

XXII SITRAER 2025

Simpósio de Transporte Aéreo



MODELAGEM COMPARATIVA DE GANHOS DE TEMPO NO TRANSPORTE AÉREO URBANO (UAM) FRENTE A MODAIS TERRESTRES: UM ESTUDO DE CASO COM APIS DE ROTEIRIZAÇÃO

Guilherme Cabral¹, Rodrigo Mollo Furlan¹, Evandro José da Silva¹, Giovanna Miceli Ronzani Borille¹, Marcelo Xavier Guterres¹

1. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

* Corresponding author e-mail address: guilherme.cabral.102063@ga.ita.br

PAPER ID: xyz

RESUMO

A mobilidade urbana enfrenta desafios persistentes de congestionamento, tornando soluções inovadoras como a Mobilidade Aérea Urbana (UAM) cada vez mais relevantes. No entanto, quantificar os benefícios deste novo modal, particularmente das aeronaves eVTOL (electric Vertical Take-off and Landing), em comparação com o transporte terrestre estabelecido, continua a ser uma tarefa complexa, principalmente no que se trata de um novo modal sem aplicações reais para fins de comparação. Este estudo propõe e aplica um modelo conceitual para analisar comparativamente os ganhos de tempo de uma jornada multimodal com eVTOL versus uma jornada unimodal terrestre. O modelo integra dados de roteirização do mundo real da API Google Maps Directions para os segmentos terrestres (acesso e saída dos vertiportos) e um modelo paramétrico para o segmento de voo. Ao aplicar esta estrutura a estudos de caso nos principais centros urbanos brasileiros, este artigo visa identificar as condições sob as quais a UAM oferece as vantagens de tempo mais significativas, considerando fatores como distância da viagem, hora do dia e densidade da rede de vertiportos. Os resultados fornecem insights valiosos para análise de viabilidade, planejamento de infraestruturas e desenvolvimento de políticas públicas para o ecossistema emergente da UAM.

Palavras-chave: Mobilidade Aérea Urbana, UAM, eVTOL, Ganhos de Tempo, APIs de Roteirização, Transporte Multimodal.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos professores Evandro José da Silva, Giovanna Miceli Ronzani Borille e Marcelo Xavier Guterres pelo valioso feedback e orientação fornecidos durante o desenvolvimento desta pesquisa. Gostaríamos de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil pelo apoio financeiro. Bolsa n.º 176789/2025-1.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA GENERATIVA

Os autores declaram que o uso de ferramentas de IA generativa foi limitado exclusivamente à geração de código para a aplicação de planejamento. Nenhuma parte do conteúdo, redação, revisão, formatação ou análise foi produzida com auxílio de IA. A ferramenta *Google Gemini* foi utilizada apenas para suporte técnico no desenvolvimento de scripts computacionais.

PAPER ID: xyz

MODELAGEM COMPARATIVA DE GANHOS DE TEMPO NO TRANSPORTE AÉREO URBANO (UAM) FRENTE A MODAIS TERRESTRES: UM ESTUDO DE CASO COM APIS DE ROTEIRIZAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana enfrenta desafios persistentes decorrentes do congestionamento do tráfego, que gera custos econômicos e sociais significativos. Neste contexto, a Mobilidade Aérea Urbana (UAM) surge como um paradigma promissor, propondo o uso de aeronaves elétricas de decolagem e pouso Vertical (eVTOL) como uma nova alternativa de transporte, conforme explorado por Pak et al. (2024). No entanto, um desafio crítico reside na quantificação precisa dos benefícios deste novo modal, especialmente quando comparado com os sistemas de transporte terrestre já estabelecidos. A escolha da metodologia para o cálculo do tempo e da rota é crucial e repleta de limitações que podem influenciar a viabilidade percebida da UAM, bem como limitações das aeronaves eVTOL, conforme investigado por Bacchini e Cestino (2019).

