorological Conditions* (VMC) quanto em IMC. A Coreia do Sul, no seu *ConOps* (UAM Team Korea, 2021), descreve, para a fase inicial, a adoção de um “método de voo visível”, caracterizado por operações predominantemente visuais, porém fortemente apoiadas por sistemas digitais, geoconsciência e monitoramento de conformidade. Embora não constitua um novo conjunto formal de regras de voo, este método representa uma evolução em relação ao VFR tradicional e apresenta afinidades conceituais com abordagens baseadas em separação digital, como as propostas no DFR. Já o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) prevê que as operações iniciais utilizarão VFR, com uma transição eventual para DFR nas fases mais avançadas, permitindo que operadores usem novas tecnologias e procedimentos cooperativos para garantir a separação.

A perspectiva europeia, expressa no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), além de referenciar as regras de voo visual (VFR) e por instrumentos (IFR) estabelecidas pelo Anexo 2 da ICAO e pelas SERA, introduz conceitualmente uma modalidade operacional designada *U-space Flight Rules* (UFR). Esta abordagem é concebida especificamente para usuários do espaço aéreo que operam sob a provisão de serviços U-space, sendo baseada em serviços digitais e requisitos específicos de desempenho, coexistente com as regras de voo tradicionais. O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) e o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) preveem um caminho semelhante, com operações iniciais sob VFR e





uma transição gradual para IFR e, potencialmente, novas regras à medida que a maturidade operacional aumenta. O *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) concentra a análise na integração das operações dentro das regras de voo existentes (VFR e IFR) no espaço aéreo de Classe D, destacando que os conceitos de operação devem propor medidas de mitigação para os riscos identificados, o que pode eventualmente exigir ajustes no conjunto atual de regras de voo.

Em síntese, observa-se convergência entre os documentos em reconhecer a necessidade de evoluir das regras tradicionais (VFR e IFR) para regimes mais digitais, automatizados e orientados à informação, de forma a suportar operações AAM/UAM com maior densidade e complexidade. Os conceitos DFR, AFR e UFR representam variações desse paradigma. O modo DFR, proposto pela NASA e adotado conceitualmente em outros documentos, permite voo digital com auto-separação e intercâmbio contínuo de dados, aplicável em VMC e IMC, em um modelo descentralizado. O AFR, introduzido pela FAA, evolui o regime regulatório tradicional, incorporando tecnologias avançadas, mas mantendo a supervisão do ATC e a compatibilidade com VFR/IFR. O UFR, desenvolvido no contexto europeu do U-space, combina regras digitais e serviços *U-space*, aplicável a aeronaves que recebem serviços automatizados de gestão de tráfego, coexistindo com VFR/IFR e permitindo segregação funcional e monitoramento de conformidade. Apesar das diferenças de enfoque e nomenclatura, há convergência na tendência de integrar tecnologias digitais e automação, aumentando a flexibilidade operacional, a previsibilidade de tráfego e a segurança, ao mesmo tempo que se preserva a compatibilidade com os regimes tradicionais quando necessário.

## 6.2 Regras de separação

As regras de separação para a AAM/UAM evoluem de modelos tradicionais para soluções mais dinâmicas e automatizadas, conforme refletido nos diversos conceitos operacionais. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) propõe que, em um estado intermediário, o ATC fornecerá serviços de separação no espaço aéreo controlado, utilizando principalmente meios procedimentais, como rotas UAM RNP projetadas para não interferir com outras rotas publicadas. Estas são complementadas por práticas de auto-separação e sequenciamento e gerenciamento de intervalo baseadas em acordos com o ATC. No estado maduro, a gestão da separação evoluirá para ser automatizada e fornecida por TSPs ou PSUs.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) aponta que os critérios tradicionais de separação, como 5 milhas náuticas lateralmente ou 1.000 pés verticalmente em TMA, são insuficientes para a escalabilidade das operações de UAM. A solução não se limita



à simples redução desses valores, mas envolve a introdução de novos parâmetros apoiados por tecnologias de comunicação *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) e *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I), que ampliam a consciência situacional e favorecem o desconflito. Esses parâmetros incluem requisitos de navegação de alta precisão (como RNP 0.3 ou melhor) e a aplicação de offsets laterais e verticais, adicionando uma camada extra de segurança ao permitir que as aeronaves operem ligeiramente deslocadas do eixo nominal da trajetória.

No quadro regulatório da U-space da União Europeia (Eurocontrol, 2023), a separação é implementada através de serviços U-space específicos. A separação estratégica (pré-voo) é alcançada através do serviço de Autorização de Voo, que promove o desconflito dos *U-plans*. A separação tática (em voo) é fornecida nos volumes do tipo Z, sendo o serviço de Resolução de Conflitos Táticos de caráter obrigatório em Zu e consultivo em Zz. O projeto *Defining the Building Basic Blocks for a U-Space Separation Management Service* (BUBBLES) refinou estas definições e propôs volumes e limiares para detecção de conflitos, conforme a Figura 6.1.

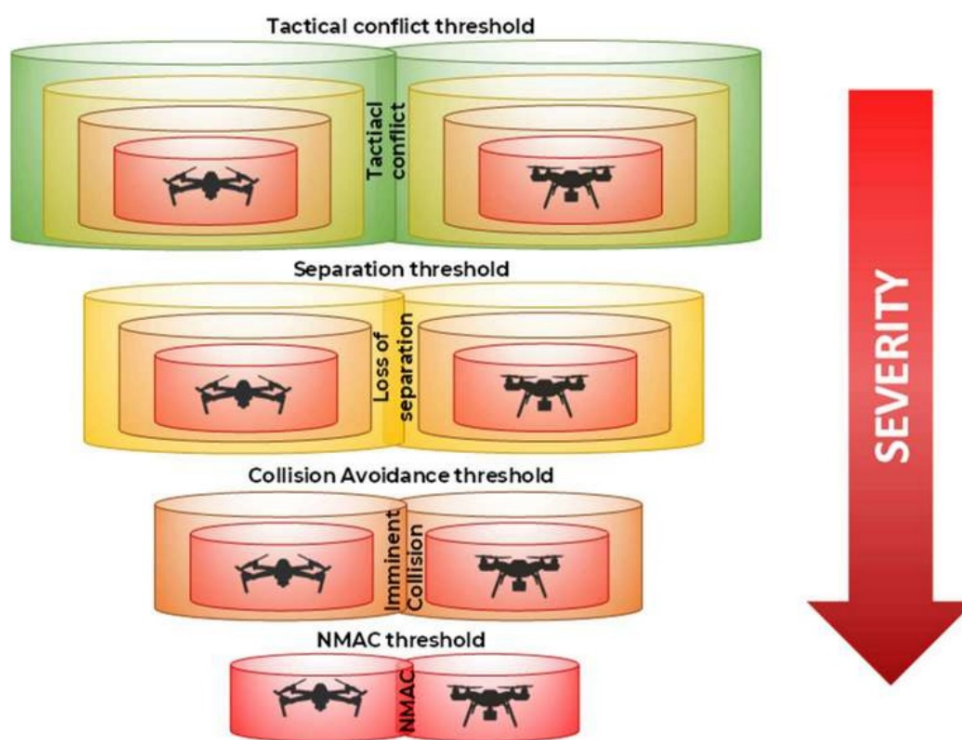


Figura 6.1: Limiares de conflito tático no conceito U-space. Fonte: Adaptado de Eurocontrol (2023).

A FAA, no seu ConOps (FAA, 2023b), descreve uma evolução similar. Inicialmente, a separação nos Corredores UAM pode aproveitar os mecanismos VFR/IFR aplicáveis. Conforme a tecnologia e as capacidades das aeronaves amadurecem, novos mínimos de separação e AFR podem ser introduzidos para fornecer maior capacidade. A separação é alcançada através do compartilhamento e desconflito estratégico das in-



tenções operacionais e o estabelecimento de regras procedimentais, podendo a responsabilidade pelo desconflito ser alocada ao operador UAM, ao *Pilot in Command* (PIC) ou à automação do operador.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) estabelece uma diferença fundamental para as DFR. Sob DFR, a responsabilidade pela provisão de separação recai sobre o operador da aeronave, e não sobre o ATC como no IFR. Uma capacidade central proposta é a Separação Adaptativa Par a Par, ilustrada na Figura 6.2, onde a automação DFR adapta os critérios de separação a fatores específicos de cada par de aeronaves, conforme a Figura 6.3, permitindo uma separação reduzida de forma segura, em contraste com os critérios de separação fixos usados no IFR.

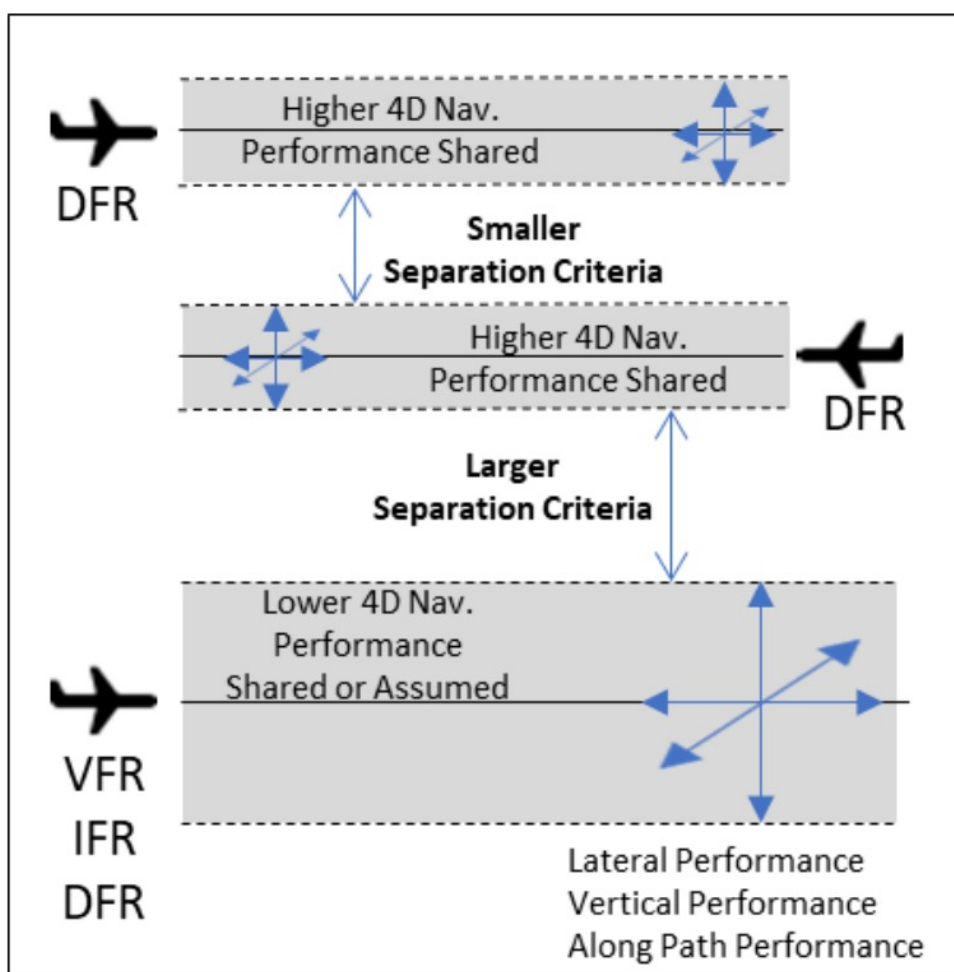


Figura 6.2: Separação adaptativa baseada em performance de navegação compartilhada. Fonte: Wing et al. (2022).

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) prevê que os requisitos de separação evoluirão em função das tecnologias de CNS. Com a melhoria das capacidades de comunicação, navegação e vigilância, bem como com sistemas avançados de monitoramento de tráfego, os procedimentos de concepção do espaço aéreo poderão exigir menos segregação e padrões



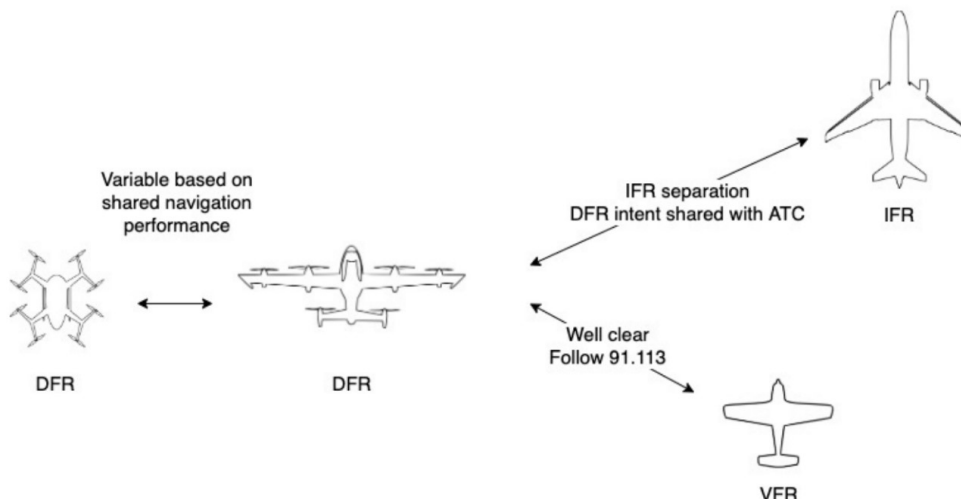


Figura 6.3: Critérios de separação variáveis baseados em performance de navegação compartilhada. Fonte: Wing et al. (2022).

de separação menos restritivos. Em corredores dedicados de UAM dentro do espaço aéreo controlado, o ATC pode não aplicar separação tradicional entre aeronaves operando dentro do corredor ou entre o corredor e outros usuários, confiando em sistemas de auto-separação e monitoramento automático. Contudo, o ATC continua a manter supervisão estratégica e pode intervir em situações de contingência ou quando for necessária coordenação com outros tráfegos, garantindo segurança e eficiência operacional.

### 6.3 Regras de acesso ao espaço aéreo

As regras de acesso ao espaço aéreo para operações de AAM/UAM variam entre as diferentes jurisdições, mas compartilham um princípio comum de acesso condicional baseado no cumprimento de requisitos específicos de desempenho e equipamento. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) estabelece que, inicialmente, o acesso aos volumes de espaço aéreo UAM estará condicionado ao cumprimento estrito de requisitos de capacidade e performance previamente estabelecidos para cada volume específico. Qualquer aeronave tripulada capaz de se ajustar a esses requisitos poderá ingressar, sendo que o operador aéreo necessitará obter aprovação de sua intenção de voo para garantir a separação estratégica e a definição de horários. As aeronaves devem ser elegíveis, ou seja, capazes de atender a requisitos como equipamentos CNS específicos (ex: ADS-B, transponder) e performance de navegação RNP.

No *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o acesso ao espaço aéreo será gerido através do processo de apresentação e aprovação de planos de voo junto ao ATC, com as





operações ocorrendo em espaço aéreo de Classes B, C, D, E e G. A autoridade sobre o espaço aéreo permanece com o ATC, enquanto os gerentes de vertiporto (*Vertiport Manager* (VM)) mantêm a autoridade sobre as superfícies que controlam, como os *keyholes*. A FAA, em seu ConOps (FAA, 2023b), estabelece que qualquer operador que cumpra os requisitos de desempenho e participação do Corredor UAM pode operar dentro ou cruzando o corredor. A FAA será responsável por definir, manter e disponibilizar publicamente as delimitações dos Corredores UAM e por gerenciar seus requisitos de desempenho, garantindo um ambiente operacional seguro de uso compartilhado e de acesso equitativo .

