

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Vitor de Oliveira Marchetti**

**Infraestrutura urbana e aérea para a integração de  
aeronaves eVTOL: desafios e soluções**

**São Carlos**

**2024**



**Vitor de Oliveira Marchetti**

**Infraestrutura urbana e aérea para a integração de  
aeronaves eVTOL: desafios e soluções**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Martins Abdalla

**São Carlos  
2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M845i      Marchetti, Vitor de Oliveira  
              Infraestrutura urbana e aérea para a integração  
de aeronaves eVTOL: desafios e soluções / Vitor de  
Oliveira Marchetti; orientador Álvaro Martins Abdalla.  
São Carlos, 2024.




Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica)  
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2024.

1. eVTOL. 2. Mobilidade. 3. Infraestrutura. 4.  
Integração. 5. Segurança. I. Título.

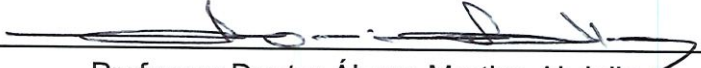


**FOLHA DE APROVAÇÃO**  
**Approval sheet**

<b>Candidato / Student:</b> Vitor de Oliveira Marchetti
<b>Título do TCC / Title :</b> Infraestrutura Urbana e Aérea para a Integração de aeronaves eVTOL: Desafios e Soluções
<b>Data de defesa / Date:</b> 19/11/2024

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / result
Professor Doutor Álvaro Martins Abdalla 	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Professor Doutor João Paulo Eguea	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA 	
Professor Doutor Jorge Henrique Bidinotto	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA 	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee:

  
Professor Doutor Álvaro Martins Abdalla  
(assinatura / signature)



*Este trabalho é dedicado à indústria da aviação, buscando contribuir com o desenvolvimento do mercado aeronáutico brasileiro através da pesquisa científica.*



## **AGRADECIMENTOS**

Aos amigos e familiares, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores da Universidade de São Paulo, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.



*“O homem há de voar.”*

*Santos Dumont*





## RESUMO

MARCHETTI, V. **Infraestrutura urbana e aérea para a integração de aeronaves eVTOL**. 2024. 77p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Este trabalho tem como objetivo analisar os requisitos de infraestrutura urbana e aérea necessários para a integração de aeronaves eVTOL (veículos elétricos de decolagem e pouso vertical) no contexto da mobilidade aérea urbana. O estudo abrange os desafios relacionados ao planejamento de vertiportos, rotas aéreas, controle de tráfego e segurança operacional, além de apresentar soluções tecnológicas e regulatórias. São discutidos os principais elementos envolvidos, como o dimensionamento de mercados, requisitos de homologação dos vertiportos e a evolução dos sistemas de controle de tráfego aéreo, com foco na implementação de tecnologias de comunicação de alta capacidade, vigilância em tempo real e navegação precisa. A pesquisa também abordou a integração entre vertiportos e aeroportos, propondo modelos de operação que garantem eficiência e segurança para as aeronaves eVTOL em espaços urbanos. Questões relacionadas à segurança, como a prevenção de acidentes, o impacto de falhas em baixa altitude e o acesso público dessas novas aeronaves, são exploradas com base em exemplos de operações de helicópteros e estudos sobre acidentes aéreos em áreas densamente povoadas.

**Palavras-chave:** Infraestrutura. eVTOL. Integração. Mobilidade. Segurança.



## **ABSTRACT**

MARCHETTI, V. **Urban and air infrastrucutre for integration of eVTOL aircrafts: challenges and solutions**. 2024. 77p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

This work aims to analyze the urban and aerial infrastructure requirements necessary for the integration of eVTOL aircraft (electric vertical takeoff and landing vehicles) in the context of urban air mobility. The study covers the challenges related to vertiport planning, air routes, traffic control, and operational safety, while also presenting technological and regulatory solutions. The key elements involved, such as market sizing, vertiport certification requirements, and the evolution of air traffic control systems, are discussed with a focus on the implementation of high-capacity communication technologies, real-time surveillance, and precise navigation. The research also addressed the integration between vertiports and airports, proposing operational models that ensure efficiency and safety for eVTOL aircraft in urban spaces. Safety issues, such as accident prevention, the impact of low-altitude failures and public access to these new aircraft, are explored based on examples from helicopter operations and accidents in densely populated areas.

**Keywords:** Infrastructure. eVTOL. Integration. Mobility. Security.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Meios de transporte público mais utilizados no Brasil. Fonte: (PODER 360, 2023) . . . . .	23
Figura 2 – Principais problemas dos meios de transporte público mais utilizados no Brasil. Fonte: (PODER 360, 2023) . . . . .	23
Figura 3 – Comparação de tempo entre um carro de aplicativo e eVTOL de São Paulo à Campinas. Fonte: (FAPESP, 2019) . . . . .	24
Figura 4 – Crescimento do congestionamento do tráfego urbano nos Estados Unidos. Fonte: (TEXAS A&M TRANSPORTATION INSTITUTE, 2019) . . . .	29
Figura 5 – Projeção do mercado para eVTOLs. Fonte: (MORGAN STANLEY, 2019)	30
Figura 6 – Projeção do usuários para eVTOLs. Fonte: (ROLAND BERGER, 2020)	31
Figura 7 – Classificação do espaço aéreo. Fonte: (AERIAL GUIDE, 2018) . . . . .	32
Figura 8 – Classificação do espaço aéreo com helicópteros. Fonte: (AIRSERVICES AUSTRALIA, 2020) . . . . .	36
Figura 9 – eVTOL Joby. Fonte: (JOBY AVIATION, 2024) . . . . .	41
Figura 10 – eVTOL Volocopter. Fonte: (VOLOCOPTER, 2024) . . . . .	42
Figura 11 – eVTOL Lilium. Fonte: (LILIUM AIR MOBILITY, 2024) . . . . .	42
Figura 12 – eVTOL Beta Technologies. Fonte: (BETA TEAM, 2024) . . . . .	43
Figura 13 – eVTOL Airbus. Fonte: (AIRBUS, 2024) . . . . .	43
Figura 14 – eVTOL Embraer/Eve. Fonte: (EVE AIR MOBILITY, 2024) . . . . .	44
Figura 15 – eVTOL Ehang. Fonte: (EHANG, 2024) . . . . .	45
Figura 16 – Conceito da EASA para UAM. Fonte: (EUROCONTROL, 2019) . . . .	61
Figura 17 – Conceito do FAA para UAM. Fonte: (FAA, 2019) . . . . .	64
Figura 18 – Conceito da DLR para UAM. Fonte: (NIKLAß, 2019) . . . . .	66
Figura 19 – Conceito da Varon Vehicles para UAM. Fonte: (VARON VEHICLES, 2019) . . . . .	67
Figura 20 – Conceito da Embraer para UAM. Fonte: (EMBRAER, 2019) . . . . .	68
Figura 21 – Atuação do UASP no controle de tráfego. Fonte: (EMBRAER, 2019) .	68
Figura 22 – Serviços essenciais para a implementação do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019) . . . . .	70
Figura 23 – Exemplo de rotas e corredores. Fonte: (EMBRAER, 2019) . . . . .	70
Figura 24 – Controle dinâmico do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019) . . . . .	71
Figura 25 – Controle emergencial do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019) . . . . .	72



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance– Broadcast</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANSPs	<i>Air Navigation Providers</i>
ATC	<i>Air Traffic Controler</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
CAA	<i>Civil Aviation Authority</i>
CONOPS	<i>Concept of Operations</i>
CORUS	<i>Concept of Operations for U-Space</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
EASA	<i>European Aviation Safety Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
eVTOL	<i>Eletrical Vertical Take-Off and Landing</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	<i>Artificial Intelligence</i>
IFR	<i>Instrumental Flight Rules</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
sUAS	<i>System for small UAS</i>
UAM	<i>Urban Air Mobility</i>
UATM	<i>Urban Air Traffic Management</i>

UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i>
UASP	<i>Unmanned Aircraft System Providers</i>
UML	<i>Urban Air Mobility Maturity Level</i>
UTM	<i>Unmanned Aircraft System Traffic Management</i>
USS	<i>UAS Service Suppliers</i>



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	21
2	OBJETIVOS . . . . .	27
3	A MOBILIDADE AÉREA URBANA . . . . .	29
3.1	O Espaço Aéreo Atual e seu Controle . . . . .	31
3.1.1	Classes de Espaço Aéreo . . . . .	32
3.1.2	Controle do espaço aéreo para helicópteros . . . . .	36
3.2	Regulamentações para Mobilidade Aérea Urbana . . . . .	38
3.3	Empresas Apostando na Inovação e Modelos de eVTOL . . . . .	41
3.4	Obstáculos da concepção UAM . . . . .	46
4	DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA UAM . . . . .	47
4.1	Infraestrutura física . . . . .	47
4.2	Infraestrutura digital . . . . .	50
4.3	Operação e segurança . . . . .	53
4.4	Impacto ambiental . . . . .	55
5	SOLUÇÕES PREVISTAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA UAM .	59
5.1	EASA - <i>Conceito Corus</i> . . . . .	60
5.2	NASA . . . . .	61
5.3	FAA . . . . .	63
5.4	CAA - Reino Unido . . . . .	64
5.5	DLR - Alemanha . . . . .	65
5.6	Varon Vehicles . . . . .	66
5.7	Embraer - <i>Flight Plan 2030</i> . . . . .	67
6	CONCLUSÃO . . . . .	73
	REFERÊNCIAS . . . . .	75



## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, o transporte de pessoas tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento social, econômico e cultural das sociedades. Na antiguidade, as pessoas dependiam de métodos rudimentares para se deslocarem, como a caminhada e o uso de animais de carga. Com o passar do tempo, a invenção da roda e o aperfeiçoamento das técnicas de construção de veículos terrestres, como as carruagens, revolucionaram a forma como as distâncias eram percorridas. Civilizações antigas, como os romanos, desenvolveram redes de estradas que possibilitaram um maior fluxo de pessoas e mercadorias, promovendo o comércio e a expansão territorial.

O advento da Revolução Industrial no século XVIII marcou o início de uma transformação sem precedentes no setor de transportes. Com a invenção da máquina a vapor, os primeiros trens começaram a operar, oferecendo um meio de transporte mais rápido e eficiente, capaz de cobrir grandes distâncias em menor tempo. No século XIX, o transporte ferroviário consolidou-se como um dos principais modos de locomoção em várias partes do mundo, especialmente na Europa e nos Estados Unidos. Paralelamente, a navegação marítima passou por grandes avanços, com a introdução dos navios a vapor, que tornaram as viagens intercontinentais mais rápidas.

O início do século XX trouxe consigo a popularização dos automóveis e dos aviões, impulsionada pelos avanços na engenharia e na produção em massa. O carro, inventado no final do século XIX, tornou-se o principal meio de transporte pessoal, alterando radicalmente o planejamento urbano e a forma como as cidades se expandiam. Já a aviação comercial começou a ganhar força após a Primeira Guerra Mundial, com os primeiros voos comerciais surgindo na década de 1920. O desenvolvimento de aeronaves mais rápidas e seguras ao longo das décadas seguintes, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, permitiu que o transporte aéreo se tornasse a principal escolha para viagens de longa distância, conectando cidades e continentes em um curto espaço de tempo.

No final do século XX e início do século XXI, o transporte de pessoas passou por uma nova fase de inovação, com o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e eficientes. Trens de alta velocidade, como os famosos TGV franceses e os Shinkansen japoneses, revolucionaram o transporte ferroviário ao oferecerem deslocamentos rápidos e confortáveis entre grandes centros urbanos. Ao mesmo tempo, a preocupação com o meio ambiente e a busca por alternativas ao uso de combustíveis fósseis incentivaram a criação de veículos elétricos e híbridos, que ganharam popularidade como soluções para o transporte.

A mobilidade urbana enfrenta desafios crescentes à medida que as cidades começam

a se expandir e as populações urbanas aumentam. Os principais meios de locomoção no Brasil, de acordo com a Figura 1, representam grande uso de ônibus e carros, entretanto, congestionamentos constantes, emissões de poluentes e deficiências de soluções de transporte rápidas e eficientes, assim como exposto na Figura 2, fazem com que governos e empresas busquem alternativas inovadoras para melhorar a mobilidade nos centros urbanos, como, por exemplo, utilizando o conceito de Mobilidade Aérea Urbana (UAM).

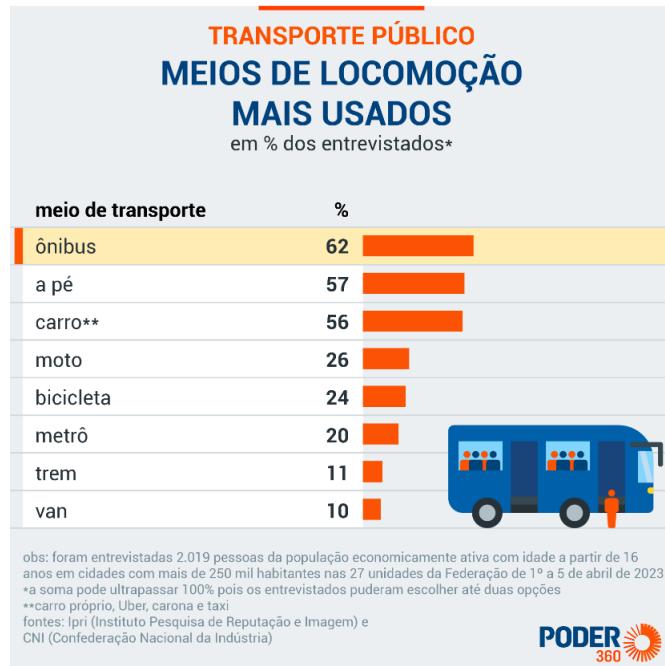


Figura 1 – Meios de transporte público mais utilizados no Brasil. Fonte: (PODER 360, 2023)



Figura 2 – Principais problemas dos meios de transporte público mais utilizados no Brasil. Fonte: (PODER 360, 2023)

Segundo a EASA, a Agência de Segurança da Aviação na União Europeia (EASA, 2021a), o conceito UAM, da sigla em inglês *Urban Air Mobility*, poderia ser definido como “um novo sistema de transporte, seguro e sustentável, para passageiros e carga, dentro de ambientes urbanos, viabilizado por novas tecnologias e integrado com outros modais de transporte”. Este conceito pode ser imaginado como verdadeiros táxis aéreos urbanos,

fluindo em grandes metrópoles.

Nesse contexto, as aeronaves eVTOL (veículos elétricos de decolagem e pouso vertical) surgem como uma solução promissora para transformar o transporte aéreo, oferecendo deslocamentos rápidos e ambientais mais sustentáveis, assim como exposto na figura 3 que compara uma viagem de eVTOL e de carro com a empresa Uber. Integradas ao conceito UAM, essas aeronaves visam resolver alguns dos maiores desafios enfrentados pelas cidades, como congestionamento no trânsito e a necessidade de soluções de transporte limpas e de alta capacidade. Assim como o carro e o avião transformaram o transporte no século XX, as aeronaves eVTOL têm o potencial de redefinir a mobilidade urbana, integrando-se ao tecido das cidades de forma eficiente e segura.

### Car vs. eVTOL ▲

Uber study compared the cost and time of commuting between the cities of São Paulo and Campinas by car and eVTOL

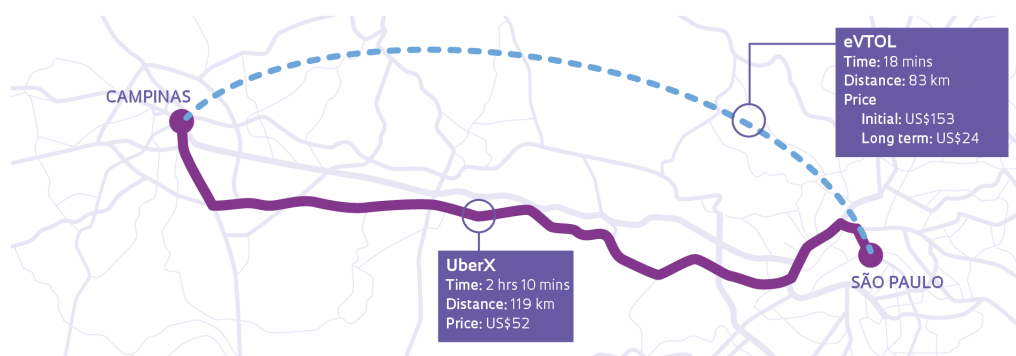


Figura 3 – Comparação de tempo entre um carro de aplicativo e eVTOL de São Paulo à Campinas. Fonte: (FAPESP, 2019)

As aeronaves eVTOL representam uma revolução tecnológica não apenas no setor de aviação, mas também na maneira como o transporte urbano pode ser concebido. Alimentadas por sistemas elétricos, essas aeronaves prometem reduzir significativamente as emissões de carbono, ao mesmo tempo em que operam de forma silenciosa em comparação com helicópteros tradicionais. A decolagem e o pouso vertical possibilitam que essas aeronaves utilizem espaços limitados e otimizem áreas urbanas, como terraços de edifícios, para pouso e decolagem, ou que minimizem a necessidade de grandes infraestruturas aeroportuárias. Essa flexibilidade abre novas oportunidades para desenvolver um sistema de transporte que não dependa de infraestruturas tradicionais e congestionadas de estradas e rodovias.