Este estudo visa preencher esta lacuna, propondo e aplicando um modelo conceitual para comparar os ganhos de tempo de uma viagem multimodal com eVTOL em relação a uma viagem unimodal terrestre. O modelo proposto distingue-se pela sua integração de dados de roteirização em tempo real de APIs comerciais (ex: Google Maps Directions API) para modelar os segmentos terrestres da viagem — acesso e saída dos vertiportos. Esta abordagem fornece uma estimativa mais realista do tempo de viagem terrestre em comparação com modelos simplistas baseados em distâncias geodésicas.

A justificativa para esta investigação reside na necessidade urgente de ferramentas analíticas robustas para apoiar a tomada de decisão no ecossistema emergente da UAM (Uber Technologies Inc. (2016)). Tais modelos são essenciais para análises de viabilidade, planejamento de infraestruturas (localização e densidade da rede de vertiportos) e para o desenvolvimento de políticas públicas que possam integrar eficazmente este novo modal na malha urbana. Ao fornecer uma compreensão mais clara e baseada em dados sobre os potenciais ganhos de tempo, este trabalho contribui para um debate mais informado sobre o futuro do transporte urbano.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta secção apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos centrais que sustentam esta investigação: Mobilidade Aérea Urbana (UAM) e a modelagem do tempo de viagem em redes de transporte.

2.1 Mobilidade Aérea Urbana (UAM) e eVTOLs

A Mobilidade Aérea Urbana é definida como um sistema seguro e eficiente para o transporte aéreo de passageiros e carga dentro de uma área urbana. O conceito depende fortemente do desenvolvimento de aeronaves eVTOL, que se caracterizam pela sua capacidade de realizar decolagens e pousos verticais, propulsão elétrica e níveis de ruído reduzidos em comparação com helicópteros convencionais (Haan et al., 2021). A literatura destaca vários desafios para a implementação em larga escala da UAM, incluindo a gestão do tráfego aéreo (UTM), o desenvolvimento de infraestruturas (vertiportos), a aceitação pública e a certificação regulatória (Ribeiro et al., 2023). Apesar desses obstáculos, o potencial

para aliviar o congestionamento terrestre torna a UAM um tema de intensa investigação e investimento.

2.2 Modelagem do Tempo de Viagem em Redes de Transporte

A estimativa do tempo de viagem é uma tarefa fundamental no planejamento de transportes. A metodologia varia significativamente entre os modais terrestres e aéreos.

2.2.1 Modais Terrestres (Carro, Transporte por Aplicativo)

Uma distinção crítica na modelagem do transporte terrestre é entre a distância geodésica (em linha reta) e a distância real ao longo de uma rede rodoviária. Embora mais simples, a primeira não consegue capturar as complexidades dos traçados urbanos. A principal limitação destes métodos é a sua dependência da qualidade e disponibilidade dos dados de tráfego, o que pode introduzir variabilidade nas estimativas.

As abordagens modernas dependem de APIs de roteirização, que podem ser amplamente categorizadas como:

- **APIs Comerciais/Freemium:** Serviços como Google Maps, Mapbox e HERE fornecem algoritmos de roteirização sofisticados que frequentemente incluem dados de tráfego em tempo real ou preditivos, oferecendo estimativas de tempo de viagem altamente realistas.
- **APIs de Código Aberto:** Plataformas como OpenRouteService (ORS) e OSRM (Open Source Routing Machine) oferecem maior flexibilidade e transparência, mas podem exigir auto-hospedagem e podem não ter acesso ao mesmo volume de dados de tráfego em tempo real que as suas congêneres comerciais.

2.2.2 Modal Aéreo (eVTOL)

A modelagem do tempo de voo do eVTOL envolve o seu próprio conjunto de variáveis. Embora se presuma frequentemente uma trajetória de voo direta, as operações no mundo real estariam confinadas a corredores aéreos predefinidos. Além disso, fatores como condições meteorológicas adversas poderiam necessitar de desvios. O tempo total de voo é também influenciado por fases operacionais como o taxiamento, a subida vertical, o cruzeiro e a descida vertical.