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) prevê o gerenciamento do acesso ao espaço aéreo por meio do conceito de U-space e das *Geographical Zones* (*Geo-Zones*). O acesso a um espaço aéreo U-space, que corresponde a um tipo específico de *Geographical Zone* (*Geo-Zone*), exige obrigatoriamente a utilização de serviços U-space. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) estabelece que o acesso ao espaço aéreo U-space é condicional à utilização de pelo menos quatro serviços U-space obrigatórios (identificação de rede, geoconsciência, autorização de voo e informação de tráfego). Os operadores devem submeter um pedido de autorização de voo para cada voo individual e ativá-lo apenas quando prontos para decolar, devendo cumprir estritamente a autorização concedida durante o voo. O serviço de autorização de voo verifica se um Plano de Voo U-space (U-plan) cumpre todas as condições de acesso, incluindo a entrada em zonas geográficas ou espaços aéreos controlados, o que demanda coordenação com o ATC. As informações sobre estas zonas e suas restrições são disponibilizadas publicamente por meio dos serviços de informação aeronáutica e de geoconsciência. O artigo 10 do *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) também introduz aspectos relacionados à prioridade de operações, estabelecendo dois níveis de prioridade (*Normal* e *Priority*) para voos, dando maior prioridade a operações especiais como missões policiais, médicas ou de emergência.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) indica que o acesso geral se baseia na conformidade com as regras de voo aplicáveis ao espaço aéreo em que se pretende operar. Para acessar certas rotas UAM, podem ser requeridos requisitos específicos. Para acesso aos corredores UAM, os operadores devem atender a requisitos de equipamento (ex: ADS-B Out, transponder) e desempenho, e seguir as provisões dos serviços UATM.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) especifica que o acesso ao espaço aéreo dos corredores UAM é condicional e restrito a aeronaves e operadores que cumpram com os requisitos de performance operacional do corredor estabelecidos pela autoridade e que tenham seus planos de voo aprovados pelo UATMSP. O





acesso ao espaço aéreo imediato do vertiporto requer ainda uma aprovação prévia específica do operador do vertiporto. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) descreve uma evolução: na fase inicial, as operações usarão as classes e limites de espaço aéreo existentes; na fase de progresso, requisitos baseados em desempenho dentro das áreas de corredor permitirão separação reduzida, e aeronaves não-AAM, com equipamento apropriado, serão autorizadas a entrar ou cruzar corredores AAM; na fase avançada, o espaço aéreo será unificado através de sistemas de automação avançados.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) descreve que o acesso varia conforme a classe do espaço aéreo. No espaço aéreo não controlado (Classe G), os veículos UAM poderão voar de forma semelhante a outros usuários. Inicialmente, as operações UAM (operando sob VFR) permanecerão fora do espaço aéreo controlado, a menos que seja dada uma autorização específica. O documento prevê que o estabelecimento de operações UAM pode exigir a criação de uma nova classe de espaço aéreo.

A FAA, no seu *Implementation Plan* (FAA, 2023a), rege o acesso pelas regras existentes para cada classe de espaço aéreo, detalhando que, para operar dentro do espaço aéreo de Classe B, os pilotos devem receber uma autorização do ATC, e as aeronaves devem estar equipadas com um rádio bidirecional operacional, ADS-B Out, capacidade de navegação adequada e um transponder operável com capacidade de reporte de altitude.

Por fim, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe que as operações sob DFR sejam permitidas em todas as classes de espaço aéreo (A, B, C, D, E, G) sem requerer espaço aéreo segregado. Para entrar nas Classes A, B, C e D, mantém-se o requisito de estabelecer comunicações bidirecionais com o ATC antes da entrada, propondo que inicialmente isto seja feito com comunicações de voz, evoluindo para um mecanismo de reconhecimento automático de dados.

## 6.4 Requisitos de certificação de veículos e operadores

Os requisitos de certificação para veículos e operadores de AAM/UAM são um tema central e complexo nos documentos analisados, com diferentes autoridades reguladoras adotando abordagens distintas. O documento da ANAC confirma que o processo de certificação de tipo para eVTOLs é complexo, caro e um grande desafio para as startups, destacando o envolvimento da agência na certificação do eVTOL EVE-100. Para os operadores, identifica a certificação como operador aéreo (equi-





valente à Part 135 dos EUA) como outro desafio significativo. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) atribui explicitamente a competência para a certificação de aeronaves à ANAC, enquanto a certificação dos Provedores de Serviço UAM (PSU) será de responsabilidade do DECEA, segundo regras a serem publicadas.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) estabelece que os operadores de aeronaves UAM serão certificados sob a 14 CFR Parte 135 ou Parte 121 nos EUA (Office of the Federal Register, 2025). As aeronaves UAM devem atender aos requisitos de aeronavegabilidade definidos pelo regulador, possuir um Certificado de Tipo e a segurança cibernética será um requisito fundamental, seguindo os padrões RTCA DO-326A (RTCA, Inc., 2014) e DO-356A (RTCA, Inc., 2018). A FAA, no seu *ConOps* (FAA, 2023b), detalha que a agência desenvolve ou modifica regulamentos para apoiar as operações UAM, sendo necessários esforços significativos para revisar regras e material de orientação (como as 14 CFR Parts 135, 91, 23, 25, 27, 29) (Office of the Federal Register, 2025). A FAA reserva o direito de aumentar os requisitos de desempenho operacional da aeronave para otimizar a capacidade do espaço aéreo. De acordo com o *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), espera-se que as aeronaves AAM sejam certificadas como “classe especial” sob 14 CFR § 21.17(b) (Office of the Federal Register, 2025), utilizando muitos dos regulamentos da Parte 23 (Office of the Federal Register, 2025) como base, e que os operadores comerciais sejam certificados sob a Parte 135 (Office of the Federal Register, 2025). Os pilotos de aeronaves *powered-lift* devem ter qualificação (*type rating*) para cada aeronave e atender aos requisitos atualizados da Parte 135 (Office of the Federal Register, 2025). O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) também menciona a necessidade de desenvolvimento ou atualização de orientações de suporte, como *Advisory Circulars* e processos para emissão de Certificados de Operador Aéreo, além de propor uma expansão dos requisitos para *Safety Management System* (SMS). No que diz respeito ao ruído, qualquer requerente que busque um certificado de tipo para sua aeronave nos EUA deve cumprir com os requisitos de padrão de ruído da parte 36 do CFR como parte do processo de certificação.

No contexto do U-space da União Europeia, os USSP devem ser certificados para fornecer serviços em espaços aéreos U-space específicos. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) estabelece um regime de certificação obrigatório para os USSP e para o prestador único de serviços de informação comum, com condições rigorosas que incluem a demonstração de capacidade de prestar serviços de forma segura, a implementação de um sistema de gestão de segurança, a existência de um plano de contingência e a robustez financeira comprovada. É também mencionada a importância da infraestrutura de confiança (*Trust Framework*) da ICAO e da utilização de *Public Key Infrastructure* (PKI) para garantir a segurança e





autenticidade nas trocas de dados entre participantes do U-space.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) afirma que as aeronaves AAM requerem certificação de tipo baseada em normas de aeronavegabilidade que considerem a diversidade de *design* e operação, e que o JCAB está revisando os regulamentos para permitir o início das operações em 2025. Operadores que realizam serviços de transporte aéreo devem obter uma licença comercial e a aprovação dos documentos para os procedimentos operacionais. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) delinea, de forma geral, que a autoridade de segurança será responsável pela definição de padrões mínimos e pela certificação de aeronaves UAM, operadores aéreos e vertiportos, bem como pelo licenciamento de pilotos e outro pessoal. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) descreve uma evolução em três fases para os requisitos de certificação, desde a adaptação de políticas para aeronaves híbridas na fase inicial, passando pela atualização das definições de aeronaves e estabelecimento de padrões de desempenho na fase de progresso, até a consolidação dos requisitos em um conjunto unificado de regulamentos na fase avançada. Para os pilotos, a transição ocorre de pilotos humanos a bordo na fase inicial, para licenças de piloto/operador remoto na fase de progresso, até a substituição da necessidade de pilotos humanos a bordo por níveis mais altos de automação na fase avançada.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) atribui a responsabilidade pela certificação de veículos e operadores à autoridade de aviação civil nacional, que terá o mesmo papel que exerce hoje para o sistema de aviação como um todo, sendo responsável pela certificação de todos os elementos considerados relacionados com a segurança. No entanto, o documento observa que, em muitos casos, os requisitos de certificação para sistemas de gestão de tráfego ainda serão definidos. Por fim, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) não detalha especificamente os requisitos de certificação, mas estabelece que serão necessárias qualificações pré-requisito para os operadores DFR, incluindo equipamento, formação e outros requisitos determinados pelos reguladores. A automação de separação, em particular, será certificada para a função de separação de tráfego, e o caminho para a certificação envolverá o desenvolvimento dos elementos essenciais do *Digital Flight* e a geração de artefatos operacionalmente derivados, com a análise de segurança sendo um facilitador crítico.

## 6.5 Responsabilidades e papéis regulatórios

A distribuição de responsabilidades e papéis regulatórios no ecossistema AAM/UAM é claramente definida nos diversos documentos, com uma divisão de funções entre





autoridades reguladoras, prestadores de serviços de navegação aérea e novos atores. No Brasil, o documento da ANAC estabelece uma divisão clara: a ANAC é responsável pela regulação de aeronaves, infraestrutura (aeródromos), operações de linha aérea, incluindo manutenção e pessoal, enquanto o DECEA é responsável pela regulação do espaço aéreo, incluindo controle de tráfego, procedimentos de voo e acesso. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) reforça esta divisão, acrescentando que o DECEA atua como autoridade de *Air Traffic Services* (ATS), regulador e provedor de serviços de navegação aérea, sendo responsável por definir os espaços aéreos UAM, estabelecer requisitos e certificar os PSU. A ANAC (ANAC, 2023) mantém sua responsabilidade pela certificação de aeronaves e pilotos e pela definição da capacidade vertiportuária. A atuação colaborativa entre DECEA e ANAC é destacada como condição indispensável para a implementação da UAM no Brasil.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) identifica a FAA como a autoridade reguladora primária nos EUA. A FAA realiza funções regulatórias, de ATC e de troca de dados para a UAM, devendo aprovar as COPs para garantir a segurança e o acesso equitativo. Os operadores UAM são responsáveis pela conformidade regulatória e por todos os aspectos da execução da operação, enquanto os PSUs atuam como provedores primários de serviços e dados e como interface entre o ecossistema UAM e a FAA. No *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), a FAA reafirma sua autoridade única e exclusiva sobre todos os aspectos de segurança da aviação na integração da AAM, incluindo regras operacionais, certificação de aeronaves e de pilotos, desenvolvendo e processando todas as certificações, políticas e atividades regulatórias.

Na União Europeia, o quadro do U-space distribui as responsabilidades por várias entidades. A autoridade competente de um Estado-Membro é responsável por estabelecer a estrutura do espaço aéreo, designar os espaços aéreos U-space e supervisionar o cumprimento dos regulamentos. Os USSPs são entidades certificadas que fornecem os serviços U-space mandatórios. Pode ser designado um CISP para fornecer informações de base de forma exclusiva, ou esta função pode ser distribuída entre os USSPs. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) detalha que as autoridades competentes dos Estados-Membros são responsáveis pela supervisão e aplicação do regulamento, incluindo tarefas como estabelecer um sistema de registo para os prestadores de serviços certificados e realizar auditorias e inspeções.

No *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), o JCAB (Japan Civil Aviation Bureau) possui uma dupla função, atuando tanto como regulador, responsável pela certificação de todos os elementos relacionados à segurança (aeronaves, tripulação, vertiportos), quanto





como Prestador de Serviços de Navegação Aérea (ANSP), coordenando o movimento das aeronaves no espaço aéreo controlado. Está planejado que o ANSP (JCAB) forneça os serviços UATM. O documento também cita a importância de autoridades locais e reguladores de outras áreas, como avaliação ambiental e telecomunicações.

Na Coreia do Sul, o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) atribui a autoridade máxima e reguladora ao Korea Office of Civil Aviation, que é dividido em funções de autoridade de política e autoridade de segurança. A autoridade de segurança tem o papel central de desenvolver e fazer cumprir os regulamentos de segurança para aeronaves, vertiportos e sistemas de informação. O UATMSP age como um provedor de serviços regulado, responsável por implementar as regras no âmbito operacional, aprovando planos de voo e monitorando a conformidade. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) identifica o *Ministry of Land, Infrastructure and Transport* (MOLIT) como a agência de aprovação para todas as operações de aviação, pessoal e sistemas, responsável por definir políticas e regular o projeto, construção e operação de vertiportos e sistemas operacionais. Introduce, ainda, a figura do *AAM Air Traffic Management Service Provider* (AATMSP), um provedor de serviços que troca informações entre as partes interessadas e pode ter autoridade para agendar, coordenar e monitorar voos.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) define que a agência de aviação civil nacional é o regulador principal para a certificação de todos os elementos relacionados com a segurança, tendo o mesmo papel para o sistema de aviação como um todo. O ANSP fornece serviços de navegação aérea e, dependendo do mandato, pode acomodar operações UAM através da prestação de serviços de ATM, podendo as funções da autoridade de gestão de tráfego para o ambiente UAM serem executadas pelo ANSP ou delegadas a uma organização da indústria. O documento também salienta a importância de funções claras para a gestão do ruído e para o planejamento territorial relativamente aos vertiportos.

Finalmente, o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) afirma consistentemente que o operador da aeronave é a entidade responsável pela segurança da trajetória de voo, incluindo a separação de tráfego, sob o modo DFR, podendo delegar a função de “separador de tráfego” à automação certificada, mas mantendo a responsabilidade final. O papel das autoridades reguladoras, como a FAA, é estabelecer as regras, padrões de desempenho e meios de conformidade, e supervisionar a certificação. O documento também prevê um papel para prestadores de serviços de terceiros, que podem ser entidades governamentais ou comerciais que auxiliam os operadores no cumprimento dos requisitos operacionais.





## 7 Tecnologias de Suporte

Com base na análise comparativa dos documentos, as tecnologias de suporte para a integração segura e eficiente da AAM/UAM podem ser categorizadas nas seguintes áreas fundamentais: CNS, compartilhamento de dados e informações, e automatização e uso de Inteligência Artificial (IA). Os documentos demonstram consenso sobre a dependência crítica de infraestrutura CNS robusta e evoluída. A comunicação inicialmente se baseará em voz e rádio tradicional - *Very High Frequency* (VHF), com uma transição clara e uniformemente prevista para datalink digital de baixa latência e alta capacidade, destacando-se as redes Quinta Geração de Telecomunicações Móveis (5G) e, prospectivamente, Sexta Geração de Telecomunicações Móveis (6G), bem como enlaces satelitais. Estas redes não só suportarão a troca de dados entre aeronaves e infraestrutura (V2V, V2I), mas também atuarão como complemento de navegação em áreas urbanas de difícil cobertura.

Para a navegação, o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) é estabelecido como o sistema primário em todos os conceitos operacionais. No entanto, é amplamente reconhecida a sua vulnerabilidade em cânions urbanos, o que leva à necessidade de sistemas de augmentação, como *Satellite-Based Augmentation System* (SBAS) e *Ground-Based Augmentation System* (GBAS), e de *Performance-Based Navigation* (PBN) com requisitos de alta precisão, como RNP 0.3 ou melhor. A redundância e resiliência é frequentemente buscada através da integração de *Inertial Navigation System* (INS) e, em visões mais avançadas, de navegação relativa baseada em sensores.

No domínio da vigilância, o ADS-B é amplamente citado como uma tecnologia fundamental, especialmente o ADS-B Out para a transmissão da posição da aeronave. Documentos como o *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023), o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) alertam para as limitações da vigilância por radar em baixas altitudes e para a potencial saturação da frequência 1090 MHz em ambientes de alta densidade. Como solução, a vigilância cooperativa baseada na troca de dados de posição via redes (como a identificação em rede no U-space) é proposta como a base para a consciência situacional, complementada por capacidades de DAA que podem ser baseadas na aeronave, no solo ou híbridas.

O compartilhamento de dados e informações em tempo real é unanimemente tratado como a espinha dorsal do ecossistema AAM/UAM. A interoperabilidade é garantida





através de arquiteturas e princípios como o *System-Wide Information Management* (SWIM), que permitem a troca de dados entre todas as partes interessadas, incluindo provedores de serviços, como os PSUs, o ANSP e operadores. Dados essenciais compartilhados incluem planos de voo, intenção de trajetória em 4D, posição em tempo real, condições meteorológicas, disponibilidade de vertiportos e restrições de espaço aéreo. Documentos como o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) enfatizam o papel de uma rede federada de serviços para facilitar esse intercâmbio de dados. A qualidade, integridade, segurança e baixa latência dos dados são frequentemente destacadas como críticas.

A automatização é um pilar central em todos os documentos, evoluindo de funções assistidas para operações autônomas. São descritos vários níveis de interação humano-máquina, como *Human-over-the-loop* (HOVTL), *Human-on-the-loop* (HOTL) e *Human-within-the-loop* (HWTL). Os serviços automatizados abrangem desde a aprovação estratégica de planos de voo e desconflito, monitoramento de conformidade de trajetórias, gestão dinâmica de capacidade e slots de vertiportos, até a resolução tática de conflitos e execução automática de planos de voo. O conceito europeu U-space, por exemplo, institui serviços de autorização de voo e monitoramento de conformidade totalmente automatizados.