No entanto, para que esse conceito de mobilidade aérea urbana se torne realidade, há uma série de desafios críticos a serem enfrentados. A adaptação da infraestrutura urbana para receber aeronaves eVTOL exige um planejamento meticuloso, que envolve não apenas a construção de vertiportos — estruturas previstas ao pouso, decolagem e manutenção dessas aeronaves — mas também a integração com os sistemas de transporte

existentes, como aeroportos e modais terrestres . Além disso, o controle do espaço aéreo em áreas densamente povoadas requer uma reestruturação significativa, com a introdução de sistemas avançados de controle de tráfego aéreo que garantem a segurança e eficiência das operações de eVTOL em grande escala.

Outro aspecto crítico é a acessibilidade pública e regulatória dessas aeronaves, que depende de garantias de segurança operacional, confiabilidade tecnológica e sustentabilidade. Os voos em baixa altitude, especialmente em áreas urbanas, levantam questões de segurança sobre o gerenciamento de falhas, acidentes e painel em sistemas críticos, o que exige a criação de novos protocolos de segurança. Além disso, as preocupações com ruído e impacto ambiental, principalmente no descarte de baterias, devem ser abordadas de forma transparente para garantir que essas aeronaves possam operar de maneira sustentável.





## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo central a análise dos desafios e das soluções para a implementação da Mobilidade Aérea Urbana, utilizando aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical, em grandes centros urbanos. Para atingir o objetivo, o estudo será dividido em quatro grandes áreas de análise: infraestrutura física, infraestrutura digital, operação e segurança e impactos ambientais. Cada uma dessas áreas será avaliada com base nas demandas e complexidades que envolvem a inserção dos eVTOLs no espaço aéreo urbano, considerando a previsão prática e tecnológica, bem como a integração com o ecossistema de transporte já existente e consolidado.

A infraestrutura física é essencial para a implementação da UAM e envolve a construção e a adequação de vertiportos, que devem ser localizados estrategicamente em áreas urbanas de alta densidade populacional e com fácil acesso a outros meios de transporte. Esses vertiportos modernos de áreas de decolagem e pouso, zonas de espera, e espaços para manutenção, projetados para operar com múltiplas aeronaves simultaneamente e acomodar um fluxo de passageiros elevado. Além disso, é crucial que haja uma integração eficaz com a infraestrutura de transporte existente, como ônibus e metrô, para garantir a fluidez no posicionamento dos usuários. A adaptação de estruturas urbanas, como terraços de prédios, também pode oferecer pontos de pouso alternativos, otimizando o uso do espaço. Por fim, protocolos de segurança devem ser implementados para mitigar riscos para a população.

No campo da infraestrutura digital, o foco será em avanços tecnológicos necessários para garantir a segurança e a eficiência das operações de eVTOLs em grande escala. Isso inclui uma análise dos sistemas de controle de tráfego aéreo específicos para aeronaves que operam em baixa altitude, onde o risco de complicações com prédios e outras estruturas urbanas é maior. Tecnologias de comunicação de alta capacidade, vigilância em tempo real e navegação precisa e monitorada serão exploradas como elementos essenciais para a coordenação dessas agências em áreas urbanas densas. Além disso, o trabalho discutirá a necessidade de desenvolver sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo que possam lidar com um grande número de eVTOLs simultaneamente, criando "estradas no céu" que sejam seguras e eficientes. Será analisado, ainda, como essas tecnologias podem ser integradas aos sistemas já existentes de controle aéreo, tanto em áreas urbanas quanto em suas proximidades.

A operação e a segurança das aeronaves eVTOL são especificamente outro desafio central que será abordado. O trabalho investigará como garantir que essas aeronaves possam operar de maneira segura em ambientes urbanos, onde as falhas em voo apresentam um risco significativo para a população. Serão considerados sistemas de redundância e *backup* que

podem ser instalados para prevenir acidentes e mitigar os impactos de uma eventual falha mecânica ou elétrica. Questões relacionadas à cibersegurança também serão exploradas, especialmente no que se refere a aeronaves que podem ser pilotadas remotamente ou operar de forma totalmente autônoma.

Por fim, o trabalho abordará as questões ambientais relacionadas à implementação de aeronaves eVTOL nas cidades. Serão analisados os impactos de ruído que essas aeronaves podem gerar em comparação com helicópteros e veículos terrestres, especialmente em áreas densamente habitadas. Além disso, será considerado o ciclo de vida das baterias utilizadas nessas aeronaves, incluindo os desafios associados ao descarte e à reciclagem, de modo a garantir que a operação das eVTOLs seja sustentável em longo prazo.

Além de analisar os desafios, este trabalho propõe avaliar as soluções tecnológicas e regulatórias que já estão sendo desenvolvidas em diferentes partes do mundo para viabilizar a Mobilidade Aérea Urbana. Serão examinadas experiências internacionais de testes e operações de aeronaves eVTOL em ambientes controlados, destacando as melhores práticas e as inovações que podem ser aplicadas em outras cidades. O estudo também explorará possíveis inovações adicionais, como novas tecnologias de controle de tráfego, melhorias na eficiência energética e no armazenamento de energia, e métodos mais seguros de coordenação entre aeronaves e infraestrutura.

### 3 A MOBILIDADE AÉREA URBANA

A Mobilidade Aérea Urbana surge como uma resposta inovadora aos desafios de congestionamento nas cidades modernas, oferecendo soluções de transporte aéreo que prometem melhorar a eficiência e a sustentabilidade da mobilidade urbana. De acordo com a Figura 4, o congestionamento é crescente ao longo dos anos independente do tamanho do grupo populacional.

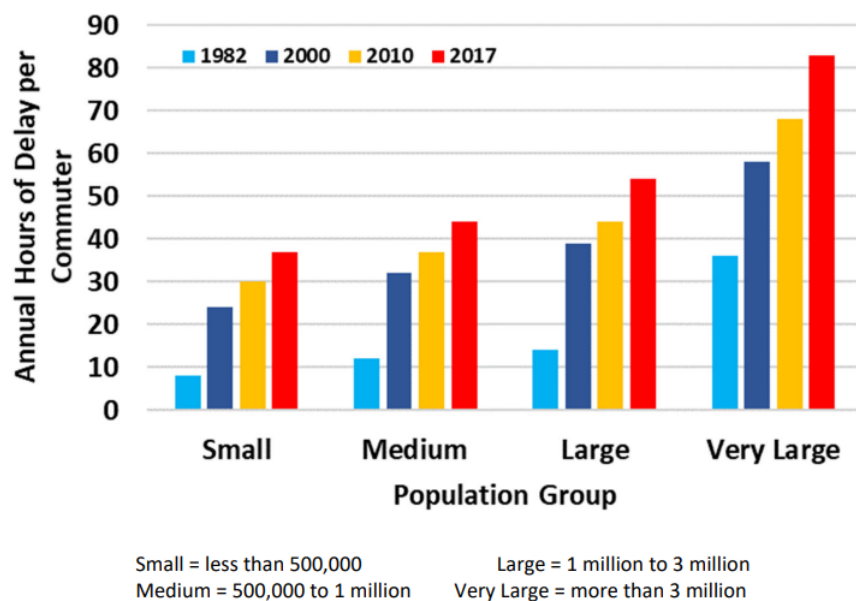


Figura 4 – Crescimento do congestionamento do tráfego urbano nos Estados Unidos. Fonte: (TEXAS A&M TRANSPORTATION INSTITUTE, 2019)

As empresas veem nos eVTOLs uma oportunidade para transformar a mobilidade urbana, oferecendo serviços que atendem às demandas contemporâneas por agilidade e sustentabilidade. Devido a sua similaridade de operação, os eVTOLs são frequentemente comparados aos helicópteros, entretanto, os eVTOLs são projetados para serem mais silenciosos e menos poluentes, abordando preocupações ambientais e de aceitação pública. Além disso, eles apresentam custos operacionais mais baixos devido à sua propulsão elétrica, maior eficiência e menor necessidade de manutenção. A tecnologia de eVTOL também permite um design mais versátil e compacto, facilitando operações em áreas urbanas densas, onde os espaços para pouso e decolagem são limitados.

Com isso, aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical se apresentam como a principal solução para o futuro de cidades congestionadas.

O mercado de eVTOLs está projetado para experimentar um crescimento significa-

tivo nas próximas décadas, com diversas previsões apontando para um potencial de lucros expressivos. Segundo um relatório da Morgan Stanley (MORGAN STANLEY, 2019) e a Figura 5, o mercado global de mobilidade aérea urbana pode ultrapassar 1 trilhão de dólares até 2040, com o aumento da demanda por soluções de transporte aéreo nas cidades. Essa expectativa se deve não apenas ao crescimento da população urbana, mas também ao aumento do congestionamento nas vias terrestres, que torna o transporte aéreo uma alternativa cada vez mais viável.

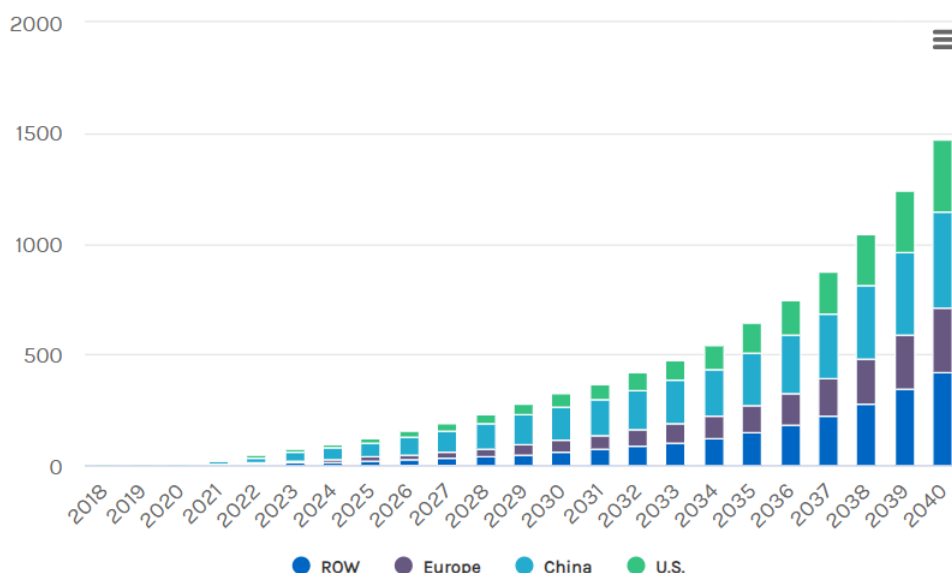


Figura 5 – Projeção do mercado para eVTOLs. Fonte: (MORGAN STANLEY, 2019)

Em termos de passageiros, estima-se que milhões de pessoas possam utilizar plataformas de eVTOL diariamente em áreas urbanas. Por exemplo, um estudo da Roland Berger (ROLAND BERGER, 2020) projeta que, até 2035, cerca de 20% dos passageiros em áreas urbanas poderão optar por serviços de eVTOL, representando uma parte significativa do total de viagens urbanas, assim como exposto na Figura 6. Isso se traduz em uma demanda crescente por serviços de táxi aéreo e transporte sob demanda, à medida que as cidades implementam a infraestrutura necessária, como vertiportos e sistemas de controle de tráfego aéreo.

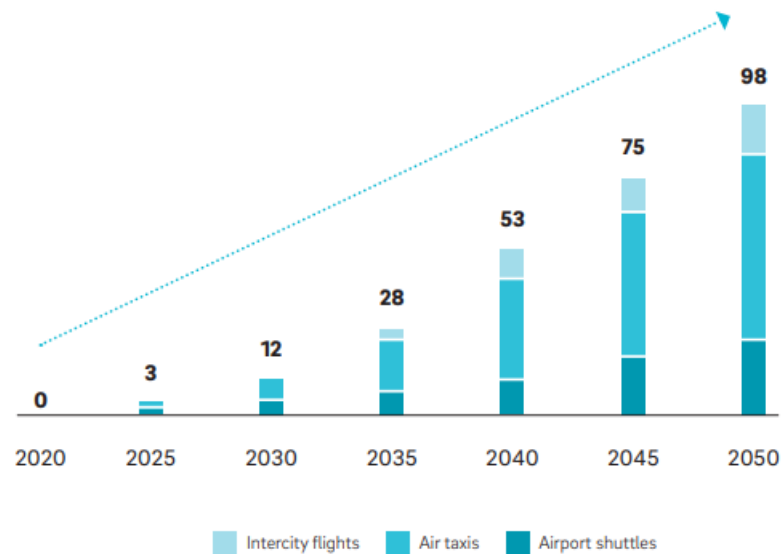


Figura 6 – Projeção do usuários para eVTOLs. Fonte: (ROLAND BERGER, 2020)

Quanto ao tempo economizado, o transporte por eVTOL pode reduzir drasticamente os tempos de viagem em comparação com o tráfego rodoviário. Por exemplo, estimativas indicam que um trajeto que normalmente levaria duas horas em um carro pode ser realizado em menos de 20 minutos por eVTOL (FAPESP, 2019), dependendo da distância e das condições do tráfego. Essa economia de tempo não apenas melhora a conveniência para os passageiros, mas também contribui para a eficiência geral do transporte urbano, permitindo uma melhor utilização do tempo e dos recursos.

Em resumo, o mercado de eVTOLs, e sua respectiva mobilidade aérea urbana, apresenta um potencial de lucro robusto, com expectativas de milhões de passageiros utilizando essas plataformas e significativas economias de tempo, o que torna essa inovação uma solução atraente para os desafios de mobilidade urbana.

### 3.1 O Espaço Aéreo Atual e seu Controle

O espaço aéreo é dividido em diferentes classes para acomodar diversos tipos de operações e garantir a segurança e a eficiência dos voos, assim como apresentado na Figura 7. De acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) (OACI, 2018a), essas classes (A a G) determinam o nível de separação, vigilância e comunicação exigido para cada voo. Em áreas de maior tráfego, como aeroportos ou regiões de alta densidade populacional, o espaço aéreo é fortemente controlado para garantir a separação segura entre aeronaves.

