

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

JOÃO CÉSAR SAMPAIO NETO

**MOBILIDADE AÉREA URBANA (UAM): IDENTIFICAÇÃO
DE EXTERNALIDADES E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS
DE SUA IMPLANTAÇÃO**

BRASÍLIA
2025

JOÃO CÉSAR SAMPAIO NETO

MOBILIDADE AÉREA URBANA (UAM): IDENTIFICAÇÃO DE
EXTERNALIDADES E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DE SUA
IMPLANTAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade de
Brasília, como parte das exigências do Pro-
grama de Pós-Graduação em Economia para
a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Vitor de Carva-
lho Sousa

BRASÍLIA

2025

JOÃO CÉSAR SAMPAIO NETO

**MOBILIDADE AÉREA URBANA (UAM): IDENTIFICAÇÃO
DE EXTERNALIDADES E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS
DE SUA IMPLANTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade de Brasília, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia para a obtenção do título de Mestre.

**Prof. Dr. Lucas Vitor de Carvalho
Sousa**
Orientador
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Andrei Domingues Cechin
Universidade de Brasília (UnB)

**Prof. Dr. Ademir Antônio Moreira
Rocha**
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

BRASÍLIA
2025

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família que, diante de minha missão pessoal de concluir o Mestrado em Economia, esteve sempre em meu apoio, ainda que isso representasse menos tempo ao lado de minha amada esposa, Lídia, e de meu amado filho, Luís.

A meus pais, Gabriel e Lúcia, por terem cultivado um exemplo de família, refletido nas tantas e tamanhas realizações pessoais e profissionais minhas e de meus amados irmãos, Mário Mau e Caio Bola.

Ao professor e orientador Lucas Vitor, não apenas pela transmissão de conhecimento, mas também pelo empenho e sucesso em tornar prazerosa a experiência acadêmica de seus alunos.

Com especial apreço, agradeço ao professor Jorge Madeira Nogueira, pela dedicada coordenação do programa de pós-graduação e pela generosidade com que compartilhou seus vastos conhecimentos ao longo desta jornada.

Aos colegas e professores do programa pelas valiosas informações e experiências.

*“If you think the economy is more important than the environment,
try holding your breath while counting your money.”*
(Guy R. McPherson)

Resumo

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) apresenta-se como alternativa inovadora aos desafios da mobilidade nas metrópoles contemporâneas, marcadas por congestionamentos, altos custos logísticos e degradação ambiental. Esta dissertação analisa as externalidades econômicas associadas à implantação da UAM, com ênfase nos impactos sociais, ambientais e regulatórios decorrentes do uso de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOLs). Adotou-se o método ProKnow-C para seleção e análise estruturada de portfólios bibliográficos, com base na Web of Science, a fim de mapear o estado da arte sobre o tema e identificar lacunas na literatura. A pesquisa revelou que os estudos existentes privilegiam aspectos técnicos e de certificação, havendo escassez de abordagens econômicas e quantitativas voltadas à mensuração de externalidades. Entre as externalidades negativas mais recorrentes encontram-se o ruído, a desconfiguração da paisagem urbana, o consumo energético, os riscos à segurança e privacidade e os efeitos sobre a rede elétrica. Por outro lado, destacam-se externalidades positivas como a redução de congestionamentos, a geração de empregos qualificados, o estímulo à inovação tecnológica, o acesso a áreas remotas e a diminuição das emissões de carbono. Além da análise bibliométrica, realizou-se uma avaliação de impactos com base em indicadores de performance ambiental, considerando dois cenários prospectivos com diferentes graus de maturidade tecnológica e operacional da UAM. A avaliação comparativo evidenciou que os benefícios ambientais potenciais dependem fortemente da integração com matrizes energéticas limpas e da eficiência dos sistemas de gestão do espaço aéreo. O estudo ressalta a importância de frameworks regulatórios, como o U-Space, para a padronização de métricas e simulações que subsidiem políticas públicas. Conclui-se que a ausência de estudos econômicos aprofundados e de indicadores padronizados limita o avanço teórico e a formulação de políticas baseadas em evidências. Assim, a pesquisa contribui para o desenvolvimento metodológico e estratégico de cidades inteligentes e sustentáveis.

Palavras-chaves: mobilidade aérea urbana. externalidades. eVTOL.

Abstract

Urban Air Mobility (UAM) emerges as an innovative alternative to the challenges of mobility in modern metropolises, characterized by congestion, high logistical costs, and environmental degradation. This dissertation examines the economic externalities associated with the implementation of UAM, emphasizing its social, environmental, and regulatory impacts derived from the use of electric vertical take-off and landing aircraft (eVTOLs). The ProKnow-C method was applied for the structured selection and analysis of bibliographic portfolios, based on the Web of Science database, in order to map the state of the art and identify research gaps. The findings reveal that existing literature still prioritizes technical and certification aspects, with limited attention to the economic quantification of social and environmental externalities. Among the most recurrent negative externalities are noise, urban landscape alteration, energy consumption, safety and privacy risks, and increased demand on the electrical grid. Conversely, positive externalities include the reduction of ground congestion, the creation of qualified jobs, technological innovation, access to remote areas, and lower carbon emissions. Beyond the bibliometric and qualitative analyses, the study conducted an impact assessment using environmental performance indicators across two prospective scenarios representing different levels of technological and operational maturity of UAM. The comparative assessment showed that environmental gains depend strongly on the integration with clean energy matrices and efficient airspace management systems. The research highlights the role of regulatory frameworks such as U-Space in standardizing metrics and simulation models that support the quantification of UAM's socioeconomic and environmental impacts. It concludes that the scarcity of comprehensive economic evaluations and standardized indicators constitutes a key gap limiting evidence-based policymaking. Thus, this dissertation contributes to advancing theoretical and methodological understanding of air mobility and supports the transition toward smarter and more sustainable cities.

Key-words: urban air mobility. externalities. eVTOL.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustrações de modelos de aeronaves por fabricante.	33
Figura 2 – Ilustração do U-Space	36
Figura 3 – Procedimento de reciclagem de automóveis elétricos (EVs)	42
Figura 4 – Etapas do método ProKnow-C	53
Figura 5 – Primeiro fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C	56
Figura 6 – Segundo fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C	61
Figura 7 – Evidenciação do valor de corte de citações	62
Figura 8 – Terceiro fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C	64
Figura 9 – Relação dos 10 artigos mais citados, pelo critério de citações globais	97
Figura 10 – Diagrama Sankey (<i>Three-Field Plot</i>), relacionando as colunas CR (referências citadas), AU (autor) e KW_merged (palavras-chave) para os dados do portfólio de artigos	98
Figura 11 – Fases de desenvolvimento da mobilidade vertical	103

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo dos status de desenvolvimento dos eVTOLs por fabricante (julho de 2025)	34
Tabela 2 – Comparação entre externalidades do transporte rodoviário e da Mobilidade Aérea Urbana (UAM)	50
Tabela 3 – Distribuição dos temas nos <i>abstracts</i> das 830 referências analisadas na consulta preliminar ao Portal de Periódicos CAPES	55
Tabela 4 – Palavras-chave (PCs) e suas combinações para uso na consulta de artigos	58
Tabela 5 – Novas palavras-chave (NPCs) identificadas na primeira iteração.	60
Tabela 6 – Artigos que formam o portfólio para compor o referencial sobre externalidades em mobilidade aérea urbana (UAM) - publicação entre 2020 e 2025	66
Tabela 7 – Quadro das principais externalidades negativas identificadas	83
Tabela 8 – Quadro das principais externalidades positivas identificadas	92
Tabela 9 – Descrição dos resultados quantitativos da coleta de dados	96
Tabela 10 – Produção científica (por país) dos 10 países com maior frequência	99
Tabela 11 – Relação dos 10 países com publicações mais citadas	99
Tabela 12 – Relação das 10 fontes de publicação mais relevantes de acordo com o índice H (h-index)	100
Tabela 13 – Avaliação dos impactos por meio dos indicadores MUSE	107
Tabela 14 – Proposta de indicadores ambientais para UAM	135

Lista de abreviaturas e siglas

AAM	Advanced air mobility
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CAFe	Comunidade Acadêmica Federada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DOI	Digital object identifier
ETS	Emissions trading systems
eVTOL	Electric vertical take-off and landing
FAA	Federal Aviation Administration
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ICAO	International Civil Aviation Organization
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NPC	Nova palavra-chave
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PC	Palavra-chave
UAM	Urban air mobility
UTM	Unmanned traffic management
VFS	Vertical Flight Society
VOT	Value of time

Sumário

Introdução	12
O problema e sua importância	15
Objetivos	18
Objetivo geral	18
Objetivos específicos	18
1 Referencial teórico	20
1.1 Externalidade	20
1.1.1 Externalidades e bens públicos	22
1.2 O espaço aéreo como um bem público	24
1.3 Economia dos transportes e economia urbana	27
2 Externalidades em mobilidade aérea urbana	30
2.1 Mobilidade urbana: passado, presente e futuro	30
2.1.1 eVTOLs, regulação e status das certificações	32
2.1.2 U-Space	35
2.2 Aspectos econômicos das aplicações de UAM	37
2.2.1 Táxi aéreo urbano	37
2.2.2 Serviços de emergência	38
2.2.3 Transporte pessoal e deslocamentos cotidianos	39
2.2.4 Transporte de cargas e logística urbana	39
2.3 Externalidades identificadas	40
2.3.1 Externalidades negativas	40
2.3.1.1 Ruídos e vibrações	40
2.3.1.2 Ciclo de vida das aeronaves e processos pré e pós-uso	41
2.3.1.3 Desconfiguração da paisagem	42
2.3.1.4 Segurança e privacidade	43
2.3.1.5 Qualidade da distribuição de energia elétrica	45
2.3.2 Externalidades positivas	46
2.3.2.1 Redução de congestionamentos terrestres	46
2.3.2.2 Geração de empregos e inovação	47
2.3.2.3 Acesso a áreas remotas e serviços de emergência	48
2.3.2.4 Redução das emissões de carbono	48
2.3.3 Comparação entre externalidades na UAM e no transporte rodoviário	49
3 Metodologia	51
3.1 Método ProKnow-C	52
3.2 Escolha de palavras-chave e bases de dados	53

3.3	Teste de aderência das palavras-chave e composição de banco de artigos bruto	59
3.4	Filtragem do banco de artigos bruto	60
4	Resultados	70
4.1	Análise qualitativa	70
4.1.1	Abordagem ampla de externalidades da UAM	70
4.1.2	Externalidades negativas	76
4.1.3	Externalidades positivas	86
4.1.4	Equidade e políticas públicas	94
4.2	Análise bibliométrica	95
4.3	<i>Cases</i> regionais	101
4.4	Avaliação do impacto da implantação de UAM	102
	Considerações finais	111
	Referências	114
	Apêndices	130
	APÊNDICE A Código-fonte: script desenvolvido em linguagem Python para obtenção de <i>abstracts</i>	131
	Anexos	133
	ANEXO A Indicadores de performance ambiental propostos no âmbito do Projeto MUSE	134

Introdução

A mobilidade urbana enfrenta uma conjuntura crítica, marcada pelo excessivo tempo de deslocamento a que os cidadãos estão submetidos para a realização de atividades cotidianas, como trabalho, estudo e acesso a serviços públicos. Tal ineficiência no sistema de transporte compromete não apenas a qualidade de vida da população, mas também a produtividade econômica, ao ampliar o tempo improdutivo gasto em trânsito. No que diz respeito ao transporte de cargas em áreas urbanas, embora também haja obstáculos relacionados à fluidez do tráfego, observa-se uma mitigação relativa desse problema com o uso de modais mais ágeis, como motocicletas e bicicletas de carga, amplamente empregados em entregas de pequeno porte, sobretudo no comércio eletrônico e nos serviços de entrega rápida. A redução dos tempos de deslocamento - tanto de pessoas quanto de mercadorias - está diretamente associada à diminuição dos custos logísticos, operacionais e sociais, ao permitir maior eficiência na alocação de recursos, economia de combustível, redução de horas-máquina e aumento da previsibilidade nos fluxos urbanos. Em cidades mais populosas, tal redução representaria benefícios ainda maiores.

O crescimento populacional e o consequente aumento da densidade demográfica no ambiente urbano representam um constante desafio para a mobilidade nas cidades. No ano de 1950, a população global alcançou a marca de 2,5 bilhões de pessoas, iniciando uma curva de crescimento que se aproxima a uma tendência linear de acréscimo de 770 milhões de pessoas por década¹.

Ainda que o século XX tenha marcado, em alguma medida, a estabilização da taxa de crescimento populacional global, o problema da mobilidade urbana, que se estende desde as organizações de pequenas populações em vilas até as crescentes metrópoles e megalópoles, foi agravado pela crescente demanda por deslocamento. Apontam Aljoufie et al. (2011) que os problemas do crescimento urbano e do transporte estão fortemente relacionados. Enquanto a infraestrutura de transporte atrai o desenvolvimento urbano, o desenvolvimento e o aumento populacional resultam em aumento na demanda por deslocamento e, consequentemente, na necessidade de infraestrutura de transportes.

A crescente demanda por meios de transporte impulsionou o ambiente industrial de inovação, permitindo que modais como ferroviário a vapor, linhas de bondes elétricos e veículos automotores transformassem o cotidiano - e a paisagem - das cidades. Tal transformação não se dá, contudo, em um único ponto no tempo; as crescentes frotas de veículos e variedades de modais demandam constantes alterações na infraestrutura urbana. Tem-se, por exemplo, o problema do congestionamento - especialmente crítico

¹ Dados do Fundo de População das Nações Unidas - UNFPA, disponíveis no Portal de Dados Populacionais em <pdp.unfpa.org>

em cidades que não investiram no alargamento de suas vias. Mumford (1938) indica que, mesmo quando o transporte de pessoas era realizado por carruagens com tração animal, na primeira metade do século XIX, as cidades já enfrentavam efeitos negativos do congestionamento.

Com o alargamento das vias tornando-se cada vez mais custoso e, por vezes, inviável, em razão da consolidação de edificações de grande porte ao longo das vias, a mobilidade aérea urbana (conhecida pela sigla UAM, do inglês *urban air mobility*) passa a ganhar notoriedade na pesquisa científica como uma alternativa complementar aos modais de transporte urbano.

Antes presente quase que exclusivamente no imaginário popular, imortalizado em visões hipotéticas de futuro como na série animada de televisão *Os Jetsons* (1962) ou no filme *O Quinto Elemento* (1997), este último dirigido por Luc Besson, o *carro voador* surge como uma possível resposta à crise de congestionamento de veículos terrestres enfrentada nos centros urbanos.

Enquanto soluções como helicópteros ou aviões de pequeno porte - além de apresentarem alto custo - demandam espaços de apoio (heliportos/aeródromos) e infraestrutura incompatíveis com as construções nos centros urbanos, aeronaves capazes de decolar e pousar verticalmente e de deslocar-se horizontalmente no ar permitiriam usufruir do espaço aéreo urbano, aliviando a demanda por transporte terrestre. Aeronaves com tais características são chamadas de VTOL (acrônimo para *vertical take-off and landing*), sendo a versão com propulsão por motores elétricos conhecida por eVTOL (UGWUEZE et al., 2023). Destaque-se que a denominação “carro voador” não deve ser confundida com o conceito de eVTOL - ainda que tal confusão seja bastante comum na mídia - vez que carros voadores são veículos automotores terrestres de contato (entre os pneus e a via) com a capacidade de decolagem e pouso verticais ou similar à de aviões de pequeno porte (sendo necessário, portanto, comprimento de pista para decolagem e pouso, também conhecido por *runway*).