Embora o termo “Inteligência Artificial” não seja explicitamente detalhado em todos os documentos, as suas aplicações são implicitamente descritas como facilitadoras para a autonomia. Serviços como otimização de rotas, previsão de conflitos, análise de grandes volumes de dados meteorológicos e a própria automação de separação (como detalhado no documento “*Digital Flight*”) dependem de algoritmos complexos e processamento de dados em tempo real, que são domínios naturais para a IA e o *Machine Learning* (ML). O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) é um dos que propõem explicitamente a IA/ML para otimização de rotas, previsão de conflitos e desenvolvimento de novos produtos de meteorologia.

Em resumo, a integração segura e eficiente depende da convergência e maturação de um conjunto de tecnologias digitais e conectadas: infraestrutura CNS resiliente e de alta performance, ecossistemas de dados abertos e interoperáveis que permitem a consciência situacional compartilhada, e sistemas altamente automatizados e eventualmente autônomos que gerenciem a complexidade operacional em ambientes urbanos de alta densidade. A cibersegurança é transversalmente reconhecida como um requisito fundamental para todas estas camadas tecnológicas.





## 7.1 Comunicação, Navegação e Vigilância (CNS)

Com base na análise comparativa dos documentos, as tecnologias de CNS são universalmente reconhecidas como a infraestrutura fundamental para a integração segura das operações de AAM/UAM. No domínio da Comunicação, existe uma visão comum de uma trajetória evolutiva. As operações iniciais, como detalhado no *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) e no *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023), como ilustrado na Figura 7.1, dependerão de sistemas de rádio VHF tradicionais para a comunicação piloto-controlador por voz. No entanto, a transição para comunicações digitais baseadas em datalink é um objetivo explícito em praticamente todos os documentos.

Functional Element	Function Description	Performance Needs	Systems
Vehicle-to-Vehicle Communication	Enables direct air-to-air communication between AAM aircraft.	Real-time, low-latency, reliable	DSRC, Cellular Networks
Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication	Facilitates communication between AAM aircraft and ground infrastructure such as AATMSP and AAM Operators.	Secure, low-latency, bidirectional	DSRC, Cellular Networks
Ground Control Station (GCS) Communication	Enables communication with AAM aircraft through remote pilot systems installed within the GCS.	Reliable, low-latency, bidirectional	Data Link Communication Systems, Satcom, Cellular Networks
Pilot to Air Traffic Control (ATC) Communication	Facilitates communication between AAM pilots and air traffic control authorities.	Real-time, clear, secure	VHF/UHF Radios, Satcom, Cellular Networks, Data Link Communication Systems
Ground System Communications	Enables exchange of information between AATMSP, Air Traffic Control, Vertiport operators, and other stakeholders connected to landline communication systems.	Secure, reliable, multicast	Ethernet

Figura 7.1: Sistemas de comunicação necessários para AAM. Fonte: Incheon Metropolitan City (2023).

A tecnologia 5G (e potencialmente 6G) é destacada pelo *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023), pelo *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e pelo *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) como um facilitador crucial para suportar a troca de grande volume de dados em tempo real entre aeronaves e infraestrutura (V2V, V2I), complementando até mesmo o posicionamento em zonas de sombra do *Global Positioning System* (GPS). O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) também enfatizam a necessidade de redes de comunicação seguras, distribuídas e determinísticas, que podem incluir infraestruturas terrestres e satelitais. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) e o *Relatório Técnico Di-*





*digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) preveem a evolução para comunicações sem voz, baseadas em VoIP e mecanismos de reconhecimento automático, para lidar com a carga de comunicação em operações de alta densidade.

Quanto à Navegação, o GNSS é estabelecido como a tecnologia primária em todos os conceitos operacionais, desde o *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) e o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) até o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021). No entanto, é amplamente reconhecida a sua vulnerabilidade em ambientes urbanos, onde o bloqueio de sinais por edificações é um desafio significativo, conforme apontado pelo *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) e pelo *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023). Para garantir precisão e resiliência, o PBN com requisitos rigorosos, como RNP 0.3 ou melhor, é frequentemente citado, como no *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024). A maioria dos documentos, incluindo o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023), prevê o uso de sistemas de aumentação, como o SBAS para rotas e o GBAS ou *Differential GNSS* (DGNSS) para aproximações e pousos em vertiportos. A redundância é uma preocupação central, com o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) defendendo a utilização de soluções de posicionamento de múltiplas fontes, como a integração de sistemas de INS, para mitigar falhas do GNSS.

No que diz respeito à Vigilância, o ADS-B é amplamente mencionado como uma tecnologia-chave, especialmente o ADS-B Out, para que as aeronaves transmitam sua posição. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a), e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) referem-se explicitamente ao seu uso. Contudo, limitações críticas são identificadas em vários documentos. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) alertam que a vigilância por radar é inviável em baixas altitudes urbanas e que a saturação da frequência de 1090 MHz do ADS-B se tornará um problema com o aumento da densidade de tráfego. Como solução principal para a vigilância em ambientes UAM de alta densidade, surge o conceito de vigilância cooperativa baseada em troca de dados de rede. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) é explícito ao afirmar que a vigilância é predominantemente dependente do serviço de Identificação em Rede, que recebe relatórios de posição das aeronaves. De forma similar, o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) propõe que a informação de vigilância dentro dos corredores seja primariamente obtida através de um sistema de reporte baseado na rede de comunicação móvel comercial, usando o ADS-B como redundância crítica. A vigilância não cooperativa por meio de sensores a bordo (LIDAR, radar, câmeras) ou baseados no solo é vista como um complemento necessário para capacidades de DAA e para preencher





lacunas, conforme mencionado no *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) e no *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022).

## 7.2 Compartilhamento de dados e informações

Com base na análise comparativa dos documentos, o compartilhamento de dados e informações, particularmente em tempo real, é unanimemente apontado como a espinha dorsal e um pilar central para a operação segura e eficiente dos ecossistemas de AAM/UAM. A necessidade de um ambiente colaborativo e rico em informação é uma constante, com a interoperabilidade entre todos os atores sendo um requisito fundamental. Para viabilizar isso, a maioria dos documentos referencia arquiteturas e conceitos de troca de informação padronizados. O SWIM é explicitamente proposto pelo *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) e mencionado no *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) e no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) como um meio de evoluir do intercâmbio de informações ponto-a-ponto para a interoperabilidade em todo o sistema. De forma equivalente, a rede federada de serviços, composta por provedores de serviços conectados, é detalhada no *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) e no *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) como o mecanismo para disponibilizar dados para a FAA, operadores e outras entidades conforme necessário.

O papel de um hub centralizador para a agregação e distribuição de dados é destacado em vários conceitos operacionais. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) introduzem a figura do Provedor de Serviços de Gerenciamento de Tráfego Aéreo – UATMSP ou AATMSP, que atua como o centro nevrálgico para a troca de informações entre as partes interessadas. De maneira similar, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) descreve os IOPs, que agregam informações operacionais em tempo real para operadores e gestores de vertiporto, podendo ser centralizados ou descentralizados. Os *Common Information Service* (CIS) previstos no conceito europeu U-space e a interface Ecossistema UAM (ECO-UAM) prevista no *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) cumprem funções análogas, servindo como interfaces de troca de dados entre sistemas de diferentes entidades.

Os tipos de dados compartilhados são extensos e críticos para a consciência situacional. De acordo com os documentos, isso inclui dados de voo, como planos de voo, posição em tempo real (muitas vezes via ADS-B) e intenção de trajetória; dados de restrição, como a disponibilidade de espaço aéreo, rotas ativas e informações de espaço aéreo especial; e dados de suporte, como terreno, obstáculos, disponibilidade de vertiportos, informações meteorológicas especializadas e alertas de cautela





cibernética. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) aprofunda-se nos requisitos para a função de separação, especificando o compartilhamento em tempo real de três conjuntos de informação entre aeronaves: estado da aeronave, intenção de trajetória (em curto, médio e longo prazo) e desempenho de navegação pretendido.

A qualidade e a segurança dos dados são preocupações transversais. O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) e o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) enfatizam a necessidade de dados com níveis especificados de qualidade, latência, integridade e proteção. Mecanismos como a PKI para gestão de identidades e confiança, mencionada no U-space, e a rastreabilidade dos dados para garantir autenticidade, mencionada no *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), são considerados essenciais para um compartilhamento seguro e confiável. Embora o foco seja no compartilhamento em tempo real para suportar a operação dinâmica, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) também faz referência ao compartilhamento de dados offline ou pré-carregados, por meio de TSP que fornecem dados aeronáuticos validados e produtos de dados necessários para o planejamento de voo.

### 7.3 Automatização e uso de IA

Com base na análise comparativa dos documentos, a automatização é reconhecida como um elemento crítico e um princípio fundamental para a viabilidade operacional da AAM/UAM, com a IA atuando como um facilitador tecnológico subjacente para muitas das funções complexas descritas. Os documentos delineiam uma evolução clara nos níveis de automação, partindo de uma operação humana assistida por máquina em direção a operações autônomas. Vários conceitos, incluindo o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) e o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), descrevem esta progressão através de categorias como HWTL, onde o humano mantém controle direto; HOTL, com supervisão humana; e HOVTL, onde o humano é notificado para ação, sendo este último um estado almejado para operações maduras, permitindo, por exemplo, a supervisão multi-veículo mencionada pela Boeing.

A aplicação da automatização é vasta e abrange serviços estratégicos e táticos. Um serviço universalmente citado é a automatização do planejamento e autorização de voo. O conceito U-space estabelece um serviço de autorização de voo que verifica automaticamente a existência de conflitos antes da ativação, funcionando como um sistema automatizado de desconflito estratégico. Serviços de otimização de rotas,





como o *U-plan Preparation/Optimization* do U-space e as ferramentas sofisticadas assumidas nesse documento, são projetados para ajudar os operadores a desenvolver planos de voo ideais. No estado maduro, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) prevê que o planejamento de voo e os serviços de separação serão totalmente automatizados no âmbito das AFO.

No nível tático, a automação de separação e resolução de conflitos é um pilar. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) dedica-se extensivamente ao elemento essencial “Automação de Separação”, descrevendo-a como a ferramenta que detecta conflitos, determina o ônus da manobra, calcula alterações de trajetória e coordena manobras com outros usuários do espaço aéreo. Serviços como o de Resolução Tática de Conflitos do U-space e o de Monitoramento de Conformidade, que identifica automaticamente veículos não conformes, são outros exemplos de funções táticas automatizadas. A gestão dinâmica de capacidade e slots, mencionada no U-space e no *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), atua automaticamente sobre os planos de voo para aplicar medidas que equalizem a demanda e a capacidade disponível.

Embora o termo “Inteligência Artificial” não seja explicitamente detalhado em todos os documentos, as suas aplicações são implícitas em serviços que requerem processamento complexo de dados e tomada de decisão. O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) é um dos mais diretos, propondo explicitamente a IA e o ML para a otimização de rotas e previsão de conflitos, integrando-os na arquitetura. O mesmo documento sugere a IA para a área de meteorologia, integrando grandes volumes de dados observados e previstos para desenvolver produtos meteorológicos mais precisos e com menor lapso temporal. Além disso, a análise de dados registrados para identificar situações de alto risco e adaptar parâmetros futuros, como mencionado no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), é uma aplicação clássica de técnicas de IA e ML. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) apresenta a IA de forma mais genérica, como uma tecnologia habilitadora para a função de “autonomia”, que visa melhorar a segurança e a confiabilidade.

A visão consolidada é que a escalabilidade do ecossistema AAM/UAM depende crucialmente da implementação de serviços digitalizados e automatizados. A automação não se limita ao gerenciamento de tráfego, estendendo-se também a sistemas de aeronaves, como a gestão autônoma da estabilidade do veículo (HOVTL) descrita pelo *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), e a vertiportos, com sistemas que automatizam o balanceamento de capacidade e demanda e a alocação de zonas de pouso. A evolução para comunicações sem voz, prevista pelo *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) e pelo *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022), é outro exemplo de como a au-





tomação substituirá funções humanas tradicionais para suportar operações de alta densidade.

## 7.4 Observações Adicionais

Além das tecnologias centrais de CNS, compartilhamento de dados e automação, os documentos abordam outras informações relevantes sobre tecnologias de suporte ao ecossistema AAM/UAM. A cibersegurança emerge como uma preocupação transversal e crítica, mencionada de forma explícita em vários documentos. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) e o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) destacam a necessidade de conformidade com padrões de segurança como os *RTCA DO326A* (RTCA, Inc., 2014) e *RTCA DO356A* (RTCA, Inc., 2018), enfatizando a importância de uma arquitetura “seguramente concebida” que inclua encriptação, autenticação e gestão de identidades através de infraestruturas de PKI. O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) também enfatiza a segurança cibernética das comunicações, incluindo a necessidade de considerar criptografia e mitigação de ataques maliciosos.

A resiliência operacional e a gestão de contingências são outro tema recorrente. Vários documentos, como o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), descrevem a necessidade de mecanismos robustos para lidar com condições excepcionais, degradação de desempenho dos serviços e falhas tecnológicas. Isto inclui a previsão de processos de contingência, ramos de emergência operacional e a possibilidade de um ator central confiável intervir em algumas situações. A redundância é um princípio aplicado, por exemplo, no *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), que prevê o uso do ADS-B como um sistema de vigilância crítico para emergências, caso a aeronave saia do corredor UAM.

A integração com infraestruturas urbanas mais amplas e o uso de tecnologias de simulação também são mencionados. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) propõe a integração da AAM na sua rede de Cidade Inteligente, utilizando um *digital twin* (gêmeo digital) para gerir operações AAM, otimizar horários e realizar análises sofisticadas. Por fim, os documentos também chamam a atenção para as limitações dos sistemas atuais. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) apontam explicitamente a insuficiência da cobertura e da capacidade da infraestrutura CNS tradicional para operações UAM de alta densidade, justificando, assim, a necessidade de desenvolvimento tecnológico. O *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) e o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) também levantam considerações sobre fatores intrínsecos às aéro-





naves, como a interação aerodinâmica com edifícios e as características da esteira de turbulência, que impactam diretamente a integração operacional e a segurança.





## 8 Casos de Uso e Cenários Operacionais

Com base na análise dos documentos, os casos de uso prático para AAM/UAM abrangem uma variedade de aplicações, sendo o transporte de passageiros e carga os propósitos centrais. As operações urbanas (UAM) focam no transporte de curta distância e baixa altitude dentro de ambientes metropolitanos, enquanto as operações regionais (RAM) envolvem voos de maior alcance, conectando cidades ou regiões, por vezes com fase de cruzeiro em altitudes mais elevadas.

Dentro do contexto urbano, os casos de uso mais frequentemente citados incluem o táxi aéreo urbano (*urban air taxi*) para transporte intraurbano e o transporte para aeroportos (*airport shuttle*), visando evitar congestionamentos e oferecer uma opção de transporte eficiente. Documentos como o *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) (Figura 8.1), o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) detalham estes cenários. A evolução esperada começa com operações iniciais em rotas pré-definidas, como conexões entre aeroportos e centros urbanos, expandindo-se posteriormente para uma rede mais complexa dentro da área metropolitana.

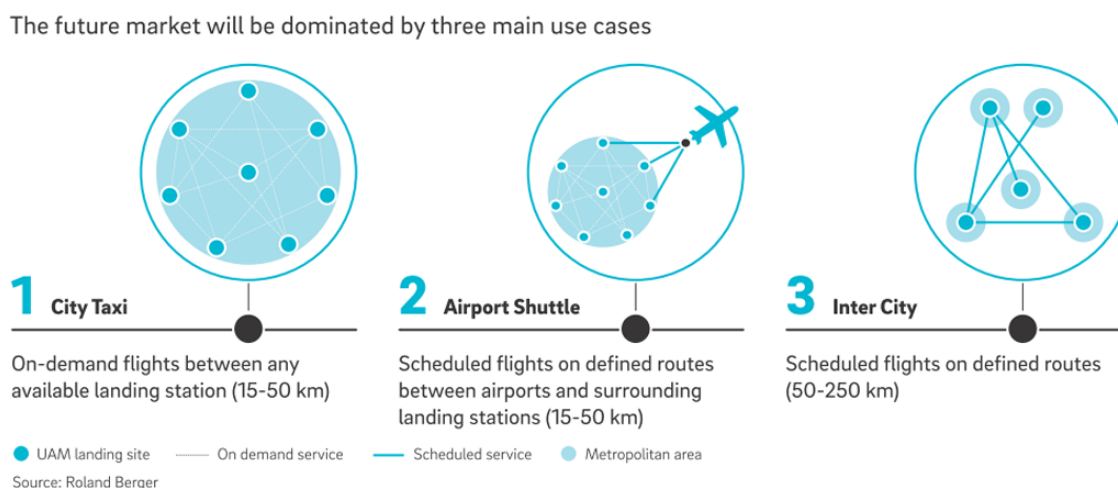


Figura 8.1: Casos de uso típicos para UAM. Fonte: ANAC (2023).