3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica deste estudo fundamenta-se no desenvolvimento e aplicação de um framework computacional para avaliação comparativa entre diferentes modais de transporte urbano. Esta plataforma, implementada como uma aplicação web interativa, foi concebida para operacionalizar a avaliação de desempenho entre diferentes modais de transporte através da integração de múltiplas fontes de dados geoespaciais e modelos matemáticos.

A implementação de uma ferramenta funcional permite a execução de estudos de caso dinâmicos e a exploração de cenários de forma eficiente, constituindo-se como um método virtual para a análise de sistemas de mobilidade. A proposta está estruturada em três etapas: (1) Desenho do Aplicativo (etapa já desenvolvida), (2) Questionário Online e (3) Análise de Dados (etapas futuras), conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Metodologia para o desenvolvimento

3.1 Desenho do Aplicativo

Nesta fase, foi desenvolvido um aplicativo web interativo que permite simular viagens, comparando o tempo total de deslocamento entre o modal terrestre de Uber e o modal multimodal com eVTOL. Um ajuste importante foi implementado: o heliponto mais próximo da origem do usuário é automaticamente considerado como ponto de embarque. A lógica da aplicação integra:

- Dados de localização de helipontos e aeroportos Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2025);
- Roteirização dos trechos terrestres via API Google Maps;
- Modelagem paramétrica do trecho aéreo, considerando um tempo fixo para operações e a velocidade de cruzeiro do eVTOL;

Essa etapa está concluída e gerou uma base sólida para análises comparativas de desempenho modal, conforme detalhado na seção de Resultados.

3.1.1 Fontes de Dados e Caracterização do Estudo

Para a operacionalização do modelo, foram utilizadas diversas fontes de dados. O conjunto de potenciais vertiportos foi selecionado a partir da base de dados de aeródromos e helipontos regularizados em todo o território brasileiro, disponibilizada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2025).

A Figura 2 apresenta a série de aeroportos representados pela cor azul e de helipontos de cor vermelha por todo o território nacional, estados como Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e São Paulo são potenciais candidatos para implementação de vertiportos devido ao grande número de infraestruturas existentes.

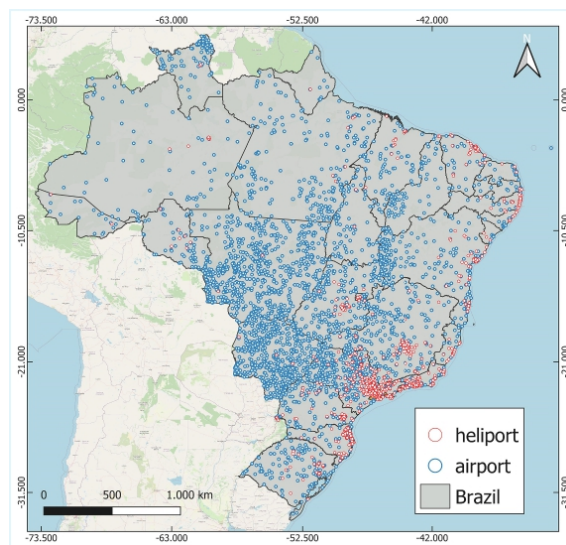


Figura 2: Mapa de heliportos e aeródromos no Brasil. Ribeiro et al. (2023)

Segundo Ribeiro et al. (2023), este tipo de abordagem que utiliza bases de dados oficiais para mapear a infraestrutura existente é fundamental para estudos de viabilidade de UAM. Para a roteirização dos trechos terrestres e geocodificação dos endereços de origem e destino, foi utilizada a API do Google Maps Platform, que fornece estimativas de tempo de viagem realistas baseadas na malha viária e em condições de tráfego.