Neste ponto, faz-se mister diferenciar os conceitos de AAM (*advanced air mobility* ou mobilidade aérea avançada) e UAM (*urban air mobility* ou mobilidade aérea urbana).

Pode-se considerar a AAM como um conceito amplo que abrange o desenvolvimento e a integração de sistemas inovadores de transporte aéreo projetados para movimentar pessoas e cargas de novas maneiras em ambientes urbanos, suburbanos e rurais. AAM inclui aeronaves tripuladas (MAV ou *manned air vehicles*) e não tripuladas (UAV ou *unmanned air vehicles*), variando de pequenos drones de entrega a aeronaves elétricas ou híbridas maiores, capazes de viagens intermunicipais. O conceito busca criar uma rede de transporte aéreo seguro, sustentável e eficiente, que complemente os sistemas terrestres existentes, revitalize aeroportos regionais subutilizados e introduza novas possibilidades logísticas, incluindo transporte de cargas e serviços de emergência.

Dentro da AAM, a UAM - cujos impactos em externalidades são analisados no presente estudo - foca especificamente nos desafios e oportunidades das áreas urbanas e suburbanas densamente povoadas. A UAM concentra-se em operações de curta distância, como serviços de táxi aéreo para passageiros, evacuações médicas e entregas de carga na última milha, geralmente em trajetos inferiores a 50 quilômetros (WIEDEMANN et al., 2024).

Esse último subconjunto enfatiza a integração com a infraestrutura de transporte já existente, com atenção especial para questões específicas do ambiente urbano, como poluição sonora, aceitação pública, adaptação regulatória e segurança das operações em espaços aéreos congestionados. A UAM prevê reduzir a congestão nas ruas das cidades ao introduzir uma nova dimensão vertical à mobilidade cotidiana (WIEDEMANN et al., 2024).

Diversas organizações têm envidado esforços no desenvolvimento de modelos de eVTOLs e, também, no estabelecimento, junto às autoridades reguladoras, de normas para o funcionamento da mobilidade aérea urbana. Algumas restrições regulatórias, ainda em estudos, apontam para limitações de distância e de quantidade de passageiros (ZHANG; LIU; ZHENG, 2024).

As externalidades negativas do uso de transporte automotivo terrestre urbano, principalmente o custo externo do congestionamento, suscitam amplas discussões sobre o modelo de planejamento urbano para as cidades, a exemplo do conceito inovador da “cidade de 15 minutos”, em que o planejamento de uma cidade deve adotar como meta que seus habitantes consigam se deslocar para serviços e atividades essenciais, tais como educação, saúde e trabalho, em um tempo não superior a 15 minutos. Indicam Abdelfattah, Deponte e Fossa (2022) que o modelo de cidade de 15 minutos altera profundamente o conceito de planejamento *urbano*, que passaria a ser interpretado como o planejamento *da vida urbana*.

Outrossim, considerados (i) que, no campo de modais terrestres, externalidades negativas em transporte público apresentam valores inferiores àqueles observados no transporte particular, considerada a figura de mérito *custo/(passageiro × quilometro)* (JAKOB; CRAIG; FISHER, 2006) (RIZZI; MAZA, 2017) e (ii) que os eVTOLs apresentam capacidade máxima de passageiros comparável à de automóveis particulares de passeio, recursos aplicados no desenvolvimento de tecnologias de UAM poderiam ser direcionados a melhorias nos modais de transporte público com maior eficácia na melhoria da mobilidade urbana.

Nesse sentido, entende-se como apropriada uma avaliação da motivação do desenvolvimento da mobilidade aérea urbana. Dado que inovação e desenvolvimento tecnológico estão diretamente ligados ao conceito de escassez relativa (DALY, 1974), a implantação de soluções de grande impacto na sociedade deve pautar-se na efetividade, ao invés de

buscar fundamento na incessante busca humana por desenvolvimento, ou *growthmania*.

Inevitável considerar a possibilidade de um *efeito cobra* (SIEBERT, 2003) ao implementar a UAM como solução para o congestionamento, vez que qualquer modal de transporte traz consigo externalidades negativas. Ainda que a externalidade negativa do tráfego de veículos terrestres fosse mitigada com o deslocamento do transporte urbano para o meio aéreo, as externalidades negativas da UAM, que integram o objeto do presente estudo, devem ser avaliadas com a finalidade de afastar a possibilidade do indesejado referido efeito, segundo o qual determinada suposta solução proposta para um problema poderia, em contrário, agravá-lo.

A conectividade e integração em P&D ao redor do globo, alcançadas graças aos constantes aprimoramentos de tecnologias de comunicação e metodologias de pesquisa colaborativa, permitem que soluções para problemas em escala global sejam amplamente discutidas. Dessa forma, ainda que o desenvolvimento de novas tecnologias em transportes seja de grande interesse e relevância social, entende-se necessária a constante vigilância quanto ao seu impacto para a sociedade.

O problema e sua importância

No início do século XX, marcado pela popularização do carro para transporte urbano, pouco se discutia a respeito dos impactos econômicos negativos do transporte automotor terrestre sobre a sociedade. De fato, o próprio conceito de externalidade - ainda que o termo, em si, não tenha sido então utilizado - foi introduzido pelo economista Arthur Pigou na obra *The Economics of Welfare* (PIGOU, 1938), originalmente publicada em 1920, 12 anos após o lançamento e início da fabricação do veículo Ford Model T (WELLS, 2007), um dos marcos na produção automotiva.

O transporte automobilístico, que por décadas consolidou-se como principal meio de transporte nas cidades, representa um dos principais agentes de mudança da paisagem urbana (CHANG et al., 2022). O congestionamento surgiu como um dos mais persistentes impactos negativos, afetando significativamente a produtividade econômica e contribuindo para a degradação ambiental (LITMAN, 2009).

Acidentes de trânsito, outro subproduto do transporte motorizado terrestre, resultaram em perdas substanciais de vidas e em custos relacionados à saúde dos envolvidos. Apontam Miner et al. (2024) que os resultados das externalidades do transporte automotivo incluem o custo referente à morte de entre 60 e 80 milhões de pessoas, aproximadamente, desde sua invenção.

A poluição sonora urbana, por sua vez, derivada principalmente de ruídos dos motores a combustão e da fricção entre pneus e via, tornou-se uma relevante fonte de estresse e doenças cardiovasculares em populações metropolitanas (BASNER et al., 2014).

A exemplo da implantação e popularização do modelo terrestre de transporte urbano, é comum que formuladores de políticas públicas subestimem os custos sociais da implantação de novas tecnologias, ilustrando o perigo de negligenciar avaliações de externalidades antes da adoção em massa de um novo meio de transporte (OECD, 1994).

Para o problema em tela, qual seja a avaliação de externalidades em mobilidade aérea urbana, por tratar-se a UAM de uma forma de transporte *aéreo* entende-se conveniente a comparação, no que diz respeito às externalidades, com modelos tradicionais deste tipo de transporte. Nesse sentido, apesar dos conhecidos benefícios da aviação, há de se considerar, por exemplo, os impactos negativos dos modais aéreos nas comunidades que habitam regiões próximas à infraestrutura aeroportuária, em que percebe-se elevada movimentação de aeronaves.

Mesmo com a adoção de novas tecnologias de motores, o ruído de aeronaves segue como uma das principais causas de perturbação do sono e efeitos cardiovasculares adversos entre residentes de regiões próximas a aeroportos (OMS, 2018). Outrossim, emissões gassosas durante movimentos de decolagem e pouso contribuem para um aumento relevante da poluição do ar local, com impactos mensuráveis na saúde respiratória deste recorte populacional (STETTLER; EASTHAM; BARRETT, 2011).

Para além dos impactos em saúde física, o estresse causado pelos frequentes sobrevoos em baixa altitude tem contribuído para uma resistência de populações à implantação e expansão de áreas aeroportuárias, reforçando a importância de gerenciar os impactos do planejamento de mobilidade aérea nestas localidades.

Ainda mais próximos dos eVTOLs, os helicópteros - já consolidados no transporte aéreo por oferecerem flexibilidade para fins de mobilidade em aplicações médicas, de segurança e de luxo - também são responsáveis por gerar externalidades nos contextos urbanos afetados. Seu ruído, caracterizado por um som de alta intensidade, baixa frequência e padrão rítmico, resulta em perturbação notadamente superior ao ruído típico de tráfego terrestre (FIELDS, 1993).

Tem-se, ainda, que o ruído decorrente do voo de helicóptero, mesmo em menores níveis de pressão sonora (dB), resulta em maior perturbação quando comparado ao ruído de aeronaves de asas fixas (aviões) (GJESTLAND, 1994), o que intensifica a oposição de populações vizinhas à implantação de heliportos, ainda que em cenários de frequências limitadas de voos.

O transporte aéreo de rotor traz à tona, ainda, questão de grande relevância para a discussão da mobilidade aérea urbana. Trata-se da preocupação com a segurança das operações em baixa altitude, que cria elevados riscos de acidentes em áreas densamente populadas. A regulamentação de operações de helicópteros nas cidades pode oferecer, portanto, importantes lições para a estruturação de políticas para os eVTOLs.

Igualmente relevantes para a discussão sobre externalidades em UAM, os drones (veículos aéreos não tripulados) trouxeram, com sua popularização, novas categorias de externalidades. Estudos apontam que o ruído de drones, ainda que em baixos níveis de pressão sonora, é percebido como mais irritante, quando comparado a outros ruídos de transporte aéreo, em razão de sua natureza aguda e flutuante (CHRISTIAN; CABELL, 2017).

Ademais, a operação frequente de drones introduz relevante alteração na paisagem visual, trazendo à tona a discussão estética sobre poluição visual e seus impactos, entre outros, econômicos, particularmente em áreas de patrimônio cultural ou visualmente sensíveis (a exemplo de cidades como Brasília, tombada como Patrimônio Cultural da Humanidade pela UNESCO em 1987).

Os drones, por fim, inauguram discussão sobre desconforto psicológico e fricção social em decorrência de sua capacidade de filmagem e vigilância em voos de baixa altitude (FINN; WRIGHT, 2012), com casos reais já registrados no Brasil suscitando discussões jurídicas sobre responsabilidade civil (MOTTA, 2021).

Em outro condão, mudanças significativas na tecnologia de transporte não apenas impactam as externalidades, mas também desencadeiam resistência psicológica enraizada na territorialidade e na percepção de perda de controle sobre o ambiente. A psicologia ambiental indica que mudanças súbitas nos padrões urbanos familiares - como novas fontes de movimento aéreo - podem provocar sentimentos de ansiedade, alienação e impotência (EVANS, 2003).

A aceitação de novas paisagens depende fortemente de como essas mudanças se alinham aos modelos mentais que os residentes possuem de seu ambiente. Quando as “intrusões” tecnológicas são percebidas como violações da identidade local ou como ameaças às normas sociais existentes, movimentos de oposição tendem a se intensificar (em língua inglesa tais movimentos são conhecidos pelo acrônimo *NIMBY* - *Not in my backyard* - ou, em tradução livre, “Não no meu quintal”), independentemente da magnitude objetiva da perturbação (DEVINE-WRIGHT, 2009). Nesse contexto, a UAM deve ser compreendida não apenas como uma inovação técnica, mas como uma profunda transformação cultural e psicológica da vida urbana, exigindo uma cuidadosa avaliação da percepção pública em paralelo com regulamentação técnica e identificação de seus impactos econômicos e sociais.

Por outro lado, seria injusto não abordar as externalidades positivas da adoção de UAM. O uso de eVTOLs tem o potencial de aliviar os congestionamentos no transporte terrestre ao oferecer uma alternativa de mobilidade nos centros urbanos. A UAM pode reduzir os tempos de viagem em 30% a 40% em trajetos ponto a ponto, e até 40% a 50% em grandes cidades dos Estados Unidos e da China, quando comparada ao transporte terrestre (MORADI; WANG; MAFAKHERI, 2024).

Por serem movidos a eletricidade, os eVTOLs podem gerar uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com veículos equipados com motores a combustão interna. Apontam Zhao et al. (2022) que as emissões de gases de efeito estufa por passageiro-quilômetro são 50% menores para os eVTOLs do que para os veículos convencionais.

Por fim, o desenvolvimento e a implementação de UAM podem impulsionar o crescimento econômico, criando novos mercados e oportunidades de trabalho nas áreas de manufatura, infraestrutura e operações. Estima-se que a AAM (da qual, como já discutido, a UAM é subgrupo) poderá gerar, nas próximas décadas, dezenas de milhares de novos empregos e bilhões de dólares em atividade econômica adicional (MCNAB, 2023).

A mobilidade aérea urbana apresenta grande potencial de transformar as cidades - pode ser forte aliada na redução do congestionamento terrestre, notadamente apresenta menores índices de emissões e promove acesso a áreas remotas. Contudo, precedentes históricos demonstram que desprezar externalidades - especialmente as negativas - pode acarretar em significativos prejuízos sociais. Dos custosos congestionamentos e acidentes dos veículos automotores aos impactos dos ruídos de helicópteros, aviões e drones na saúde populacional, todo salto tecnológico na história produziu consequências indesejadas.

Nesse sentido, desenvolvedores, pesquisadores e, principalmente, formuladores de políticas públicas devem integrar avaliações rigorosas de externalidades, consultas comunitárias e estratégias adaptativas de mitigação nas etapas de planejamento dos sistemas de UAM.

O sucesso do tráfego urbano de eVTOLs depende não apenas da viabilidade tecnológica, mas também da capacidade de antecipar seus custos sociais.

Objetivos

Objetivo geral

De modo geral, o presente trabalho teve por objetivo identificar e avaliar, com base na literatura científica disponível, possíveis externalidades decorrentes da implantação de mobilidade aérea urbana, consideradas as diversas aplicações dos eVTOLs.

Objetivos específicos

É possível, ainda, elencar objetivos específicos que compõem o objetivo geral do presente trabalho. São eles:

- (a) Identificar, com base na literatura disponível, possíveis externalidades negativas e positivas da implantação da UAM;

- (b) Analisar políticas públicas que possam mitigar eventuais externalidades negativas e facilitar efeitos de externalidades positivas da mobilidade aérea urbana;
- (c) Realizar análise bibliométrica da produção científica a respeito da UAM, destacando padrões e tendências relacionados a externalidades.

1 Referencial teórico

1.1 Externalidade

Vez que o conceito de externalidade é de importância central para o problema em tela, a presente seção dedica-se a esclarecer a acepção adotada. Para tanto, faz-se necessário recorrer à literatura acadêmica sobre o tema, bem como aos trabalhos dos dois principais teóricos a seu respeito, quais sejam Arthur Pigou e Ronald Coase.

Sob a perspectiva da didática dos cursos de Economia, a externalidade é estudada na cadeira de Microeconomia. Sua definição, em uma acepção simplificada a ser detalhada a seguir, pode ser resumida da seguinte forma:

As externalidades ou economias externas surgem quando a decisão tomada por um agente influencia o bem-estar de outro agente, não diretamente envolvido com as decisões do primeiro. Em outras palavras, em um mercado, as decisões de compradores e vendedores influenciam mutuamente uns e outros - e o resultado do mercado não é uma externalidade. No entanto, caso outro agente, não envolvido no mercado, também seja influenciado, nesse caso, a perda ou ganho de bem-estar desse último agente é uma externalidade. (CHAGAS, 2011, p. 281)

Mankiw (2014), por sua vez, define a externalidade como a influência de uma atividade sobre o bem-estar de um terceiro, mas pelo qual não há pagamento ou recebimento de compensação. O roteiro didático usualmente inclui, ainda, a tipologia das externalidades, podendo ser classificadas como negativas ou positivas.