Para além do transporte regular de passageiros, vários documentos destacam aplicações de utilidade pública e emergência. Estes casos incluem o transporte médico de emergência, como o deslocamento rápido de pacientes ou profissionais de sa-





úde entre hospitais, o transporte de órgãos ou suprimentos médicos urgentes, e a resposta a desastres, incluindo o combate a incêndios e operações de busca e salvamento. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) enfatizam estes usos, notando que aeronaves de emergência podem necessitar de considerações de projeto especiais e acesso prioritário ao espaço aéreo, podendo operar a partir de locais não convencionais como autoestradas ou heliportos existentes.

No domínio do transporte de carga, a AAM é vista como uma extensão da entrega por drones, evoluindo para uma escala maior. Os casos de uso incluem a logística comercial entre empresas (B2B), o acesso a locais remotos ou de difícil acesso, como ilhas ou áreas montanhosas, e a distribuição de bens perecíveis ou encomendas urgentes. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) ilustram a conectividade melhorada para ilhas, enquanto o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) e o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) citam exemplos como a entrega farmacêutica e o abastecimento de cadeias de suprimentos.

Outros casos de uso mencionados, como no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), incluem operações de inspeção, como o mapeamento aéreo e a vigilância de infraestruturas (linhas de energia, por exemplo), e operações de fotografia. O turismo e entretenimento, através de voos panorâmicos, também são citados como casos de uso iniciais por alguns atores, como a *Airbus*.

A natureza das operações pode ser programada, com horários pré-definidos para otimizar a utilização da infraestrutura, ou sob demanda (*on-demand*), ativada através de aplicações móveis, assemelhando-se a serviços de mobilidade terrestre. A evolução geralmente começa com voos programados, evoluindo para uma maior proporção de serviços sob demanda à medida que a frota e a maturidade operacional aumentam. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) abordam explicitamente esta dualidade.

Em resumo, os casos de uso para AAM/UAM são diversos, evoluindo de aplicações iniciais focadas em transporte de passageiros em ambientes urbanos para uma gama mais ampla que inclui carga, serviços de emergência, utilidade pública e conectividade regional, com a operação podendo ser tanto programada quanto sob demanda.





## 8.1 Operações urbanas (UAM) e regionais (RAM)

A AAM é consistentemente definida como um termo abrangente que engloba tanto a UAM quanto a RAM. A UAM é descrita como um subconjunto da AAM que se concentra em operações de baixa altitude dentro de ambientes urbanos e metropolitanos, tipicamente envolvendo distâncias curtas. Em contraste, a RAM refere-se a operações de mais longo alcance, conectando cidades ou regiões, com sua fase de cruzeiro ocorrendo em altitudes mais elevadas do que as operações UAM.

O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) estabelece esta distinção desde o início, definindo AAM como o termo abrangente e apresentando casos de uso para UAM, como táxi aéreo urbano e transporte para aeroportos, e para RAM, como voos entre cidades próximas. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) confirma que a UAM é um subconjunto da AAM, operando em baixas altitudes urbanas. O documento do Comitê Público-Privado para AAM detalha que a UAM se refere a operações de curta distância e baixa altitude, enquanto a RAM se refere a operações de longo alcance, de algumas centenas de quilômetros.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) reconhece a AAM como um tema mais abrangente que inclui a UAM e a RAM, mas declara explicitamente que a sua ênfase principal é o desenvolvimento relacionado à UAM. Já o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), exemplifica a RAM como operações para locais a mais de 100 km de distância, transportando passageiros e carga para regiões vizinhas, ilustrando com um voo de um residente de uma ilha para a cidade de Incheon, que inclui um segmento sobre águas abertas.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) caracteriza a UAM como focada em operações urbanas a vários milhares de pés de altitude, geralmente orientada para missões intraurbanas, enquanto a AAM abrange também conceitos emergentes como a entrega autônoma de carga regional, que se enquadraria no âmbito da RAM. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) também menciona que as operações UAM podem incluir espaço aéreo fora de um ambiente urbano, indicando uma certa sobreposição entre os conceitos.

Em síntese, a comparação entre UAM e RAM nos documentos revela uma divisão clara baseada no ambiente operacional, altitude e distância. A UAM é predominantemente urbana e de curto alcance, enquanto a RAM expande o serviço para ligações regionais de maior distância e altitude, sendo ambas partes integrantes do ecossistema mais amplo da AAM.



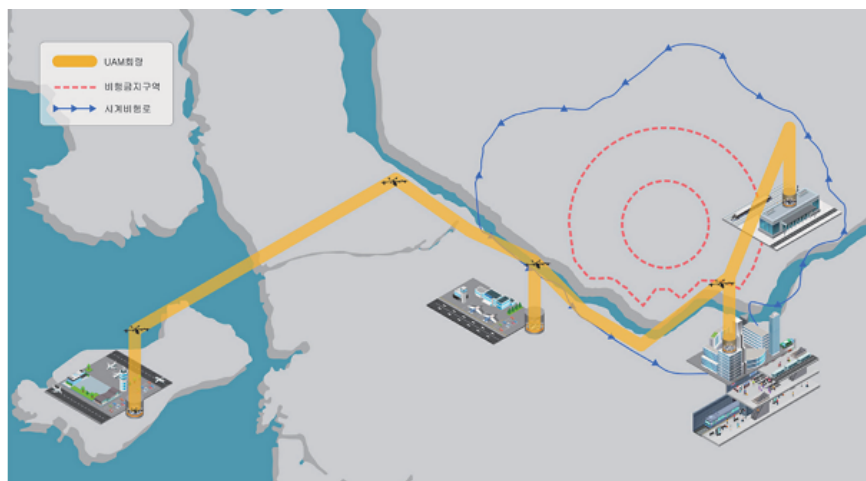


Figura 8.2: Exemplo de concepção de uso inicial de rota de helicóptero para operações UAM em *Han River Helicopter Corridor*. Fonte: UAM Team Korea (2021).

## 8.2 Transporte de passageiros ou carga

Com base na análise dos documentos, o transporte de passageiros e carga constitui a finalidade central e primordial da AAM/UAM. A maioria dos documentos, incluindo o *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023), o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024), o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), o *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023), identifica explicitamente o movimento de pessoas e mercadorias como o propósito principal dessas operações. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) exemplifica um caso de uso na Figura 8.2.

O foco inicial é predominantemente no transporte de passageiros, com casos de uso detalhados como táxi aéreo urbano, shuttles para aeroportos e voos entre cidades. No entanto, o transporte de carga é igualmente reconhecido como uma finalidade fundamental. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) menciona que a AAM se volta para o transporte de “carga e passageiros” de forma geral, salientando que a autonomia deve evoluir primeiro para voos cargueiros. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) definem a UAM como um sistema para o transporte de passageiros ou cargas.

Para além destes usos comerciais gerais, os documentos detalham uma gama mais ampla de finalidades especializadas, particularmente para carga e serviços de utilidade pública. O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) e o *ConOps de Incheon* (Incheon Me-



tropolitan City, 2023) listam aplicações como logística comercial (B2B), entrega de carga em áreas remotas e acesso a ilhas. As finalidades de emergência e serviço público são amplamente destacadas, incluindo o *Emergency Medical Transport* (EMT), o transporte de órgãos, a resposta a desastres, o combate a incêndios e operações de busca e salvamento. A Airbus é citada no *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) por incluir emergências médicas e turismo nos seus casos de uso iniciais.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) fornece exemplos práticos que vão além do transporte puro, abrangendo operações de inspeção, como fotografia arquitetônica e vigilância de linhas de energia, e entrega farmacêutica. O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) também menciona serviços de utilidade pública, como assistência médica de emergência, busca e vigilância. De um modo geral, os documentos preveem que a AAM não substituirá os sistemas de transporte existentes, mas sim que funcionará como um método complementar, oferecendo uma nova opção para evitar congestionamentos, melhorar a acessibilidade a localidades remotas e reduzir o tempo de resposta a emergências.

### 8.3 Voos programados e *on-demand*

As operações de AAM/UAM serão conduzidas tanto como voos programados (*scheduled*) quanto sob demanda (*on-demand*), sendo que a natureza da operação é frequentemente associada ao caso de uso específico. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) é explícito ao atribuir cada modalidade: os táxis aéreos urbanos são tipicamente operados sob demanda, enquanto os serviços de transporte para aeroportos e os voos entre cidades são caracterizados como programados. Esta dualidade é confirmada por outros documentos, como o da Boeing, que descreve que os passageiros poderão comprar um lugar em um voo existente (programado) ou solicitar um novo voo através de uma aplicação (sob demanda).

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) introduz e enfatiza o conceito de *On Demand Mobility* (ODM), onde os serviços são oferecidos a pedido, tornando o serviço aéreo semelhante ao transporte terrestre em termos de redução do tempo entre a solicitação e o início do serviço. O documento estabelece que as operações no ambiente UAM poderão ocorrer de forma agendada ou sob demanda, se houver disponibilidade de meios. O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) ilustra esta diferença com exemplos contrastantes: um serviço de transporte de passageiros programado, com horários pré-definidos para otimizar a utilização do vertiporto, e um serviço de táxi aéreo ativado sob demanda através de uma aplicação móvel.





A visão da FAA, apresentada no ConOps (FAA, 2023b), corrobora que as operações UAM podem ser conduzidas como serviços programados ou serviços sob demanda via solicitação de um cliente individual ou operador intermodal. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) também menciona que as viagens podem ser planejadas com antecedência ou sob demanda, sendo que o operador da frota receberá encomendas de voos através de uma plataforma de reservas. A perspectiva de evolução, compartilhada por documentos como o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), indica que a operação inicial tenderá a ser realizada com voos programados, ocorrendo uma progressão natural para serviços *on-demand* à medida que a densidade da frota e a maturidade operacional aumentam. O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) projeta que as operações maduras incluirão voos programados, não programados e sob demanda, indicando uma coexistência de ambos os modelos num ecossistema maduro.

## 8.4 Voo tripulado, não tripulado e autônomo

A evolução das operações de AAM/UAM em relação ao controle da aeronave segue uma trajetória clara e consensual: partindo de voos tripulados, passando por operações não tripuladas supervisionadas remotamente, até atingir a autonomia total. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) prevê explicitamente esta evolução gradual, onde a fase inicial será de “voo pilotado”, com todas as operações iniciais assumindo a presença de um piloto, evoluindo depois para o desenvolvimento de tecnologias de voo autônomo, primeiro para carga e, posteriormente, para passageiros.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) detalha esta transição através de três estágios de maturidade. No estado inicial, as operações envolvem um piloto a bordo. No estado intermédio, ocorre a transição para operações não tripuladas, supervisionadas por um *Multi-Vehicle Supervisor* (MVS) baseado em solo. No estado maduro, prevê-se operações totalmente automatizadas (AFO). O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) corrobora esta visão, afirmando que as operações iniciais ocorrerão com piloto a bordo, enquanto as operações autônomas ou remotamente pilotadas são consideradas para estágios mais avançados de maturidade (UML-4 em diante).

A FAA, no seu ConOps (FAA, 2023b), descreve operações iniciais com um PIC a bordo, com uma evolução potencial para *Remote Pilot in Command* (RPIC). O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) especifica que, para esta fase inicial, as operações serão conduzidas com piloto a bordo. O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) salienta que muitos novos entrantes projetam um futuro sem pilotos a bordo, com aeronaves efetivamente autopilotadas, e que é precisamente para





permitir estas operações não tripuladas e autônomas que um novo modo operacional, como o *Digital Flight*, se torna necessário.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) estrutura a sua evolução em três fases: uma Fase Inicial com piloto a bordo, uma Fase de Progresso que introduz o conceito de piloto remoto, e uma Fase Avançada que prevê a introdução do voo autônomo sem piloto. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) segue uma progressão idêntica, começando com pilotos a bordo, transitando para operações remotamente pilotadas e evoluindo eventualmente para aeronaves autônomas. O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) descreve uma mistura de mecanismos de pilotagem ao longo dos seus três Horizontes UATM, desde veículos pilotados no Horizonte 1 até uma mistura de veículos pilotados e autônomos no Horizonte 3, que suporta operações de alta densidade. Em resumo, existe um amplo consenso entre os documentos de que a autonomia completa é um objetivo de longo prazo, precedido por uma fase de transição crítica com pilotos a bordo e, subsequentemente, com supervisão remota.

## 8.5 Cenários de operação nominal e off-nominal

Com base na análise dos documentos, os cenários operacionais para a AAM/UAM são meticulosamente planejados tanto para situações nominais (padrão) como off-nominal (fora do padrão), que incluem congestionamento, condições meteorológicas adversas e situações de contingência ou emergência. Os cenários nominais são descritos de forma sequencial e detalhada em documentos como o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) e o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), que dividem a operação em fases como agendamento, pré-voo, partida, voo em curso, aproximação e pouso, e pós-voo. Nestas operações padrão, o fluxo envolve a submissão e aprovação de um plano de voo, a sua execução por uma aeronave que navega autonomamente ao longo de uma trajetória autorizada, e o monitoramento contínuo por parte de supervisores remotos, gestores de tráfego aéreo e gestores de vertiportos, com o objetivo de assegurar uma operação previsível e eficiente.

Para cenários off-nominal, os documentos revelam uma preocupação central com a segurança e a robustez dos procedimentos. O congestionamento de tráfego é abordado através de serviços de gestão dinâmica de capacidade, como descrito no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), que atua para impor atrasos ou rerroteamentos quando a demanda excede a capacidade. As condições meteorológicas adversas são identificadas como um desafio significativo, particularmente para eVTOLs devido à sua suscetibilidade a fenômenos como rajadas de vento, *wind shear* e forma-



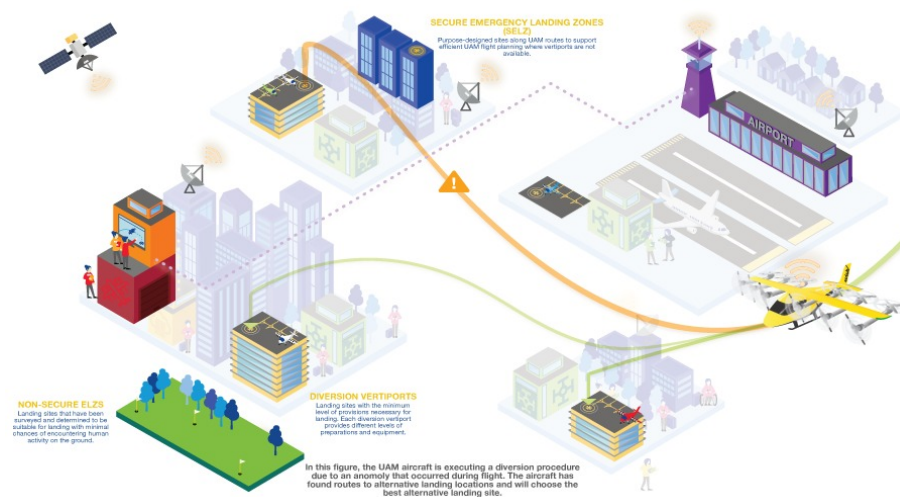


Figura 8.3: Rota de desvio em cenário off-nominal. Fonte: Boeing (2023).

ção de gelo. Vários documentos, incluindo o *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), o *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) e o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), destacam que as operações dependerão de serviços de informação meteorológica para autorizar voos e monitorar o cumprimento dos limites durante o voo, sendo que a operação em IMC é um marco para fases de maturidade mais avançadas.

As situações de contingência e emergência recebem uma atenção especial. O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) e o *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) detalham procedimentos robustos para lidar com falhas técnicas, perda de enlace de C2, emergências médicas a bordo ou indisponibilidade de infraestruturas. É universalmente enfatizada a necessidade de a aeronave ter a capacidade de executar procedimentos pré-programados automaticamente, como entrar num estado de contingência de *datalink* perdido, desviar para um local de pouso alternativo pré-planejado ou regressar ao ponto de decolagem, como ilustra a Figura 8.3. A disponibilidade de vertiportos de desvio e zonas de pouso de emergência ao longo das rotas é considerada crítica. Em caso de emergência, os serviços de gestão de emergências devem assistir o operador, permitindo o reporte, detectando a situação e alertando outras partes interessadas. A abordagem geral, conforme resumo no *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), é que os operadores devem planejar eventos off-nominal, incluindo a identificação de locais de pouso alternativos, e que os sistemas são projetados para reduzir o envolvimento tático do controle de tráfego aéreo através de protocolos off-nominal padronizados.