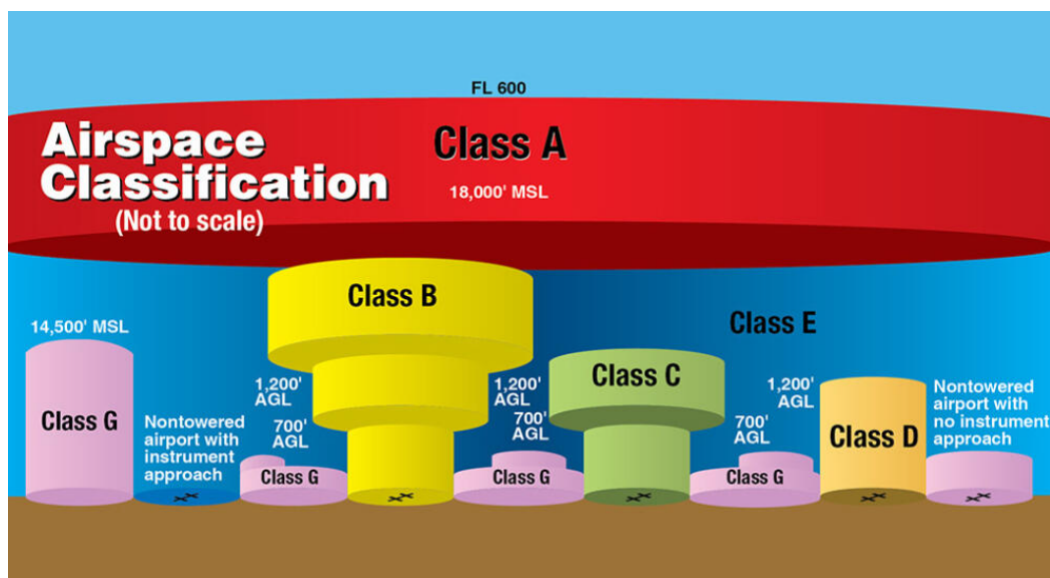


Figura 7 – Classificação do espaço aéreo. Fonte: (AERIAL GUIDE, 2018)

### 3.1.1 Classes de Espaço Aéreo

- **Classe A:** A Classe A é o espaço aéreo mais restrito e controlado, geralmente encontrado em altitudes elevadas, tipicamente acima de 24.500 pés (cerca de 7.500 metros) em muitos países. Nessa classe, apenas voos sob as Regras de Voo por Instrumentos (IFR) são permitidos, o que significa que todos os aviões são controlados de forma rigorosa por instrumentos e devem seguir as instruções dos controladores de tráfego aéreo (ATC). As aeronaves comerciais de grande porte, como aviões de passageiros e carga, que operam em rotas de longo alcance, são os principais usuários desta classe. A vigilância do espaço aéreo é feita principalmente por radar, e o ATC é responsável pela separação completa entre aeronaves.
- **Classe B:** A Classe B é destinada aos espaços aéreos ao redor de grandes aeroportos com muito tráfego, como Nova York (JFK), Londres (Heathrow) ou São Paulo (Guarulhos). Ela abrange uma grande área em torno desses aeroportos e pode se estender desde o solo até altitudes de 10.000 pés (cerca de 3.000 metros). Tanto voos IFR quanto VFR (Regras de Voo Visual) são permitidos, mas com controle rigoroso. As aeronaves devem obter autorização do ATC para entrar neste espaço e devem seguir instruções específicas. A Classe B é usada por aviões comerciais, jatos executivos, e em alguns casos, por aeronaves de pequeno porte que operam de ou para esses grandes hubs aeroportuários. A separação entre aeronaves é totalmente controlada por ATC, garantindo alta segurança e fluxo de tráfego.
- **Classe C:** A Classe C também é utilizada em torno de aeroportos, mas em menor escala do que a Classe B. Ela se aplica a aeroportos com tráfego moderado e pode

cobrir o espaço aéreo desde o solo até cerca de 4.000 pés acima do nível do aeroporto. Voos IFR e VFR são permitidos, mas os voos VFR devem estar em comunicação constante com o controle de tráfego aéreo. Nesta classe, há uma vigilância por radar para monitorar a posição das aeronaves e o ATC provê separação entre aeronaves IFR e entre aeronaves IFR e VFR. As aeronaves de pequeno e médio porte, incluindo voos regionais e de aviação geral, são comuns nesta classe.

- **Classe D:** A Classe D é tipicamente aplicada a aeroportos menores, mas que ainda requerem algum nível de controle. O espaço aéreo da Classe D vai do solo até uma altitude de cerca de 2.500 pés (760 metros) ao redor de aeroportos com tráfego moderado. Embora menos restritiva que as Classes B e C, todos os voos devem manter comunicação com o ATC, e as aeronaves IFR têm prioridade sobre os voos VFR. A separação é menos rigorosa, e em muitos casos, os voos VFR apenas precisam informar sua posição, sem necessidade de separação direta por ATC. Aeronaves pequenas, aviões de treinamento e helicópteros são comuns nesta classe.
- **Classe E:** A Classe E é considerada um espaço aéreo controlado, mas com menos restrições do que as classes anteriores. Ela cobre grande parte do espaço aéreo inferior em áreas menos congestionadas, indo geralmente desde 1.200 pés acima do solo até 18.000 pés, mas sem incluir áreas que estão sob as Classes A, B, C ou D. Voos IFR e VFR são permitidos, mas voos VFR não precisam estar em comunicação com o ATC, a menos que entrem em áreas de controle. Nesta classe, a separação é fornecida apenas entre aeronaves IFR, enquanto voos VFR operam de forma independente, com responsabilidade de evitar colisões através de procedimentos visuais. A Classe E é usada por aeronaves de aviação geral, incluindo aviões leves, helicópteros e voos de negócios.
- **Classe F:** A Classe F não é amplamente utilizada em muitos países e, quando presente, refere-se a um espaço aéreo parcialmente controlado, onde a prestação de serviços de separação para voos IFR é opcional. Neste espaço aéreo, as aeronaves IFR operam sob certas regras de separação, mas as aeronaves VFR não são necessariamente monitoradas ou controladas, criando um ambiente híbrido. É comum em áreas de tráfego muito leve ou remoto, onde o risco de colisão é baixo, mas ainda há uma necessidade de supervisão para voos IFR.
- **Classe G:** A Classe G é o espaço aéreo não controlado, que normalmente cobre as áreas abaixo de 1.200 pés (365 metros) ou em regiões muito remotas. Neste espaço, não há serviço de controle de tráfego aéreo, e todas as aeronaves, sejam elas IFR ou VFR, operam sob sua própria responsabilidade. O piloto é responsável por garantir a separação de outras aeronaves e evitar obstáculos. Este espaço é amplamente utilizado por aeronaves de aviação geral, como ultraleves, aviões agrícolas, drones e

helicópteros. Em muitas regiões rurais, áreas costeiras ou montanhosas, a Classe G é o espaço predominante para aeronaves de pequeno porte.

O controle de tráfego aéreo difere amplamente entre as classes. Nos espaços aéreos das classes A, B e C, os serviços de controle são rígidos e a vigilância constante, muitas vezes por radar e ADS-B, garante a segurança entre aeronaves. O ATC fornece instruções detalhadas para manter a separação horizontal e vertical, garantindo que aeronaves nunca se aproximem em níveis perigosos. Já nas Classes D, E e G, o controle é menos intensivo, com uma combinação de responsabilidade do piloto e supervisão limitada do ATC.

A importância desse sistema de classificação é que ele permite que diferentes tipos de voos coexistam de forma segura, seja em espaços controlados como grandes hubs aeroportuários ou em áreas menos movimentadas, onde a flexibilidade é maior. No entanto, a introdução de eVTOLs e outras formas de mobilidade aérea urbana exigirá um redesenho dessas regras e a criação de uma nova classe de espaço aéreo ou a adaptação dos espaços existentes para acomodar veículos que operam em altitudes mais baixas e em ambientes urbanos densos.

No entanto, o espaço aéreo urbano apresenta desafios adicionais devido ao tráfego concentrado em altitudes mais baixas, onde predominam aeronaves de pequeno porte, como helicópteros, drones e, no futuro, eVTOLs. Diferentemente das operações em rotas de grande altitude, os voos em áreas urbanas exigem um controle dinâmico e ágil, dadas as condições variáveis e a proximidade de obstáculos naturais e artificiais, como edifícios altos e infraestruturas críticas.

Nas áreas urbanas, o controle do espaço aéreo é limitado a zonas designadas, conhecidas como corredores de tráfego, onde helicópteros e aeronaves de pequeno porte podem operar com segurança. Essas áreas são coordenadas com o ATC e evitam sobrevoos em zonas críticas, como áreas densamente povoadas, e são ajustadas de acordo com as condições climáticas e operacionais.

Helicópteros, por exemplo, operam sob o princípio do VFR em muitos casos, o que significa que dependem das condições visuais para navegação e segurança. O uso de tecnologia de vigilância, como o ADS-B, tem sido implementado em algumas áreas urbanas para fornecer uma camada adicional de controle e segurança, permitindo ao ATC rastrear helicópteros e coordenar suas rotas com segurança.

A integração dos eVTOLs em um ambiente já saturado nas classes B e C representa um grande desafio. O controle de tráfego precisa ser reimaginado para permitir que veículos operem de maneira autônoma ou semiautônoma, interagindo em tempo real com outras aeronaves e com o ATC. Tecnologias como o UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management) estão sendo desenvolvidas para suportar esse aumento no tráfego em áreas urbanas, utilizando dados em tempo real, inteligência artificial e comunicação constante



entre veículos para evitar colisões e garantir um fluxo de tráfego eficiente.(FAA, 2021).

Vale ressaltar que o UTM é um sistema projetado para gerenciar de maneira segura e eficiente o tráfego de aeronaves não tripuladas (drones) no espaço aéreo de baixa altitude. Ele está sendo concebido para lidar com o crescente número de drones operando em áreas urbanas, periurbanas e rurais, onde a coordenação do espaço aéreo tradicional, voltada para aeronaves tripuladas, não é adequada.

O objetivo principal do UTM é criar um ambiente em que drones possam voar em proximidade uns dos outros e de outras aeronaves de maneira coordenada, sem a necessidade de intervenção direta do controle de tráfego aéreo convencional. Para isso, o sistema depende de tecnologias avançadas, como sensores, redes de comunicação, algoritmos de inteligência artificial e bancos de dados em tempo real, que ajudam a monitorar a posição, velocidade e trajetória de cada drone. Dessa forma, as principais características do UTM são:

- **Autonomia:** O UTM opera sem a necessidade de supervisão humana constante. Os operadores de drones podem enviar planos de voo e obter autorização automaticamente, com o sistema gerenciando de forma autônoma a separação e o controle das aeronaves.
- **Comunicação em tempo real:** Utilizando redes de comunicação de alta capacidade, o UTM permite que drones e sistemas terrestres troquem informações constantemente sobre rotas, posições e condições do ambiente de voo.
- **Integração de tecnologias** O sistema utiliza dados de sensores, como GPS, radares e ADS-B, para monitorar a posição e o status das aeronaves não tripuladas.
- **Segurança e gestão de conflitos:** Uma das principais funções do UTM é prever e evitar potenciais conflitos entre aeronaves. Ele calcula trajetórias de voo e ajusta automaticamente rotas ou alturas para evitar colisões.
- **Planejamento de voo:** O sistema auxilia no planejamento e na autorização de voos, garantindo que as rotas respeitem as regras de espaço aéreo e outras restrições, como zonas proibidas ou regulamentações locais.
- **Integração com o ATM:** O UTM trabalha em conjunto com o sistema de gerenciamento de tráfego aéreo tradicional (ATM), criando uma coordenação entre drones e aeronaves tripuladas, especialmente em áreas próximas a aeroportos ou em rotas controladas.

Portanto, o UTM comprova ser um aliado aos novos estudos para desenvolver novas concepções de UAM, assim como o controle de espaço aéreo específico de helicópteros devido a sua atuação em baixas altitudes.

### 3.1.2 Controle do espaço aéreo para helicópteros

O controle do espaço aéreo para helicópteros apresenta particularidades que o diferenciam do controle de aeronaves fixas, devido à capacidade dos helicópteros de operar em altitudes mais baixas, sua flexibilidade de movimento, capacidade de pairar, e uso de locais de pouso e decolagem não convencionais, como helipontos ou áreas improvisadas. Por conta dessas características, o gerenciamento do espaço aéreo para helicópteros exige uma abordagem específica, que envolve tanto o controle de tráfego aéreo convencional quanto a autonomia dos pilotos, especialmente em ambientes urbanos, assim como é previsto para ocorrer com as aeronaves eVTOL.

O espaço aéreo utilizado por helicópteros é, em grande parte, o de baixa altitude, geralmente abaixo de 1.200 pés (cerca de 365 metros), que muitas vezes coincide com o espaço aéreo da Classe G (não controlado), assim como presente na Figura 8. Nessa faixa de altitude, os helicópteros podem operar com maior flexibilidade, mas com responsabilidade total sobre a separação de obstáculos e outras aeronaves. No entanto, helicópteros também podem operar em outras classes de espaço aéreo, como a Classe B, C, D e E, especialmente ao voar em rotas ou se aproximar de aeroportos.



Figura 8 – Classificação do espaço aéreo com helicópteros. Fonte: (AIRSERVICES AUSTRALIA, 2020)

Os helicópteros podem operar tanto sob VFR quanto IFR. A operação sob VFR é a mais comum, já que helicópteros muitas vezes voam em áreas não controladas e dependem da visibilidade do piloto para navegação e separação. Quando operam em áreas controladas, como em torno de grandes aeroportos ou em condições de baixa visibilidade, o voo IFR é necessário. Helicópteros IFR precisam seguir rotas de voo pré-determinadas e instruções diretas do ATC, assim como as aeronaves fixas.

Em áreas urbanas, onde helicópteros são frequentemente utilizados para transporte executivo, missões de resgate e emergências médicas, o controle do espaço aéreo é especialmente desafiador devido à densidade de obstáculos, como edifícios e linhas de transmissão, além da proximidade de outras aeronaves e atividades terrestres. Para garantir a segurança, várias estratégias de controle são empregadas:

- **Rotas Heliaéreas:** Em muitas cidades, são estabelecidas rotas específicas para helicópteros, conhecidas como "*helilanes*", que funcionam como "estradas aéreas". Essas rotas são definidas para evitar áreas de tráfego elevado, zonas sensíveis (como hospitais, escolas e áreas residenciais) e grandes obstáculos. No Brasil, por exemplo, cidades como São Paulo possuem um denso tráfego de helicópteros, e há rotas específicas coordenadas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).
- **Zonas de Controle de Helipontos:** Muitos edifícios altos em áreas urbanas possuem helipontos certificados, e esses locais requerem coordenação com o ATC local para garantir que o tráfego de helicópteros seja gerenciado de forma segura. O ATC pode fornecer instruções para coordenar pousos e decolagens nesses helipontos, especialmente em horários de pico.
- **Vigilância por Radar e Comunicação via Rádio:** O ATC mantém vigilância sobre helicópteros que operam nas Classes B, C e D por meio de radar e sistemas como o ADS-B. Helicópteros precisam manter comunicação constante com o ATC nessas áreas, recebendo instruções sobre rotas e separação de tráfego, especialmente quando em proximidade de aeroportos e em zonas de controle.
- **Altitudes Mínimas:** O regulamento impõe altitudes mínimas para operações VFR em áreas densamente povoadas. Helicópteros, de modo geral, são obrigados a manter uma altitude que permita, em caso de emergência, realizar um pouso seguro sem colocar pessoas ou propriedades em risco. Em áreas urbanas, essa altitude mínima pode ser ajustada pelo ATC, dependendo das circunstâncias, para garantir maior segurança.

Os helicópteros que operam em áreas próximas a aeroportos seguem as mesmas regras que outras aeronaves, dependendo da classe de espaço aéreo em que se encontram. O ATC deve coordenar a operação dos helicópteros para garantir que não interfiram com o tráfego de aeronaves fixas. Devido à sua capacidade de voar em altitudes mais baixas e de se mover com mais flexibilidade, helicópteros podem ter rotas de aproximação e saída diferentes das aeronaves maiores.

Um exemplo é o uso de rotas de chegada e saída separadas para helicópteros em aeroportos comerciais movimentados. Isso permite que eles façam operações de pouso e decolagem sem interromper as operações das aeronaves comerciais. Em muitos casos,

helicópteros podem pousar em áreas específicas de aeroportos (como áreas designadas para helicópteros ou zonas de transição), evitando as pistas principais.

As operações de helicópteros são regulamentadas por organismos nacionais e internacionais, como a OACI e a Administração Federal de Aviação dos EUA (FAA). Essas regulamentações incluem requisitos específicos para helicópteros, como a necessidade de manutenções regulares, certificações de pilotos, e diretrizes para operações em áreas densamente povoadas ou próximas a aeroportos.

A OACI estabelece as diretrizes internacionais para a operação segura de helicópteros em espaços aéreos controlados e não controlados, enquanto a FAA regula as operações dentro dos EUA. No Brasil, o DECEA é responsável pela criação de rotas, definição de padrões de operação e controle do tráfego aéreo de helicópteros.

Com o aumento da demanda por transporte aéreo urbano, especialmente em grandes centros como São Paulo, Nova York e Tóquio, o controle de tráfego de helicópteros enfrentará desafios crescentes, incluindo a integração com novas aeronaves eVTOL e a adaptação a novas tecnologias de controle de tráfego aéreo urbano. A infraestrutura atual de controle de helicópteros precisará se expandir e se modernizar, incluindo mais rotas dedicadas e maior uso de sistemas autônomos de vigilância e controle, como o UTM.

Portanto, o controle do espaço aéreo para helicópteros é uma parte vital da aviação moderna, especialmente em ambientes urbanos densos. Embora ofereça flexibilidade, ele também requer soluções complexas para garantir a segurança e a eficiência das operações em coexistência com outros tipos de tráfego aéreo.

### **3.2 Regulamentações para Mobilidade Aérea Urbana**

A implementação da UAM exige o desenvolvimento de regulamentações claras e robustas para garantir a segurança operacional e o uso eficiente do espaço aéreo. Nos Estados Unidos, a FAA está liderando o desenvolvimento de regras específicas para aeronaves eVTOL, incluindo requisitos para certificação, manutenção e operações. O programa “UAM Grand Challenge”, uma iniciativa da NASA em colaboração com a FAA, está realizando testes e simulações para entender como essas aeronaves podem operar em cidades grandes, com foco na segurança e na gestão de tráfego.