Definem-se as externalidades negativas como aquelas em que os efeitos de determinada atividade sobre terceiros são adversos (MANKIW, 2014). O exemplo de externalidade negativa usado por Mankiw (2014), Pindyck e Rubinfeld (2013) e Chagas (2011) diz respeito à poluição - efeito adverso de muitas atividades econômicas, que afeta toda a sociedade.

Já as externalidades positivas, como define Mankiw (2014), são aquelas em que os efeitos sobre terceiros são benéficos. Novamente, Mankiw (2014) e Chagas (2011) convergem, ao exemplificar a educação como atividade que promove benefícios para terceiros, vez que todos se beneficiam por viver em uma sociedade melhor educada, classificando tais efeitos, portanto, como externalidade positiva. Pindyck e Rubinfeld (2013), por sua vez, utilizam como exemplos (i) os benefícios que reformas e reparos em uma residência promovem para a vizinhança e (ii) investimentos em P&D, cujas inovações resultantes, resguardadas as limitações impostas por patentes, podem beneficiar outras firmas.

A construção do entendimento do conceito de externalidade pressupõe, ainda, conhecimentos sobre os trabalhos de dois teóricos britânicos que se destacaram nos estudos a respeito do tema - são eles Arthur Cecil Pigou (1877-1959) e Ronald Coase (1910-2013).

Pioneiro nos estudos sobre externalidades, em *The Economics of Welfare*, obra publicada inicialmente em 1920, Arthur Pigou dedica atenção especial à análise da eficiência econômica, com foco nas variáveis que influenciam o aumento ou a redução do dividendo nacional. Sua investigação se debruça sobre os entraves que dificultam a alocação eficiente dos recursos dentro de uma comunidade.

Embora reconheça a complexidade própria desse tipo de análise, Pigou adota uma perspectiva orientada à ação, buscando identificar possíveis formas de intervenção e regulação por parte do Estado, com vistas a orientar as forças econômicas em direção à promoção do bem-estar econômico e social coletivo - não à toa o nome do autor é amplamente conhecido por meio do conceito de *tasa pigouviana* (ou *imposto pigouviano*). É desse contexto que brota sua formulação teórica sobre as externalidades, inserida como parte integrante do esforço por compreender e corrigir falhas de mercado que comprometem a maximização do bem-estar:

Aqui, a essência da questão é que uma pessoa A, ao prestar um determinado serviço - pelo qual recebe pagamento - a uma segunda pessoa B, acaba, incidentalmente, prestando serviços ou causando prejuízos a outras pessoas (que não são produtoras de serviços semelhantes), de tal forma que não é possível exigir pagamento dos beneficiados nem impor compensação em favor dos prejudicados. (PIGOU, 1938, p. 183 - tradução nossa)

Em contraste, Coase (1960) argumenta que, se os direitos de propriedade forem exclusivos e bem definidos, e se não houver custos de transação, os agentes privados podem negociar uma solução eficiente sem a necessidade de intervenção estatal. Esse resultado ficou conhecido como Teorema de Coase. A essência da proposta é que o ponto de atribuição inicial dos direitos não altera o resultado econômico final, desde que as partes possam negociar livremente.

Por exemplo, no caso de poluição ruidosa em um vertiporto que afete residentes vizinhos, tanto faz quem tem direito ao silêncio ou ao ruído - o nível de ruído ótimo será atingido se for possível negociar compensações (PARISI, 2008). Coase enfatiza que mudanças legais ou regulatórias deveriam focar em reduzir custos de transação, evitando interferências desnecessárias no mercado.

Literatura mais recente, como Schneider (2022), sustenta que os modelos de Coase e de Pigou não são incompatíveis, mas sim complementares. Ao identificar situações onde os custos de transação são elevados ou direitos pouco definidos, políticas baseadas na ideologia pigouviana podem garantir que os resultados de mercado se aproximem do ideal de eficiência social. Quando os direitos são claros e a quantidade de partes envolvidas

é limitada, mecanismos deliberados com base no teorema de Coase - como negociação privada ou contratos de mitigação - mostram-se mais adaptáveis e menos custosos em termos de supervisão.

Esse arranjo “híbrido” sugere que, em muitos casos, a intervenção pública deveria atuar como medida *alternativa*, garantindo a eficiência quando a negociação direta falha, sem substituir completamente as instituições de mercado (SCHNEIDER, 2022).

1.1.1 Externalidades e bens públicos

O conceito de bens públicos e os desafios inerentes à sua provisão em economias de mercado permanecem como um pilar da teoria econômica, profundamente enraizado nas contribuições fundamentais de Paul Samuelson. A análise de Samuelson sobre a não-exclusão e a não-rivalidade como características definidoras dos bens públicos estabeleceu um arcabouço teórico para compreender falhas sistêmicas de mercado. Em sua crítica ao Teorema de Coase (SAMUELSON, 1995), ele enfatizou que as condições idealizadas de concorrência perfeita e de custos de transação nulos raramente se verificam na realidade, conduzindo a ineficiências quando os mercados privados tentam prover bens com atributos de consumo compartilhado. Essa tensão decorre do fato de que indivíduos podem se beneficiar de bens públicos sem contribuir para sua provisão (o chamado problema do “carona” - conhecido em língua inglesa pela expressão *free rider*), criando uma divergência entre o ótimo privado e o ótimo social.

Os fundamentos teóricos da falha de mercado na provisão de bens públicos derivam da natureza dual da não-exclusão e da não-rivalidade. A não-exclusão implica que, uma vez fornecido o bem público - como defesa nacional ou ar limpo - torna-se impossível impedir que não pagadores usufruam de seus benefícios. A não-rivalidade, por sua vez, significa que o consumo de uma pessoa não reduz o acesso de outra. A formulação matemática dessas propriedades por Samuelson demonstrou como mercados não regulados tendem a prover tais bens em quantidades sistematicamente inferiores às necessidades sociais (SAMUELSON, 2002). Seu trabalho revelou que, mesmo em mercados perfeitamente competitivos, o mecanismo de preços falha em incorporar plenamente o valor social dos bens públicos, tornando necessária a intervenção estatal para alcançar a eficiência de Pareto.

As externalidades agravam ainda mais essas falhas de mercado, como ilustrado na análise de Samuelson sobre a negociação coasiana (SAMUELSON, 1995). Embora Coase tenha argumentado que negociações privadas poderiam internalizar custos externos por meio da atribuição adequada de direitos de propriedade, Samuelson destacou as limitações práticas dessa abordagem. Ele observou que os custos de transação, as assimetrias de informação e os problemas de ação coletiva frequentemente impedem resultados de barganha eficientes, especialmente quando envolvem grande número de partes interessadas.

Essa análise se estende às externalidades ambientais, como a poluição, em que a natureza não-excludente dos sistemas atmosféricos cria interdependências complexas que os mecanismos de mercado, sozinhos, não conseguem resolver.

As contribuições de Samuelson também iluminaram as dimensões políticas da provisão de bens públicos. Sua formulação da “condição de Samuelson” estabeleceu critérios rigorosos para a alocação ótima de recursos em economias mistas, exigindo que a soma das taxas marginais de substituição individuais seja igual à taxa marginal de transformação (SAMUELSON, 2002). Essa formulação matemática ofereceu aos governos uma base teórica para definir níveis apropriados de tributação e escalas de investimento público. No entanto, Samuelson também reconheceu os desafios de implementação, incluindo os problemas de revelação de preferências e as restrições da economia política nos processos decisórios democráticos.

A persistência de desafios globais como a mudança climática e a preparação para pandemias evidencia a atualidade do arcabouço de Samuelson. Aplicações modernas demonstram que mesmo sociedades tecnologicamente avançadas enfrentam dificuldades na provisão de bens públicos, devido a descompassos entre escalas políticas e os sistemas biofísicos que regulam. A pandemia de COVID-19 exemplificou essa tensão: o desenvolvimento de vacinas evidenciou a inovação do setor privado, enquanto a distribuição global expôs as limitações das soluções de mercado para bens públicos transnacionais. Esses casos concretos validam o trabalho de Samuelson (que viveu até o final de 2009) sobre a necessidade - e também a complexidade - de mecanismos institucionais para coordenar ações coletivas.

Desenvolvimentos teóricos recentes expandiram os fundamentos de Samuelson por meio da economia experimental e do desenho de mecanismos. Estudos laboratoriais de jogos de bens públicos demonstram consistentemente a fragilidade de sistemas de contribuição voluntária, com taxas de cooperação que diminuem acentuadamente à medida que o grupo aumenta, a menos que sejam reforçadas por instituições de sanção. Economistas comportamentais também identificaram vieses cognitivos que agravam a tendência ao comportamento de carona, sugerindo que o desenho ótimo de políticas públicas deve considerar tanto fatores racionais quanto psicológicos na tomada de decisões humanas. Esses avanços criam novas sinergias entre o arcabouço neoclássico de Samuelson e os modelos comportamentais contemporâneos.

A era digital introduz complicações inéditas à teoria tradicional dos bens públicos. Bens informacionais apresentam consumo não-rival, mas podem ser tornados excludentes por meio de medidas tecnológicas de proteção, originando bens híbridos que desafiam as categorizações convencionais. A ênfase de Samuelson nas propriedades fundamentais dos bens, em vez de sua implementação tecnológica, permanece vital para a análise desses desenvolvimentos. Os debates atuais sobre dados como bem público e sobre a governança

de infraestruturas digitais demonstram a utilidade contínua de seu arcabouço analítico na abordagem de fenômenos econômicos emergentes (SAMUELSON, 2002).

Críticas e alternativas ao modelo samuelsoniano continuam a moldar o debate acadêmico. O trabalho de Elinor Ostrom sobre a gestão de recursos comuns desafiou a ideia da inevitabilidade da provisão estatal, ao demonstrar casos de autogestão bem-sucedida em certos contextos (OSTROM; GARDNER, 1993). Contudo, tais casos geralmente envolvem comunidades pequenas e homogêneas, com normas sociais robustas - condições que contrastam com as interações anônimas e em larga escala que caracterizam os desafios modernos relacionados aos bens públicos. O reconhecimento, por parte de Samuelson, da dependência de escala das soluções continua essencial para compreender quando mecanismos de mercado, governança comunitária ou intervenção estatal são mais adequados.

A integração da teoria dos bens públicos com a economia ambiental tem produzido avanços significativos na valoração dos serviços ecossistêmicos. O capital natural, como a biodiversidade e a capacidade de sequestro de carbono, apresenta características clássicas de bens públicos, com não-exclusão e não-rivalidade gerando desafios complexos de valoração. Aplicações modernas do arcabouço de Samuelson auxiliam na quantificação do custo social do carbono e no desenho de acordos climáticos internacionais, embora os persistentes problemas de comportamento de carona nas estruturas de governança global continuem a dificultar sua implementação efetiva (SAMUELSON, 2009). Tais aplicações destacam a adaptabilidade da teoria aos desafios prementes do século XXI, ao mesmo tempo em que revelam lacunas persistentes entre os ideais teóricos e as realidades políticas.

A inovação tecnológica introduz novas possibilidades para mitigar os problemas associados aos bens públicos, por meio de mecanismos que Samuelson não poderia ter antecipado. Sistemas baseados em blockchain e contratos inteligentes oferecem soluções potenciais para os desafios de revelação de preferências e verificação de contribuições, permitindo o rastreamento mais granular do uso e dos benefícios dos bens públicos. No entanto, essas tecnologias também levantam novas questões sobre privacidade, equidade e centralização, que exigem integração cuidadosa com os princípios econômicos já consolidados (SAMUELSON, 2002). O cenário em evolução confirma que, embora as propriedades fundamentais dos bens públicos permaneçam constantes, suas estratégias de gestão devem se adaptar continuamente às transformações tecnológicas e sociais.

1.2 O espaço aéreo como um bem público

A classificação do espaço aéreo como bem público decorre de suas características intrínsecas de não-exclusão e não-rivalidade. Como recurso compartilhado, o espaço aéreo não pode, de forma viável, excluir aeronaves de sua utilização uma vez que esteja alo-

cado, e seu consumo por um usuário não reduz, em condições normais, a disponibilidade para outros (SANSON, 2020). No entanto, esse arcabouço idealizado se complica quando analisado sob a ótica das realidades operacionais da aviação.

A natureza não-rival do espaço aéreo é condicional à baixa densidade de tráfego, a congestão o transforma em um bem público congestionável, em que a rivalidade emerge devido à capacidade finita de rotas e às restrições espaço-temporais (DEKKER, 2021). Essa dualidade cria um paradoxo econômico bem singular: embora o espaço aéreo satisfaça a definição técnica de bem público, sua gestão prática exige intervenções regulatórias para mitigar ineficiências decorrentes da rivalidade.

As atividades da aviação geram externalidades significativas, tanto positivas quanto negativas, que permeiam o sistema econômico. As externalidades positivas, como já abordado, incluem o aumento da conectividade global, que estimula o comércio, o turismo e a mobilidade da força de trabalho (MAYOR; TOL, 2009). Por exemplo, o acordo de Céus Abertos entre a União Europeia e os Estados Unidos demonstrou como o acesso liberalizado ao espaço aéreo pode aumentar o produto econômico em 0,1 a 0,2% nos países participantes, por meio de uma maior integração de mercados (MAYOR; TOL, 2009).

Em contrapartida, externalidades negativas se manifestam na degradação ambiental, poluição sonora e riscos à segurança. O setor da aviação contribui com aproximadamente 2 a 3% das emissões globais de CO₂, sendo que os efeitos radiativos não relacionados ao CO₂ podem triplicar seu impacto climático (JANIC, 1999; GRAMPELLA et al., 2017). Esses custos externos permanecem, em grande parte, não precificados nas transações de mercado, resultando em uma subestimação sistêmica do verdadeiro ônus social da aviação.

A falha de mercado inerente à utilização do espaço aéreo decorre da divergência entre custos privados e sociais. As companhias aéreas otimizam rotas com foco na eficiência de combustível e no cumprimento de cronogramas, sem internalizar a poluição atmosférica ou o incômodo sonoro imposto a terceiros (SCHIPPER; RIETVELD; NIJKAMP, 2001). Esse desalinhamento configura um cenário de tragédia dos comuns, no qual escolhas racionais individuais levam, coletivamente, à degradação de um recurso compartilhado. Modelos econômicos demonstram que a competição não regulada por corredores aéreos ideais resulta em saturação subótima do espaço aéreo, elevando os riscos de colisão e os custos de gerenciamento do tráfego aéreo em 15 a 20% em regiões de alta densidade (SRIDHAR; CHATTERJI, 2021).

Exemplos práticos da discussão sobre os limites do espaço aéreo como bem público incluem o julgado da Suprema Corte Estadunidense no caso *United States v. Causby* (EUA, 1946). Na ação, um fazendeiro (Thomas Lee Causby) pleiteava reparação do Estado por uso excessivo do espaço aéreo próximo a sua propriedade rural, impactando negativamente a produtividade de sua criação de galinhas em razão dos altos níveis de ruído nas movimentações de aeronaves em um aeroporto a menos de um quilômetro de

distância. No caso, o autor comparava a inutilização de sua propriedade para o fim pretendido a uma desapropriação. Causby obteve decisão favorável, em sentença que “sepultou” a doutrina do *ad cælum*, confirmando a noção do espaço aéreo como bem público e a necessidade de reparação civil pelos danos causados¹.