## 8.6 Estágios de evolução/maturidade

A evolução da AAM/UAM é universalmente estruturada em estágios ou fases de maturidade nos documentos analisados, que descrevem uma progressão desde operações iniciais simples até um ecossistema complexo e integrado. Vários documentos apresentam seus próprios modelos de evolução, mas compartilham uma trajetória comum centrada no aumento da densidade de tráfego, da complexidade operacional e do nível de automação.

O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) apresenta duas visões complementares. Uma, da Porsche Consulting, divide a evolução do táxi aéreo em duas fases: a Fase 1, a partir de 2025, denominada “*Make it happen*”, caracterizada por um mercado de luxo, baixos volumes e uso de infraestrutura existente; e a Fase 2, a partir de 2035, chamada “*Make it relevant*”, que prevê um mercado de massa com grandes volumes. O *roadmap* da própria ANAC apresenta uma visão genérica em três estágios: Inicial (baixo tráfego, voo pilotado), Intermediário (média densidade, automação para auxílio do piloto) e Maduro (tráfego denso, automação da aeronave e de tráfego).

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) traça uma evolução em três estados de maturidade com marcos temporais definidos: Estado Inicial (Now-2028), com piloto a bordo e VFR ou IFR; Estado Intermediário (2028-2032), que é o seu foco principal, caracterizado pela transição para operações não tripuladas supervisionadas por um MVS; e Estado Maduro (2032+), que prevê AFO totalmente automatizadas.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) adota integralmente a estrutura de Níveis de Maturidade UAM (UML) desenvolvida pela NASA/FAA, descrevendo seis estágios evolutivos (UML-1 a UML-6). O documento detalha o UML-2 (baixa densidade, operações com piloto e VFR), UML-3 (baixa densidade/complexidade média, introdução de tecnologias para escalabilidade), UML-4 (densidade média/complexidade média, capacidade de operar em IMC) e menciona que os UML-5 e UML-6, estágios futuros de altíssima densidade, serão tratados em versões futuras.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) agrupa a evolução em cinco estágios conceituais, desde “*Before 2023: the foundations of U-space*” até “*Full U-space Integration (U4)*”, em que a maioria das operações aéreas profissionais seria não tripulada. O Comitê Público-Privado para AAM define a maturidade operacional pela progressão através de quatro fases distintas (Fases 0 a 3), que evoluem em densidade, autonomia, condições de voo e complexidade do gerenciamento de tráfego.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) estrutura a sua evolução em



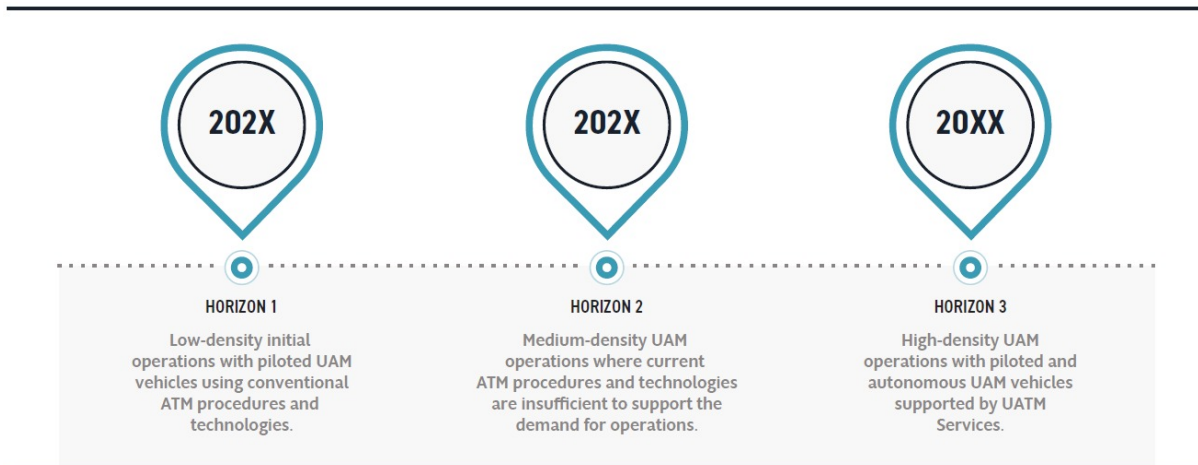


Figura 8.4: Horizontes da evolução de UATM segundo a EmbraerX. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020).

três fases distintas: Fase Inicial (a partir de 2025), com piloto a bordo e corredores fixos iniciais; Fase de Progresso (a partir de 2030), introduzindo o piloto remoto e uma rede mais complexa de corredores fixos; e Fase Avançada (a partir de 2035), com voo autônomo e corredores dinâmicos. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) segue uma estrutura semelhante em três fases: Fase 1 (2020-2025), de investigação e desenvolvimento; Fase 2 (2025-2030), de integração e implantação comercial inicial; e Fase 3 (2030-2040), de maturação e expansão.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) formaliza a evolução em três Horizontes UATM: Horizonte 1, com operações iniciais de baixa densidade e veículos pilotados; Horizonte 2, introduzindo serviços UATM para suportar operações de média densidade; e Horizonte 3, suportando operações de alta densidade com veículos pilotados e autônomos. A Figura 8.4 resume essas informações. Por fim, o *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) detalha um *framework* de seis níveis de maturidade (0-5), descrevendo a progressão desde operações exploratórias de densidade mínima (Nível 1) até um ecossistema AAM maduro (Nível 5) com operações de alta densidade, programadas, não programadas e sob demanda, servidas por aeronaves autônomas. A iniciativa *Innovate28* é citada como um marco neste *continuum* evolutivo.

### 8.7 Observações adicionais

Dos documentos analisados, emergem informações relevantes adicionais sobre os casos de uso e cenários operacionais da AAM/UAM. Uma preocupação transversal identificada em múltiplos documentos, como o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), o





*UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) e o *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021), é a crítica importância da infraestrutura terrestre, particularmente dos vertiportos. Estes são descritos como uma infraestrutura essencial que suporta operações de passageiros e carga, com os seus procedimentos de acesso, tempo de *turnaround* no solo e papel na gestão de contingências, sendo fatores determinantes para a capacidade e eficiência global do sistema. O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b), inclusive, distingue entre *vertiports* (com instalações associadas) e *vertistops* (minimamente desenvolvidos).

Outra consideração operacional crucial, salientada pelo *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) e pelo *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020), é o desafio da licença social para operar. Isto envolve considerar o efeito do ruído e da poluição visual nas comunidades em solo, bem como questões de privacidade, que são agravadas pela combinação de voo a baixa altitude e alta densidade de tráfego em ambientes urbanos. A segurança (*security*) também é explicitamente abordada no *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023), que menciona preocupações do público sobre o uso indevido de veículos e ciberataques, enfatizando a necessidade de abordar questões de cibersegurança no desenvolvimento da arquitetura dos sistemas para AAM/UAM.





## 9 Desempenho Operacional

O desempenho operacional do ecossistema AAM/UAM é abordado de forma variada nos documentos analisados, com diferentes níveis de detalhamento e enfoques. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) adota uma abordagem qualitativa que identifica desafios e requisitos para viabilidade, segurança e sucesso do ecossistema, sem mencionar métricas específicas de segurança, eficiência ou capacidade. Já o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) enfatiza a segurança como princípio primordial, com operações que devem cumprir ou exceder os padrões atuais da aviação comercial, utilizando sistemas de DAA e monitoramento de conformidade do plano de voo. A eficiência é tratada considerando as limitações de armazenamento de energia das aeronaves elétricas, exigindo rotas eficientes e planejamento pré-voo. A capacidade evolui com o aumento da densidade de operações, e a sustentabilidade ambiental é inerente ao uso de propulsão elétrica, que reduz emissões e ruído.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) aborda a questão do desempenho de forma prospectiva, estabelecendo a necessidade de monitoramento e definição de parâmetros iniciais. A segurança é tratada por meio de camadas de desconflito e registro de dados para análise. A eficiência inclui a gestão de atrasos via Sistema de Gestão de Indicadores de Desempenho e otimização de trajetórias. A capacidade é um objetivo central de escalabilidade, com metodologia de cálculo ainda em desenvolvimento. A sustentabilidade ambiental destaca a redução de ruído e emissões com eVTOLs, e a equidade é abordada via Uso Flexível do Espaço Aéreo, condicionando o acesso ao atendimento de requisitos técnicos.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) descreve um processo contínuo de avaliação de desempenho, evoluindo com as fases de maturidade. A segurança é quantificada por modelos de risco, como o modelo de Reich, e volumes de detecção de conflitos. A eficiência envolve *trade-offs* entre otimizações de voo, vertiporto e capacidade do espaço aéreo. A capacidade é gerida dinamicamente para equilibrar demanda e oferta. A sustentabilidade social e ambiental foca na aceitação pública, com ações para reduzir ruído e impacto visual. A equidade é discutida criticamente, apontando que a regra “*first to file*” penaliza operações sob demanda, com a necessidade de esquemas mais justos em desenvolvimento.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) estabelece a segurança como fundamental, com separação mantida pelo ATC e operadores responsáveis pela condução segura. A eficiên-





cia é abordada via DCB, e a capacidade evolui com o ritmo operacional. A sustentabilidade considera ruído e impacto ambiental no projeto de corredores, e a equidade é um princípio incorporado, garantindo acesso seguro e equitativo ao espaço aéreo. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) reforça a segurança como prioridade, com avaliação de impacto ambiental e ênfase em opções de transporte equitativas, utilizando uma abordagem baseada em risco para vigilância.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) aborda desempenho de forma implícita, com segurança como princípio norteador, eficiência via gestão de fluxo e corredores fixos, capacidade gerenciada pela expansão de infraestrutura, sustentabilidade com minimização de ruído e emissões, e equidade baseada em conformidade com requisitos de performance. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) destaca segurança com Sistemas de Gestão de Segurança, eficiência monitorada por dados pós-voo, capacidade estimada por modelagem de mercado, sustentabilidade com redução de carbono e monitoramento de ruído, e equidade com foco em aceitação comunitária e priorização para serviços de emergência.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) adota as Áreas de Desempenho Chave - *Key Performance Area (KPA)* - da ICAO, incluindo segurança, eficiência, capacidade, acesso e equidade, flexibilidade, previsibilidade, participação, interoperabilidade, custo-efetividade, meio ambiente e segurança física, conforme ilustrado na Figura 9.1. São listados indicadores - *Key Performance Indicator (KPI)* - como ocorrências de segurança, eficiência de rota, capacidade de vertiporto e conformidade ambiental. A segurança é priorizada com controle de acesso e monitoramento de conformidade, a eficiência é focada em operações porta-a-porta e redução de *holdings*, a capacidade é gerenciada dinamicamente, a sustentabilidade ambiental considera ruído e emissões, e a equidade garante acesso não discriminatório, geralmente seguindo a regra “*first ready, first served*”.

O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a), o *Regulamento Europeu 2021/665* (European Commission, 2021b) e o *Regulamento Europeu 2021/666* (European Commission, 2021c) estruturam a avaliação de desempenho com base na avaliação de risco do espaço aéreo, focando na segurança operacional, capacidade gerenciada por autorização de voo e reconfiguração dinâmica, equidade como acesso não discriminatório e priorização “*first come, first served*”, e sustentabilidade ambiental considerada indiretamente na designação de espaço aéreo.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe um novo modo operacional com benefícios em segurança, eficiência e capacidade, utilizando separação adaptativa e gestão automatizada de conflitos. A eficiência é alcançada por





Figura 9.1: KPAs da ICAO. Fonte: EmbraerX and Airservices Australia (2020).

flexibilidade operacional e otimização de trajetórias, a capacidade é aumentada pela redução de separações e autoseparação, e a equidade é incorporada nas práticas cooperativas, assegurando participação equitativa e acesso baseado em desempenho.

Por fim, o *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) enfatiza a segurança operacional com foco na mitigação de riscos como perda de separação e colisão, a equidade como acesso justo ao espaço aéreo, e a sustentabilidade social através da licença social para operar, considerando ruído e poluição visual, sem discutir explicitamente eficiência, capacidade ou sustentabilidade ambiental com métricas específicas.

## 9.1 Segurança

No que diz respeito ao desempenho em segurança, os documentos analisados apresentam abordagens distintas. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) aborda a segurança de forma qualitativa, apresentando-a como princípio fundamental, mas sem mencionar métricas específicas como taxas de conflito ou violações de separação, focando antes nos desafios para atingi-la, como a complexa certificação de aeronaves e a segurança contra atos ilícitos.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) estabelece a segurança como primordial, devendo as operações UAM cumprir ou exceder os mais altos padrões da aviação comercial. Isto será alcançado através de múltiplas camadas de proteção, incluindo sistemas de DAA para cumprir os requisitos regulamentares de separação e evitar colisões. O monitoramento automático da conformidade da trajetória em relação ao





plano de voo pelos Centros de Operações de Frota e pelo Controle de Tráfego Aéreo é considerado essencial para manter a segurança.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) aborda a segurança primariamente através de um conceito de camadas de desconflito – estratégico, tático e de escape/ACAS – para prevenir a perda de separação. Estabelece, ainda, a obrigatoriedade de registro e armazenamento dos dados de todas as operações pelo PSU para fins de análise, o que é fundamental para calcular métricas de segurança retrospectivas.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) introduz uma abordagem quantitativa para a gestão de segurança, fundamentada em modelos de risco probabilísticos. Ela opera com o conceito de que a trajetória planejada de um UAS (o *U-plan*) é representada por volumes quadridimensionais que encapsulam a incerteza operacional (Figura 4.1). Criticamente, o documento estabelece que estes volumes devem ser dimensionados para um nível de confiança de 95%, assegurando que a aeronave permaneça dentro do espaço previsto durante a grande maioria da operação. Este valor tem origem consolidada na aviação, derivando do histórico e rigoroso modelo de risco de colisão de Reich.

Além desse fundamento, o ConOps incorpora contribuições avançadas de projetos de pesquisa como o BUBBLES. Este projeto foi instrumental em refinar operacionalmente os serviços de separação tática e, sobretudo, em propor uma estrutura de volumes e limiares para a detecção e escalonamento de conflitos. O elemento central desta estrutura é o “*Near Mid-Air Collision (NMAC) Volume*” (*Near Mid-Air-Collision*), que define a zona de colisão iminente (Figura 6.1). Ao seu redor, são definidos limiares sucessivos para ação do sistema de resolução de conflitos em terra, para a separação a ser mantida e, finalmente, para a ativação de sistemas embarcados de evitação. Mais do que uma definição conceitual, o BUBBLES forneceu uma metodologia analítica que permite calcular as separações mínimas necessárias (em distância ou tempo) com base numa avaliação específica do desempenho dos sistemas de CNS e no *Target Levels of Safety (TLS)* estatístico estabelecido para a operação, efetivamente criando uma ligação direta entre performance técnica e garantia de segurança.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) mantém a segurança como um princípio fundamental, onde a separação de aeronaves não participantes das operações cooperativas é responsabilidade do ATC. Os operadores UAM são responsáveis pela condução segura das operações e, em caso de desempenho inadequado da aeronave para manter a separação dentro do Corredor UAM, devem tomar ação apropriada para garanti-la. *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) reforça que a separação durante as operações iniciais continuará baseada primariamente no princípio “*see-and-avoid*”.





O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) descreve a separação como sendo garantida pela combinação de desconflito estratégico na aprovação do plano de voo e separação tática durante o voo, sendo a taxa de conflitos e violações de separação uma métrica crítica implícita. O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) incorpora a segurança em todos os aspectos, exigindo que os candidatos a vertiportos tenham um Sistema de Gestão de Segurança.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) prioriza a segurança, focando na minimização do risco através do controle de acesso e da consciência situacional sistêmica das operações. O Serviço de Monitoramento de Conformidade fornece consciência situacional em tempo real para identificar veículos não conformes, e o desconflito pré-tático de movimentos perto de vertiportos e ao longo de rotas é um benefício do Serviço de Planejamento e Autorização de Voo.