Na Europa, a EASA está trabalhando em um *framework* regulatório que inclui não apenas a certificação dos veículos, mas também aspectos como cibersegurança, impacto ambiental e integração com sistemas de transporte terrestre. Além disso, a EASA tem priorizado a aceitação pública da UAM, reconhecendo que questões como segurança, sustentabilidade e acessibilidade são cruciais para garantir a adoção de novos sistemas de mobilidade aérea (EASA, 2021b).

Outros países, como o Japão e a Coreia do Sul, também têm planos ambiciosos

para a implementação da UAM, com governos e empresas locais trabalhando em conjunto para estabelecer rotas e infraestrutura apropriadas. No Japão, por exemplo, espera-se que os primeiros serviços comerciais de táxi aéreo estejam em operação até 2025, aproveitando a infraestrutura existente de aeroportos e heliportos.

No Brasil, a regulamentação da UAM e o controle de tráfego aéreo, especialmente para helicópteros e eVTOLs, estão em desenvolvimento, impulsionados pelo rápido avanço da tecnologia e pelo crescente interesse de empresas nacionais e internacionais. A ANAC, juntamente com outros órgãos reguladores, como o DECEA e a OACI, tem um papel crucial na formulação de regulamentações que garantam a segurança, eficiência e integração desses novos sistemas de mobilidade aérea.

A Mobilidade Aérea Urbana envolve a utilização de aeronaves como helicópteros, drones e, futuramente, os eVTOLs para transporte de passageiros e cargas em ambientes urbanos. A ANAC reconhece que as operações UAM representam um novo paradigma para o transporte aéreo, exigindo regulamentações inovadoras e específicas para acomodar a complexidade dessas operações em áreas densamente povoadas.

A ANAC tem promovido discussões sobre o desenvolvimento de regulamentações para as operações UAM, em linha com os esforços globais liderados por agências como a FAA e a EASA. No Brasil, a ANAC está focada em três pilares principais para regulamentar a UAM:

- **Certificação das Aeronaves:** A ANAC está desenvolvendo requisitos específicos para a certificação de eVTOLs, que incluem critérios de segurança, eficiência energética, sustentabilidade e capacidade operacional. Esses requisitos estão sendo elaborados em conformidade com as normas da OACI e as práticas internacionais, visando garantir que os eVTOLs operem com níveis de segurança equivalentes aos de aeronaves tradicionais. Isso envolve a certificação de baterias, sistemas de controle autônomo ou remotamente pilotado, e sistemas de pouso e decolagem.
- **Operação em Espaços Aéreos Urbanos:** A ANAC está estudando como integrar os eVTOLs e outras aeronaves UAM no espaço aéreo brasileiro, especialmente em áreas urbanas. A ideia é criar um modelo de gestão de tráfego aéreo que permita a convivência segura de helicópteros, drones e eVTOLs. Esse modelo deve incluir a criação de "estradas aéreas" específicas, a definição de zonas de pouso e decolagem (vertiportos), e a coordenação com o sistema atual de controle de tráfego aéreo gerido pelo DECEA.
- **Regulamentação de Vertiportos:** Um dos aspectos críticos para a operação dos eVTOLs é a criação de uma infraestrutura adequada de vertiportos. A ANAC tem trabalhado em conjunto com o DECEA e outros órgãos reguladores para definir

os requisitos para a construção e operação de vertiportos, que devem atender a normas de segurança, acessibilidade e integração modal (ligação com outros meios de transporte). As regulamentações devem considerar o impacto urbano, como ruído, segurança e viabilidade de operação em áreas densamente povoadas.

A expectativa é que as primeiras operações de eVTOL no Brasil comecem a ocorrer entre 2025 e 2030. Empresas como a Embraer, com seu projeto Eve, estão na vanguarda desse desenvolvimento, já trabalhando em parceria com autoridades reguladoras e aeroportos para implementar as primeiras rotas de UAM no Brasil.

A ANAC tem enfatizado a importância de garantir que a regulamentação esteja pronta para quando os eVTOLs começarem a operar, garantindo a segurança, eficiência e aceitação pública desse novo modal de transporte.

### 3.3 Empresas Apostando na Inovação e Modelos de eVTOL

O setor de eVTOL está crescendo rapidamente, com diversas empresas desenvolvendo aeronaves de diferentes tamanhos, capacidades e configurações. Algumas das principais empresas envolvidas no desenvolvimento de eVTOLs incluem:

- **Joby Aviation:** Uma das líderes do setor, a estadunidense Joby está desenvolvendo uma aeronave eVTOL, de acordo com a Figura 9, com capacidade para quatro passageiros, projetada para viagens de até 240 km com uma única carga, atingindo uma velocidade de 200 km/h. A empresa recebeu apoio significativo da Uber e da Toyota, além de estar em colaboração com a NASA para testar seus veículos em ambientes controlados (JOBY AVIATION, 2024).



Figura 9 – eVTOL Joby. Fonte: (JOBY AVIATION, 2024)

- **Volocopter:** A empresa alemã desenvolveu o VoloCity, representado na Figura 10, um multicóptero eVTOL projetado especificamente para transporte urbano de curta distância. Com 18 rotores, o VoloCity é conhecido por sua operação silenciosa e tem capacidade para dois passageiros. O modelo foi projetado para operar em vertiportos localizados no topo de prédios, integrando-se ao tráfego urbano (VOLOCOPTER, 2024).



Figura 10 – eVTOL Volocopter. Fonte: (VOLOCOPTER, 2024)

- **Lilium:** A Lilium é outra empresa alemã que desenvolveu um eVTOL com propulsão por motores elétricos, assim como apresentado na Figura 11. Seu modelo é projetado para transportar até seis passageiros e tem uma autonomia de cerca de 300 km. A Lilium está focada em oferecer um serviço de táxi aéreo entre cidades, em vez de apenas dentro de áreas metropolitanas (LILIUM AIR MOBILITY, 2024).



Figura 11 – eVTOL Lilium. Fonte: (LILIUM AIR MOBILITY, 2024)

- **Beta Technologies:** A estadunidense Beta está desenvolvendo o ALIA, um eVTOL projetado tanto para transporte de carga quanto de passageiros, com uma autonomia de 250 km, apresentado na Figura 12. A empresa está em parceria com empresas de logística e saúde, explorando o uso de suas aeronaves para transporte de produtos médicos e mercadorias de alto valor (BETA TEAM, 2024).





Figura 12 – eVTOL Beta Technologies. Fonte: (BETA TEAM, 2024)

- **Airbus:** A empresa francesa Airbus está desenvolvendo o eVTOL conhecido como CityAirbus, de acordo com a Figura 13, projetado para ser um veículo de mobilidade urbana elétrica e sustentável. O CityAirbus possui um design de asa fixa com múltiplos rotores, permitindo decolagens e pousos verticais, com capacidade para transportar até quatro passageiros. O eVTOL visa oferecer uma solução de transporte eficiente para áreas urbanas, reduzindo o congestionamento e as emissões de carbono. A Airbus está testando protótipos e planeja realizar operações de demonstração em várias cidades ao redor do mundo, com a expectativa de que as operações comerciais comecem nos próximos anos. O projeto reflete o compromisso da Airbus com a inovação na mobilidade aérea e a sustentabilidade no transporte urbano (AIRBUS, 2024).



Figura 13 – eVTOL Airbus. Fonte: (AIRBUS, 2024)

- **Embraer:** A Embraer é uma das principais fabricantes de aeronaves do mundo, com uma sólida reputação no setor de aviação comercial, executiva e de defesa. A empresa, com sede no Brasil, tem investido continuamente em inovações tecnológicas, incluindo o desenvolvimento de soluções para a UAM. Dentro desse contexto, a Embraer lançou a *Eve Urban Air Mobility Solutions*, uma subsidiária dedicada ao desenvolvimento de eVTOLs, demonstrando seu modelo através da Figura 14.



Figura 14 – eVTOL Embraer/Eve. Fonte: (EVE AIR MOBILITY, 2024)

O projeto Eve visa criar uma solução de mobilidade urbana eficiente e sustentável, projetando um eVTOL que possa operar em ambientes urbanos e suburbanos. O objetivo da Eve é desenvolver uma aeronave que possa oferecer transporte de passageiros e cargas com baixo custo operacional e um impacto ambiental reduzido (EVE AIR MOBILITY, 2024).

O eVTOL da Eve está sendo projetado para ser totalmente elétrico e com capacidade para até 4 passageiros, além de um piloto. A aeronave contará com características avançadas, como uma autonomia de até 200 km de distância, sistema de propulsão elétrica com múltiplos rotores para maior segurança e eficiência e com foco em reduzir as emissões de carbono e o ruído, visando uma aceitação social mais ampla nas áreas urbanas.

O projeto Eve tem gerado um forte interesse no mercado. Em 2023, a Eve anunciou que havia recebido um total de 2.270 pedidos de compra de seu eVTOL (G1 - VALOR ECONÔMICO, 2021), o que demonstra uma demanda significativa e crescente por soluções de mobilidade urbana. Esses pedidos foram feitos por diversas empresas de aviação e operadoras de serviços de mobilidade aérea, destacando a confiança do setor na viabilidade do projeto.

Em termos financeiros, a Eve fez sua estreia na bolsa de valores em 2021, como parte de uma fusão com uma empresa de aquisição de propósito específico. Com isso, a empresa está se posicionando para se tornar um dos líderes no mercado de UAM, aproveitando a experiência da Embraer em engenharia aeronáutica e produção em larga escala.

A Eve também está estabelecendo parcerias estratégicas com outras empresas e entidades para acelerar o desenvolvimento de sua solução de UAM. A colaboração com autoridades regulatórias, como a ANAC e a FAA, é crucial para garantir que o eVTOL atenda a todos os requisitos regulatórios antes de suas operações comerciais.

Essas empresas variam em seus enfoques e designs, com alguns modelos sendo mais adequados para transporte urbano de curta distância, enquanto outros são projetados para conectar cidades e regiões próximas.

As aplicações dos eVTOLs vão além do transporte de passageiros, assim como mostra a Figura 15 com um modelo que atua no combate à incêndios. Empresas estão explorando o uso de aeronaves para logística e entrega de mercadorias, emergências médicas (como transporte rápido de órgãos), turismo aéreo, além de transporte executivo em regiões metropolitanas congestionadas. Essas aplicações diversificadas mostram que a UAM não será apenas uma solução de mobilidade, mas também uma ferramenta para otimizar outros serviços críticos em grandes cidades.



Figura 15 – eVTOL Ehang. Fonte: (EHANG, 2024)

Os prazos para a implementação de eVTOLs variam globalmente, com alguns mercados esperando lançar serviços comerciais já em 2025. Nos Estados Unidos, a FAA tem planos para testar e certificar os primeiros eVTOLs comerciais dentro desse prazo, com empresas como Joby Aviation e Archer já avançando nas fases de teste e certificação (FAA, 2021). Na Europa, a EASA também trabalha com um cronograma semelhante, com a expectativa de que os primeiros voos comerciais de táxi aéreo ocorram até meados da

década. No Brasil, a ANAC espera que os primeiros voos de aeronaves eVTOL ocorram entre 2025 e 2026.

### **3.4 Obstáculos da concepção UAM**

A implementação da UAM enfrenta vários desafios, tanto técnicos quanto sociais. Entre os desafios mais críticos estão a criação de uma infraestrutura adequada, tanto física quanto digital, para suportar a operação dos eVTOLs. Vertiportos devem ser construídos ou adaptados em locais estratégicos, e novas rotas aéreas precisam ser criadas para evitar interferências com outras operações. Além disso, a aceitação pública e a percepção de segurança serão fatores determinantes para o sucesso da UAM, já que o impacto do ruído, a confiabilidade dos veículos e a cibersegurança estão entre as principais preocupações da população.

A Mobilidade Aérea Urbana está no limiar de transformar a maneira como as cidades lidam com seus desafios de transporte e infraestrutura. Com o desenvolvimento contínuo de tecnologias e a colaboração entre reguladores e empresas, é provável que os eVTOLs se tornem uma parte integrante das cidades inteligentes nas próximas décadas. No entanto, a implementação bem-sucedida depende de superar desafios complexos relacionados à infraestrutura, regulamentação e aceitação pública.

## 4 DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA UAM

### 4.1 Infraestrutura física

A implementação da Mobilidade Aérea Urbana envolve uma série de desafios relacionados à infraestrutura física, sendo um dos principais a criação e certificação de vertiportos, além da integração com aeroportos e helipontos já existentes. Vertiportos são áreas específicas para o pouso e decolagem de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical e sua construção demanda uma série de considerações técnicas, operacionais e regulatórias, que garantam segurança, eficiência e integração com o sistema de transporte aéreo e terrestre.

A construção de vertiportos requer que várias questões sejam abordadas, como localização, espaço disponível, infraestrutura elétrica para carregamento das aeronaves e a certificação regulatória. Um dos maiores desafios é encontrar locais adequados em áreas urbanas densas, que permitam pousos e decolagens com segurança, sem causar distúrbios significativos, como poluição sonora ou interferências visuais, nos arredores. As regulamentações devem garantir que esses vertiportos estejam localizados em áreas acessíveis e próximos aos principais centros urbanos, mas ao mesmo tempo, precisam respeitar os limites de segurança em relação às construções e ao tráfego terrestre.

Além disso, vertiportos precisam ser equipados com uma infraestrutura elétrica robusta, uma vez que eVTOLs dependem de baterias de alta capacidade. Isso implica não apenas na instalação de pontos de recarga adequados para aeronaves elétricas, mas também na criação de um sistema que suporte uma rede elétrica resiliente, capaz de garantir carregamento rápido e eficiente entre as operações.

No que tange à certificação, as autoridades reguladoras, como a ANAC no Brasil e a FAA nos Estados Unidos, estão em processo de definir as normas de segurança e operação para vertiportos. Esses padrões incluem diretrizes sobre a distância segura de outras estruturas, requisitos de espaço para pouso e decolagem, sistemas de comunicação e navegação, além de acessibilidade para manutenção e emergências. Devido à natureza emergente da UAM, essas regulamentações ainda estão sendo formuladas, o que cria incertezas para as empresas que buscam desenvolver essa infraestrutura .

Outro grande desafio é a integração dos vertiportos com os aeroportos e helipontos já existentes. Aeroportos, por exemplo, já possuem infraestruturas complexas de controle de tráfego aéreo, o que exigirá a criação de áreas específicas para eVTOLs, separadas das aeronaves convencionais. Isso evitará congestionamento nas pistas e garantirá que o tráfego aéreo seja gerenciado de maneira eficiente. As autoridades reguladoras precisarão adaptar os sistemas de controle de tráfego aéreo, como o UTM, para monitorar as rotas e

os espaços aéreos reservados para as operações de eVTOL, promovendo uma coordenação fluida entre as aeronaves convencionais e as novas.

A utilização de helipontos convencionais também será parte importante da infraestrutura da UAM. No entanto, há desafios para adaptar esses locais, visto que a demanda de eVTOLs poderá ser bem superior à dos helicópteros. Helipontos atuais, em muitos casos, não possuem infraestrutura elétrica para recarga, o que exigirá reformas e melhorias em larga escala. Além disso, devido ao menor nível de ruído e emissões de eVTOLs em comparação aos helicópteros, pode ser necessário rever as regras de operação em áreas densamente povoadas, permitindo que eVTOLs operem em horários e locais onde os helicópteros hoje não são permitidos .

Os desafios ambientais e sociais também são considerações críticas na construção da infraestrutura de vertiportos. Embora os eVTOLs prometam ser mais silenciosos que os helicópteros tradicionais, é preciso realizar estudos detalhados sobre os impactos sonoros em áreas urbanas. O processo de obtenção de licenças para construção e operação em áreas residenciais pode ser dificultado se não houver uma aceitação pública da tecnologia. Da mesma forma, os impactos sobre o uso do solo, especialmente em cidades densas, precisarão ser cuidadosamente avaliados, uma vez que grandes áreas podem ser necessárias para as operações diárias, bem como para a expansão futura.

Além dos desafios relacionados à construção e certificação de vertiportos, é essencial considerar a questão da manutenção das aeronaves eVTOL, assim como a integração desses vertiportos com outros sistemas de transporte urbano. A manutenção regular e preventiva dessas aeronaves é um fator crítico para garantir a segurança e a continuidade das operações. Diferentemente dos helicópteros e aviões tradicionais, os eVTOLs têm sistemas elétricos complexos que exigem infraestruturas específicas para a manutenção, como pontos de recarga e oficinas especializadas em eletrônica e baterias de alta capacidade.