As intervenções políticas buscam reconciliar essas externalidades por meio de mecanismos de mercado e reformas institucionais. A iniciativa “Céu Único Europeu”, da UE, exemplifica uma abordagem regulatória para internalizar externalidades de congestionamento, por meio da harmonização de espaços aéreos nacionais fragmentados em uma rede integrada (DEKKER, 2021). Da mesma forma, os sistemas de comércio de emissões (*emissions trading systems*, ou ETS) impõem tributos pigouvianos sobre a emissão de carbono, embora as implementações atuais capturem apenas 40 a 60% das externalidades climáticas totais da aviação (SCHIPPER; RIETVELD; NIJKAMP, 2001). Soluções emergentes como a setorização dinâmica do espaço aéreo, com apoio de inteligência artificial, otimizam o roteamento em tempo real, reduzindo o consumo de combustível em 8 a 12% por meio da minimização de padrões de espera (DOOLE et al., 2021).

A fragmentação institucional impõe desafios persistentes à governança eficaz do espaço aéreo. As reivindicações de soberania nacional sobre o espaço aéreo criam sobreposições jurisdicionais, enquanto a natureza global das rotas de voo exige coordenação supranacional (ZOLIN; LEWIS, 2014). O estudo comparativo entre Austrália e Estados Unidos de Zolin e Lewis (2014) revela como filosofias regulatórias divergentes - modelos orientados pelo mercado *versus* modelos controlados pelo Estado - produzem diferentes resultados na internalização dos custos externos. Essa diversidade institucional dificulta a implementação de mecanismos uniformes de especificação de externalidades, frequentemente resultando em oportunidades de arbitragem regulatória para as companhias aéreas.

Os conceitos de UAM vislumbram redes de vertiportos para transporte com eVTOLs, mas sua integração ao espaço aéreo existente exige a redefinição dos parâmetros de bem público. Estudos de simulação indicam, por exemplo, que a implantação não regulada da UAM pode aumentar a poluição sonora urbana em 6 a 9 dB(A), afetando de maneira desproporcional bairros próximos aos vertiportos (DOOLE et al., 2021). Por outro lado, a eletrificação da aviação de curta distância representa um caminho para reduzir as emissões locais em 30 a 45%, embora as limitações de densidade energética das baterias restrinjam sua escalabilidade (CABUKOGLU et al., 2018).

É importante destacar que, embora Samuelson, como já abordado, tenha sido fundamental no desenvolvimento da teoria dos bens públicos, tanto (BUCHANAN, 2024), com os bens de clube, quanto (HARDIN, 1968), com os bens de recursos comuns, consideraram que existia um espectro de bens entre os “puramente privados” e os “puramente

¹ De acordo com a referida doutrina, *Cujus est solum ejus usque ad cælum* - àquele a quem pertence o solo pertence até o céu.

públicos". Quando um bem público é excludente, ele se torna um bem de clube.

Para o contexto específico da UAM, um excerto do voto do *Justice* Douglas no caso *US v. Causby* supracitado merece especial atenção:

O avião faz parte do ambiente moderno de vida, e os inconvenientes que ele causa normalmente não são indenizáveis à luz da Quinta Emenda. O espaço aéreo, exceto as faixas imediatas acima do terreno, integra o domínio público. Não é necessário, neste momento, determinar quais são exatamente esses limites. Os voos sobre propriedade privada não constituem desapropriação, a menos que sejam tão baixos e tão frequentes a ponto de representarem uma interferência direta e imediata no uso e gozo do terreno. (EUA, 1946, tradução nossa)

O julgado de 1946 parece ganhar vida com a emergência de novos modos de aviação na UAM, que recupera a discussão sobre o uso do espaço aéreo em baixas altitudes e, a depender da escala de adoção, com frequência comparável aos movimentos cotidianos de veículos automotores.

Consideradas as características da UAM, tratar o espaço aéreo como um bem de clube com direitos de acesso em camadas permitiria aos reguladores implementar mecanismos dinâmicos de precificação que reflitam em tempo real a valoração dos custos externos (CORNES; SANDLER, 1996). Tais abordagens devem ser complementadas por acordos internacionais para evitar comportamentos de “carona” (*free-riding*), garantindo que a redução de emissões e os investimentos em infraestrutura estejam alinhados com a natureza não-excludente dos sistemas atmosféricos.

1.3 Economia dos transportes e economia urbana

A economia dos transportes é um ramo aplicado da ciência econômica dedicado à alocação eficiente de recursos escassos voltados à mobilidade de pessoas e bens no espaço e no tempo (BUTTON, 2010). Sua análise compreende aspectos micro e macroeconômicos, sendo essencial à compreensão das relações entre infraestrutura, demanda, regulação e externalidades nos sistemas de transporte.

Sua origem enquanto campo de estudos remonta ao século XIX, com contribuições teóricas de autores como Von Thünen e Weber, inseridos no contexto da economia regional e com produção voltada para a minimização de custos de transporte na localização de atividades econômicas.

Embora esses autores não tenham tratado diretamente de transportes **como setor econômico**, seus modelos forneceram subsídios teóricos fundamentais (ISARD, 1956). Em *Theory of the Location of Industries*, o economista alemão Alfred Weber² determina um modelo que identifica o custo de transporte como fator de grande relevância na tomada de

² irmão mais novo de Max Weber

decisão de local de implantação de indústrias e outras atividades produtivas (FEARON, 2002).

Von Thünen, por sua vez, na obra de 1826 *Der isolierte Staat* (O Estado Isolado, em tradução livre), desenvolve um modelo monocêntrico em que analisa os diferenciais de rendas fundiárias e os custos de transporte como elementos centrais para a compreensão da organização espacial das atividades econômicas urbanas (CROSIER, 2001).

Nas primeiras décadas do século XX, autores iniciaram uma abordagem normativa, tratando de alocação de custos, regulação e precificação de serviços ferroviários. Contudo, até meados do século XX, o campo permaneceu “marginalizado”, dado o predomínio da teoria econômica geral e da macroeconomia.

A consolidação da economia dos transportes como subárea ocorreu a partir da década de 1950 com os avanços metodológicos proporcionados pela econometria e pela análise custo-benefício. Estudos empíricos sobre regulação, estrutura de mercado e eficiência também contribuíram para a afirmação do campo (BUTTON, 2010).

Oferta e demanda por serviços de transporte passam então a ser analisados, considerando as peculiaridades da infraestrutura (ativos fixos) e dos modais (ativos móveis). Infraestruturas como ferrovias, portos e rodovias apresentam economias de escala e exigem altos investimentos públicos, sendo caracterizadas como bens públicos sujeitos a externalidades.

A demanda por transporte é derivada, condicionada por fatores como crescimento econômico, renda, estrutura espacial da produção e consumo. Por sua vez, a oferta está sujeita a restrições de capacidade, custos fixos elevados e implicações distributivas e ambientais. O transporte também assume papel de insumo essencial à produção, integrando cadeias logísticas e contribuindo para a produtividade agregada. Neste ponto intensificam-se as pesquisas relacionadas às externalidades dos diversos modais - interseção com o tema da presente dissertação.

Aspectos como segurança, acessibilidade, impacto ambiental e integração regional passaram a ser incorporados às análises, especialmente em contextos urbanos. As reformas regulatórias dos anos 1970 e 1980, a liberalização dos mercados e a crescente complexidade logística impuseram novos desafios à economia aplicada ao transporte (BUTTON, 2010).

Em grande medida, a economia dos transportes está inserida no campo de estudos da economia espacial. A economia especial tem por objeto de estudo os tipos específicos de atividades econômicas e suas localizações em relação a outras atividades econômicas. Seus principais teóricos incluem Walter Isard e Paul Krugman.

A economia espacial é um ramo da ciência econômico-regional que busca compreender a localização das atividades econômicas no espaço, suas interações, os custos envolvidos (como transporte) e o impacto dessa organização sobre mercados e uso da

terra (ISARD, 1956). Um recorte da economia espacial voltado para a análise da estrutura interna das cidades corresponde à chamada economia urbana:

O principal objetivo da economia urbana é explicar a estrutura interna das cidades, ou seja, como o solo é distribuído entre as diversas atividades e por que as cidades possuem um ou vários CBDs. O conceito básico da economia urbana é o mercado de terras, que serve para alocar agentes e atividades econômicas no espaço. Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969) podem ser considerados os fundadores deste campo da economia. (THISSE, 2011, pp. 21-22)

Impactos da introdução de modais de transporte automotivo e de massa incluíram suburbanização e achatamento da densidade populacional urbana (THISSE, 2011). A compreensão dos modelos de cidade, quantidade e distribuição dos CBDs (*central business districts*) e alocação dos espaços frente ao desenvolvimento das atividades econômicas no ambiente urbano é de fundamental relevância para os exercícios de futurologia necessários ao sucesso no estabelecimento de um novo modelo de mobilidade.

2 Externalidades em mobilidade aérea urbana

2.1 Mobilidade urbana: passado, presente e futuro

A mobilidade urbana é um elemento essencial da dinâmica econômica, social e ambiental das cidades. Ao longo da história, o desenvolvimento dos modais de transporte transformou não apenas o deslocamento dos indivíduos, mas também a estrutura urbana, os padrões de uso do solo e os impactos ambientais associados ao crescimento urbano. Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a evolução da mobilidade urbana, enfocando a transformação dos modais e das externalidades - tanto negativas quanto positivas - associadas a esses sistemas.

Historicamente, as cidades moldaram-se a partir das possibilidades e limites de transporte de cada época. No século XIX, o surgimento das ferrovias e dos bondes impulsionou o crescimento urbano em direção aos subúrbios. No século XX, o automóvel individual passou a dominar a paisagem urbana, especialmente em cidades dos países desenvolvidos, promovendo dispersão espacial e incentivando o modelo de cidade rodoviária (JONES, 2014).

Jones (2014) propõe uma divisão paradigmática da política de transportes urbanos em três fases. A primeira, centrada no crescimento do tráfego motorizado, enfatizava a construção de infraestrutura rodoviária para responder à crescente demanda por automóveis. Essa abordagem gerou impactos significativos sobre o espaço urbano, promovendo a exclusão de pedestres, ciclistas e transporte coletivo em prol da fluidez do tráfego privado.

No contexto dos países em desenvolvimento, Gakenheimer (1999) salienta que a rápida motorização urbana frequentemente supera a capacidade das infraestruturas, gerando congestionamentos severos e redução da acessibilidade. Em cidades como Bangkok e Bogotá, os tempos médios de deslocamento ultrapassam 90 minutos (GAKENHEIMER, 1999). No caso brasileiro, estudo de Pereira et al. (2021) indica que o tempo médio diário em trânsito em regiões metropolitanas subiu de 1h12m para 1h22m em 2015.

A ênfase no transporte individual motorizado trouxe consigo uma série de externalidades negativas. Entre os principais impactos estão a poluição atmosférica, os acidentes de trânsito, o aumento das emissões de gases de efeito estufa e a fragmentação urbana. Esses efeitos colaterais geraram um custo social elevado, nem sempre internalizado nos modelos econômicos ou políticos de planejamento urbano (JONES, 2014).

Schipper, Emanuel e Oldenziel (2020) observam que os custos externos do transporte urbano são subestimados ou pouco considerados nas decisões políticas. Isso perpetua

investimentos ineficientes e agrava desigualdades sociais, visto que os grupos de menor renda, que dependem do transporte público, são os mais prejudicados pelos congestionamentos e pela baixa qualidade do serviço coletivo (TOMASIELLO; PEREIRA; NADALIN, 2023). Em um segundo prisma, Perez (2024) recupera estudo de Pereira e Schwanen (2013) em que o tempo de deslocamento apresenta-se, no Brasil, como variável determinante salarial - com maiores tempos de deslocamento associados a menores salários, em regiões metropolitanas específicas analisadas (PEREIRA; SCHWANEN, 2013).

Outrossim, Oliveira e Wiltgen (2020) alertam para os impactos sociais da exclusão urbana causada pela má distribuição dos modais. A sobreposição de interesses privados sobre os coletivos, impulsionada por lógicas de mercado, agrava o problema da mobilidade em contextos de desigualdade estrutural.

A mobilidade urbana, no entanto, não gera apenas custos sociais. Também há externalidades positivas, como o estímulo à aglomeração econômica, à produtividade e à inovação. Segundo Venables (2007), os investimentos em infraestrutura de transporte que promovem aglomeração urbana tendem a elevar a produtividade dos trabalhadores e das empresas, gerando ganhos de escala e encadeamentos produtivos. Tais benefícios, quando não internalizados no mercado, configuram externalidades positivas.

Nos países em desenvolvimento, as intervenções que favorecem o transporte coletivo - como corredores exclusivos de ônibus (BRT) e integração tarifária - podem melhorar a equidade e a acessibilidade, criando ganhos indiretos em saúde pública e inclusão social (GAKENHEIMER, 1999).

A crise dos modelos centrados no automóvel levou ao surgimento de um novo paradigma: a mobilidade sustentável. Esta nova abordagem busca integrar eficiência, equidade e sustentabilidade ambiental. Modos ativos (como a bicicleta e a caminhada), tecnologias limpas (como os veículos elétricos) e o uso racional do solo urbano tornaram-se centrais nas agendas de mobilidade.

A perspectiva socio-técnica, apresentada por Jones (2014), amplia a compreensão da mobilidade ao considerar as interações entre tecnologias, normas sociais e estruturas institucionais. Assim, a inovação em mobilidade depende tanto do avanço tecnológico quanto da capacidade de governança e planejamento urbano (JONES, 2014).

No horizonte futuro, a UAM surge como mais um vetor disruptivo. Embora ainda incipiente, seu potencial de reconfigurar fluxos urbanos e gerar novas externalidades - positivas e negativas - requer uma avaliação criteriosa, pautada na experiência histórica dos modais terrestres e nos princípios da sustentabilidade.

A história da mobilidade urbana revela um ciclo constante de inovação e reavaliação dos impactos sociais, econômicos e ambientais das soluções adotadas. A compreensão das externalidades associadas aos diferentes modais é essencial para orientar políticas públicas

mais eficientes, justas e sustentáveis. A análise da Mobilidade Aérea Urbana, no recorte proposto na presente dissertação, deve, portanto, considerar as lições do passado e os desafios do presente.

2.1.1 eVTOLs, regulação e status das certificações

A ausência de dados detalhados sobre o status de certificações e desenvolvimento de aeronaves eVTOL pode ser justificada pela natureza incipiente (e altamente competitiva) do setor de UAM. Entende-se normal que fabricantes tratem seus processos de desenvolvimento tecnológico como informação estratégica, sujeita a sigilo industrial, o que limita a divulgação de detalhes técnicos, cronogramas exatos e interlocuções com autoridades regulatórias.

Além disso, por se tratar de um campo de inovação disruptiva, muitos projetos encontram-se em constante revisão, sendo ajustados à medida que novas exigências regulatórias, desafios técnicos ou oportunidades de mercado surgem.

O arcabouço regulatório que rege a certificação de aeronaves eVTOL ainda está em construção em diversos países. Embora instituições como a FAA (*Federal Aviation Administration*) e a EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) já tenham publicado diretrizes específicas, como a SC-VTOL (EASA, 2023), a ausência de normativas plenamente consolidadas ou harmonizadas globalmente dificulta a padronização do progresso. Isso faz com que diferentes fabricantes se encontrem em estágios distintos de interação com autoridades aeronáuticas, muitas vezes dependendo de projetos-piloto, *sandbox* regulatórios (ANAC, 2025) ou acordos bilaterais, cujo conteúdo nem sempre é disponibilizado publicamente.

A escassez de dados reflete, ainda, dificuldade de acesso a fontes primárias de informação e defasagem entre eventos recentes e sua publicação em meios acadêmicos ou institucionais. Parte relevante das informações sobre os programas de eVTOL é veiculada por meio de comunicados corporativos, conferências setoriais ou reportagens especializadas, com linguagem frequentemente promocional e pouca padronização terminológica.