O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) posiciona a segurança operacional como principal objetivo de desempenho, sendo monitorada através da consideração de “níveis de desempenho de segurança exigidos” e da avaliação de risco do espaço aéreo. Os serviços U-space são projetados para prevenir conflitos, com o serviço de monitoramento de conformidade fornecendo alertas em tempo real por desvios da autorização concedida.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) apresenta a segurança como um benefício fundamental do seu modo operacional, fornecendo avisos de tráfego de forma previsível em contraste com a base “ver-e-ser-visto” do VFR. Sob DFR, os operadores devem aplicar mínimos de separação quantificados apropriados, com critérios adaptados a cada encontro específico, baseando-se em informações eletronicamente intercambiadas.

Por fim, o *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) identifica a mitigação de riscos de segurança como crucial, listando especificamente o risco de perda de separação entre aeronaves e colisão no ar como perigos a serem geridos pelos conceitos de operações no contexto de aumento da densidade de tráfego.

## 9.2 Eficiência

A avaliação da eficiência operacional, abrangendo tempo de voo, consumo de energia e atrasos, é abordada com diferentes ênfases nos documentos. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) aborda a eficiência de forma indireta, através das tecnolo-





gias viabilizadoras, citando a propulsão elétrica como mais eficiente que motores a combustão. Não discute métricas operacionais específicas, mas a expectativa de processamento ágil em vertiportos e operações automatizadas, com o objetivo de eficiência sistêmica.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) identifica a eficiência operacional como um foco crítico, impulsionado pelas limitações de armazenamento de energia das aeronaves elétricas UAM. A previsibilidade e a eficiência são alcançadas através da conformidade com planos de voo detalhados com elementos espaciais e temporais. A seleção e execução de rotas eficientes são consideradas vitais devido à capacidade limitada das baterias, exigindo que as rotas mantenham opções de pouso seguras ao longo do trajeto para contingências. O planejamento pré-voo, juntamente com o monitoramento em tempo real dos ventos, visa garantir que o estado de energia seja suficiente para alcançar vertiportos alternativos.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) aborda a eficiência através da gestão de atrasos, prevendo a utilização do Sistema de Gestão de Indicadores de Desempenho (SGID) para monitorar a pontualidade dos voos UAM. A otimização de trajetórias é perseguida com a implementação de conceitos como *Trajectory-Based Operations* (TBO) e *Four-Dimensional Trajectory* (4DT) para aprimorar o planejamento e a execução de voos eficientes. A gestão de pontos de pouso alternativos é considerada crítica devido à limitação atual das baterias e seu impacto na autonomia, tornando a eficiência energética uma preocupação operacional implícita.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) discute a eficiência no contexto de otimizações e compromissos, salientando que a incerteza inerente à execução de qualquer plano limita a precisão das otimizações. Serão necessários *trade-offs* no U-space entre pelo menos três otimizações: a de cada voo, a da utilização do vertiporto e a da capacidade do espaço aéreo. Ferramentas de Preparação/Otimização de *U-plan* são assumidas para ajudar os operadores a desenvolver planos de voo que otimizem fatores como custo, risco no solo e abatimento de ruído.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) aborda a eficiência através do conceito de DCB, definido como a avaliação estratégica de fluxos de tráfego e capacidades de aeródromos para permitir que os usuários determinem quando, onde e como operar, mitigando necessidades conflitantes. Dentro do Corredor UAM, as funções de gerenciamento de fluxo, incluindo DCB, serão fornecidas através de serviços de CFM. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) menciona que a eficiência será influenciada pelo uso de horários de voo predeterminados, coordenados com antecedência com o ATC para gerenciar demanda e capacidade.





O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) considera a eficiência operacional principalmente através da ótica da gestão de fluxo e previsibilidade. O tempo de voo é otimizado através da utilização de corredores fixos e diretos. O monitoramento contínuo do estado dos vertiportos e o compartilhamento dessa informação em tempo real permitem um ajuste eficiente dos planos de voo, minimizando atrasos. Embora o consumo de energia não seja explicitamente mencionado como uma métrica, a natureza elétrica das aeronaves eVTOL inclui a eficiência energética como um atributo fundamental.

O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) identifica a conveniência e velocidade como benefícios específicos da AAM, fornecendo um meio de transporte que contornará atrasos associados aos veículos terrestres. Um dos objetivos-chave é permitir viagens dentro de 30 minutos na região metropolitana. A eficiência operacional também será monitorada através de dados pós-voo, utilizados para avaliar o desempenho e identificar anomalias.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) define a eficiência como a eficácia operacional e econômica das operações de voo de porta a porta, onde os usuários querem decolar e chegar na hora selecionada e voar a trajetória que determinarem ser ótima. O Serviço de Gestão de Fluxo minimiza o tempo necessário no ar, assegura que a eficiência do voo não seja impactada por outros movimentos, reduz *holdings* e minimiza a quantidade de energia a ser consumida. A utilização cronometrada de recursos de vertiporto e a implementação de 4DT são citadas como formas de aumentar a eficiência.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) promove a eficiência operacional como um benefício central, proporcionando “flexibilidade operacional” – a capacidade de alterar dinamicamente a intenção de trajetória sem autorizações específicas do ATC, permitindo auto-otimização para economia de combustível ou tempo. Esta eficiência é crucial para aeronaves elétricas, para as quais a previsibilidade operacional é um motivador principal. A “Separação Adaptativa Par a Par” permite critérios de separação potencialmente menores, resultando em menos conflitos, maior eficiência de voo e maior densidade de tráfego.

### 9.3 Capacidade

A capacidade do sistema, entendida como o número de voos por área por tempo, é um tema abordado de forma evolutiva e com diferentes níveis de detalhe nos documentos analisados. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) foca nos desafios para





atingi-la, como a necessidade de uma nova sistemática de controle de tráfego aéreo face à previsão de “tráfego intenso” sobre grandes cidades. O *roadmap* da ANAC prevê a evolução para um “tráfego denso” no estágio maduro, sendo os desafios de infraestrutura, como a construção de vertiportos com alta frequência de operações, diretamente ligados à capacidade futura do sistema.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) estabelece a evolução para operações de maior densidade como um objetivo central. No estado intermediário, as operações irão se expandir com procedimentos de voo especiais onde as aeronaves aderirão a rotas UAM RNP publicadas. No estado maduro, soluções automatizadas de gestão de tráfego permitirão separação reduzida entre aeronaves e maior densidade de tráfego sob o paradigma de AFR. A capacidade do vertiporto é explicitamente mencionada como sendo influenciada pelo seu *layout* físico, com certas configurações podendo resultar em operações dependentes que reduzem a capacidade e flexibilidade.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) trata a escalabilidade, ou o aumento seguro do número de operações aéreas simultâneas, como um objetivo central. É citada explicitamente a necessidade de desenvolver uma metodologia de cálculo de capacidade de espaço aéreo no ambiente UAM, indicando que este é um trabalho em andamento. Adicionalmente, o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo requer o cálculo da capacidade dos vertiportos, de forma análoga aos aeroportos, o que será de responsabilidade da ANAC e dos administradores dos vertiportos.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) descreve que a capacidade do sistema é gerida pelo serviço de Gestão Dinâmica de Capacidade, que visa equilibrar a demanda com a capacidade. A capacidade de um espaço aéreo é definida como um fator técnico estabelecido pela autoridade competente durante o seu desenho, em função dos riscos esperados e do nível de tráfego permitido. Em espaços aéreos com serviços táticos, a gestão dinâmica de capacidade é necessária para evitar exceder as capacidades do serviço de resolução de conflitos táticos.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) aborda a capacidade através do conceito de ritmo operacional, definido como a densidade, frequência e complexidade das operações, que evolui de um pequeno número de operações de baixa complexidade para uma alta densidade e alta frequência de operações complexas. A FAA reserva o direito de aumentar os requisitos de desempenho operacional da aeronave para otimizar a capacidade/utilização do espaço aéreo. Com o crescimento contínuo, a demanda operacional da UAM pode exceder a capacidade inicial de projeto de um Corredor UAM, momento em que o aumento de capacidade pode ser obtido através de estrutura adicional, incluindo trilhas e capacidades de desempenho aumentadas.





O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) trata a capacidade de forma evolutiva e escalável. Na fase inicial, a capacidade é intencionalmente baixa, sendo gerida com base na capacidade do vertiporto. O aumento da capacidade não é previsto através da sobrecarga dos corredores existentes, mas sim por meio da expansão da infraestrutura física, notadamente pela adição de novos corredores e pela construção de mais vertiportos, formando progressivamente uma rede. O número de operações por hora em um corredor ou vertiporto específico será uma métrica-chave para acionar esta expansão.

O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) afirma que a capacidade da rede AAM dependerá, em grande parte, de quantas aeronaves e vertiportos estarão disponíveis. Ferramentas de modelagem de mercado podem estimar o número de passageiros que uma rede de operações AAM pode receber com base em pressupostos para o tempo necessário entre operações e o tempo de transição nos vertiportos. Projeções fornecidas estimam que uma rede inicial com 3 vertiportos poderia transportar 250 passageiros por dia, crescendo para 36.671 passageiros por semana em uma rede expandida com 13 vertiportos e 4 aeroportos.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) define a capacidade como uma KPA crítica, mencionando a necessidade de utilização ótima da capacidade existente para satisfazer a demanda dos usuários em horas e locais de pico, minimizando restrições ao fluxo de tráfego. A capacidade do vertiporto, definida pelo número de *Final Approach and Takeoff Area* (FATO) e *stands*, e pelo tempo necessário no solo e na zona de transição, afeta significativamente a capacidade de todo o sistema UATM. O Serviço de Gestão de Fluxo assegura que a maior capacidade é alcançada a partir da infraestrutura de vertiporto e estrutura de espaço aéreo disponíveis, enquanto o Serviço de Gestão Dinâmica de Espaço Aéreo permite que rotas/corredores e espaço aéreo adicionais sejam disponibilizados para aumentar a capacidade. São listados indicadores específicos como capacidade do vertiporto, demanda do vertiporto, utilização do vertiporto, capacidade do espaço aéreo, demanda do espaço aéreo, capacidade de rota/corredor e demanda de rota/corredor.

O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) gerencia a capacidade do sistema através do próprio processo de autorização de voo, que atua como um controle de fluxo, e através do mecanismo de reconfiguração dinâmica do espaço aéreo, que ajusta temporariamente os limites geográficos do espaço aéreo U-space para acomodar mudanças na demanda de tráfego tripulado.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) identifica o aumento





da capacidade do espaço aéreo como uma das cinco principais motivações para um novo modo operacional, citada como “Escalabilidade”. Argumenta que os requisitos de separação física e as limitações de carga de trabalho do controlador associados às operações IFR são fatores limitantes da capacidade. O *Digital Flight*, com a sua função de separação automatizada e distribuída, contorna esses fatores limitantes, permitindo um aumento da capacidade global. A capacidade de operar com critérios de separação reduzidos e adaptativos entre aeronaves é um mecanismo-chave para permitir operações com densidades de tráfego significativamente mais elevadas.

#### 9.4 Sustentabilidade social e ambiental

A sustentabilidade social e ambiental, particularmente no que diz respeito a emissões, ruído e poluição visual, é um pilar reconhecido nos documentos, embora com profundidades variadas de análise. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) posiciona a sustentabilidade ambiental como um dos três pilares macroeconômicos do setor, especificamente a “busca pela ‘emissão zero’”. A propulsão elétrica é destacada como “zero-emission”, e as células a combustível de hidrogênio são apresentadas como produtoras apenas de vapor d’água. O baixo ruído dos eVTOLs em comparação com os helicópteros é apresentado como uma característica fundamental para a aceitação pública, permitindo voos mais próximos de áreas populosas. A sustentabilidade social e a poluição visual não são discutidas explicitamente.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) descreve a sustentabilidade como inerente ao conceito de UAM. A propulsão elétrica é citada como fundamental por eliminar as emissões diretas de carbono, reduzir o ruído e diminuir o consumo de energia. A minimização do ruído é apontada como um fator crucial para a aceitação da comunidade, sendo a confiança e a aceitação públicas fundamentais para o sucesso do ecossistema, requerendo que a indústria trabalhe com cidades para uma integração segura.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) lista a redução da poluição sonora como um benefício esperado da UAM, à medida que novas tecnologias de rotores entrarem em operação, sendo a aceitação da comunidade um fator crítico para a implantação de vertiportos em áreas densas, diretamente ligada aos níveis de ruído. A redução do impacto ambiental e da dependência de combustíveis fósseis é destacada como benefício primário do uso de eVTOL.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) aborda a sustentabilidade principalmente na seção dedicada à aceitabilidade social. As preocupações do público in-





cluem o ruído, a qualidade do ar local e o impacto ambiental geral. Assume-se que as aeronaves UAM serão elétricas, o que diminui as emissões de gases poluentes e a poluição sonora. Para melhorar a aceitabilidade, são sugeridas ações como limitar a altitude mínima, evitar voos pairados, definir limites de velocidade de acordo com a área sobrevoada e estudar o uso do solo urbano abaixo da trajetória de voo para minimizar o incômodo. Voar sobre vias de transporte urbanas existentes é proposto para minimizar a percepção de incremento de ruído, uma vez que estas já são áreas aceitas como ruidosas.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) considera a sustentabilidade no projeto dos Corredores UAM, que seriam projetados de forma consistente com considerações ambientais aplicáveis. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) reforça a responsabilidade da agência em avaliar impactos significativos no ambiente, incluindo ruído, qualidade do ar, distúrbios visuais e perturbação da vida selvagem. O ruído da aviação permanece um dos principais desafios ambientais, sendo regulado através de limites máximos de emissão como parte do processo de certificação de tipo. Considerações de ruído são contabilizadas no projeto de espaço aéreo, e novas rotas provavelmente exigirão que a FAA conduza revisão ambiental e divulgação comunitária.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) apresenta a sustentabilidade como um fator crítico de desenho do espaço aéreo, diretamente influenciando o projeto dos corredores. A necessidade de minimizar o ruído e atender aos padrões por região é explicitamente citada como um requisito para a escolha dos corredores. A poluição visual é indiretamente abordada pela decisão de utilizar corredores predefinidos, concentrando a operação em rotas específicas em vez de voos livres sobre a cidade, minimizando assim o impacto visual disperso. As emissões de carbono são intrinsecamente baixas devido à propulsão elétrica.

O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) destaca que a AAM oferece benefícios como a redução de poluição, uma vez que as aeronaves podem acelerar a viabilidade econômica e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Espera-se que as aeronaves AAM, dadas as suas escolhas de sistemas de propulsão, operem de forma mais eficiente e sejam de baixa ou nenhuma emissão de carbono. Além disso, as aeronaves são geralmente projetadas para serem mais silenciosas do que os helicópteros. O monitoramento da conformidade do ruído será realizado em áreas circundantes aos vertiportos para garantir o cumprimento com métricas aceitáveis. O planejamento do espaço aéreo considera rotas que devem evitar áreas sensíveis ao ruído, como parques, escolas e zonas residenciais, podendo incluir restrições de horário de operação e gestão de trajetórias que minimize a geração de ruído.





O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) inclui o Meio Ambiente como uma KPA, estipulando que o sistema de navegação aérea deve contribuir para a proteção do ambiente, considerando o ruído, as emissões gasosas e outras questões. A capacidade de posicionar rotas sobre áreas menos sensíveis ao ruído é um benefício do Serviço de Projeto de Espaço Aéreo e Procedimentos. A adesão a obrigações ambientais ou de ruído é um benefício do Serviço de Planejamento e Autorização de Voo. O Serviço de Gestão de Fluxo reduz o *holding* aéreo e diminui o ruído de voo, enquanto o Serviço de Gestão Dinâmica de Espaço Aéreo fornece um mecanismo para a distribuição de ruído através do uso de rotas alternativas. O impacto na comunidade com respeito ao abate de ruído é uma consideração significativa no projeto de espaço aéreo, corredores e rotas.

O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) considera a sustentabilidade ambiental indiretamente, uma vez que os Estados-Membros podem designar espaço aéreo U-space por razões ambientais. O estabelecimento de zonas geográficas de UAS, que alimentam o serviço de geoconsciência, deve ter em conta os requisitos ambientais.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) toca ligeiramente em aspectos de sustentabilidade ambiental, ao argumentar que, ao permitir rotas continuamente otimizadas e alterações flexíveis de rota e altitude, poderia permitir economia de combustível. Ao permitir que as aeronaves se beneficiem plenamente de níveis de voo otimizados para a economia de combustível, contribui indiretamente para a eficiência energética. O documento não aborda explicitamente o ruído ou a poluição visual como métricas de desempenho.