3.1.2 Modelagem

Nesta subseção, são descritos os parâmetros adotados para a modelagem do aplicativo. O procedimento abrangeu as seguintes etapas:

- A. Identificação e definição da área de estudo a ser atendida pela Mobilidade Aérea Urbana (UAM);
- B. Aquisição e preparação dos dados necessários, como localizações de aeroportos/heliportos pelo Brasil, tempos de viagem de carro entre zonas e tempos de deslocamento de carro e pedestres entre coordenadas de origem e destino;
- C. Formulação do modelo de tempo de voo dos eVTOLs;
- D. Cálculo dos tempos de viagem.

As especificações da etapa (A) foram estabelecidas na Seção 2.1 deste artigo. A etapa (B) envolveu a utilização da linguagem de programação Python para manipulação de arquivos em diversos formatos, incluindo em formato de texto (.csv) e em formato de Excel (.xlsx) para dados vetoriais.

As ferramentas utilizadas são de licença livre, porém há ressalva para a ferramenta Google, pois sua gratuidade tem uma duração restrita. A Tabela 1 resume a quantidade de aeródromos, de caráter público, privado e heliportos, que foram alimentados no código para plotagem de pontos no mapa e subsequentes cálculos.

Tabela 1: Distribuição dos aeródromos por tipo e quantidade

Tipo de aeródromo	Quantidade
Aeródromos públicos	3.494
Aeródromos privados	505
Helipontos	1.475

A distância ortodrômica apresentada na Equação 1 permite o cálculo direto de distâncias a partir de coordenadas geográficas. Tal expressão está implementada em diversos pacotes e módulos computacionais, incluindo a linguagem Python. Para este problema específico, essa formulação é suficientemente precisa, e trabalhar com coordenadas geográficas é conveniente, considerando os dados disponíveis.

$$\text{DIST} = \arccos [\sin(\phi_1) \cdot \sin(\phi_2) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\Delta\lambda)] \cdot R \quad (1)$$

Onde:

- ϕ_1 é a latitude do ponto 1;
- ϕ_2 é a latitude do ponto 2;
- $\Delta\lambda$ é a diferença de longitude entre os pontos 1 e 2;
- R é o raio da esfera representando a Terra, equivalente a 6.371 quilômetros (km), conforme o modelo WGS-84.

O modelo está estruturado em quatro passos sequenciais:

- Definição de Origem e Destino:** O utilizador fornece dois pontos geográficos (origem e destino) através de um processo de geocodificação, de maneira similar às encontradas em aplicativos de viagem como Waze ou Google Maps.
- Modelagem da Jornada Terrestre:** O tempo e a distância para uma viagem de carro direta são calculados através da API de Direções.
- Modelagem da Jornada Multimodal UAM:** Esta jornada é dividida em três percursos: acesso terrestre, segmento aéreo e saída terrestre.
- Análise Comparativa:** O ganho de tempo observado (Δt) é calculado pela Equação (3).

O cálculo do tempo de voo do eVTOL (t_{voo}) segue o modelo paramétrico da Equação 2, onde T_0 representa o tempo fixo para operações de decolagem, pouso e manobras (741 segundos, com base em Schweiger et al. (2022)), D_{voo} é a distância geodésica do voo em quilômetros, e S_{voo} é a velocidade de cruzeiro da aeronave (100 km/h).

$$t_{voo} = T_0 + \frac{D_{voo}}{S_{voo}} \quad (2)$$

O ganho de tempo (Δt) é a métrica central do estudo, calculada pela diferença entre o tempo total da jornada de carro (T_{carro}) e o tempo total da jornada multimodal com eVTOL, que é a soma dos tempos do percurso de acesso ($t_{percurso1}$), do voo (t_{voo}) e do percurso de saída ($t_{percurso2}$), conforme a Equação 3.