Essa fragmentação informacional impõe limites à pesquisa científica sistemática sobre o setor, exigindo do pesquisador um esforço adicional de triangulação de fontes e cautela metodológica na interpretação dos dados disponíveis.

Nesse sentido, informações relacionadas ao status de desenvolvimento pelas principais empresas do ramo foram obtidos a partir do periódico Vertiflite, publicação da *Vertical Flight Society* (VFS), em especial da edição de maio/junho de 2025.



Figura 1 – Ilustrações de modelos de aeronaves por fabricante.

Fonte: Revista Vertiflite, edição maio/junho de 2025, disponível em <<https://vtol.org/news/may-june-2025-vertiflite>>

A partir dos dados compilados na reportagem *eVTOL Leaders Continue* da referida edição, foi possível elaborar a Tabela 1, indicando os status de desenvolvimento das principais empresas do ramo de UAM. Outrossim, a título de ilustração, a Figura 1 elenca os principais modelos de aeronave em desenvolvimento.

Tabela 1 – Resumo dos status de desenvolvimento dos eVTOLs por fabricante (junho de 2025)

Empresa	Status de Desenvolvimento
Archer Aviation	Testes de voo do protótipo Midnight, entregas previstas para 2025, parceria com United Airlines e Abu Dhabi Aviation (ADA).
Beta Technologies	Demonstrações com aeronaves eCTOL, incluindo voos IFR e apresentação de operação confiável em diversos ambientes; colaboração com autoridades nos EUA e Noruega.
Eve Air Mobility	Testes em túnel de vento concluídos; primeiro voo previsto para meados de 2025; cooperação com a ANAC e participação em estudos de percepção sonora e visual.
Joby Aviation	Cinco aeronaves em testes; em estágio avançado de certificação pela FAA; entregas previstas para Dubai em 2025; voos com tripulação já realizados.
SkyDrive	Voos não tripulados iniciados com o protótipo SD-05; demonstrações programadas para a Expo 2025 em Osaka; LOI para 50 aeronaves com empresa dos Emirados.
Supernal	Testes em escala real com demonstrador lift+cruise; entregas previstas para 2028; parceria com CHC Helicopter para serviços de MRO.
Vertical Aerospace	Terceiro protótipo VX4 em construção; expansão do centro de testes em Cotswold Airport; certificação baseada em SC-VTOL da EASA e UK CAA.
Volocopter Aerospace	Empresa reorganizada após aquisição; continua campanha de testes com foco em certificação EASA em 2025; demonstrações com voo do VoloCity.
Wisk Aero	Desenvolvimento do modelo autônomo Gen 6; integração de sensores e testes com FAA; foco em operação autônoma e testes em ambientes reais.

Fonte: Revista Vertiflite, edição maio/junho de 2025, disponível em <<https://vtol.org/news/may-june-2025-vertiflite>>

No que diz respeito à regulação da UAM/AAM, o estudo comparativo de Wiedemann et al. (2024) elenca o status regulatório de Singapura, Emirados Árabes, China, Europa e Estados Unidos em áreas como licenciamento de pilotos, normas gerais e de voos e certificação e licenciamento de pilotos, aeronaves, operadores e vertiportos.

No Brasil, passos regulatórios incluem a Análise Preliminar de Segurança Operacional para eVTOLs e Helicópteros (BHEST, 2025) e a tramitação do Projeto de Lei nº 743, de 2025, de autoria do Senador Esperidião Amin, que altera a Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986 (Código Brasileiro de Aeronáutica), a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Diretrizes Gerais da Política Urbana), a Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012 (Política Nacional de Mobilidade Urbana) e a Lei nº 10.636, de 30 de dezembro de 2002 (Destinação dos recursos da CIDE) para prover base legal ao desenvolvimento da

regulamentação e à implementação de medidas de incentivo à introdução das aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical como elemento da cadeia de mobilidade urbana no Brasil (SENADO FEDERAL, 2025).

Para as regras de licenciamento de pilotos, a Agência Nacional de Aviação Civil, através da Nota Técnica nº 3/2023/GCEP/SPL e da Nota Técnica complementar Nº 1/2024/GCEP/SPL, apresenta proposta regulatória segundo a qual para a obtenção da licença de piloto de eVTOL no Brasil os candidatos devem ter mínimo de 18 anos, ensino médio completo e Certificado Médico Aeronáutico de Primeira Classe. O treinamento segue a metodologia CBTA (*Competency Based Training and Assessment*) e inclui formação teórica, prática e operacional sem exigência de mínimo de horas de voo, focando no desenvolvimento de competências. Pilotos já licenciados (comercial avião ou helicóptero) precisam apenas do treinamento específico para obter a licença VTOL, enquanto novos candidatos passam por treinamento básico (teórico e prático), seguido do treinamento específico e exame de proficiência (ANAC, 2023; ANAC, 2024).

A aeronavegabilidade, definida pela ANAC como o estado de segurança de uma aeronave para uso em voo (ANAC, 2025), foi estabelecida pela agência para o modelo EVE-100 da Eve Soluções de Mobilidade Aérea Urbana Ltda. - subsidiária da Embraer para projetos de veículos de mobilidade aérea urbana - por meio da Portaria nº 15.760/SAR, de 31 de outubro de 2024.

2.1.2 U-Space

O U-Space consiste em um *framework* abrangente de sistemas de gestão de tráfego inteligentes, automatizados, interoperáveis e sustentáveis. Seu objetivo principal é possibilitar a integração segura e eficiente de drones e aeronaves de UAM no espaço aéreo de baixa altitude, o qual deve ser compartilhado de forma harmoniosa com a aviação tripulada já existente (BARRADO et al., 2020).



Figura 2 – Ilustração do U-Space

Fonte: (EASA, 2025)

Ilustrado na Figura 2, pode ser considerado uma “evolução” da forma de lidar com espaço aéreo - antes voltado para voos em altitude elevada na aviação comum, agora o controle de tráfego aéreo (ATC) precisa superar desafios do tráfego aéreo de baixa altitude, incluindo aqueles impostos pela paisagem urbana e por novas tecnologias, oferecendo para as entidades (aeronaves, drones, edificações, usuários) serviços em tempo real.

Esse arcabouço é estruturado em volumes distintos de espaço aéreo - designados como X, Y e Z -, cada um com conceitos operacionais específicos, serviços relevantes, metodologias arquitetônicas e padrões de separação destinados a garantir a segurança (BARRADO et al., 2020). Mascio, Serrone e Moretti (2025) detalham ainda que, no âmbito do U-Space, as regras de voo e os serviços podem variar entre operações de passageiros regulares e sob demanda, sendo que o “Serviço de Autorização de Voo” desempenha papel fundamental na verificação de voos livres de conflitos (MASCIO; SERRONE; MORETTI, 2025).

Destaca-se o modelo de governança multisectorial proposto para o U-Space, que envolve municípios, associações de cidadãos, urbanistas, autoridades de saúde, especialistas em saúde ambiental e autoridades regionais, ao lado das tradicionais autoridades de aviação civil e provedores de serviços (SIMIĆ et al., 2024). Essa ampla participação reconhece que impactos sociais como ruído, poluição visual, preocupações com a privacidade, equidade e segurança pública são elementos integrais para a implementação bem-sucedida do U-Space.

A persistência de impactos sociais negativos dos eVTOLs, identificada por Biehle (2022), especialmente no que se refere à acessibilidade e à capacidade de pagamento, reforça a necessidade de que as políticas do U-Space promovamativamente a inclusão e não apenas a integração técnica.

2.2 Aspectos econômicos das aplicações de UAM

A viabilidade econômica das aplicações de UAM permanece como um dos principais desafios para sua concretização em larga escala. Aspectos como custos operacionais, estrutura tarifária, elasticidade da demanda, retorno sobre investimento (ROI) e impactos socioeconômicos precisam ser criteriosamente analisados. Estudos recentes têm buscado modelar esses fatores, fornecendo estimativas realistas sobre a sustentabilidade econômica de diferentes casos de uso de UAM (YAN; WANG; QU, 2024b).

A presente seção dedica-se a abordar quatro aplicações centrais da UAM - táxi aéreo, serviços de emergência, transporte pessoal e transporte de cargas - à luz das evidências empíricas e projeções econômicas disponibilizadas pela literatura científica recente.

A análise econômica das aplicações da UAM revela um cenário heterogêneo, marcado por grande potencial, mas também por desafios significativos. Enquanto serviços como o transporte de cargas e as missões de emergência mostram-se mais viáveis financeiramente no curto prazo, aplicações voltadas ao transporte pessoal e táxi aéreo urbano ainda demandam avanços tecnológicos, mudanças regulatórias e estratégias de mercado inovadoras para atingir sustentabilidade econômica.

A literatura identificada aponta a importância de integrar a UAM aos sistemas existentes de mobilidade urbana, de forma a maximizar sinergias, reduzir custos operacionais e ampliar o acesso. Além disso, é fundamental que políticas públicas considerem os efeitos redistributivos e externalidades dessas tecnologias, promovendo uma transição justa e inclusiva.

A continuidade dos estudos econômicos e a realização de pilotos controlados em contextos urbanos diversos serão essenciais para refinar os modelos de negócio e validar as hipóteses atualmente em discussão. A UAM representa não apenas uma inovação tecnológica, mas uma inflexão nos paradigmas da mobilidade - e seu sucesso dependerá, sobretudo, da capacidade de articular eficiência econômica com justiça social.

2.2.1 Táxi aéreo urbano

O uso de eVTOLs como táxis aéreos é uma das aplicações mais divulgadas da UAM. Grandes empresas como Uber Elevate e Joby Aviation têm investido fortemente nesse modelo, apostando em um serviço sob demanda que reduza drasticamente os tempos de deslocamento urbano. Contudo, a sustentabilidade econômica desse serviço ainda é tema de debate.

Segundo Coppola, Fabiis e Silvestri (2025), a demanda por serviços de táxi aéreo em cidades como Milão é altamente dependente da elasticidade-preço. Simulações demonstram que apenas com tarifas subsidiadas ou fortemente reduzidas o serviço conseguiria atrair uma base de usuários consistente. Em termos operacionais, os principais

custos envolvem infraestrutura (vertiportos), manutenção das aeronaves, energia elétrica e treinamento de pilotos (RAJENDRAN; SRINIVAS; GRIMSHAW, 2021).

Estudos como o de Liu e Gao (2024), ao analisarem a viabilidade econômica de táxis aéreos, indicam que o custo por passageiro-km pode variar entre US\$ 2,50 e US\$ 6,00, o que é significativamente superior ao custo médio de serviços terrestres. Apesar disso, o modelo pode ser economicamente justificável em corredores de alta densidade e em deslocamentos intermodais com integração a aeroportos.

Para alcançar viabilidade financeira, diversas propostas apontam para a necessidade de modelos híbridos de financiamento, incluindo parcerias público-privadas, subsídios à inovação e exploração de receitas acessórias, como publicidade e dados de mobilidade. Nesse contexto, a escalabilidade é um fator-chave: quanto maior a taxa de ocupação e frequência das viagens, menores os custos médios e maior a atratividade do serviço.

2.2.2 Serviços de emergência

A UAM também apresenta grande potencial para aplicações em serviços de emergência, como transporte aeromédico, resgate de vítimas em áreas congestionadas e entrega rápida de equipamentos médicos. Neste caso, a análise econômica assume contornos distintos: o critério de avaliação não é apenas o custo-benefício financeiro direto, mas também o valor social e o impacto sobre a saúde pública.

Estudo de Dulia, Sabuj e Shihab (2021), ao avaliar o uso de aeronaves UAM em operações de emergência no estado de Ohio (EUA), destaca que o ganho de tempo em intervenções médicas críticas - como infartos ou traumas - pode representar diferença entre vida e morte. Quando se incorporam métricas de valor da vida estatística (VSL) e redução de internações hospitalares, os benefícios superam os custos operacionais, mesmo sem escala massiva.

A economicidade dessas aplicações depende fortemente do uso racional de recursos, com otimização de rotas, integração a redes de hospitais e padronização dos processos logísticos. O estudo de Sadrani et al. (2025) revela que, ao comparar o custo médio de uma missão aérea com UAM frente ao uso tradicional de ambulâncias terrestres, há paridade econômica apenas em cenários urbanos altamente congestionados ou com barreiras geográficas significativas.

Apesar disso, os autores sugerem que políticas públicas voltadas à saúde e defesa civil devem considerar essas tecnologias em suas estratégias de modernização, especialmente em áreas periféricas com acesso limitado a hospitais de alta complexidade.

2.2.3 Transporte pessoal e deslocamentos cotidianos

Uma das visões mais futuristas da UAM - semelhante ao cenário imaginado em *Os Jetsons*, como já explorado no capítulo de introdução - é sua utilização como alternativa cotidiana ao transporte terrestre privado. Nesta aplicação, os usuários se deslocariam entre domicílio e trabalho por meio de aeronaves autônomas ou semiautônomas, utilizando vertiportos localizados em áreas residenciais e comerciais.

Embora esse cenário tenha apelo em termos de conveniência e rapidez, os desafios econômicos são particularmente críticos. Conforme Perez et al. (2025), o uso diário de eVTOLs apresenta limitações financeiras severas: o custo total de propriedade (TCO) para um indivíduo excede o valor de carros de luxo, mesmo considerando a amortização ao longo de uma década. Além disso, a necessidade de manutenção especializada, seguros e energia de aviação contribuem para um custo marginal elevado.

A viabilidade econômica do transporte pessoal depende de três fatores: (i) avanço tecnológico que reduza o custo dos eVTOLs em escala industrial; (ii) políticas regulatórias que permitam sua operação em áreas urbanas densas; e (iii) estratégias de compartilhamento, como caronas aéreas, que diluam o custo individual.

A literatura também aponta efeitos redistributivos preocupantes. Yan, Wang e Qu (2024b) argumentam que o acesso a essa forma de mobilidade poderá acentuar desigualdades sociais, caso sua implementação ocorra sem subsídios ou regulação equitativa. Assim, é provável que sua adoção se restrinja inicialmente a nichos de alto poder aquisitivo, com risco de elitização da mobilidade.

2.2.4 Transporte de cargas e logística urbana

Por fim, uma das aplicações mais promissoras da UAM está no transporte de cargas, especialmente em logística de última milha. Nesse segmento, o foco está na entrega rápida de pequenos volumes, como pacotes, alimentos, medicamentos e componentes industriais de alta urgência.

A viabilidade econômica desse modelo já vem sendo testada por empresas como Amazon, UPS e DHL, que utilizam aeronaves não tripuladas (UAVs) para entregas expressas. O uso de UAVs para entregas de encomendas apresenta grande potencial em termos de economia de tempo, menor consumo de energia e redução de custo (ZIEHER et al., 2024).

Além disso, o modelo logístico com UAM apresenta vantagens ambientais, com menor emissão de CO₂ por tonelada-km transportada, desde que a matriz energética seja limpa. O estudo de Dulia, Sabuj e Shihab (2021) aponta ainda que a redução de ruído e a flexibilidade de rotas favorecem a aceitação social dessas operações, especialmente em zonas industriais e comerciais.

Por outro lado, os desafios regulatórios e de infraestrutura permanecem. É necessário desenvolver redes aéreas dedicadas, sistemas de controle de tráfego integrados e plataformas automatizadas de carga e descarga. A análise de Perez et al. (2025) conclui que o modelo é economicamente viável quando incorporado a centros logísticos urbanos e quando opera em regime de alta densidade de pedidos, o que exige uma base consolidada de consumidores e rotinas logísticas otimizadas.

2.3 Externalidades identificadas

A implantação das tecnologias de UAM envolve um conjunto complexo de externalidades econômicas, tanto negativas quanto positivas, que - como já fundamentado em seções anteriores - devem ser devidamente identificadas, avaliadas e consideradas em processos de regulação, planejamento urbano e formulação de políticas públicas.