O *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) aborda a sustentabilidade social indiretamente através do conceito de licença social para operar, reconhecida como crítica para o sucesso futuro da indústria UAM. Isto implica a consideração do ruído e da poluição visual do voo a baixa altitude, o seu efeito nas comunidades em solo, incluindo as leis de privacidade, e a forma como as comunidades podem ser envolvidas.

## 9.5 Equidade

A equidade, no contexto de acesso ao espaço aéreo e regras de priorização de operações, é um princípio tratado de forma desigual nos documentos analisados. O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023) não aborda explicitamente questões de equidade, acesso ao espaço aéreo ou regras de priorização, focando nos aspectos técnicos, regulatórios e de viabilidade econômica. A visão apresentada de uma fase inicial





como um “mercado de luxo” sugere que, inicialmente, a equidade de acesso não é uma premissa central do desenvolvimento do setor.

Em contraste, o *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) aborda a equidade através do seu princípio fundamental de fornecer voo acessível para todos, argumentando que a supervisão remota e a propulsão elétrica reduzirão custos, permitindo voos acessíveis. No entanto, o documento não detalha especificamente regras de priorização de operações ou mecanismos de equidade no acesso ao espaço aéreo além do processo padrão de apresentação e aprovação de planos de voo junto ao ATC.

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) trata o princípio de equidade no acesso através do conceito de *Flexible Use of Airspace* (FUA), que visa a otimização, equilíbrio e equidade no uso do espaço aéreo a partir das necessidades de seus diversos usuários. O acesso ao espaço aéreo UAM é condicionado ao atendimento de requisitos técnicos (*performance*), não sendo exclusivo para um tipo de operador. O documento não detalha regras específicas de priorização de operações, mas estabelece que operações específicas como policiais, atendimento a emergências, segurança pública e atividades militares também serão integradas, implicando que tais serviços terão seu acesso garantido.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) discute explicitamente a equidade no contexto da resolução estratégica de conflitos. Salienta que a priorização “*first to file*” (primeiro a submeter) do *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) “penaliza sistematicamente tipos de operações que não podem submeter planos de voo com muita antecedência, como serviços ‘sob demanda’”. É expresso o desejo de alcançar justiça (*fairness*) na resolução estratégica de conflitos, sendo este um tópico de investigação em curso, com o conceito de “tempo razoável para atuar” apresentado como um esquema potencial para evitar esta desvantagem sistemática. É referenciado o artigo *Market Design for Drone Traffic Management* (SEUKEN; FRIEDRICH; DIERKS, 2022) que fornece uma visão geral de outras abordagens possíveis, mas afirma que, a esta altura, não existe uma proposta madura para um esquema de resolução mais justo.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) incorpora a equidade como um princípio fundamental em múltiplos aspectos. A FAA mantém um ambiente operacional que garante que os usuários do espaço aéreo tenham acesso aos recursos necessários para atender a objetivos operacionais específicos e que o uso compartilhado do espaço aéreo possa ser alcançado de forma segura e equitativa. As COPs abordam explicitamente a equidade de uso do espaço aéreo. Os operadores UAM não podem otimizar suas próprias operações à custa de subotimizar o ambiente como um todo, e o projeto dos





Corredores UAM deve incluir impacto mínimo às operações existentes, mantendo a equidade para todos os operadores. O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) aborda a equidade indiretamente através do princípio de que as construções de espaço aéreo, como rotas cartografadas VFR, estarão disponíveis para qualquer aeronave adequadamente equipada. O documento também enfatiza a importância de fornecer opções de transporte mais equitativas e encoraja as comunidades a planejar a alocação equitativa de vertiportos.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) aborda a equidade de duas perspectivas. Para os usuários de UAM, o acesso ao corredor é regido pela conformidade com os requisitos de performance operacional e pela aprovação do plano de voo, sugerindo um acesso não discriminatório para operadores que cumpram as regras. Para outros usuários do espaço aéreo (não-UAM), o acesso ao corredor UAM é permitido apenas se cumprirem os mesmos requisitos de performance, garantindo igualdade de condições, mas priorizando a segurança da operação UAM dentro do seu espaço dedicado.

O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) estipula, na sua KPA de Acesso e Equidade, que todos os usuários do espaço aéreo devem ter o direito de acesso aos recursos de ATM necessários para satisfazer os seus requisitos operacionais específicos, e que a utilização compartilhada do espaço aéreo para diferentes usuários deve ser alcançada com segurança. Geralmente, a primeira aeronave pronta a usar os recursos de ATM receberá prioridade, exceto em casos de questões de segurança de voo, eficiência operacional ou segurança nacional. Vários serviços UATM, como o Serviço de Planejamento e Autorização de Voo e o Serviço de Gestão de Fluxo, asseguram que todos os usuários possam ter acesso ao ambiente de baixa altitude e aos recursos partilhados de forma transparente. O Serviço de Gestão Dinâmica de Espaço Aéreo assegura a maior disponibilidade possível de espaço aéreo, permitindo simultaneamente a priorização do acesso.

O *Regulamento Europeu 2021/664* (European Commission, 2021a) estabelece o princípio da equidade e do acesso não discriminatório como fundamental. O acesso aos serviços de informação comum deve ser concedido às autoridades relevantes, prestadores de serviços de tráfego aéreo, prestadores de serviços U-space e operadores de UAS “numa base não discriminatória, incluindo com a mesma qualidade de dados, latência e níveis de proteção”. As regras de priorização para a autorização de voo incorporam um elemento de equidade operacional: os pedidos com a mesma prioridade são processados por ordem de chegada (“*first come, first served*”).





O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) incorpora a equidade como um princípio subjacente nas suas Práticas Cooperativas. A prática CP-J instrui os operadores a “participarem equitativamente” nas iniciativas de gestão de tráfego quando pretendem utilizar recursos geridos pelo ATC. A prática CP-G tem como efeito pretendido o estabelecimento de uma base transparente para a equidade em suportar o ônus da provisão de separação. É enfatizado que a transição para o DFR deve ser transparente para os operadores VFR e IFR, que devem continuar a ter os mesmos níveis de acesso e flexibilidade, assegurando a “desejada equidade entre modos operacionais”. O documento também afirma que o DFR estaria disponível para qualquer usuário do espaço aéreo capaz de cumprir os requisitos de desempenho apropriados.

O *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021) declara explicitamente a equidade como um princípio de desempenho fundamental, sob a forma de acesso justo e equitativo ao espaço aéreo para todos os usuários, de acordo com os princípios ‘*Share the Air*’ que regem o espaço aéreo de Classe D. Expressa a preocupação de que as operações UAM em escala possam desafiar este princípio, monopolizando o acesso e excluindo outros operadores, pelo que os conceitos de operações devem demonstrar como propõem manter este acesso equitativo.





## 10 Principais Contribuições e Lições Aprendidas

O *Panorama AAM da ANAC* (ANAC, 2023), sendo um panorama e não um manual técnico, não propõe soluções operacionais específicas, mas oferece contribuições estratégicas fundamentais. Sua principal lição é a defesa de uma abordagem regulatória cautelosa e baseada em risco, onde a segurança é inegociável e o ritmo da regulamentação não deve ser ditado por prazos agressivos de mercado. Ele estrutura um plano de ação claro para a autoridade reguladora, alerta que a infraestrutura terrestre é um dos maiores desafios e oferece uma visão realista sobre custos subestimados e cronogramas irrealistas, enfatizando a necessidade de separar o “hype” da realidade econômica. Para a gestão de tráfego, as lições são que as soluções devem ser cautelosas, priorizar a segurança, serem desenvolvidas em coordenação com o DECEA, buscar harmonização internacional e serem entendidas como parte de um ecossistema maior. Indica, ainda, que uma trajetória de implantação mais factível para o Brasil começaria por operações regionais (RAM) antes das urbanas (UAM).

O *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) propõe uma estrutura de espaço aéreo baseada em performance e volumes flexíveis, que substitui corredores exclusivos. Introduz o conceito de DFR, proposto pela NASA, como um novo modo operacional e propõe um modelo de governança híbrido com PSU. Apresenta uma abordagem em camadas para separação (estratégico, tático e escape) e define a criação de um ECO-UAM para interoperabilidade. Ressalta que a integração é mais eficiente que a segregação, que a colaboração DECEA-ANAC é indispensável e que a infraestrutura CNS tradicional é insuficiente para baixas altitudes urbanas.

O *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) propõe a estruturação do espaço aéreo em volumes X, Y e Z, definindo claramente os serviços de resolução de conflitos em cada um. Uma solução central é o serviço de DAR para integração eficiente com a aviação convencional. Para gestão de tráfego, propõe o conceito de “reasonable time to act” (RTTA) como alternativa mais equitativa ao “first to file”. A infraestrutura técnica é centrada no *Discovery and Synchronisation Service* (DSS) para interoperabilidade, garantindo que todas as informações relevantes sobre as aeronaves, as intenções de voo e o ambiente operacional estejam disponíveis em tempo real para todas as partes interessadas. Oferece um roteiro valioso de implementação progressiva em fases, desde as fundações até a integração total. A importância de uma infraestrutura de confiança (*trustworthy framework*) e PKI é destacada como essencial. A flexibilidade





na governança, permitindo modelos centralizados ou distribuídos, e as orientações sobre desafios de implementação, como lidar com falhas de serviços e integrar-se progressivamente com o ATM tradicional, são observações relevantes.

Os regulamentos europeus *Regulamento Europeu 2021/665* (European Commission, 2021b) e *Regulamento Europeu 2021/666* (European Commission, 2021c) estabelecem o primeiro quadro regulamentar abrangente para o U-space, criando o conceito de “espaço aéreo *U-space*” onde as operações só são permitidas com serviços U-space obrigatórios. Introduzem um modelo de governança descentralizado com múltiplos USSPs, mas harmonizado, e a solução crítica de reconfiguração dinâmica do espaço aéreo para integração com a aviação convencional.

O *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) introduz o conceito de um ambiente cooperativo altamente automatizado e a criação de Corredores UAM como volumes tridimensionais flexíveis, que podem transitar por todas as classes de espaço aéreo. O conceito de COP e a estrutura federada de PSU são vistos como modelos relevantes. Uma lição importante é a abordagem evolutiva, começando com operações de baixa complexidade sob o quadro regulatório atual e evoluindo gradualmente. O documento também propõe o conceito de AFR e estabelece que a FAA mantém a autoridade regulatória, mas delega funções operacionais específicas.

O *Implementation Plan Innovate28 da FAA* (FAA, 2023a) adota uma abordagem gradual denominada “*crawl-walk-run*”, utilizando infraestrutura e procedimentos preexistentes, como rotas VFR, e desenvolvendo acordos localizados - *Letter of Agreement* (LOA). A proposta inclui a adaptação do quadro regulatório existente e a padronização técnica por meio de “*Means of Compliance*”, que são os métodos para garantir a conformidade com os requisitos regulamentares. Para a gestão de tráfego, o foco é na coordenação antecipada e no compartilhamento de horários entre os envolvidos.

O *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) propõe a criação de um novo modo operacional formal, as DFR, como um complemento ao VFR e IFR. A solução central é a transferência da responsabilidade pela separação do controlador ou piloto individual para o operador, através de práticas cooperativas e automação. A lição fundamental é que as regras VFR e IFR não conseguem acomodar plenamente os novos entrantes, sendo melhor criar um modo distinto. A proposta é concebida para integração transparente com o sistema existente e prevê um caminho incremental de implementação. A previsão de que a infraestrutura crítica para o *Digital Flight* pode ser desenvolvida por entidades além do ANSP abre espaço para inovação do setor privado e novos modelos de negócios.

O *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) propõe um modelo de governança centralizado onde





o ANSP tradicional (JCAB) fornece os serviços UATM. Defende uma abordagem gradual baseada em fases, introduzindo serviços mais complexos apenas conforme a maturidade operacional aumenta. Propõe a criação de UASAs (áreas de espaço aéreo flexíveis) e distingue entre *UAM Routes* e *UAM Corridors* para balancear acesso e eficiência. Enfatiza a integração e interoperabilidade desde a concepção e reconhece a capacidade do vertiporto como um limitador crítico do sistema. Uma lição central é a necessidade de clareza na definição de papéis e responsabilidades no novo ecossistema.

O *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) propõe um UATMSP que atua como intermediário entre o ATC e os operadores de UAM. A solução para o espaço aéreo na fase inicial é a utilização de corredores segregados, focada na segurança. Estabelece uma separação clara entre desconflito estratégico (pré-voo) e separação tática (em voo). Lições implícitas incluem que a segurança é facilitada pela simplicidade inicial, que a colaboração público-privada é essencial e que a certeza regulatória conduz o investimento. *Insights* importantes incluem o pragmatismo tecnológico de usar redes 4G/5G disponíveis, a necessidade de a regulação preceder a inovação desordenada, e a lição de incorporar a perspectiva do passageiro e estudos sobre a experiência do usuário desde o início.

O *ConOps de Incheon* (Incheon Metropolitan City, 2023) detalha um roteiro evolutivo em três fases (P&D, Integração Comercial e Maturação). Propõe a criação de um AATMSP e uma evolução das operações de VFR para Corredores AAM e, finalmente, para DFR. Enfatiza a integração urbana e a aceitação comunitária, propondo um modelo de governança metropolitana e o uso de um “*digital twin*” da cidade. Uma lição fundamental é a necessidade de uma transição na força de trabalho, de pilotos a bordo para operações autônomas. A ênfase na evolução paralela da regulamentação e da tecnologia, e na “Aceitação da Comunidade” como princípio orientador fundamental, são lições vitais para a construção da licença social para operar.

O *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023) propõe soluções técnicas específicas, como a transição para operações baseadas em metodologias procedurais que não exigem alterações nos sistemas de ATM existentes. Introduz o conceito de MVS e a dependência de rotas RNP dedicadas, que permitem o gerenciamento do tráfego por exceção pelo ATC, reduzindo drasticamente a sua carga de trabalho. O documento também detalha um robusto conjunto de capacidades de automação e resiliência para operações sem piloto, incluindo sistemas de DAA e procedimentos para contingências. Uma lição fundamental é o reconhecimento de que a confiança e aceitação da comunidade são críticas para o sucesso.





O *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) apresenta um ConOps abrangente, definindo seis serviços UATM específicos. Propõe a criação de corredores UAM dedicados no espaço aéreo controlado. Uma lição crucial, derivada de simulações, é que o sistema atual de ATC ficará rapidamente sobrecarregado, sendo crítica a evolução para comunicações sem voz. As simulações também validaram que corredores dedicados com Gestão de Fluxo reduzem conflitos e aumentam a previsibilidade. A estrutura de três Horizontes fornece um roteiro para evolução faseada.

Finalmente, o *CAP 2272 do Reino Unido* (CAA, 2021), resultante de um *Regulatory Sandbox*, não propõe soluções definitivas, mas identifica considerações-chave. Estrutura os desafios em três áreas - operações em escala, voo a baixo nível em espaço aéreo urbano congestionado e a resistência de voo dos eVTOLs - e enfatiza que os ConOps devem propor mitigações específicas para riscos, em vez de depender apenas de regras existentes. Lições incluem a necessidade de acesso equitativo ao espaço aéreo, a indispensabilidade do engajamento comunitário para a licença social, a importância de considerar cenários *off-nominal* e a validação da abordagem de *Sandbox* regulatório para um diálogo proativo entre inovadores e reguladores.





## 11 Desafios, Limitações e Pontos em Aberto

Do ponto de vista operacional, a integração segura com o tráfego aéreo existente, a gestão de tráfego de alta densidade e a operação em condições meteorológicas adversas são citadas como barreiras significativas. Além disso, a capacidade limitada dos vertiportos, a gestão de situações *off-nominal*, como a perda de comunicação ou contingências de bateria, e a implementação de medidas de segurança sem comprometer a eficiência operacional são desafios recorrentes. A dependência inicial de operações visuais (VFR) e a transição para operações por instrumentos (IFR) são vistas como limitações que restringem a escalabilidade. A infraestrutura de vertiportos também é identificada como um dos maiores obstáculos, com dificuldades de localização, custos elevados e tempo de construção prolongado.

Tecnicamente, as limitações das baterias são um fator crítico, impactando a autonomia, a carga útil e o desempenho das aeronaves eVTOL. A imaturidade de tecnologias essenciais, como sistemas robustos de DAA, comunicação de comando e controle (C2), e navegação por satélite (GNSS) em ambientes urbanos complexos, também é destacada. A saturação do espectro de comunicação e vigilância, a necessidade de padronização de equipamentos e a certificação de designs inovadores são outros entraves tecnológicos significativos. A dependência de dados compartilhados e a garantia de sua integridade e segurança cibernética são igualmente apontadas como áreas que necessitam de desenvolvimento.