$$\Delta t = T_{carro} - (t_{percurso1} + t_{voo} + t_{percurso2}) \quad (3)$$

3.2 Etapas Futuras

Como desdobramento metodológico, será desenvolvido um instrumento digital de coleta de dados em formato de questionário online, estruturado a partir da experiência simulada no aplicativo desenvolvido na etapa anterior. Esse questionário terá como objetivo central avaliar as preferências de escolha modal entre o eVTOL e os modais terrestres convencionais, considerando variáveis reais de origem e destino, além de compreender os fatores que influenciam a escolha e identificar segmentos prioritários para estratégias de implementação. O questionário será composto pelos seguintes elementos:

- Simulação prévia no app (origem e destino reais);
- Comparação entre tempo e custo de viagem nos dois modais;
- Geração automática de um código com os dados da simulação;
- Inclusão de perguntas rápidas sobre hábitos de mobilidade (ex.: uso recente de transporte aéreo, acesso ao aeroporto).

A adoção de premissas de custo fixo neste estágio representa uma simplificação inicial Finger et al. (2019). Entretanto, o modelo atual apresenta algumas limitações que precisam ser consideradas: embora a API do Google Maps incorpore estimativas de tempo com tráfego em tempo real e preditivo, não contempla efeitos de longo prazo; a análise não incorpora a acessibilidade física aos vertiportos, fator que pode impactar a decisão modal em condições reais; e restrições operacionais, como capacidade dos vertiportos, disponibilidade de corredores aéreos e condições meteorológicas adversas, também não foram incluídas. Tais limitações deverão ser exploradas em estudos futuros, de modo a aumentar a robustez e a aplicabilidade prática da proposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para ilustrar a aplicação do modelo, foi realizado um estudo de caso para uma rota estratégica em São Paulo, Brasil. A trajetória selecionada foi de um distrito central de negócios (Avenida Paulista) para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (GRU). A aplicação foi utilizada para obter os tempos de viagem durante uma tarde típica de um dia de semana e os custos.

Os resultados compararão o tempo e a distância para cada modal Kim e Yee (2021). A discussão focará na análise das condições sob as quais a jornada com eVTOL apresenta uma vantagem de tempo significativa. Questões-chave a serem abordadas incluem como o problema da primeira e última milha (acesso/saída terrestre) impacta a eficiência geral da jornada UAM e quão sensível é o resultado à localização dos vertiportos. A Tabela 2 e a Figura 3 apresentam o estudo de caso citado acima.

Tabela 2: Detalhes do Trajeto – EVTOL

Etapa	Tempo / Distância	Descrição
Caminhada	1 min / 78 m	Até o Vertiporto
Voo EVTOL	26 min / 23,3 km	Heliponto CYK → Guarulhos
Caminhada	7 min / 0,5 km	Até destino final no aeroporto

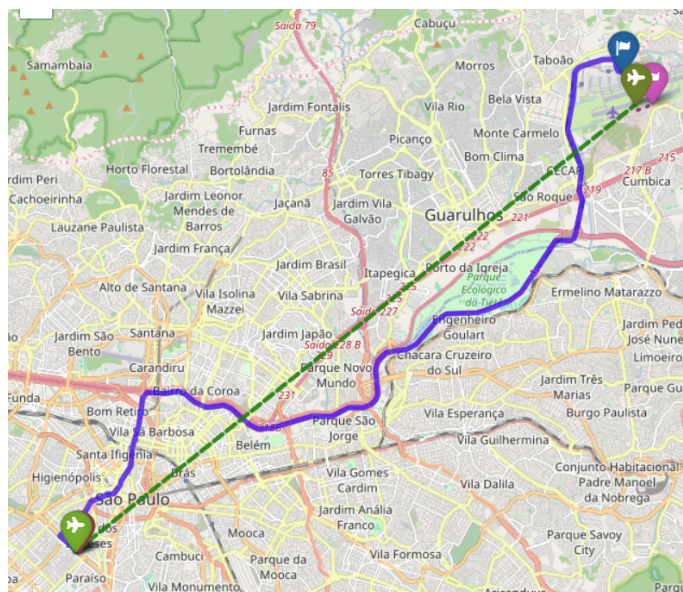


Figura 3: Mapa da rota avaliada

A seguir, a Tabela 3 apresenta um resumo do tempo e distância percorrida entre os modais simulados, e as Figuras 4 e 5 representam as comparações de tempo e distância entre os modais de forma gráfica.