A presente seção examina essas externalidades, classificando-as em dois grandes grupos: as negativas, que representam custos sociais não internalizados diretamente pelos operadores ou usuários; e as positivas, que correspondem a benefícios públicos advindos da adoção da UAM, mas também não remunerados via mecanismos de mercado. A abordagem aqui adotada é fundamentada na literatura recente, priorizando periódicos com classificação Qualis.

2.3.1 Externalidades negativas

2.3.1.1 Ruídos e vibrações

Uma das externalidades mais discutidas na literatura é a poluição sonora e vibracional gerada pelas aeronaves eVTOLs. Embora geralmente mais silenciosas que helicópteros tradicionais, as aeronaves UAM ainda produzem ruídos relevantes, especialmente em baixa altitude e durante poucos e decolagens (YAN; WANG; QU, 2024a). Estudos recentes estimam que as frequências agudas dos rotores têm maior alcance e penetração em ambientes urbanos, gerando desconforto mesmo com níveis sonoros abaixo dos padrões de tolerância (NASA, 2023).

De acordo com a revisão sistemática conduzida por Clark e Paunovic (2018), o ruído pode afetar a saúde e o bem-estar por meio de diversos mecanismos, dentre os quais se destaca a hipótese do estresse-diátese. Segundo essa perspectiva, a exposição aguda ao ruído ambiental desencadeia aumento da excitação fisiológica por ativação dos sistemas endócrino e nervoso autônomo, elevando os níveis de hormônios como adrenalina, noradrenalina e cortisol. A exposição crônica, por sua vez, pode provocar a ativação persistente dessas respostas, aumentando o risco de desenvolvimento de distúrbios depressivos e de ansiedade.

Os efeitos do ruído são particularmente preocupantes quando se consideram os impactos na saúde mental. Embora a maior parte dos estudos revisados seja de natureza transversal - o que limita a capacidade de estabelecer relações causais -, há evidências que associam a exposição ao ruído com sintomas de depressão, ansiedade e uso de medicamentos psicotrópicos. Embora os resultados sejam muitas vezes inconsistentes e a qualidade metodológica dos estudos varie, existem indícios de que o ruído ambiental, especialmente o do tráfego rodoviário, pode impactar negativamente o bem-estar emocional e a saúde psicológica, principalmente em populações sensíveis, como crianças e indivíduos com maior suscetibilidade ao estresse (CLARK; PAUNOVIC, 2018).

Em zonas residenciais e escolares, os impactos acústicos podem comprometer a qualidade de vida e a capacidade de concentração. O relatório da *International Journal of Environmental Research and Public Health* (MARTENS; BECKER, 2023) aponta para a necessidade de regulações acústicas específicas para ambientes internos, prevendo limites diferenciados para regiões densamente povoadas. A falta de padronização global para certificação acústica é hoje um dos principais entraves regulatórios para o avanço comercial da UAM (NASA, 2023).

2.3.1.2 Ciclo de vida das aeronaves e processos pré e pós-uso

A implantação da UAM requer uma infraestrutura complexa de suporte, que inclui vertiportos, corredores aéreos, estações de recarga e sistemas de controle de tráfego aéreo automatizado (UTM). O processo de construção e posterior manutenção desses elementos acarreta externalidades como emissões de carbono, impactos na ocupação do solo urbano, remoções involuntárias e elevação dos custos fundiários (COPPOLA; FABIIS; SILVESTRI, 2025).

No período pós-uso, a gestão de resíduos técnicos (como baterias de alta potência e materiais compósitos) pode representar uma fonte significativa de custos ambientais e sociais. Ainda não há um ciclo de vida padronizado para eVTOLs, tampouco sistemas de logística reversa plenamente definidos, o que dificulta a previsão de internalização de externalidades negativas em modelos de negócio sustentáveis.

Conforme exposto por Liberacki et al. (2023), identificam-se três destinações possíveis para o fim de vida útil dos eVTOLs: aterro sanitário e incineração, ambas associadas a externalidades ambientais negativas, e a reciclagem. Esta última consiste no reaproveitamento de componentes desmontados ou de materiais previamente processados para a fabricação de novos produtos. A reciclagem promove a recirculação de insumos na cadeia produtiva, reduzindo a extração de matérias-primas virgens e contribuindo para a mitigação da pegada de carbono (LIBERACKI et al., 2023).

Utilizando-se da composição de materiais de eVTOLs descrita por André e Hajek

(2019), dos processos de reciclagem de carros elétricos¹ especificados em Hao et al. (2017) e dos valores referentes ao reuso ou reciclagem de baterias delineados em estudo do Instituto Americano de Petróleo (KELLEHER ENVIRONMENTAL, 2020), Liberacki et al. (2023) propõem forma de cálculo do custo total de reciclagem.

A Figura 3 abaixo descreve o processo de reciclagem de carros elétricos apontado por Hao et al. (2017). Destaca-se que as baterias e pneus passam por processos de reciclagem próprios, que exigem mais do que apenas a Trituração.

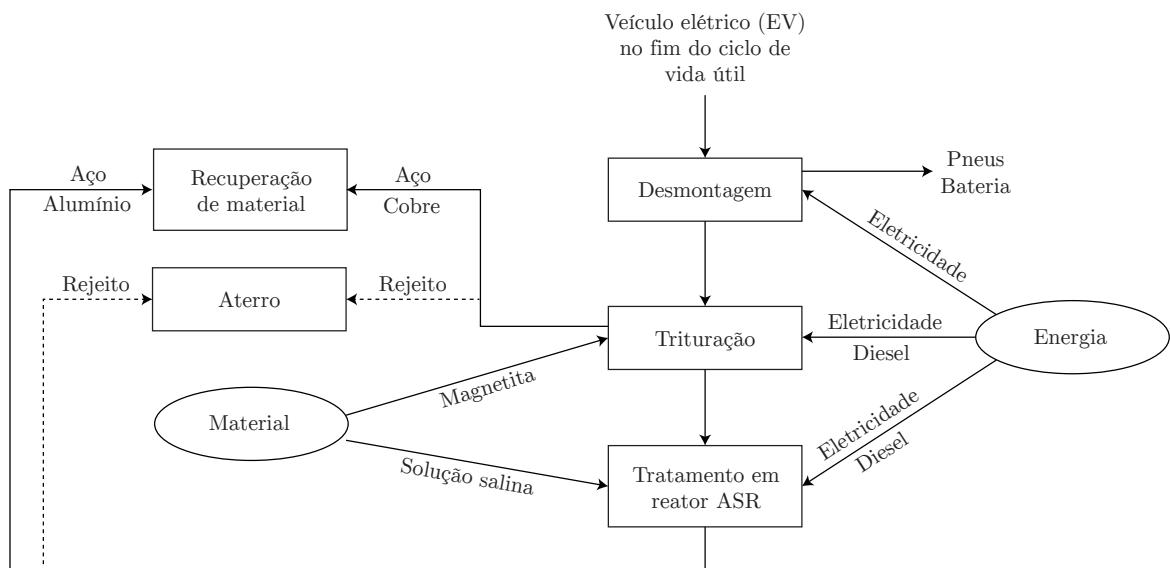


Figura 3 – Procedimento de reciclagem de automóveis elétricos (EVs)

Fonte: Adaptado de Hao et al. (2017), tradução nossa

No caso das baterias, o processo de reciclagem inclui a recuperação de materiais do cátodo, como cobalto e níquel em forma metálica. Outros materiais recuperados incluem lítio, aço, cobre, alumínio e plástico. A taxa de recuperação de metais preciosos das baterias pode chegar a 90%, mas a média gira em torno de 50% (LIBERACKI et al., 2023).

Caso o custo da reciclagem mostre-se impeditivo para este modo de descarte dos eVTOLs, é possível que métodos como incineração ou alocação em aterro sejam adotados, acarretando impacto ambiental negativo de relevante valor econômico.

2.3.1.3 Desconfiguração da paisagem

A paisagem urbana é um bem coletivo sujeito a degradação visual pela instalação de vertiportos, helipontos e pela presença constante de aeronaves em baixa altitude. Es-

¹ Apesar das diferenças substanciais no projeto entre veículos elétricos terrestres e eVTOLs, observa-se similaridade nos materiais empregados e nas estruturas mecânicas, ainda que variações específicas na composição possam estar presentes.

tudo conduzido pela EASA (EASA, 2021) evidencia preocupações da população quanto à poluição visual, sobretudo em áreas históricas e com valor patrimonial.

Os impactos na paisagem têm efeitos diretos sobre o valor imobiliário, turismo e identidade cultural dos espaços urbanos. A falta de mecanismos compensatórios para populações impactadas ou para a conservação de paisagens ícones agrava essa externalidade, criando conflitos entre progresso tecnológico e preservação urbana (DULIA; SABUJ; SHIHAB, 2021).

Thomas e Granberg (2023), em pesquisa *survey* sobre o impacto visual em diversos cenários de UAM, apontam que os dois fatores mais relevantes para a percepção de poluição visual são a distância entre o observador e o eVTOL e o número de eVTOLs visíveis simultaneamente.

Outro achado importante é que a presença de UAVs empregados em missões de emergência médica não diminui objetivamente a percepção de poluição visual, mas os entrevistados tendem a tolerar mais facilmente esse tipo de presença quando compreendem sua finalidade. Isso sugere que o fator “propósito” pode não reduzir a poluição visual percebida, mas aumenta sua aceitação. Da mesma forma, a inclusão de informações adicionais sobre o voo como destino, velocidade ou operador, não resultou em menor percepção de impacto visual, contrariando a hipótese inicial dos autores.

2.3.1.4 Segurança e privacidade

A operação de aeronaves em baixa altitude e próxima a áreas residenciais levanta questões sobre segurança física, riscos de colisão e a possibilidade de quedas em zonas habitadas. Além disso, preocupações com a privacidade têm sido crescentes, dada a presença potencial de sensores, câmeras e sistemas de rastreamento embarcados nas aeronaves (PEREZ et al., 2025).

Conforme o estudo da DLR German Aerospace Center (2022), existe uma percepção pública de invasão do espaço pessoal e doméstico, especialmente quando os voos ocorrem acima de áreas residenciais. Esses aspectos comprometem a aceitação social da UAM e geram demandas por regulação específica quanto a altitudes mínimas, zonas de exclusão e proteção de dados pessoais.

Meritório destacar que a literatura em língua inglesa costuma diferenciar dois conceitos que, em língua portuguesa, são atribuídos ao termo “segurança”: *safety* e *security*. O primeiro diz respeito à segurança operacional, isto é, à capacidade de prevenir acidentes, incidentes e falhas que possam resultar em danos a pessoas, bens ou ao meio ambiente, abrangendo práticas, tecnologias e procedimentos voltados à mitigação de riscos inerentes à operação. Trata-se de um dos principais fatores de preocupação na aceitação social da UAM (AL-HADDAD et al., 2020). *Security*, por sua vez, trata da segurança na acepção de proteção contra ameaças deliberadas, como atos de interferência ilícita, sabotagem, ata-

ques cibernéticos ou invasões físicas, buscando assegurar que o sistema permaneça imune ou resistente a tentativas de violação por terceiros (JORDAN et al., 2022).

Em *Urban Air Mobility: Safety Challenges*, Cokorilo (2020) detalha aspectos de gestão da segurança para aeronaves, utilizando-se de conceitos e dados da aviação comercial comum, dentre os quais destacam-se, para os fins de compreensão dos riscos à segurança abordados na presente dissertação, as diferentes acepções para a definição de “gestão de segurança” segundo o ICAO:

- zero acidentes (ou acidentes graves), conceito amplamente difundido entre os passageiros;
- afastamento do perigo ou risco, ou seja, daqueles fatores que causam ou são propensos a causar danos; atitude adotada pelos profissionais da aviação frente a eventos e condições de risco (uma revisão da cultura organizacional “segura”);
- o grau em que os riscos inerentes à aviação são considerados “aceitáveis”;
- processo de identificação de perigos e gerenciamento de riscos; e
- controle dos danos causados por incidentes ou acidentes (refere-se a pessoas ou bens, bem como a danos a terceiros). (COKORILO, 2020, p. 2, tradução nossa)

As múltiplas acepções para sua gestão apontam para a segurança como um conceito que não afasta a subjetividade: entre outros, ora entendida como “risco zero de acidentes”, ora entendida como “uma cultura de redução de fatores riscos”. A primeira parece refletir certa ingenuidade, vez que qualquer atividade está sujeita a determinado grau de risco. A segunda aproxima-se mais do conceito de “seguro” aplicável a atividades como transporte de passageiros: os riscos existem, mas espera-se que os profissionais na operação adotem cultura de mitigação dos fatores que promovem risco.

Para a aviação comercial, normas de superfície e superfícies virtuais consolidaram-se ao longo de décadas de utilização dos serviços, evitando colisões e condições inseguras de operação (no Brasil tem-se, por exemplo, os diversos RBACs - Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil). Para os eVTOLs, o estágio incipiente do estabelecimento do arcabouço regulatório mantém aberto um leque de opções de topologias, conforme visto em Cummings e Mahmassani (2023), com diferentes graus de prevenção de colisões e conflitos de rotas.

O trabalho de Zhyriakov, Ptak e Sawicki (2025), por sua vez, oferece uma descrição detalhada dos riscos à segurança física de ocupantes de eVTOLs, tomando como referência os dados e pesquisas disponíveis para segurança na aviação civil, em especial na helimobilidade.

Ainda que não adentrem aspectos do custo social atribuído ao risco à segurança, os artigos fornecem, nas suas comparações detalhadas com a aviação comercial, ferramentas fundamentais para que trabalhos posteriores possam relacionar o custo social esperado para a UAM - em decorrência dos riscos à segurança - com o custo social já calculado para o transporte por aeronaves em aviação comum (a exemplo dos estudos de Janic (1999) e Levinson, Gillen e Kanafani (1998)).

2.3.1.5 Qualidade da distribuição de energia elétrica

De acordo com Thipphavong (2022), a viabilidade da UAM está intrinsecamente ligada à disponibilidade de eletricidade - especialmente em cenários de operações de UAM em larga escala. A carga adicional representada por eVTOLs impõe novos desafios à capacidade e de geração, transmissão e distribuição, bem como na qualidade, de energia elétrica nas diferentes interconexões da malha.

Ainda que o estudo tenha por recorte geográfico o caso dos Estados Unidos, em que já se observa grande maturidade na eletrificação da frota terrestre, à medida que a porcentagem de EVs (veículos elétricos) cresce (com projeções de aumento de até 50% em 2050), o consumo de energia para carregamento desses veículos tende a ocupar uma fatia significativa da capacidade disponível da rede elétrica. Esse uso intensivo impacta diretamente a quantidade de energia que poderia ser destinada ao carregamento de eVTOLs, reduzindo o número de operações simultâneas viáveis.

O estudo estima que, mesmo sob uma hipótese otimista de distribuição ideal da eletricidade dentro de cada interconexão, a capacidade para suportar operações simultâneas de UAM cairá aproximadamente 20% entre 2021 e 2050, passando de 595 mil aeronaves carregando simultaneamente para cerca de 475 mil nos EUA.

Outro impacto negativo decorre das limitações estruturais da rede de distribuição elétrica, sobretudo no nível local. Enquanto a geração e a transmissão de energia podem ser compartilhadas regionalmente, a distribuição permanece essencialmente local e é frequentemente inadequada para suportar demandas pontuais e intensas, como aquelas que seriam geradas por vertiportos urbanos de alta movimentação (THIPPHAVONG, 2022).