A criação de espaços para manutenção nos próprios vertiportos pode ser uma solução prática e eficiente, reduzindo a necessidade de deslocamento das aeronaves para locais distantes e otimizando a operação. No entanto, esses espaços devem ser projetados para garantir acesso fácil a peças e equipamentos, além de áreas dedicadas para diagnósticos técnicos e reparos rápidos, o que pode representar um desafio logístico em áreas urbanas densas. Esses locais também precisariam lidar com a substituição e o descarte de baterias, uma vez que, por questões ambientais, haverá regulamentações rigorosas sobre o manejo adequado de baterias de lítio.

Ademais, o planejamento de vertiportos deve estar alinhado com o conceito de conectividade modal, integrando os pontos de pouso e decolagem dos eVTOLs aos sistemas de transporte terrestre, como ônibus, metrô e trens. Essa integração será essencial para garantir que o uso dos eVTOLs seja conveniente para os passageiros e não se torne apenas uma alternativa de luxo ou difícil acesso.

Para que os eVTOLs se tornem uma solução viável e prática para a mobilidade urbana, os vertiportos precisam estar estrategicamente localizados em áreas de fácil acesso, como próximas a estações de metrô, rodovias ou centros de transporte multimodal. Isso permitiria que passageiros fizessem a transição de um modal terrestre para o aéreo de maneira eficiente, tornando o sistema de mobilidade mais interconectado. A proximidade de vertiportos com aeroportos convencionais também é crucial, especialmente para passageiros que desejam usar eVTOLs como meio de transporte rápido até os aeroportos para voos de longa distância. Nesse contexto, os vertiportos poderiam funcionar como "hubs" integrados, otimizando a transferência entre os diferentes tipos de transporte, além de descongestionar o tráfego terrestre ao redor de aeroportos.

Essa integração, no entanto, requer um planejamento detalhado de infraestrutura urbana, incluindo a construção de acessos viários e ferroviários para esses novos pontos de transporte aéreo. O desafio é encontrar locais que possam suportar esse tráfego adicional sem causar sobrecarga nas redes já existentes, e que ao mesmo tempo permitam a rápida mobilidade das aeronaves e dos passageiros. Em cidades densamente povoadas, essa tarefa pode ser complexa, demandando investimentos significativos e a coordenação entre setores públicos e privados para a criação de soluções de infraestrutura e transporte intermodais eficientes.

A responsabilidade pelo financiamento da infraestrutura necessária para a UAM é um ponto crucial e complexo, envolvendo a colaboração entre os setores público e privado. A construção de vertiportos, a adaptação dos sistemas de controle de tráfego aéreo, a implementação de redes de manutenção e abastecimento, bem como a integração com outros modais de transporte, exigem investimentos significativos. O dimensionamento do mercado de infraestrutura para a UAM tem sido objeto de vários estudos, que estimam custos e lucros potenciais com base no crescimento esperado do setor.

No cenário atual, é provável que os governos e o setor privado compartilhem a responsabilidade pelo financiamento dessas infraestruturas. O setor público deve assumir um papel crucial no fornecimento de incentivos, regulamentações e infraestrutura básica, como redes elétricas para carregamento das aeronaves e sistemas de controle de tráfego aéreo. As cidades também podem precisar investir em melhorias na infraestrutura urbana, como a construção de vertiportos em áreas estratégicas e a adaptação das vias de acesso aos centros urbanos.

Por outro lado, o setor privado, especialmente empresas aéreas, de tecnologia e investidores do mercado de mobilidade, deve assumir a maior parte do financiamento das operações comerciais, desenvolvimento de aeronaves e construção de vertiportos. Empresas como a Eve, da Embraer, e a Joby Aviation já estão atraindo investimentos significativos para o desenvolvimento de eVTOLs e suas infraestruturas.

Em termos de infraestrutura, o mercado de vertiportos e sistemas de suporte à

UAM pode representar uma parcela significativa do mercado global de mobilidade aérea urbana. De acordo com um relatório da Roland Berger, o mercado global de vertiportos pode atingir entre US\$ 20 bilhões e US\$ 25 bilhões até 2040, conforme a UAM expande suas operações e as cidades começam a investir na construção e adaptação dessas infraestruturas. O relatório também estima que, em cidades de grande porte, o custo de construção de um vertiporto pode variar entre US\$ 500 mil a US\$ 2 milhões, dependendo do tamanho, da localização e das exigências de operação (ROLAND BERGER, 2020).

Além disso, a Morgan Stanley projeta que o mercado global da UAM, incluindo aeronaves, serviços e infraestrutura, pode atingir cerca de US\$ 1 trilhão até 2040 e, no cenário otimista, até US\$ 9 trilhões até 2050. Isso inclui investimentos em vertiportos, redes de comunicação e controle de tráfego, além da criação de centros de manutenção e abastecimento de eVTOLs (MORGAN STANLEY, 2019).

O financiamento dessa infraestrutura levanta vários desafios. A criação de vertiportos em áreas urbanas densas requer a colaboração entre diferentes níveis de governo, além da aceitação pública e viabilidade econômica para investidores privados. Muitos investidores esperam retornos de longo prazo, o que pode dificultar os primeiros anos de implementação, onde os custos são altos e as receitas iniciais podem ser limitadas devido à adoção gradual da UAM. Além disso, questões regulatórias e a necessidade de padronização internacional podem retardar o processo, aumentando o risco financeiro.

No entanto, à medida que a tecnologia avança e a UAM se torna mais viável, espera-se que novos modelos de negócios surjam, como parcerias público-privadas, onde governos podem fornecer parte da infraestrutura inicial e as empresas privadas financiam as operações, manutenção e expansão dos serviços.

## **4.2 Infraestrutura digital**

A implementação da UAM requer uma infraestrutura digital robusta e altamente avançada, capaz de lidar com o aumento significativo no volume de tráfego aéreo, bem como as necessidades específicas de segurança, navegação e vigilância. A infraestrutura digital se refere a todos os sistemas de comunicação, vigilância e controle necessários para garantir operações seguras e eficientes das aeronaves eVTOL em áreas urbanas densamente povoadas. Entre os principais desafios estão a necessidade de sistemas de controle de tráfego aéreo altamente sofisticados, comunicação de alta capacidade, vigilância em tempo real e navegação precisa.

O aumento do tráfego aéreo com a introdução de frotas de eVTOLs exigirá uma revolução nos sistemas de ATM. Atualmente, o controle de tráfego aéreo é focado em grandes aeronaves comerciais, que operam em altitudes elevadas e rotas definidas. No entanto, as aeronaves eVTOL, que voam em altitudes mais baixas e em grande quantidade,



exigirão um sistema completamente diferente, adaptado para lidar com operações em zonas urbanas, onde os níveis de congestionamento são muito maiores e os riscos de acidentes são potencialmente mais graves.

Um dos principais desafios é a criação de corredores aéreos que permitam o fluxo de aeronaves com segurança e sem comprometer a integridade das operações de outros modais aéreos, como helicópteros e drones. Além disso, deve haver um sistema automatizado que regule o acesso ao espaço aéreo e coordene rotas em tempo real, a fim de evitar congestionamentos e colisões.

A comunicação é fundamental para garantir que as aeronaves eVTOL possam operar de maneira coordenada e segura. Para isso, será necessária uma infraestrutura de comunicação de alta capacidade, capaz de lidar com grandes volumes de dados e responder em tempo real. Os sistemas de comunicação atuais não foram projetados para lidar com o número massivo de aeronaves que a UAM promete introduzir. Com as eVTOLs, será necessário garantir comunicações rápidas e confiáveis entre as aeronaves, os vertiportos, e os sistemas de controle de tráfego aéreo.

A necessidade de troca constante de dados, como localização, velocidade, rota e estado das aeronaves, implica que a rede de comunicação precisará ser extremamente robusta e resiliente. Qualquer falha na comunicação pode resultar em colisões ou perda de controle da aeronave, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Soluções como redes 5G e tecnologias de comunicação por satélite têm sido propostas como maneiras de garantir a largura de banda necessária e a confiabilidade do sistema.

Além disso, as aeronaves eVTOL, em muitos casos, serão autônomas ou remotamente pilotadas, o que aumenta ainda mais a demanda por comunicações rápidas e sem falhas. Sistemas de comunicação redundantes são essenciais para garantir a segurança, permitindo o envio e recebimento de informações críticas entre o piloto (ou sistema autônomo) e as aeronaves, em tempo real.

Para garantir a segurança de operações em grande escala, será necessário um sistema de vigilância contínua e em tempo real de todas as aeronaves no espaço aéreo. Diferentemente das aeronaves comerciais, que operam em rotas claramente definidas e são monitoradas por radares e sistemas como o ADS-B, as aeronaves eVTOLs voarão em ambientes mais dinâmicos, com mudanças frequentes de rota e altitude.

Os sistemas de vigilância precisarão ser capazes de rastrear cada aeronave com precisão e fornecer dados de localização em tempo real tanto para as autoridades de tráfego aéreo quanto para os operadores das aeronaves. A expansão e adaptação de sistemas como o ADS-B para as necessidades da UAM será um grande desafio, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas, onde a infraestrutura física de telecomunicações, como torres de celular e prédios altos, pode interferir nos sinais de vigilância.

Além disso, a capacidade de detecção de obstáculos em tempo real será crucial para as operações de eVTOL. Sensores avançados, como LiDAR (Light Detection and Ranging), radares e câmeras ópticas, devem ser integrados nas aeronaves e na infraestrutura terrestre para garantir que todos os obstáculos, sejam eles aeronaves ou estruturas físicas, possam ser identificados e evitados.

A navegação precisa é outro desafio fundamental para a implementação segura da UAM. Enquanto aeronaves comerciais utilizam sistemas de navegação baseados em satélites, como o GPS, em altitudes elevadas, as aeronaves eVTOL precisarão de sistemas de navegação mais avançados e precisos, devido à sua proximidade com o solo e a complexidade do ambiente urbano.

O GPS, por si só, pode não ser suficiente para fornecer a precisão necessária em áreas urbanas, onde edifícios altos e outras infraestruturas podem causar interferências. Soluções como RTK (Real-Time Kinematic) e sistemas de navegação baseados em GNSS (Global Navigation Satellite System) com alta precisão serão necessárias para garantir que as aeronaves possam operar de maneira segura em ambientes urbanos. Além disso, a integração de dados de navegação com sistemas de controle de tráfego e vigilância é essencial para evitar colisões e garantir a segurança das operações.

Outra consideração importante é a navegação contingencial. Em caso de falhas nos sistemas principais de navegação, as aeronaves devem ter rotas alternativas e procedimentos de emergência pré-definidos, para evitar acidentes. Isso exigirá que os sistemas de navegação e controle de tráfego aéreo sejam interligados e programados para lidar com cenários de falha.

A coordenação de rotas em ambientes urbanos densos traz um conjunto único de desafios para a infraestrutura digital necessária à implementação da Mobilidade Aérea Urbana. As cidades já são cenários complexos, com edifícios altos, infraestrutura terrestre densa, e outros sistemas de transporte competindo por espaço. O conceito de "estradas no céu" exige uma coordenação meticulosa, já que as aeronaves eVTOL precisarão navegar por rotas predefinidas que evitam colisões, minimizam ruído e respeitam áreas sensíveis, como hospitais, zonas escolares e locais de preservação ambiental.

A criação dessas "estradas no céu" demanda uma rede digital capaz de fornecer segregação segura do tráfego aéreo em três dimensões, com rotas verticais e horizontais que mudam conforme a densidade do tráfego. Um dos principais desafios é garantir a gestão dinâmica dessas rotas. Ao contrário de rodovias terrestres, as rotas aéreas podem precisar ser ajustadas constantemente em resposta às mudanças meteorológicas, aumento do tráfego ou emergências. Essa variabilidade exige um sistema de planejamento em tempo real que ajuste as rotas automaticamente, de acordo com a demanda e as condições do ambiente.

Além disso, a necessidade de manter rotas seguras e coordenadas envolve o controle de altitudes específicas e trajetórias precisas, com aeronaves eVTOL voando em diferentes níveis para otimizar o fluxo do tráfego. Gerenciar essa "camada aérea" de modo eficiente em áreas urbanas densamente povoadas exige um sistema de gestão de rotas automatizado com monitoramento constante, evitando congestionamentos aéreos e sobreposição de rotas. Implementar esses sistemas, que coordenam centenas ou até milhares de aeronaves simultaneamente, será um dos maiores desafios tecnológicos da infraestrutura digital da UAM.

### 4.3 Operação e segurança

A implementação da UAM traz consigo desafios significativos relacionados à operação e segurança, especialmente devido ao ambiente urbano densamente povoado e à natureza de voos de baixa altitude. Os riscos vão desde colisões no ar até falhas tecnológicas e ciberataques, todos os quais precisam ser cuidadosamente mitigados para garantir a segurança dos passageiros e da população em solo.

A UAM dependerá fortemente de sistemas digitais avançados para navegação, controle de tráfego aéreo e comunicação entre aeronaves e centros de controle. Isso cria vulnerabilidades cibernéticas que precisam ser abordadas desde o início do desenvolvimento das tecnologias de eVTOL. Como essas aeronaves estarão conectadas a redes digitais para operações autônomas ou semi-autônomas, elas se tornam potenciais alvos para ciberataques, que podem comprometer o controle da aeronave, interferir nos sistemas de navegação e até causar acidentes.

Os principais desafios de cibersegurança envolvem a necessidade de proteger as comunicações entre aeronaves e os sistemas de controle de tráfego aéreo, garantir que os dados de localização e navegação sejam confiáveis e não manipulados, e prevenir ataques que possam desativar ou comprometer sistemas essenciais, como os controles de voo e a propulsão elétrica. Isso exige a implementação de protocolos de segurança robustos, como criptografia avançada, autenticação multifator para operadores e pilotos remotos, e redes redundantes que garantam a continuidade da operação mesmo em caso de falhas.

Para mitigar esses riscos, será necessário adotar um sistema de segurança em camadas, que proteja tanto os sistemas centrais quanto as aeronaves individuais. A implementação de firewalls inteligentes, redes isoladas para dados críticos e a criação de sistemas de resposta rápida em caso de incidentes cibernéticos são medidas essenciais. Além disso, deve haver monitoramento contínuo das redes e sistemas para identificar atividades suspeitas e responder proativamente a possíveis ameaças.

Voos de baixa altitude em áreas urbanas densamente povoadas trazem riscos inerentes devido à proximidade com obstáculos como prédios, pontes, e outras infraestruturas.

Em caso de falhas mecânicas ou de sistemas, as aeronaves eVTOL terão muito menos tempo para manobras corretivas, aumentando o risco de acidentes. Isso representa um desafio adicional em termos de design de aeronave, que precisa garantir redundâncias operacionais e capacidades de pouso emergencial.

Uma das principais preocupações é o gerenciamento de falhas. Diferentemente das aeronaves comerciais, que têm altitude suficiente para realizar manobras de emergência ou retornar a um aeroporto em caso de pane, os eVTOLs operam em altitudes relativamente baixas. Isso aumenta o risco de impactos com prédios, infraestruturas urbanas ou até mesmo com pessoas. Para mitigar esse risco, as aeronaves eVTOL devem ser equipadas com sistemas de redundância, como baterias secundárias ou mecanismos de *fallback*, que permitam que a aeronave permaneça no ar o tempo suficiente para buscar uma zona de pouso segura.

Outro método para mitigar os riscos de falhas operacionais é o desenvolvimento de rotas de voo específicas, que evitem sobrevoar áreas densamente povoadas ou sensíveis sempre que possível. Corredores aéreos poderão ser criados sobre rodovias ou rios, onde um pouso emergencial teria menor impacto para a segurança pública. Além disso, a criação de vertiportos de emergência distribuídos pela cidade poderia garantir que as aeronaves tivessem locais pré-designados para realizar pousos forçados, minimizando o risco para a população.

Os riscos associados à UAM podem ser parcialmente compreendidos analisando o histórico de acidentes com helicópteros em ambientes urbanos. Helicópteros operam em altitudes baixas e compartilham algumas das limitações operacionais que os eVTOLs enfrentarão, como a dificuldade de manobra em caso de falha e a proximidade com infraestruturas urbanas.

Exemplos de acidentes mostram a gravidade dos riscos. Em 2019, por exemplo, um helicóptero caiu sobre um edifício em Manhattan, Nova York, matando o piloto (G1, 2019). O incidente ocorreu em clima ruim, e o piloto tentou um pouso de emergência. Em 2018, outro helicóptero caiu no East River de Nova York, matando cinco pessoas (G1, 2018). Ambos os incidentes ilustram os desafios operacionais e a necessidade de procedimentos robustos de emergência para aeronaves que operam em áreas densamente povoadas.