Tabela 3: Resumo dos modais de transporte

Modal	Tempo (min)	Distância (Km)
Carro (Uber)	53	31,8
Transporte público	115	34,3
eVTOL	34	23,9

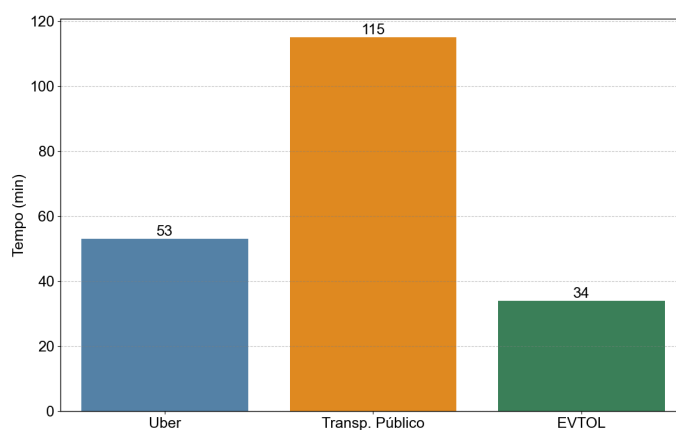


Figura 4: Comparação de tempo por modal de transporte

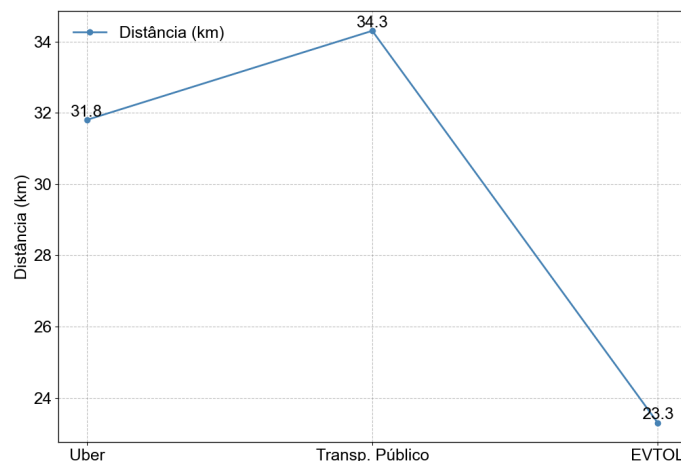


Figura 5: Comparação de Distância por modal de transporte

Como comparação, podemos observar que o tempo e a distância do modal EVTOL, somados ao tempo de caminhada até o heliponto mais próximo do ponto de partida e do ponto de chegada até o destino final, permanecem muito inferiores, representando um ganho de tempo de 8,5 minutos em relação ao Uber (aproximadamente 28%) e 11 minutos em relação ao transporte público (cerca de 36%).

Além da expressiva economia de tempo, a distância percorrida pelo modal EVTOL também se mostra significativamente menor, evidenciando a eficiência do traçado em linha reta proporcionado pelo voo vertical. Enquanto os modais terrestres seguem a malha viária urbana, muitas vezes sinuosa e congestionada, o EVTOL se beneficia da liberdade espacial para otimizar o trajeto. Essa vantagem tende a se acentuar em deslocamentos mais longos, nos quais os modais convencionais acumulam maiores perdas de tempo devido a engarrafamentos, múltiplas conexões e paradas intermediárias. Portanto, o uso de EVTOLs pode representar um diferencial ainda mais relevante em regiões periféricas ou em conexões intermunicipais.