O artigo enfatiza que o modelo utilizado é baseado em um cenário idealizado e que, na prática, grandes investimentos serão necessários para atualizar tanto a infraestrutura de transmissão quanto a de distribuição. Caso esses investimentos não venham a se concretizar, gargalos locais poderão impedir a expansão de serviços de UAM mesmo em áreas com boa capacidade de geração elétrica.

2.3.2 Externalidades positivas

Apesar das preocupantes externalidades negativas, a UAM também pode gerar impactos positivos de natureza econômica, social e ambiental, os quais merecem destaque.

2.3.2.1 Redução de congestionamentos terrestres

Ao retirar parte dos deslocamentos do solo e transferi-los para o espaço aéreo urbano, a UAM pode aliviar congestionamentos crônicos nas grandes cidades, especialmente nos acessos a aeroportos e em corredores de alta demanda (COPPOLA; FABIIS; SILVESTRI, 2025). Essa redistribuição modal tende a melhorar a fluidez do trânsito, aumentar a produtividade econômica e reduzir os custos indiretos associados a atrasos.

Tal aumento de produtividade estaria, em grande medida, relacionado com a redução do tempo de deslocamento de trabalhadores até seu local de trabalho. Em dissertação de Mestrado deste Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade de Brasília, Perez (2024) demonstra empiricamente que há uma relação negativa entre o tempo de deslocamento e os salários percebidos pelos trabalhadores no Distrito Federal. Ainda que o estudo tenha por objeto análise dos dados específicos do Distrito Federal, seu referencial teórico recupera valiosa doutrina sobre o tema.

Quanto maior o tempo que um indivíduo leva para chegar ao trabalho, menor tende a ser seu rendimento por hora. Essa constatação alinha-se a uma perspectiva econômica que trata o tempo como recurso escasso e, portanto, valioso. Inspirado pela teoria do capital humano (MINCER, 1974), Perez reconhece que o deslocamento representa um custo de oportunidade: o tempo despendido poderia ser utilizado em atividades produtivas, educacionais ou de lazer, todas com impacto direto ou indireto sobre a produtividade e o bem-estar do trabalhador².

Em outro plano, conforme indicado por Perez, a literatura econômica aponta que longos tempos de deslocamento têm impacto negativo sobre a saúde física e mental, influenciando indiretamente a produtividade (STUTZER; FREY, 2008). Sob esse prisma, políticas públicas que reduzem o tempo de deslocamento não apenas aliviam a carga individual, mas produzem ganhos sistêmicos ao ampliar a eficiência do uso do tempo de trabalho e reduzir o absenteísmo ou o esgotamento associado à jornada pendular.

² No caso do Distrito Federal, esse custo é ainda mais expressivo pela estrutura urbanística de Brasília, que concentra empregos formais e de maior remuneração no Plano Piloto, enquanto grande parte da população de baixa renda reside nas regiões periféricas. O trabalhador periférico, segundo os dados da Pesquisa Distrital por Amostras de Domicílio (PDAD-DF) de 2021, não apenas enfrenta jornadas mais longas de deslocamento, como também, de acordo com a regressão minceriana utilizada na dissertação, aufera menores salários mesmo após o controle por escolaridade e experiência. Esse fenômeno reforça a tese de que a distância espacial dos centros econômicos está correlacionada a uma penalização econômica mensurável.

2.3.2.2 Geração de empregos e inovação

A implantação de uma nova cadeia produtiva voltada à UAM estimula setores de alta tecnologia, engenharia, energia e infraestrutura. Estudos apontam para a geração de milhares de empregos diretos e indiretos em atividades de projeto, manutenção, operação e regulamentação, com efeitos multiplicadores significativos sobre a economia local (PEREZ et al., 2025).

Os estudos de Talib et al. (2025) e de Gouveia, Dias e Silva (2022) apontam para o potencial da UAM de desencadear processos de inovação e geração de novos empregos. Conforme Gouveia *et al.*, a criação de redes de vertiportos não se limita ao desenvolvimento de novas tecnologias aeronáuticas, mas envolve a formação de um ecossistema mais amplo, capaz de estimular negócios em setores complementares - como integração de espaço aéreo, tecnologias de automação, sistemas de monitoramento em tempo real e soluções verdes para propulsão. Esse ecossistema, ao demandar competências técnicas e operacionais específicas, fomenta o surgimento de postos de trabalho especializados em manutenção de eVTOLs, operação remota, análise de dados, cibersegurança, planejamento urbano e integração multimodal.

Os achados de Abu Talib *et al.* reforçam essa visão, ao mostrarem que a adoção de tecnologias emergentes - como inteligência artificial, fusão de dados multisensoriais, propulsão elétrica e realidade virtual aplicada ao treinamento - está remodelando o perfil profissional da aviação, substituindo funções tradicionais por ocupações de maior valor agregado e exigindo requalificação contínua. No contexto da UAM, essas tecnologias criam demanda por engenheiros de propulsão elétrica, gestores de sistemas autônomos, instrutores de treinamento em realidade virtual e especialistas em *compliance* regulatório para novas tecnologias.

Essa externalidade positiva se manifesta em duas frentes complementares: no estímulo à inovação, ao abrir espaço para *startups*, centros de pesquisa e parcerias público-privadas desenvolverem soluções de alto conteúdo tecnológico, e na dinamização do mercado de trabalho, ao gerar oportunidades de emprego em áreas emergentes e resilientes à automação de baixo nível.

Tal movimento não apenas contribui para o crescimento econômico, mas também fortalece a capacidade das cidades de atrair investimentos e talentos, criando um círculo virtuoso entre inovação, qualificação profissional e desenvolvimento sustentável.

Fica claro nos estudos, ainda, que a concretização desse potencial exige políticas ativas de qualificação e reconversão profissional, assegurando que a transição tecnológica da UAM não apenas substitua empregos, mas efetivamente amplie as oportunidades e aumente a complexidade tecnológica das ocupações disponíveis.

2.3.2.3 Acesso a áreas remotas e serviços de emergência

A capacidade de operar em locais de difícil acesso torna a UAM uma solução eficaz para a entrega de medicamentos, órgãos para transplante, e resgate em áreas isoladas ou em eventos críticos (DULIA; SABUJ; SHIHAB, 2021). Isso representa um ganho em equidade territorial e acesso a serviços essenciais, especialmente em regiões periurbanas e comunidades vulneráveis.

Para um exemplo prático, tem-se a integração de uma ilha com o continente, utilizando soluções de UAM e seu potencial em gerar um conjunto expressivo de benefícios socioeconômicos, ambientais e tecnológicos. O estudo de caso das Ilhas Canárias ilustra como a implantação de uma rede de transporte aéreo regional, apoiada em vertiportos estrategicamente distribuídos, pode melhorar substancialmente a conectividade, promover inovação e potencializar a inserção de energias renováveis no sistema elétrico insular (VELAZ-ACERA; GARCÍA; BORGE-DIEZ, 2023).

Do ponto de vista socioeconômico, a ligação direta entre ilhas e continente amplia a mobilidade de pessoas e mercadorias, reduzindo tempos de deslocamento e criando novas oportunidades de negócios. Isso inclui desde o fortalecimento do turismo - elemento central em muitas economias insulares - até a facilitação de serviços especializados, como transporte médico, entregas urgentes e suporte a operações industriais. A interligação aérea de alta frequência favorece a diversificação econômica, reduz a dependência de modais marítimos e permite maior integração das cadeias produtivas locais com mercados continentais.

Em termos ambientais, a adoção de eVTOLs com funcionalidade bidirecional de recarga e descarga de energia (*Vehicle-to-Grid*, ou V2G) oferece vantagens adicionais. A integração dessas aeronaves à rede elétrica local atua como sistema de armazenamento distribuído, possibilitando o nivelamento da curva de demanda e maior penetração de fontes renováveis, como a solar e a eólica. No caso das Ilhas Canárias, no estudo de Velaz-Acera, García e Borge-Diez (2023) estimou-se que essa abordagem poderia elevar em até 15% a participação das renováveis e reduzir em aproximadamente 4,6% as emissões globais do sistema elétrico. Essa sinergia entre transporte aéreo e gestão energética contribui para a descarbonização, ao mesmo tempo em que aumenta a resiliência e a estabilidade das redes insulares.

2.3.2.4 Redução das emissões de carbono

Embora a infraestrutura e os processos de produção ainda gerem impacto ambiental, a operação dos eVTOLs é potencialmente mais limpa que os veículos terrestres movidos a combustível fóssil. Em especial, os modelos elétricos têm capacidade de operar com emissão zero durante o uso - para os casos em que a rede elétrica possui geração limpa -, contribuindo para metas de neutralidade climática no setor de transporte.

No estudo de caso de Peña (2025), destaca-se o potencial da UAM na redução de emissões de CO₂, sendo avaliado o uso dos eVTOLs como táxis aéreos como uma solução transformadora de mobilidade urbana para as Filipinas, oferecendo reduções significativas nas emissões. Estima-se que seus sistemas de propulsão elétrica possam oferecer uma redução de 30% nas emissões de CO₂, apoiando as metas de transporte sustentável.

2.3.3 Comparação entre externalidades na UAM e no transporte rodoviário

As externalidades do transporte rodoviário urbano a combustão, bem conhecidas e extensivamente documentadas, compartilham similaridades estruturais com as da UAM, mas também apresentam contrastes importantes. Segundo Bocanegra (2017), o transporte rodoviário tradicional está entre as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa nas cidades brasileiras, além de gerar custos sociais relacionados a acidentes, tempo perdido em congestionamentos e degradação ambiental. Tais impactos negativos frequentemente não são apropriados pelos agentes causadores, o que caracteriza uma falha de mercado típica.

No caso da UAM, embora algumas externalidades negativas se assemelhem (ruído, impacto territorial, segurança), outras são inéditas (ou exacerbadas) pelas particularidades do modal aéreo urbano. Por exemplo, a questão da privacidade ganha nova dimensão na UAM, dada a possibilidade de vigilância aérea constante, o que não ocorre no modal terrestre.

No tocante às externalidades positivas, o transporte rodoviário historicamente contribuiu para o crescimento econômico e expansão urbana, mas seu impacto positivo se diluiu frente à saturação e ineficiência da malha viária. A UAM, por sua vez, oferece novas oportunidades para reduzir externalidades negativas históricas do modal rodoviário, como o congestionamento crônico e as elevadas emissões de CO₂ por quilômetro percorrido (YAN; WANG; QU, 2024b).

A tabela a seguir apresenta um quadro comparativo entre os dois modais:

Tabela 2 – Comparação entre externalidades do transporte rodoviário e da Mobilidade Aérea Urbana (UAM)

Tipo de Externalidade	Transporte Rodoviário	Mobilidade Aérea Urbana (UAM)
Emissão de poluentes	Elevada (combustão fóssil)	Reduzida (uso de eVTOLs elétricos)
Ruído urbano	Médio a elevado, contínuo	Elevado, intermitente e em zonas sensíveis
Congestionamento	Frequente e custoso	Potencial de redução (deslocamento tridimensional)
Ocupação de solo	Extensiva, fragmentadora	Verticalizada, concentrada
Segurança viária	Alto número de acidentes com vítimas	Risco potencial de queda, colisão aérea
Privacidade	Pouco afetada	Ameaçada por sensores e voos sobre áreas residenciais
Integração modal	Consolidada, mas saturada	Em desenvolvimento, dependente de infraestrutura
Valor patrimonial	Potencialmente depreciado por ruído e tráfego excessivo	Impactado pela desconfiguração da paisagem urbana
Benefício social ampliado	Mobilidade ampla, mas desigual	Promessa de acesso mais eficiente a serviços críticos

Fonte: Elaboração própria, com base nos achados de Parry, Walls e Harrington (2007), Bocanegra (2017) e outros estudos que referenciam o presente trabalho

3 Metodologia

Adotou-se para a presente dissertação uma abordagem metodológica descritiva exploratória, cujo objetivo central é mapear e analisar criticamente o estado da arte sobre as externalidades associadas à implantação da UAM, com especial atenção ao uso de eVTOLs. Tal escolha metodológica justifica-se pela natureza ainda incipiente do tema, que demanda uma compreensão preliminar abrangente, baseada na literatura científica disponível, antes da construção de modelos analíticos ou inferências causais mais robustas.

Segundo Gil (2017), a pesquisa exploratória é apropriada para temas pouco investigados e visa proporcionar uma visão geral e aprofundada sobre o fenômeno estudado, sem a pretensão de oferecer conclusões definitivas. Tal abordagem permite identificar categorias, hipóteses ou caminhos para estudos futuros. Complementarmente, a pesquisa descritiva, conforme definido por Vergara (2016), busca observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los, descrevendo suas características e propriedades essenciais. A combinação entre os enfoques exploratório e descritivo é, portanto, adequada quando se pretende construir um corpo teórico inicial e delinear os principais contornos analíticos de um novo campo de investigação, como é o presente caso da UAM.

Complementarmente, foi realizada revisão qualitativa e quantitativa da literatura, realizada por meio de buscas em bases de periódicos relevantes, incluindo o Portal de Periódicos da CAPES e o *Web of Science*. A escolha da plataforma de periódicos da CAPES fundamenta-se em sua abrangência internacional e pela presença de periódicos com elevado fator de impacto e boa avaliação no sistema Qualis, garantindo a confiabilidade e a relevância das fontes. A escolha da *Web of Science*, por sua vez, foi arbitrada em razão da facilidade de exportação dos resultados em formato estruturado e da disponibilidade de recursos de bibliometria. Os critérios de inclusão e exclusão de estudos foram definidos com base na pertinência temática (estudos sobre externalidades, custos sociais e econômicos de transportes, e especificamente sobre UAM ou eVTOLs).

O processo de análise qualitativa envolveu a identificação, categorização e síntese dos principais tipos de externalidades identificados na literatura sobre transporte terrestre, transporte aéreo e, mais especificamente, UAM, tanto positivas (como ganhos de produtividade, redução de congestionamentos e integração modal) quanto negativas (tais como poluição sonora, riscos à segurança aérea, desigualdade no acesso e impactos sobre o uso do solo). Para isso, foi empregada uma abordagem qualitativa baseada em análise de conteúdo temática, conforme proposto por Bardin (2016), que permite identificar padrões, recorrências e lacunas nas publicações analisadas.

Para a seleção de artigos e análise quantitativa e biométrica do material dis-

ponível sobre o tema, utilizou-se parte do método ProKnow-C (*Knowledge Development Process - Constructivist*), descrito em detalhes na seção 3.1 a seguir.

A fundamentação metodológica está ancorada em autores clássicos de metodologia científica. A expectativa é que a dissertação possa contribuir não apenas para o mapeamento sistemático do conhecimento sobre externalidades econômicas da mobilidade aérea urbana, mas também para a formulação de subsídios a políticas públicas baseadas em evidências.

3.1 Método ProKnow-C

Para garantir robustez metodológica na construção do referencial teórico da pesquisa, optou-se pela adoção de parte do método ProKnow-C, conforme proposto por Ensslin (2010) e aplicado, entre outros, por Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) em análise bibliométrica da literatura sobre avaliação de desempenho e estratégia.

O método ProKnow-C apresenta um processo estruturado voltado ao desenvolvimento do conhecimento no pesquisador, partindo de uma lógica construtivista que valoriza o alinhamento entre o objetivo da pesquisa, o contexto empírico e a seleção criteriosa das fontes bibliográficas.