Esses acidentes destacam a necessidade de sistemas de segurança reforçados para aeronaves eVTOL, que poderiam enfrentar condições operacionais semelhantes. Para reduzir o risco, será necessário desenvolver algoritmos de prevenção de colisão altamente precisos e sistemas automatizados que possam assumir o controle em caso de falhas humanas ou tecnológicas. A inclusão de sistemas de parada automática e algoritmos que identifiquem rotas de fuga em caso de emergências pode reduzir drasticamente o impacto de acidentes.

As tecnologias de mitigação de risco incluem a implementação de sistemas automatizados de gestão de tráfego aéreo que podem prever e evitar colisões. Sistemas como o ADS-B, que permitem que aeronaves compartilhem sua localização em tempo real, já são usados em aviação tradicional e serão fundamentais para a UAM. No entanto, serão necessários avanços significativos para garantir que essas tecnologias possam lidar com o número muito maior de aeronaves eVTOL.

A introdução de inteligência artificial (IA) e *machine learning* permitirá que esses sistemas identifiquem potenciais riscos antes que se tornem problemas reais, como sobrecarga de tráfego aéreo ou falhas em aeronaves. A IA também será essencial para garantir a gestão autônoma de rotas, o que reduzirá a dependência da intervenção humana, minimizando a possibilidade de erro.

Além disso, as aeronaves eVTOL devem ser equipadas com mecanismos de pouso de emergência que possam ser ativados automaticamente em caso de falha. A integração desses sistemas com o controle automatizado de tráfego aéreo permitirá respostas rápidas e coordenadas em caso de emergências, reduzindo o impacto de acidentes em áreas urbanas densamente povoadas.

#### 4.4 Impacto ambiental

A UAM traz consigo desafios ambientais significativos, que precisam ser abordados para garantir a viabilidade sustentável dessa nova forma de transporte. Os principais desafios incluem o impacto do ruído gerado pelas aeronaves eVTOL, o descarte sustentável das baterias e a demanda por energia elétrica para alimentar essas aeronaves.

Um dos grandes atrativos dos eVTOLs é a promessa de operações mais silenciosas em comparação com helicópteros e aeronaves tradicionais. No entanto, o ruído ainda é um fator de preocupação, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas: enquanto um helicóptero típico pode gerar ruídos de até 90 dB durante a decolagem e pouso, alguns protótipos de eVTOLs estão projetados para operar com níveis de ruído de 45 dB (ELECTRIC EVTOL NEWS, 2023). Essa redução é significativa, mas o ruído ainda pode ser perceptível em zonas residenciais e comerciais, dependendo da frequência e da proximidade dos vertiportos.

A principal fonte de ruído dos eVTOLs provém dos rotores elétricos, que, embora mais silenciosos que motores a combustão, ainda geram som, especialmente durante as manobras de decolagem e pouso. Contudo, o impacto do ruído não se limita ao nível sonoro absoluto. O tipo de som produzido, a frequência e a localização das operações também influenciam na percepção pública. Em áreas que já são expostas ao barulho de tráfego terrestre intenso, o ruído dos eVTOLs pode passar despercebido, mas em regiões residenciais, pode se tornar um problema.

Além disso, estudos indicam que o impacto do ruído varia com a quantidade de aeronaves simultâneas no espaço aéreo. Com a previsão de um grande número de eVTOLs voando nas cidades futuramente, a acumulação de fontes sonoras pode representar um desafio, tornando-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que minimizem ainda mais o ruído.

Outro grande desafio ambiental relacionado aos eVTOLs é o descarte sustentável das baterias. A maioria dessas aeronaves utiliza baterias de íon-lítio, que têm uma vida útil limitada e, após alguns ciclos de recarga, precisam ser substituídas. O descarte inadequado dessas baterias pode gerar impactos ambientais sérios, como a contaminação do solo e da água por metais pesados.

Embora muitas indústrias estejam desenvolvendo processos de reciclagem de baterias, esta ainda é uma área em desenvolvimento. O ciclo de vida dessas baterias e a reutilização eficiente dos materiais é uma questão central para garantir que a operação dos eVTOLs não resulte em resíduos prejudiciais ao meio ambiente. A adoção de políticas rigorosas para o manejo de baterias descartadas e a criação de infraestrutura adequada para a coleta e reciclagem serão essenciais para garantir que o impacto ambiental seja minimizado.

Em termos práticos, algumas empresas já estão investindo em tecnologias de reciclagem, enquanto outras estudam o reaproveitamento das baterias de aeronaves para uso em sistemas de armazenamento de energia em outras aplicações, como para energizar instalações urbanas de menor demanda. No entanto, um sistema robusto de reciclagem e manejo sustentável ainda precisa ser desenvolvido em larga escala.

Os eVTOLs, sendo movidos a eletricidade, têm uma grande demanda por energia limpa e eficiente. Para que a operação de frotas inteiras de aeronaves eVTOL seja sustentável, é necessário um fornecimento massivo de energia elétrica, preferencialmente proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. A infraestrutura de vertiportos deve incluir estações de recarga rápidas e eficientes, o que implica a criação de redes elétricas robustas e seguras.

Os desafios estão tanto na oferta de energia como no tempo necessário para o carregamento das baterias. Dependendo do modelo da aeronave, o tempo de recarga pode variar entre 30 minutos a algumas horas e o número de aeronaves recarregando simultaneamente em um vertiporto pode exercer uma pressão significativa sobre a rede elétrica local. Além disso, a demanda energética adicional em áreas urbanas já sobrecarregadas exigirá planejamento para evitar apagões e garantir o fornecimento contínuo.

Por isso, a necessidade de fontes de energia sustentáveis é crítica para evitar que o impacto ambiental se desloque para o aumento das emissões de carbono na geração de eletricidade. A BloombergNEF estima que, globalmente, a eletrificação de veículos aéreos

e terrestres exigirá um crescimento de 70% na produção de energia elétrica até 2040, com uma parte significativa desse aumento vindo das necessidades de eVTOLs.





## 5 SOLUÇÕES PREVISTAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA UAM

O controle eficaz e seguro do espaço aéreo requer a criação de sistemas robustos que garantam a separação entre as aeronaves e a mitigação de riscos associados a colisões, falhas operacionais e interferências com infraestruturas terrestres. Esse tema vem sendo amplamente debatido em fóruns internacionais e discutido em estudos sobre como integrar veículos aéreos não tripulados (UAS) e futuras aeronaves eVTOL em um ecossistema aéreo urbano.

No Drone Enable 2, realizado pela Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) em 2018 na China (OACI, 2018b), a necessidade de estabelecer padrões para a separação segura entre aeronaves em ambientes urbanos foi amplamente debatida. O evento destacou os riscos de colisão aumentados pela proximidade de prédios e outras infraestruturas, além da necessidade de criar rotas aéreas que possam acomodar o tráfego simultâneo de aeronaves eVTOL em altitudes relativamente baixas. O uso de tecnologias avançadas de gestão de tráfego aéreo foi identificado como fundamental para garantir que múltiplas aeronaves possam operar em áreas urbanas de forma segura, sem comprometer a integridade das operações ou a segurança pública.

Uma solução-chave discutida nesse evento foi o conceito de estratificação de corredores aéreos que permitiriam a segregação de diferentes tipos de aeronaves de acordo com sua performance, velocidade e capacidade de navegação. As aeronaves eVTOL de passageiros, por exemplo, poderiam operar em altitudes intermediárias, enquanto drones menores para entregas utilizariam corredores mais baixos, perto do solo. Isso exige um planejamento rigoroso e a implementação de novas tecnologias de controle de tráfego aéreo urbano (UTM - Unmanned Traffic Management), que possam gerenciar simultaneamente aeronaves tripuladas e não tripuladas de diferentes características.

Além disso, o estudo de Bauranov e Rakas (2021) (CAMBRIDGE, 2018) oferece uma visão aprofundada sobre a necessidade de determinar zonas proibidas para voo dentro de áreas urbanas, especialmente em torno de infraestruturas críticas e áreas sensíveis, como hospitais, escolas e prédios governamentais. Essas zonas de exclusão seriam essenciais para mitigar os riscos de acidentes ou falhas operacionais, garantindo que as aeronaves evitem áreas densamente povoadas ou locais onde uma falha resultaria em maiores danos. O estudo sugere que, para garantir a segurança pública, essas zonas precisariam ser integradas em tempo real aos sistemas de gestão de tráfego aéreo, permitindo que aeronaves ajustem suas rotas de forma automática e dinâmica conforme necessário. Esse tipo de sistema também precisaria levar em conta o clima e outros fatores ambientais que possam afetar a segurança das operações aéreas.

Já a questão da maturidade tecnológica e regulatória para a implementação da UAM é tratada em um estudo da NASA (NASA, 2021), que introduz o conceito de Nível de Maturidade da UAM (Urban Air Mobility Maturity Level - UML). Esse framework avalia o progresso da UAM em diferentes níveis, desde as primeiras operações experimentais até a integração plena de aeronaves eVTOL em redes de transporte urbano regulares. A NASA identificou que, embora a tecnologia de aeronaves eVTOL esteja avançando rapidamente, os sistemas de controle de tráfego aéreo e os regulamentos que garantem a operação segura ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento. Segundo a NASA, o nível UML-4 seria necessário para a UAM alcançar operações comerciais completas, o que envolve o desenvolvimento de sistemas automatizados robustos de controle de tráfego aéreo e a coordenação integrada entre autoridades locais, operadores de aeronaves e controladores de tráfego.

Diversas entidades têm começado seus estudos através da colaboração entre parceiros para o desenvolvimento de uma concepção operacional, mas não há um consenso entre elas, pois algumas defendem a criação de corredores pré-definidos e padrões de operação, enquanto outras acreditam em uma solução mais flexível. Dessa forma, serão abordadas diferentes soluções previstas para a implementação da UAM.

## 5.1 EASA - *Conceito Corus*

A concepção operacional da EASA (European Union Aviation Safety Agency) para a Mobilidade Aérea Urbana está fortemente ligada ao projeto CORUS (Concept of Operations for U-Space), apresentado na Figura 16, que estabelece as bases para a integração segura de aeronaves não tripuladas e eVTOL no espaço aéreo europeu. O CORUS foi criado para desenvolver um conjunto de princípios e procedimentos que permitam o uso seguro e eficiente de aeronaves em ambientes urbanos, focando especialmente em aeronaves não tripuladas e futuras soluções de UAM (EUROCONTROL, 2019).

O conceito do CORUS se baseia na criação de um sistema chamado U-Space, que compreende um conjunto de serviços e procedimentos digitais para a gestão do tráfego aéreo de aeronaves não tripuladas (UAS) e eVTOL. O U-Space atua como uma infraestrutura digital que permite a comunicação constante entre as aeronaves e os sistemas de controle de tráfego, viabilizando operações seguras em altitudes baixas. Esse sistema é projetado para facilitar operações em áreas densas, garantindo que os veículos operem em espaços aéreos limitados sem interferir com o tráfego aéreo tradicional.

Entre os principais componentes da concepção operacional do CORUS estão:

- **Gestão de Rotas Dinâmicas:** As aeronaves podem ajustar suas rotas em tempo real, com base nas condições do espaço aéreo, clima ou outras mudanças operacionais. O sistema é desenhado para ser altamente responsivo e adaptável, possibilitando

que várias aeronaves operem de maneira segura e coordenada em espaços urbanos congestionados.

- **Níveis de Serviço de U-Space:** O CORUS define diferentes níveis de serviços que são ativados conforme a complexidade da operação. Serviços mais avançados incluem vigilância em tempo real, separação de tráfego automatizada e comunicação de alta capacidade, que são essenciais para manter a segurança em áreas densamente povoadas.
- **Coordenação com o ATM Tradicional:** O U-Space deve funcionar em conjunto com os sistemas tradicionais de controle de tráfego aéreo (ATM). Isso significa que, em áreas onde helicópteros e aviões já operam, os eVTOLs precisarão compartilhar o espaço aéreo de forma harmoniosa, sem comprometer a segurança de todos os usuários.



Figura 16 – Conceito da EASA para UAM. Fonte: (EUROCONTROL, 2019)

## 5.2 NASA

A concepção operacional da NASA para a Mobilidade Aérea Urbana (UAM), apresentada em 2018, estabelece uma visão ampla e detalhada para a integração de eVTOL no espaço aéreo urbano. Esse estudo foi desenvolvido como parte do programa UAM Grand Challenge, que visa facilitar o desenvolvimento seguro e eficiente de operações UAM nos Estados Unidos (NASA, 2020). A abordagem da NASA vai além da integração de veículos aéreos e foca no desenvolvimento de conceitos de controle de tráfego e infraestrutura digital e física para suportar um alto volume de aeronaves em ambientes urbanos. Três dos principais conceitos operacionais discutidos nesse estudo incluem: Sky-Lane, Sky-Tube e Sky-Corridor.

O conceito de Sky-Lane se refere à criação de "pistas" virtuais no céu, onde as aeronaves eVTOL podem voar de maneira organizada e segura. Essas pistas são definidas por trajetórias fixas, semelhantes a faixas de rodovias no solo. Cada Sky-Lane seria uma rota aérea pré-determinada, onde as aeronaves podem voar em diferentes altitudes e direções. Esse conceito permite a separação lateral das aeronaves e ajuda a garantir que elas sigam trajetórias previsíveis, facilitando a gestão do tráfego em áreas urbanas. O Sky-Lane oferece uma maneira eficiente de coordenar o fluxo de tráfego em áreas densamente povoadas, evitando colisões e minimizando o risco de congestionamento aéreo. Além disso, essa solução favorece a previsibilidade, uma vez que as aeronaves e os operadores de tráfego aéreo saberiam com antecedência onde as aeronaves estarão em cada momento. Porém, essa previsibilidade traz o desafio de coordenar diferentes rotas fixas sobre a mesma cidade, especialmente em locais onde o espaço aéreo já é saturado.

O conceito de Sky-Tube representa um avanço do Sky-Lane. Ele é pensado para criar "corredores tridimensionais", onde o espaço aéreo não apenas é dividido em faixas horizontais, mas também em volumes verticais. Isso significa que as aeronaves podem voar em altitudes diferentes dentro de um mesmo "tubo" aéreo, criando uma gestão vertical do tráfego. Essa solução oferece ainda mais capacidade para acomodar uma alta densidade de tráfego aéreo urbano, já que aeronaves podem sobrevoar a mesma área em diferentes altitudes dentro do Sky-Tube. No entanto, o desafio aqui é garantir que as aeronaves possam mudar de altitude de maneira coordenada e segura, sem conflitos. Isso exige sistemas de comunicação e navegação altamente precisos, capazes de monitorar e ajustar as rotas em tempo real, especialmente em cenários onde mudanças meteorológicas ou desvios imprevistos podem alterar o fluxo de tráfego.

O Sky-Corridor é o conceito mais abrangente e flexível entre os três. Ele define grandes áreas ou "corredores" de operação, onde as aeronaves eVTOL podem se mover livremente em diferentes altitudes e direções. Diferente do Sky-Lane e Sky-Tube, que seguem rotas mais estruturadas, o Sky-Corridor permite maior liberdade para as aeronaves ajustarem suas trajetórias de acordo com as condições de tráfego ou requisitos operacionais. Esse conceito é semelhante a corredores aéreos usados para aeronaves comerciais, mas com maior complexidade, pois precisa lidar com a maior densidade de tráfego prevista para as operações UAM. O Sky-Corridor oferece a flexibilidade necessária para operações dinâmicas, como emergências ou mudanças de rota devido a congestionamentos, mas também apresenta desafios substanciais no controle do tráfego, uma vez que as aeronaves teriam mais liberdade de movimento. Isso exige um nível elevado de coordenação automatizada e comunicação em tempo real entre as aeronaves e o sistema de controle, além de sistemas avançados de detecção e prevenção de conflitos aéreos.

Os três conceitos propostos (Sky-Lane, Sky-Tube e Sky-Corridor) exigem sistemas robustos de separação de tráfego e gestão do espaço aéreo. A NASA identificou que o

sucesso da implementação da UAM depende da capacidade de gerir o espaço aéreo de forma altamente dinâmica, permitindo que múltiplas aeronaves operem simultaneamente em áreas congestionadas sem comprometer a segurança.

Nesse sentido, um dos principais desafios levantados pela NASA é a necessidade de criar zonas de exclusão (No-Fly Zones) dentro das áreas urbanas, para garantir que aeronaves não sobrevoem regiões sensíveis, como hospitais, áreas residenciais densas, locais históricos ou de importância política.

A NASA também identificou que o nível de maturidade tecnológica e operacional para a UAM ainda está em estágios preliminares. O estudo indicou que o desenvolvimento de aeronaves e sistemas de controle de tráfego para UAM requer uma abordagem progressiva, onde os testes iniciais são feitos em ambientes controlados antes de expandir para áreas urbanas densas. Esse processo de maturação tecnológica envolve várias fases, sendo elas: testes e simulações, expansão para áreas suburbanas e integração com ambientes urbanos densos.