5 CONCLUSÃO

Este estudo introduziu um modelo conceitual para a análise comparativa dos ganhos de tempo proporcionados pela Mobilidade Aérea Urbana. Ao integrar APIs de roteirização do mundo real para os segmentos terrestres, o modelo oferece uma avaliação mais realista do que aquelas baseadas puramente em distâncias geodésicas. Os resultados preliminares do estudo de caso indicam que a UAM tem o potencial de oferecer economias de tempo substanciais, dessa maneira, a principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma estrutura flexível e acessível, materializada na aplicação "Planejador de Rotas UAM", que pode ser utilizada para futuras investigações e análises.

Trabalhos futuros devem focar-se na superação das limitações atuais. A implementação de uma análise de sensibilidade para as variáveis de custo e tempo seria um próximo passo valioso. Adicionalmente, a integração de modelos de voo mais complexos que considerem restrições de tráfego aéreo e meteorologia, e a análise de uma rede abrangente de vertiportos em vez de apenas o mais próximo, melhoraria significativamente o poder preditivo e a aplicabilidade do modelo para o planejamento urbano no mundo real. Também é de grande interesse que pesquisas futuras abordem o ambiente regulatório vigente, e em desenvolvimento, para maior robustez no que se diz respeito à aplicabilidade prática desse novo modal.

Referências

- Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2025). Lista de aeródromos civis cadastrados. <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/lista-de-aerodromos-civis-cadastrados>. [Accessed May 18, 2025].
- Bacchini, A. & Cestino, E. (2019). Electric vtol configurations comparison. *Aerospace*, 6(3). DOI: 10.3390/aerospace6030026. Disponível em:<https://www.mdpi.com/2226-4310/6/3/26>.
- Finger, D., Götten, F., Braun, C., & Bil, C. (2019). Cost estimation methods for hybrid-electric general aviation aircraft. Em: *Cost Estimation Methods for Hybrid-Electric General Aviation Aircraft*.
- Haan, J., Garrow, L. A., Marzuoli, A., Roy, S., & Bierlaire, M. (2021). Are commuter air taxis coming to your city? a ranking of 40 cities in the united states. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132:103392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103392>. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21003892>.
- Kim, H. & Yee, K. (2021). A novel cost estimation method for uam evtols. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 49(3):233–241. DOI: 10.5139/JKSAS.2021.49.3.233. Disponível em:<https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.3.233>.
- Pak, H., Asmer, L., Kokus, P., Schuchardt, B. I., End, A., Meller, F., Schweiger, K., Torens, C., Barzantny, C., Becker, D., Ernst, J. M., Jäger, F., Laudien, T., Naeem, N., Papenfuß, A., Pertz, J., Prakasha, P. S., Ratei, P., Reimer, F., Sieb, P., Zhu, C., Abdellaoui, R., Becker, R.-G., Bertram, O., Devta, A., Gerz, T., Jaksche, R., König, A., Lenz, H., Metz, I. C., Naser, F., Schalk, L., Schier-Morgenthal, S., Stolz, M., Swaid, M., Volkert, A., & Wendt, K. (2024). Can urban air mobility become reality? opportunities and challenges of uam as innovative mode of transport and dlr contribution to ongoing research. *CEAS Aeronautical Journal*. DOI: 10.1007/s13272-024-00733-x. Disponível em:<https://doi.org/10.1007/s13272-024-00733-x>.
- Ribeiro, J. K., Borille, G. M. R., Caetano, M., & da Silva, E. J. (2023). Repurposing urban air mobility infrastructure for sustainable transportation in metropolitan cities: A case study of vertiports in são paulo, brazil. *Sustainable Cities and Society*, 98:104797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104797>. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723004080>.
- Schweiger, K., Knabe, F., & Korn, B. (2022). An exemplary definition of a vertidrome's airside concept of operations. *Aerospace Science and Technology*, 125:107144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107144>. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963821006544>. SI: DICUAM 2021.
- Uber Technologies Inc. (2016). Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. Disponível em:<https://www.uber.com/elevate.pdf>. White Paper.