No aspecto regulatório, a falta de harmonização internacional e a ausência de normas específicas da ICAO para vertiportos e operações AAM/UAM criam um vazio que os países devem preencher individualmente, o que pode levar à fragmentação global. A inadequação da legislação atual, que não foi concebida para acomodar a dinâmica e a escala da AAM, exige a criação de novas classificações de espaço aéreo, regras de voo digital e estruturas para pilotagem remota e operações autônomas. O processo de certificação de aeronaves, operadores e sistemas é descrito como complexo, demorado e custoso, com a necessidade de evoluir regulamentos existentes para permitir, por exemplo, a supervisão de múltiplos veículos por um único operador remoto. A governança dos vertiportos e a definição de autoridade no espaço aéreo de baixa altitude também são pontos regulatórios em aberto.

Por fim, os documentos também reconhecem desafios transversais cruciais, como a aceitação pública, que é afetada por preocupações com ruído, impacto visual, priva-





cidade e equidade de acesso. A viabilidade econômica do modelo de negócio do táxi aéreo urbano permanece uma grande interrogação, com opiniões divergentes sobre sua rentabilidade. A necessidade de uma coordenação nacional e multidisciplinar, integração multimodal com transportes terrestres e a avaliação de impacto ambiental são frequentemente mencionadas como áreas que carecem de planos concretos e detalhados, representando pontos em aberto que exigirão esforços contínuos de pesquisa, desenvolvimento e cooperação entre setores públicos e privados nos próximos anos.





## 12 Considerações Finais

Este relatório apresentou os resultados de uma revisão sistemática de 15 documentos nacionais/internacionais sobre AAM/UAM, publicados entre 2020 e 2024. A análise abrangeu documentos de agências reguladoras, indústria e consórcios de pesquisa de diversas regiões, incluindo América do Norte (FAA, Boeing, NASA), Europa (Eurocontrol, Comissão Europeia de Regulamentação), Ásia (Japão, Coreia do Sul), América do Sul (ANAC, DECEA, EmbraerX) e Oceania (Austrália). O estudo identificou tendências convergentes, divergências conceituais e lições aprendidas relevantes para o desenvolvimento do ecossistema AAM/UAM no Brasil.

As principais tendências na gestão do espaço aéreo para UAM revelam uma evolução de estruturas fixas para conceitos mais dinâmicos e baseados em performance. A abordagem de corredores dedicados, presente em documentos como *ConOps da Boeing* (Boeing, 2023), *ConOps da FAA* (FAA, 2023b) e *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021), contrasta com a proposta de volumes de espaço aéreo específicos do *ConOps do DECEA* (DECEA, 2024) e *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023). Enquanto corredores permitem uma segregação física inicial, os volumes são destacados por proporcionarem maior flexibilidade operacional. A estrutura em camadas por altitude é consensual, com operações UAM tipicamente entre 400-4.000 pés, acima do ambiente UTM e abaixo do tráfego convencional.

As principais divergências surgem nos níveis de integração/segregação das diferentes abordagens de gestão do espaço aéreo e do tráfego. Enquanto a Coreia do Sul adota corredores de uso exclusivo na fase inicial, a Boeing, o DECEA e a NASA defendem integração desde o início. A classificação do espaço aéreo também varia: alguns documentos propõem adaptar classes existentes (FAA), enquanto outros sugerem novas classificações específicas para UAM (DECEA, Eurocontrol). O DECEA se destaca ao propor uma abordagem flexível baseada em performance, evitando corredores fixos como solução primária e priorizando a integração com o ATM existente sem impor carga adicional aos controladores. Um ponto relevante é a consideração do DECEA de que o uso de corredores aéreos pode resultar em menor eficiência no uso do espaço aéreo em áreas congestionadas, o que se opõe ao entendimento da maior parte dos demais conceitos. Por exemplo, o *ConOps do Japão* (JCAB, 2024) fala expressamente que os corredores são mais eficientes nesses casos; até mesmo a Europa, que se baseia em volumes de espaço aéreo, entende que os corredores





poderão ser uma solução mais eficiente em determinados casos.

A gestão de tráfego aéreo para AAM/UAM apresenta uma trajetória evolutiva clara de modelos centralizados para arquiteturas descentralizadas e altamente automatizadas. A tendência predominante é a transição do controle por ATC tradicional para serviços especializados prestados por Provedores de Serviços UAM – PSU ou USSP, com crescente automação na separação e desconflito de tráfego. Documentos como o *Relatório Técnico Digital Flight da NASA* (WING et al., 2022) e o *ConOps da Eurocontrol* (Eurocontrol, 2023) preveem sistemas onde a responsabilidade pela separação é delegada aos operadores, com supervisão automatizada. Uma lição importante é a necessidade de balanceamento dinâmico entre demanda e capacidade, com sistemas automatizados de gerenciamento de *slots* para vertiportos e de reconfiguração dinâmica do espaço aéreo.

As divergências aparecem nos modelos de governança, variando entre centralizado (Japão/JCAB), híbrido (DECEA) e descentralizado (FAA, NASA). O DECEA propõe um modelo híbrido com um sistema central interoperável com múltiplos PSUs descentralizados, equilibrando controle centralizado com flexibilidade operacional. Um ponto em aberto é como será feita a interação entre este sistema central, que poderá ser gerido pelo DECEA ou por outra instituição por ele delegada, e PSUs, sendo o DECEA o único a propor a adoção de um modelo híbrido.

Os serviços críticos identificados são consensuais: autorização de voo, gestão de conflitos, monitoramento de conformidade e gestão de capacidade, entre outros. No entanto, os níveis de estruturação formal variam significativamente. A Eurocontrol, em articulação com a Comissão Europeia, apresenta um *roadmap* estruturado para a implementação progressiva dos serviços U-space, definindo conjuntos de serviços, requisitos funcionais e dependências técnicas alinhadas com níveis crescentes de complexidade operacional. Embora inclua referências temporais indicativas, a implementação efetiva e os respectivos prazos são determinados pelos Estados-Membros, de acordo com as suas necessidades operacionais e o nível de maturidade técnica.

No domínio regulatório, observa-se uma evolução das regras de voo tradicionais (VFR/IFR) para novos paradigmas, como Regras de Voo Digital (DFR - NASA), Regras de Voo Automatizado (AFR - FAA) e Regras U-space (UFR - Europa). A tendência é criar modos operacionais complementares que permitam maior flexibilidade e automação, mantendo a segurança. As regras de separação também evoluem de critérios fixos para parâmetros dinâmicos baseados em performance de navegação e tecnologias V2V/V2I.

As certificações de veículos e operadores representam um desafio comum, com a





FAA adaptando a Parte 135 para operações comerciais, a Europa estabelecendo um regime específico via EU 2021/664-666, e o Brasil com competências divididas entre ANAC (aeronaves) e DECEA (provedores de serviço). O acesso ao espaço aéreo tende a ser condicional ao cumprimento de requisitos técnicos e de performance específicos. O DECEA se alinha com tendências internacionais ao propor acesso baseado em performance aos volumes UAM, enquanto mantém a colaboração regulatória com a ANAC como condição indispensável para implementação. Neste contexto, a definição de um *roadmap* regulatório poderá contribuir para maior previsibilidade, seguindo exemplos da FAA e do Eurocontrol.

As tecnologias habilitadoras convergem para infraestrutura CNS (Comunicação, Navegação, Vigilância) robusta, compartilhamento de dados em tempo real e automação avançada. A comunicação evolui de voz, via radio VHF, para datalinks digitais (5G/6G, CPDLC), a navegação depende de GNSS com sistemas de aumento (SBAS/GBAS) e navegação baseada em performance (RNP), e a vigilância migra do ADS-B tradicional para identificação em rede e vigilância cooperativa.

O compartilhamento de dados por meio de arquiteturas como SWIM é consensual como base para consciência situacional compartilhada. A automação e IA/ML são fundamentais para escalabilidade, desde autorização automática de voo até resolução autônoma de conflitos. O DECEA identifica as limitações da infraestrutura CNS tradicional para ambientes urbanos densos e propõe explicitamente IA/ML para otimização de rotas e previsão de conflitos, alinhando-se com as tendências mais avançadas. Há, ainda, menção a um sistema integrado e interoperável de compartilhamento de dados, embora não haja um esboço de como esse sistema será constituído.

Os casos de uso predominantes incluem táxi aéreo urbano, transporte aeroportuário, conectividade regional, logística de carga e serviços de emergência. A distinção entre UAM (operações urbanas de curto alcance) e RAM (conectividade regional de maior distância) é amplamente reconhecida, com o DECEA enfatizando a UAM como foco inicial. As operações evoluem de voos programados para serviços sob demanda, e de aeronaves tripuladas para não tripuladas e autônomas.

Os cenários de maturidade, que representam estágios de evolução do ecossistema UAM, mostram consistência entre documentos, geralmente estruturados em 3 a 5 fases, evoluindo de operações simples para ecossistemas complexos. O DECEA adota a estrutura UML da NASA/FAA, enquanto outros documentos como *K-UAM ConOps da Coreia* (UAM Team Korea, 2021) e *UATM ConOps da EmbraerX e Airservices Australia* (EmbraerX and Airservices Australia, 2020) propõem *frameworks* similares. Uma lição transversal é a necessidade de considerar, desde o início, aspectos como aceita-





ção pública, ruído, infraestrutura de vertiportos e integração com sistemas de cidade inteligente. A definição dos *UAM Maturity Levels* (UMLs) do DECEA poderia ser complementada com maior detalhamento em comparação com outros documentos. Por exemplo, uma tabela indica que as operações UAM ocorrerão inicialmente em espaço aéreo classe D nos estágios UML-2 e UML-3, mas essa informação não é explorada de forma mais aprofundada ao longo do documento.

A revisão internacional revela consensos significativos na direção tecnológica e operacional para AAM/UAM, com divergências principalmente na governança e ritmo de implementação. O conceito brasileiro do DECEA demonstra alinhamento com as melhores práticas internacionais, particularmente na abordagem flexível de gestão do espaço aéreo, modelo híbrido de governança que prevê a atuação de novos provedores de serviços, necessidade de evolução de regras e infraestrutura, com base em digitalização e automação, e ênfase na integração com ATM existente. Recomenda-se manter esta trajetória, com atenção especial ao desenvolvimento de capacidades técnicas nacionais, *framework* regulatório colaborativo entre ANAC e DECEA, e uma abordagem faseada que priorize casos de uso iniciais viáveis enquanto prepara a infraestrutura para operações mais complexas no futuro. É interessante também a reavaliação de aspectos como a utilização de corredores, detalhamentos gerais, com clarificação sobre os papéis de diferentes atores, como PSUs, SDSPs e ECO-UAM, e a definição de um *roadmap* regulatório, incluindo a especificação de serviços críticos, requisitos funcionais e prazos de implementação. O contínuo monitoramento da evolução internacional e a participação em fóruns de padronização global permanecem essenciais para assegurar a interoperabilidade e competitividade do ecossistema brasileiro de AAM/UAM.





## Bibliografia

ANAC. **Advanced Air Mobility: Panorama e Perspectivas**. Brasília, 2023.

ASTM International. **Standard Specification for Operation of Small Unmanned Aircraft Systems over People**. West Conshohocken, PA, 2021. Disponível em: <<https://www.astm.org/f3548-21.html>>.

ASTM International. **Standard Specification for Remote ID and Tracking**. West Conshohocken, PA, 2022. Disponível em: <<https://www.astm.org/f3411-22a.html>>.

Boeing. **Concept of Operations for Uncrewed Urban Air Mobility**. Chicago, 2023. Version 2.0.

Brasil. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-12: Regras do Ar**. Rio de Janeiro, 2024. Publicada no BCA nº 206 de 14 de novembro de 2024. Em vigor a partir de 28 de novembro de 2024. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-12>>.

CAA. **Key Considerations for Airspace Integration within an Urban Air Mobility Landscape (CAP 2272)**. London: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.caa.co.uk/innovation>>. Acesso em: 13 out. 2025.

DECEA. **Concepção Operacional UAM Nacional (PCA 351-7)**. Brasília, 2024. Portaria DECEA/DNOR1 nº 1.546, de 6 nov. 2024.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-37 - Serviços de Tráfego Aéreo**. [S.l.], 2024. Em vigor a partir de 28 de novembro de 2024. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-37>>.

EmbraerX and Airservices Australia. **Urban Air Traffic Management: Concept of Operations (UATM)**. Canberra and Melbourne, 2020. Version 1.

Eurocontrol. **U-space ConOps and Architecture (Edition 4)**. Brussels, 2023. Deliverable D4.2, CORUS-XUAM Project, Grant 101017682.

European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems. **Official Journal of the European Union**, v. 152, n. 2019/945, p. 1–44, June 2019. Disponível em: <[http://data.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/945/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj)>.

European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. **Official Journal of the European Union**, v. 152, n. 2019/947, p. 45–71, June 2019. Disponível em: <[http://data.europa.eu/eli/reg\\_impl/2019/947/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj)>.

European Commission. **European Commission Implementing Regulation 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space**. 2021. Official Journal of the European Union, L 139, p. 161–183.





European Commission. **European Commission Implementing Regulation 2021/665 of 22 April 2021 amending Implementing Regulation (EU) 2017/373 as regards requirements for providers of ATM/ANS and other ATM network functions in the U-space airspace designated in controlled airspace.** 2021. Official Journal of the European Union, L 139, p. 184–186.

European Commission. **European Commission Implementing Regulation 2021/666 of 22 April 2021 amending Regulation (EU) No 923/2012 as regards requirements for manned aviation operating in U-space airspace.** 2021. Official Journal of the European Union, L 139, p. 187–189.

FAA. **Advanced Air Mobility (AAM) Implementation Plan: Near-term (Innovate28) Focus with an Eye on the Future of AAM, Version 1.0.** Washington, D.C.: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.faa.gov>>. Acesso em: 13 out. 2025.

FAA. **Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations, Version 2.0.** Washington, D.C.: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.faa.gov>>. Acesso em: 13 out. 2025.

Incheon Metropolitan City. Relatório técnico, **Advanced Air Mobility: Concept of Operations for Incheon Metropolitan City.** Incheon, South Korea: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.incheon.go.kr>> (acesso em: 13 out. 2025).

International Civil Aviation Organization. **Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management (PANS-ATM).** 16th. ed. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2016. Doc 4444, AN/501. ISBN 978-92-9258-081-0.

JCAB. **Concept of Operations for Advanced Air Mobility.** Tokyo: [s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.mlit.go.jp>>. Acesso em: 13 out. 2025.

Office of the Federal Register. **Title 14 CFR - Aeronautics and Space.** National Archives and Records Administration, 2025. Code of Federal Regulations. Title 14. Disponível em: <<https://www.ecfr.gov/current/title-14>>.

RTCA, Inc. **Airworthiness Security Process Specification.** Washington, D.C., 2014. Disponível em: <<https://www.rtca.org/>>.

RTCA, Inc. **Airworthiness Security Methods and Considerations.** Washington, D.C., 2018. Disponível em: <<https://www.rtca.org/>>.

RTCA, Inc. **DO-377A: Minimum Aviation System Performance Standards for C2 Link Systems Supporting Operations of Unmanned Aircraft Systems in U.S. Airspace.** Washington, D.C., 2021. Disponível em: <[https://my.rtca.org/NC\\_Product?id=a1B1R00000OGaItUAL](https://my.rtca.org/NC_Product?id=a1B1R00000OGaItUAL)>.

RTCA, Inc. **Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems, Minimum Performance Standards for Unmanned Aircraft System.** [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://my.rtca.org/productdetails?id=a1B1R00000SEJDbUAP>>.

SEUKEN, S.; FRIEDRICH, P.; DIERKS, L. Market design for drone traffic management. In: **Proceedings of the AAI Conference on Artificial Intelligence.** [S.l.: s.n.], 2022. v. 36, n. 11, p. 12294–12300.





UAM Team Korea. **K-UAM Concept of Operations 1.0**. Seoul: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.utkorea.go.kr>>. Acesso em: 13 out. 2025.

WING, D. et al. **Digital Flight: A New Cooperative Operating Mode to Complement VFR and IFR**. Hampton, VA, 2022. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov>>. Acesso em: 13 out. 2025.