### 5.3 FAA

O Concept of Operations (CONOPS), demonstrado na Figura 17, da FAA para a UAM (FAA, 2019), publicado em 2020, destaca a necessidade de sistemas avançados de gestão de tráfego aéreo (ATM) e o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de tráfego não tripulado (UTM) para gerenciar com segurança as operações de aeronaves autônomas e remotamente pilotadas. O CONOPS aborda diferentes níveis de operação para eVTOL:

- **Operações de Baixa Altitude:** A FAA reconhece que as aeronaves eVTOL operarão principalmente em altitudes mais baixas, muitas vezes entre 500 e 1.500 pés, sobre áreas urbanas. Essas altitudes representam desafios únicos em termos de controle de tráfego, exigindo uma infraestrutura digital mais robusta, capaz de fornecer vigilância em tempo real e comunicação de alta capacidade entre as aeronaves e o sistema de controle de tráfego.
- **UTM para Gestão de Operações Autônomas:** A FAA pretende desenvolver um sistema de UTM, semelhante ao proposto pela NASA, para gerenciar aeronaves não tripuladas. Esse sistema permitiria que as aeronaves autônomas navegassem com segurança através do espaço aéreo urbano, utilizando dados de vigilância em tempo real e sistemas de prevenção de colisões. O UTM também forneceria *deconfliction services*, ou seja, serviços para evitar conflitos entre aeronaves que compartilham o mesmo espaço aéreo.

- **Integração com o Sistema de Controle de Tráfego Aéreo (ATC):** Um dos maiores desafios identificados pela FAA é a integração dos eVTOL com o sistema tradicional de controle de tráfego aéreo. Embora a FAA reconheça a necessidade de criar sistemas automatizados para gerenciar o tráfego em baixa altitude, eles também destacam a importância de manter a coordenação com os controladores de tráfego aéreo, especialmente em zonas de aproximação de aeroportos e áreas restritas.

Aliada à abordagem da NASA, a FAA também está explorando a ideia de criar estruturas no céu, ou "Sky-Highways", para eVTOL. Esses "corredores aéreos" seriam rotas aéreas pré-determinadas que as aeronaves poderiam seguir para garantir que as operações urbanas sejam previsíveis e organizadas. Essas rotas ajudariam a evitar conflitos entre aeronaves e facilitar a integração entre operações tripuladas e não tripuladas.

O conceito dos Sky-Highways se baseia em rotas pré-definidas para aeronaves UAM, permitindo que os operadores e o sistema de controle de tráfego antecipem as trajetórias das aeronaves. Além disso, essas rotas teriam diferentes níveis de acesso, permitindo operações autônomas em níveis mais baixos e rotas reservadas para aeronaves tripuladas em níveis superiores.

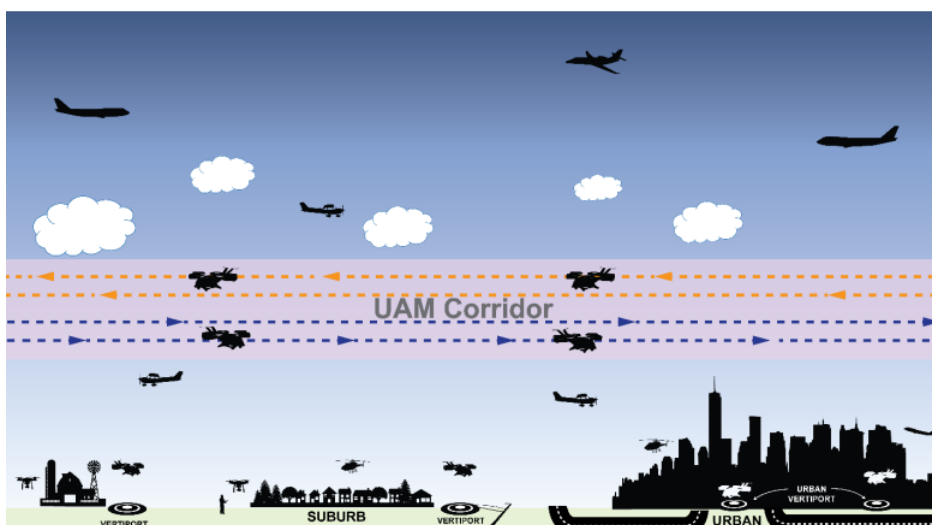


Figura 17 – Conceito do FAA para UAM. Fonte: (FAA, 2019)

## 5.4 CAA - Reino Unido

O espaço aéreo do Reino Unido é altamente denso, especialmente sobre cidades como Londres, onde o tráfego aéreo é extremamente congestionado. A UK CAA está desenvolvendo um sistema que permita a coexistência das aeronaves eVTOL com aeronaves convencionais, considerando também a integração com helicópteros, drones e aviões comerciais. A estratégia envolve a criação de espaços aéreos segregados, rotas específicas, e zonas de operação otimizadas, permitindo uma gestão mais precisa das aeronaves eVTOL

e minimizando a possibilidade de interferência com o tráfego aéreo tradicional (UK CIVIL AVIATION AUTHORITY, 2020).

A UK CAA trabalha em estreita colaboração com a Future Flight Challenge, uma iniciativa do governo britânico que visa fomentar a inovação na aviação, incluindo UAM. O órgão regulador também está em parceria com empresas como Vertical Aerospace, Rolls-Royce e Urban-Air Port, todas as quais estão desenvolvendo tecnologia e infraestrutura necessárias para a operação de eVTOL no Reino Unido. Vários testes e demonstrações já estão em andamento com a CAA desempenhando um papel ativo na supervisão e regulamentação dos testes dessas aeronaves.

Um dos aspectos mais importantes é a integração do UTM, que permitirá a operação segura e coordenada das aeronaves eVTOL em espaços aéreos urbanos densos, utilizando automação e comunicação avançada. A CAA está desenvolvendo protocolos que permitam a interoperabilidade entre o UTM e os sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo já estabelecidos, como o NATS (National Air Traffic Services), o órgão de controle de tráfego aéreo do Reino Unido.

Assim como outros órgãos reguladores internacionais, a UK CAA está investigando o conceito de Sky-Lanes e Sky-Corridors, que seriam rotas aéreas específicas designadas para aeronaves eVTOL. Estas "estradas no céu" seriam utilizadas para manter as aeronaves em trajetórias predefinidas e garantir a segurança do tráfego em áreas urbanas densas. Além disso, essas rotas teriam como objetivo otimizar o fluxo de aeronaves, prevenindo congestionamento aéreo e minimizando o risco de colisões.

A UK CAA também está desenvolvendo propostas para Zonas de Exclusão Aérea sobre áreas sensíveis, como edifícios governamentais, escolas e hospitais, onde as aeronaves eVTOL não teriam permissão para voar.

## 5.5 DLR - Alemanha

A DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) tem colaborado com várias empresas de eVTOL e com cidades alemãs para testar e demonstrar a viabilidade da UAM, assim como apresenta a Figura 18. Esses testes incluem a instalação de vertiportos experimentais em cidades como Hamburgo e Munique, onde as operações de eVTOL são simuladas para entender melhor os desafios relacionados à infraestrutura física e digital.

Um exemplo é o projeto de pesquisa "City-ATM", que envolve o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, comunicação em tempo real e monitoramento de tráfego para garantir que as aeronaves possam operar com segurança em áreas urbanas sem a necessidade de grandes adaptações na infraestrutura física das cidades. Além disso, esse projeto estuda a interação entre as aeronaves eVTOL e o tráfego aéreo existente, incluindo drones e helicópteros (NIKLAß, 2019).

Além disso, a DLR está trabalhando na criação de uma rede de infraestruturas modulares, onde os vertiportos poderiam ser integrados a outras redes de transporte, como estações de trem e metrô, facilitando a mobilidade urbana intermodal.

Para evitar colisões no ar, os veículos aéreos urbanos devem estar sempre separados, como as aeronaves convencionais. No entanto, devido a diferenças substanciais no desempenho e automação do veículo, “os conceitos ATM existentes devem ser adaptados para UAM ou totalmente reprogramados” (NIKLAß, 2019). No estudo, percebe-se que todos os conceitos requerem mínimos de separação para a solução de conflitos. Para detecção eficiente de conflitos, o Centro trabalha com “o espaço aéreo urbano dividido em grade, sendo que apenas os pontos vizinhos de trajetória são analisados”.

Os conflitos podem ser evitados com a implementação de padrões de separação lateral entre vias aéreas, procedimentos padronizados de partida e chegada para vertiportos e reprogramação de voos em conflito.

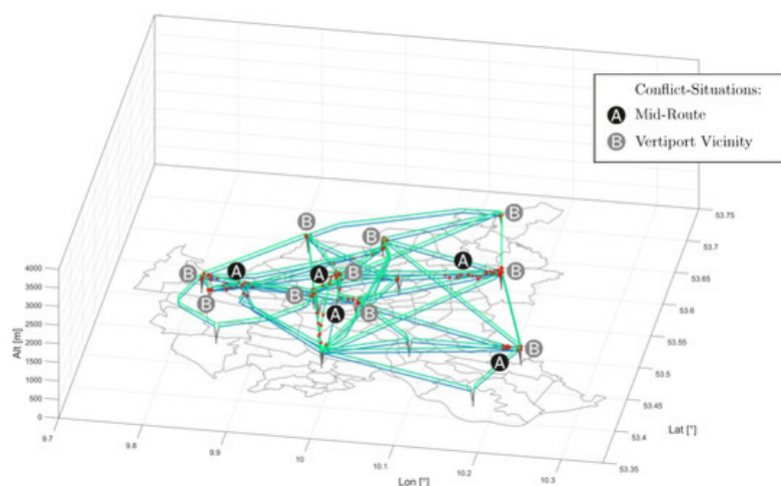


Figura 18 – Conceito da DLR para UAM. Fonte: (NIKLAß, 2019)

## 5.6 Varon Vehicles

A concepção operacional da Varon Vehicles, apresentado na Figura 19, é baseada em um modelo de rede de vertiportos interligados, que serviriam como *hubs* para aeronaves eVTOL. A ideia central é criar corredores aéreos entre essas plataformas, permitindo que as aeronaves circulem em rotas previamente designadas, controladas de maneira automatizada e eficiente. Isso seria uma solução para desafogar o trânsito terrestre, especialmente em regiões altamente congestionadas, como Bogotá e outras capitais latino-americanas, que enfrentam graves problemas de mobilidade urbana (VARON VEHICLES, 2019).

O foco da empresa não está na operação direta das aeronaves, mas sim na infraestrutura necessária para que esses veículos possam funcionar. Isso inclui o desenvolvimento



e operação de vertiportos, que serão responsáveis pelo pouso, decolagem, recarga elétrica e manutenção das aeronaves eVTOL.

A Varon Vehicles também foca na integração intermodal, ou seja, a conexão de seus vertiportos com outros sistemas de transporte urbano, como metrô, ônibus e sistemas de táxi. Isso criará uma malha de transporte fluida, onde os passageiros poderão alternar entre diferentes modais de transporte sem dificuldades. A ideia é que os vertiportos não sejam apenas pontos de entrada e saída para eVTOLs, mas também estações conectadas com o transporte terrestre.

Um dos diferenciais da Varon Vehicles em relação a outras empresas no mercado de eVTOL é seu foco exclusivo na América Latina. A empresa identifica uma lacuna significativa na infraestrutura de transporte da região, particularmente em cidades que enfrentam trânsito severo e falta de soluções de mobilidade eficientes. Por esse motivo, sua abordagem considera as condições locais de cada cidade, customizando sua rede de vertiportos e rotas aéreas de acordo com as necessidades específicas.

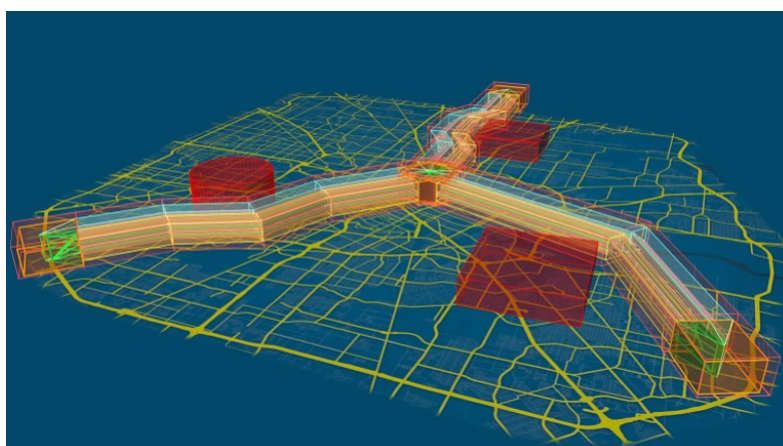


Figura 19 – Conceito da Varon Vehicles para UAM. Fonte: (VARON VEHICLES, 2019)

## 5.7 Embraer - *Flight Plan 2030*

O UATM (Urban Air Traffic Management) é uma nova abordagem proposta pela Embraer para organizar o espaço aéreo urbano, garantindo que voos em áreas densamente povoadas sejam seguros e eficientes, ao mesmo tempo que minimize o impacto sobre o gerenciamento de tráfego aéreo convencional (ATM). Ele será implementado por meio de estruturas e procedimentos de espaço aéreo específico, com suporte de tecnologias como CNS, autonomia, IA e redes de troca de informações. Essas inovações permitirão ao UATM criar novos desenhos de espaço aéreo que sejam ágeis e harmonizados com o crescimento tecnológico (EMBRAER, 2019).



Figura 20 – Conceito da Embraer para UAM. Fonte: (EMBRAER, 2019)

O espaço aéreo controlado pelo UATM ficará posicionado entre as operações de drones de pequeno porte (sUAS) e o espaço aéreo controlado pelo ATM, assim como apresentado na Figura 20. Essa abordagem permite que os provedores de serviços de navegação aérea (ANSPs) aumentem a capacidade do espaço aéreo urbano e ofereçam acesso equitativo tanto para novas aeronaves quanto para as convencionais.

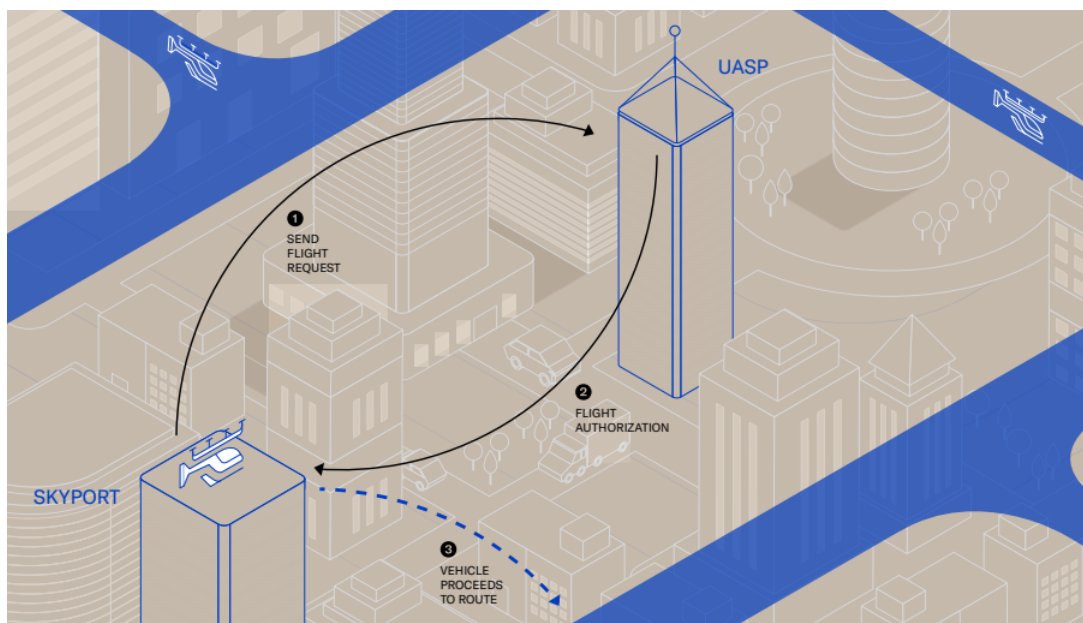


Figura 21 – Atuação do UASP no controle de tráfego. Fonte: (EMBRAER, 2019)

O UATM também contará com uma autoridade única para gerenciar o tráfego aéreo, garantindo uma estrutura organizada de fluxo de tráfego e mitigação de riscos. A longo prazo, o sistema poderá ser capaz de integrar todas as operações de aeronaves

de baixa altitude, tanto pilotadas quanto autônomas, mas inicialmente o foco será nas aeronaves que operam acima das operações de drones pequenos.

O conceito de provedor de serviços de espaço aéreo urbano (UASP) propõe uma única entidade responsável pela gestão do tráfego aéreo de baixa altitude em áreas urbanas, de acordo com a Figura 21. O UASP colaboraria estreitamente com o ATM, USSs (Provedores de Serviços UTM) e outras partes interessadas para oferecer uma gama completa de serviços, especialmente no gerenciamento de tráfego entre vertiports, durante a fase de cruzeiro dos voos de eVTOLs. O UASP teria autoridade exclusiva para controlar rotas, autorizar voos e implementar um plano de gerenciamento de fluxo integrado. Em emergências ou situações atípicas, os operadores humanos estariam presentes para orientar as aeronaves com segurança.

Cada cidade ou país adotaria uma abordagem própria para criar seu UASP, com variações dependendo das regulamentações e políticas locais. Em algumas regiões, a ANSP poderia ampliar seu papel atual para incluir a gestão do espaço aéreo urbano. Outras jurisdições poderiam delegar essa função a terceiros. O importante é que uma autoridade central garanta a segurança e a eficiência dos fluxos de tráfego urbano, utilizando um plano único de gestão.

Seis serviços principais são essenciais para o sucesso do UATM: dois preparatórios, que preparam o espaço aéreo para operações UAM, e quatro operacionais, necessários para as atividades diárias, assim como exposto na Figura 22. Esses serviços incluem estruturas de espaço aéreo com rotas, corredores e limites definidos, além de pontos predefinidos para entrada e saída de aeronaves em espaços aéreos adjacentes. Esses elementos ajudam a maximizar a capacidade do espaço aéreo urbano e promover uma coexistência segura entre eVTOLs e aeronaves tradicionais, incluindo drones pequenos (sUAS).

	UATM SERVICE	DESCRIPTION
<b>FOUNDATIONAL SERVICES</b> Services that must be established before UAM operations begin	<b>AIRSPACE AND PROCEDURE DESIGN</b> Creating urban airspace routes, corridors, and procedures	Pre-planning routes, corridors, airspace boundaries, and procedures for safety and environmental concerns, while maximizing use of airspace to enable the UAM industry to thrive
	<b>INFORMATION EXCHANGE</b> Exchanging airspace and flight information with all stakeholders	Sharing information with all stakeholders in UATM and adjacent airspace management systems, such as ATM and UTM; providing critical information to enable operational services
<b>OPERATIONAL SERVICES</b> Services that are delivered on a daily basis to manage airspace and flights	<b>FLIGHT AUTHORIZATION</b> Authorizing registered aircraft and pilots for flight in UATM airspace	Receiving flight requests, identifying optimal routes, and assigning 4-D flight requirements before authorizing a flight for UATM operations
	<b>FLOW MANAGEMENT</b> Spacing aircraft to maintain the integrity of the UATM operation	Managing the volume of traffic and assigning metering times to ensure safe spacing of aircraft
	<b>DYNAMIC AIRSPACE MANAGEMENT</b> Managing routes, corridors, and airspace boundaries dynamically	Shifting pre-planned routes, corridors, and geo-fenced areas when flight restrictions are activated; moving, opening, and closing routes in response to flow management needs, ATM needs, and changing weather conditions
	<b>CONFORMANCE MONITORING</b> Ensuring flights conform to flight and assisting pilots during off-nominal situations	Monitoring all traffic to maintain safety and provide guidance for any deviations; giving emergency aircraft immediate assistance and activating airspace and traffic flow adjustments to keep flights safe

Figura 22 – Serviços essenciais para a implementação do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019)

Neste contexto, rotas são caminhos definidos por GPS delimitados vertical e horizontalmente para acomodar apenas um eVTOL, enquanto que corredores são caminhos para tráfego com delimitações verticais e horizontais definidas para acomodar diversos veículos e separá-los vertical e horizontalmente entre si, assim como apresenta na Figura 23.

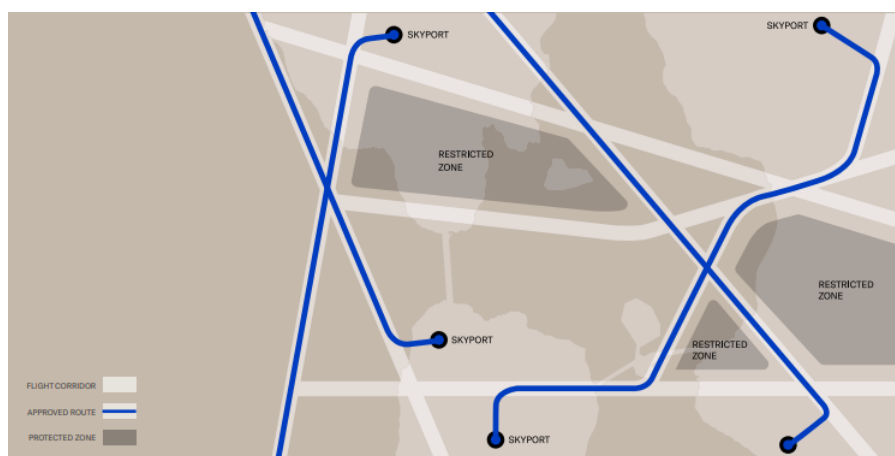


Figura 23 – Exemplo de rotas e corredores. Fonte: (EMBRAER, 2019)

As operações no espaço aéreo UATM serão dinâmicas, exigindo uma abordagem

responsiva por parte do provedor de serviços de espaço aéreo urbano (UASP) e estruturas flexíveis de espaço aéreo. A gestão dinâmica do espaço aéreo será um serviço central que permitirá que o UATM funcione de maneira contínua e eficiente, mesmo diante de mudanças inesperadas ou programadas. O UASP será responsável por abrir, movimentar rotas, corredores e espaços aéreos para atender às demandas diárias de tráfego, mudanças nas condições climáticas, emergências e restrições temporárias de voo impostas pela ANSP, assim como apresentado na Figura 24. Algumas dessas mudanças serão programadas antecipadamente, de acordo com as necessidades específicas de tráfego, enquanto outras ocorrerão em tempo real, conforme as situações exigidas.



Figura 24 – Controle dinâmico do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019)

Em casos de emergência, o UASP desempenhará um papel crucial, ajustando rapidamente as estruturas do espaço aéreo, assim como mostrado na Figura 25, e comunicando as alterações de maneira imediata aos operadores, utilizando o meio de comunicação mais protegido à gravidade da situação, incluindo comunicações de voz em casos urgentes. Para ajustes não críticos, as atualizações serão refletidas automaticamente nas redes de troca de informações. Essa flexibilidade operacional é essencial para manter a segurança e a eficiência do tráfego aéreo urbano, especialmente em situações fora do normal. O uso de tecnologias de comunicação e sistemas dinâmicos garantirá que os voos de eVTOLs e outras aeronaves continuem operando de forma segura, mesmo em ambientes complexos e congestionados.

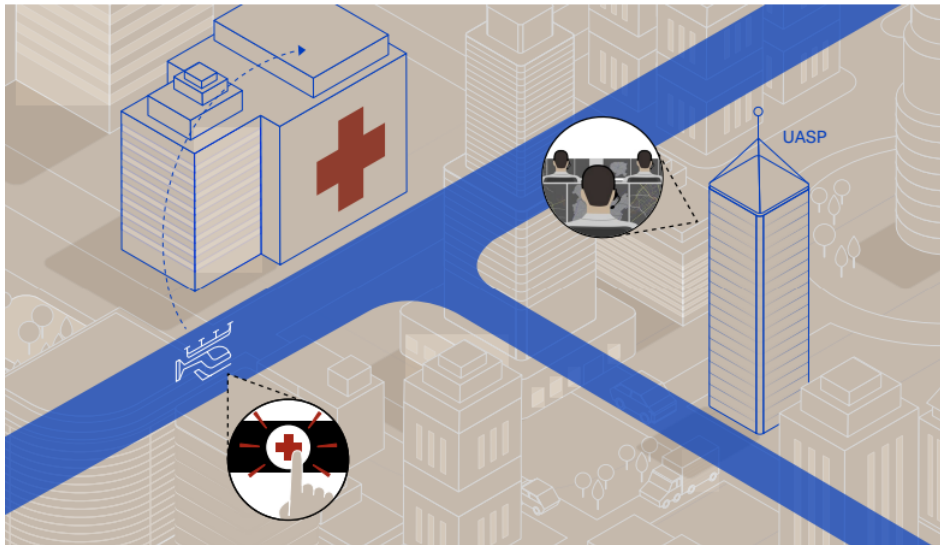


Figura 25 – Controle emergencial do UATM. Fonte: (EMBRAER, 2019)

## 6 CONCLUSÃO

Com o aumento constante da população nas grandes metrópoles, as dificuldades de mobilidade urbana tornaram-se cada vez mais evidentes, levando a sociedade a buscar alternativas aos modais tradicionais de transporte. Nesse contexto, a Mobilidade Aérea Urbana (UAM) surge como uma possibilidade promissória, utilizando veículos elétricos com capacidade de descolagem e pouso vertical (eVTOLs). Esses veículos oferecem uma perspectiva de deslocamentos mais rápidos e eficientes em áreas urbanas, especialmente em momentos de congestionamento, facilitando a conexão entre centros urbanos, aeroportos e até cidades próximas.

O crescimento da UAM segue uma trajetória de expansão dos drones, com grandes investimentos em todo o mundo, sinalizando um mercado promissor. Empresas consolidadas do setor aeroespacial, como a Embraer, bem como startups emergentes, têm esforços e recursos direcionados para desenvolver esse novo nicho. Diante desse cenário, este trabalho buscou analisar os principais desafios relacionados à implementação da UAM.

A pesquisa focou, sobretudo, nas questões relacionadas à inserção desses novos veículos no espaço aéreo e nos impactos que isso traria para os prestadores de serviços de navegação aérea. Embora não tenha a pretensão de esgotar o tema, o estudo confirma a necessidade de novas pesquisas em diversas áreas, como a certificação de pilotos e agências, a segurança das comunicações, questões de ruído, privacidade, poluição visual, segurança operacional e aceitabilidade social.

Foi fundamental compreender as responsabilidades e normativas vigentes, bem como os desafios relacionados à estrutura do espaço aéreo e os fatores que influenciam sua geometria. Além disso, foram evidenciadas algumas das principais concepções operacionais inovadoras globalmente, a fim de identificar as melhores práticas já implementadas no avanço desse conceito.

Nas fases mais avançadas, o cenário futuro prevê uma maior diversidade de aeronaves, tripuladas e não tripuladas, exigindo sistemas de alta disponibilidade e capacidade de compartilhamento de dados, de forma a garantir o fluxo contínuo e a separação segura entre os veículos, apoiados por tecnologias avançadas de vigilância e navegação precisa. Contudo, os desafios para essa integração no espaço aéreo são consideráveis, incluindo a autonomia das aeronaves, a infraestrutura dos vertiportos, a capacidade de detecção e evasão de tráfego, os procedimentos de emergência, e o gerenciamento de tráfego em altitudes baixas e áreas densamente povoadas.

Por fim, considerando que se trata de um campo emergente, com avanços esperados no curto prazo, recomenda-se a continuidade de estudos aprofundados não apenas sobre

os desafios de controle do espaço aéreo, mas também sobre outras questões relacionadas às diversas áreas envolvidas no desenvolvimento da UAM.



## REFERÊNCIAS

- AERIAL GUIDE. **Airspace classification overview**. 2018. Disponível em: <https://www.aerial-guide.com/article/sectional-chart-airspace-classification-overview>. Acesso em: 13 de Setembro de 2024.
- AIRBUS. **Airbus**. 2024. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/urban-air-mobility/cityairbus-nextgen/urban-air-mobility>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.
- AIRSERVICES AUSTRALIA. **How airspace is managed?** 2020. Disponível em: <https://www.airservicesaustralia.com/about-us/our-services/how-air-traffic-control-works/how-airspace-is-managed/>. Acesso em: 19 de Setembro de 2024.
- BETA TEAM. **Beta Team**. 2024. Disponível em: <https://www.beta.team/>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.
- CAMBRIDGE. **Progress in Aerospace Sciences**. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042121000312>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.
- EASA. **Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**. 2021. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-short-report.pdf>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.
- EASA. **Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**. 2021. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-shortreport.pdf>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.
- EHANG. **Ehang**. 2024. Disponível em: <https://www.ehang.com/ehangaav/>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.
- ELETRIC EVTOL NEWS. **Archer Aviation Midnight**. 2023. Disponível em: <https://evtol.news/archer/#:~:text=Each%20VTOL%2Donly%20propeller%20has,during%20forward%20flight%3A%2045%20dba>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.
- EMBRAER. **Flight Plan 2030**. 2019. Disponível em: [https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/72d6ed98a71cb43f/original/200702\\_AF\\_EMBX](https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/72d6ed98a71cb43f/original/200702_AF_EMBX). Acesso em: 10 de Outubro de 2024.
- EUROCONTROL. **U-space Concept of Operations**. 2019. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-10/03-overview.pdf>. Acesso em: 10 de Outubro de 2024.
- EVE AIR MOBILITY. **Eve Air Mobility**. 2024. Disponível em: <https://www.eveairmobility.com/#s1/1>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.
- FAA. **Urban Air Mobility**. 2019. Disponível em: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0\\_1.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0_1.pdf). Acesso em: 10 de Outubro de 2024.

FAPESP. **The arrival of flying cars**. 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/the-arrival-of-flying-cars/>. Acesso em: 05 de Setembro de 2024.

G1. **Queda de helicóptero em rio de Nova York deixa 5 mortos**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/helicoptero-cai-em-rio-em-nova-york.ghtml>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.

G1. **Piloto morto em acidente em Nova York não tinha habilitação para voos em baixa visibilidade**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2019/06/11/piloto-morto-em-acidente-em-nova-york-nao-tinha-habilitacao-para-voos-em-baixa-visibilidade.ghtml>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.

G1 - VALOR ECONÔMICO. **Carteira de encomendas de aeronave elétrica da Eve Air Mobility soma US\$ 3bi**. 2021. Disponível em: . Acesso em: 14 de Outubro de 2024.

JOBY AVIATION. **Joby Aviation**. 2024. Disponível em: <https://www.jobyaviation.com/>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.

LILIUM AIR MOBILITY. **Lilium Air Mobility**. 2024. Disponível em: <https://lilium.com/>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.

MORGAN STANLEY. **Autonomous aircraft**. 2019. Disponível em: <https://www.morganstanley.com/ideas/autonomous-aircraft>. Acesso em: 09 de Setembro de 2024.

NASA. **Urban Air Mobility: Grand Challenge**. 2020. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200001287/downloads/20200001287.pdf>. Acesso em: 16 de Outubro de 2024.

NASA. **Description of the NASA Urban Air Mobility Maturity Level (UML) Scale**. 2021. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205010189/downloads/UML%20Paper%20SciTech%202021.pdf>. Acesso em: 16 de Outubro de 2024.

NIKLAß. **A Collaborative Approach for an Integrated Modeling of Urban Air Transportation Systems**. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/aerospace7050050>. Acesso em: 10 de Outubro de 2024.

OACI. **Air Traffic Services**. 2018. Disponível em: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/10/ICAO-Annex-11-Air-Traffic-Services.pdf>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.

OACI. **Drone Enable: ICAO's Second Unmanned Aircraft Systems Industry Symposium**. 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eTC-IUWyKko>. Acesso em: 14 de Outubro de 2024.

PODER 360. **Os meios de Transporte no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/infograficos/reduzir-tarifa-e-espera-incentivaria-transporte-publico-diz-estudo/>. Acesso em: 05 de Setembro de 2024.

ROLAND BERGER. **Urban Air Mobility**. 2020. Disponível em: [https://www.rolandberger.com/publications\\_pdf](https://www.rolandberger.com/publications_pdf). Acesso em: 10 de Setembro de 2024.

TEXAS A&M TRANSPORTATION INSTITUTE. **Urban Mobility Report**. 2019. Disponível em: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/umr/archive/mobility-report-2019.pdf>. Acesso em: 05 de Setembro de 2024.

UK CIVIL AVIATION AUTHORITY. **Advanced Air Mobility challenge**. 2020. Disponível em: <https://www.caa.co.uk/our-work/innovation/advanced-air-mobility-challenge/>. Acesso em: 16 de Outubro de 2024.

VARON VEHICLES. **Our advanced air mobility concept**. 2019. Disponível em: <https://varon.aero/site/concept>. Acesso em: 10 de Outubro de 2024.

VOLOCOPTER. **Volocopter**. 2024. Disponível em: <https://www.volocopter.com/en/solutions>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.