O método completo, ilustrado na Figura 4 é composto por quatro etapas: (i) A seleção do Portfólio Bibliográfico, (ii) Análise Bibliométrica, (iii) Análise Sistêmica e, por fim, (iv) Definição da Pergunta da Pesquisa, Objetivo Geral e Objetivos Específicos (DIENSTMAN et al., 2014, p. 6). A aplicação do método inicia-se com uma etapa de investigação preliminar, na qual se define o campo amostral da pesquisa, normalmente composto por bases de dados científicas de reconhecida relevância. Em seguida, estabelece-se o conjunto de palavras-chave alinhadas ao tema de interesse, que serão utilizadas para a busca de artigos.

Após a extração dos artigos, realiza-se uma triagem que inclui a eliminação de duplicatas, editoriais, resenhas e textos fora do escopo temporal delimitado. Os artigos remanescentes são analisados quanto à aderência temática, por meio da leitura de títulos e resumos, visando garantir a pertinência ao objeto de pesquisa. Paralelamente, avalia-se o reconhecimento científico das publicações por meio do número de citações, com base no Google Scholar, aplicando-se critérios baseados no princípio de Pareto¹ para definir um ponto de corte (LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012).

Os artigos que ultrapassam os filtros de aderência temática e reconhecimento científico compõem o chamado “portfólio bibliográfico”, núcleo fundamental do referencial teórico da pesquisa. Esse portfólio pode ainda ser ampliado mediante uma segunda ro-

¹ O Princípio de Pareto (também conhecido como regra do 80-20) afirma que para diversos fenômenos, cerca de 80% das consequências são produzidas por 20% das causas (DUNFORD et al., 2014, p. 4)

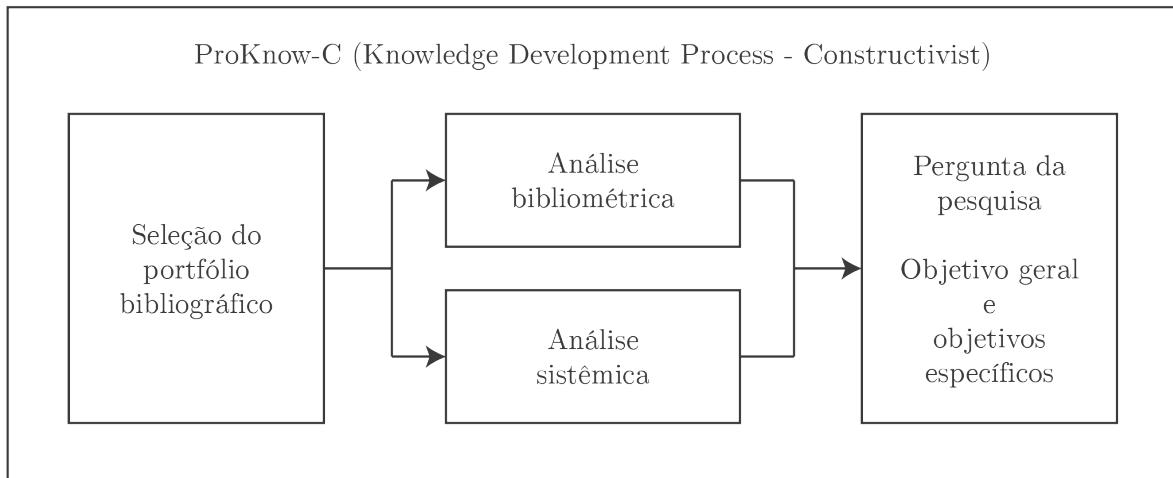


Figura 4 – Etapas do método ProKnow-C

Fonte: Adaptado de Dienstmann et al. (2014) e Ensslin (2010)

dada de análise dos artigos menos citados, desde que preencham critérios adicionais, como publicação recente ou autoria recorrente entre os artigos já selecionados.

Uma vez consolidado o portfólio final, realiza-se uma análise bibliométrica que permite identificar os periódicos, autores e publicações de maior relevância para o campo temático investigado. A análise bibliométrica não apenas organiza a informação de forma quantitativa, como também orienta o pesquisador na identificação de lacunas e oportunidades para futuras investigações.

Para o estudo em tela, julgou-se adequada a proposta do método ProKnow-C para o cumprimento dos objetivos específicos listados nos objetivos específicos. Para tanto, foram adotadas as etapas (i) seleção do portfólio bibliográfico e (ii) análise bibliométrica do referido método.

3.2 Escolha de palavras-chave e bases de dados

Por tratar-se de tema sobre o qual as pesquisas são relativamente recentes, a seleção de artigos no método ProKnow-C precisou passar por uma etapa de consulta preliminar simplificada, anterior à definição dos eixos de pesquisa e palavras-chave proposta no método.

De início, foram coletadas publicações em diversas bases sobre a ampla temática de externalidades em meios de transportes, por meio de consultas nos mecanismos de busca do Google e do Google Scholar.

Especificamente para UAM, foram buscados artigos por meio do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando-se da funcionalidade “Busca Avançada”. Por tratar-se de uma consulta preliminar, não foi estabelecido limite temporal para os artigos buscados

- os resultados, contudo, mostraram-se compatíveis com a hipótese de que o tema é recente, com ocorrências de artigos a partir de 2018. Para ampliar o escopo da identificação de publicações, foram empregados os seguintes critérios de pesquisa: o campo “Qualquer campo” contendo os termos “mobilidade aérea urbana” ou “urban air mobility”. Essa estratégia de busca - em português e inglês - assegurou a cobertura de trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais. O resultado bruto da consulta foi um total de 875 registros bibliográficos².

Os resultados da busca foram exportados do portal por meio da funcionalidade “Exportar”, no formato BiBTeX, amplamente utilizado em sistemas de editoração científica baseados em LaTeX. Os registros extraídos foram organizados e compilados em uma planilha no formato Microsoft Excel (.xlsx), o que permitiu a manipulação e categorização sistemática das informações.

Para enriquecer os dados obtidos e, principalmente, viabilizar a análise de conteúdo dos artigos, foi implementada uma rotina automatizada em linguagem Python (Apêndice A) com o uso da API pública do Crossref. Essa rotina permitiu a coleta dos *abstracts* disponíveis dos artigos identificados na etapa anterior. A aplicação da API foi estruturada para varrer os registros da planilha, utilizando o identificador digital (DOI) como chave para a recuperação dos metadados e resumos correspondentes.

Apesar de todos os DOIs terem sido encontrados, nem todos os *abstracts* estavam disponíveis por meio da API. Por meio da API foram obtidos 387 *abstracts* de um total de 875 esperados. Para os artigos restantes, os *abstracts* foram obtidos manualmente por meio do Portal de Periódicos da CAPES, quando disponíveis.

A leitura dos *abstracts* possibilitou a realização de uma análise qualitativa preliminar, com vistas à classificação temática dos artigos quanto à abordagem dos tópicos centrais de interesse (externalidades da UAM). Os critérios de classificação consideraram a abordagem de externalidades negativas (como ruído, impacto visual, privacidade, emissões e segurança) e externalidades positivas (tais como redução de congestionamentos, inovação logística e geração de empregos). Essa etapa foi realizada pela leitura dos *abstracts* e categorização manual, com base na ocorrência explícita dos temas nos resumos analisados.

Durante a leitura, 45 registros foram descartados sem classificação temática, por tratarem-se de duplicatas, por inconsistência no cadastro no Portal, por não configurarem publicação ou por não apresentarem pertinência suficiente com o tema das externalidades.

A análise teve por início a busca textual (nos *abstracts*) pelos termos, em língua inglesa, “externality” e seu plural “externalities”. Verificou-se que, na massa de referências avaliada, o conceito amplo de externalidade associado à UAM ocorria de forma explícita

² Consulta efetuada em 23 de junho de 2025.

nos *abstracts* em apenas 2 (duas) das referências, confirmado a necessidade de inclusão de palavras-chave relacionadas com as externalidades negativas e positivas específicas encontradas.

A abordagem consistiu na classificação temática dos resumos dos artigos e capítulos de livros sobre UAM identificados no Portal, buscando evidências de discussões sobre externalidades (em geral), bem como as seguintes externalidades específicas: ruído, segurança, privacidade, emissões, redução do congestionamento viário terrestre, desconfiguração da paisagem, criação de empregos e inovação tecnológica.

A seleção de palavras-chave foi arbitrada tendo como referência os temas identificados na consulta ampla preliminar no Portal de Periódicos CAPES e na literatura para os modais de transporte rodoviário, conforme Tabela 2, não excluída a análise de outras externalidades identificadas na leitura de artigos, em especial aquelas relacionadas com a aviação tradicional e sua infraestrutura.

A Tabela 3, por sua vez, apresenta o quantitativo de artigos cujos *abstracts* abordam explicitamente cada uma das externalidades mapeadas. Destaque-se que a abordagem nos artigos, em análise preliminar, apontou para uma predominância de aspectos de engenharia, em detrimento de avaliações sob o prisma da economia.

Tabela 3 – Distribuição dos temas nos *abstracts* das 830 referências analisadas na consulta preliminar ao Portal de Periódicos CAPES

Tema	Quantidade de Artigos
Segurança	262
Ruído	124
Emissões	102
Privacidade	13
Redução do congestionamento terrestre	329
Inovação tecnológica	202
Criação de empregos	47
Desconfiguração da paisagem	12

Fonte: Elaboração própria

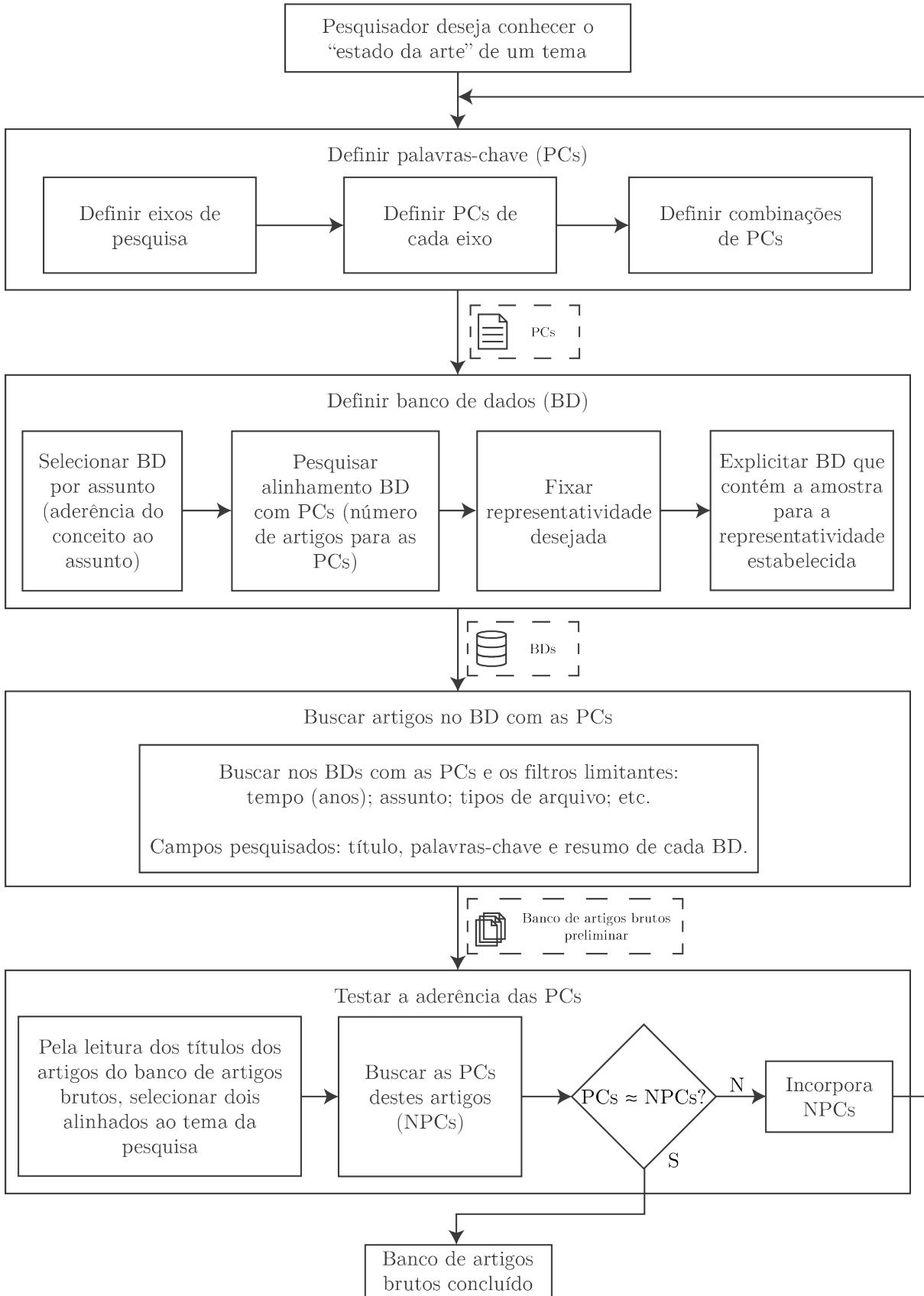


Figura 5 – Primeiro fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C

Fonte: Adaptado de Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) e Ensslin (2010)

Passa-se a tratar da definição das palavras-chave e da base de dados para o processo de busca e seleção de artigos ilustrado na Figura 5.

Para a definição das palavras-chave, foram escolhidos 3 (três) eixos, em distintas abordagens:

- **Eixo 1: Economia e UAM:** eixo mais amplo, em que buscam-se estudos que abordem a UAM em seus aspectos econômicos;
- **Eixo 2: Externalidades (conceito amplo) e UAM:** eixo de maior relevância para os objetivos propostos, vez que buscam-se análises ou métodos para identificação e avaliação de externalidades decorrentes da implantação de UAM;
- **Eixo 3: Externalidades (específicas) e UAM:** neste eixo são de interesse os artigos que tratem de uma ou mais externalidades específicas, positivas ou negativas, decorrentes da implantação de UAM.

Para cada um dos eixos, foram escolhidas palavras-chave pertinentes. Observou-se que diversas consultas, em busca preliminar por palavras-chave adequadas, revelaram que há ocorrência de artigos que, apesar de não apresentarem a palavra-chave “urban air mobility” explicitamente, abordam o conceito de UAM por meio do conceito mais amplo de AAM ou pelo conceito mais específico de “eVTOL”. Por essa razão as palavras-chave dos eixos foram combinadas não apenas com “urban air mobility” mas, alternativamente, com “advanced air mobility” e “evtol”, de modo a ampliar os resultados.

Para o Eixo 1, foram escolhidas para formação de combinações as palavras-chave, em língua inglesa, “economy”, “economic” e “economics”; “policy” e “policies”; e “welfare”. A escolha foi orientada pela necessidade de captar, de forma abrangente, os aspectos econômicos, regulatórios e sociais da implantação desse novo modal. Os termos “economy”, “economic” e “economics” permitem identificar estudos que abordam custos, benefícios, viabilidade econômica e impactos sobre os mercados e cadeias produtivas. Já “policy” e “policies” estão relacionados às normas, diretrizes e decisões governamentais que moldam o ambiente institucional necessário à operação da UAM, incluindo regulamentações sobre infraestrutura, segurança e uso do espaço aéreo. Por fim, a palavra “welfare” visa capturar análises sobre os efeitos da UAM no bem-estar social.

No Eixo 2, a escolha foi mais direta, buscando pelas PCs “externality” e seu plural “externalities”.

O Eixo 3, por sua vez, amplia a busca ao indicar palavras-chave específicas de cada uma das externalidades já abordadas no referencial teórico e na busca preliminar.

As combinações de palavras-chave - formatadas com o uso do operador booleano “AND” (operador lógico “E”, em língua portuguesa) e de caracteres “curinga” (asterisco *, por exemplo) - podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 – Palavras-chave (PCs) e suas combinações para uso na consulta de artigos

Eixo	Palavras-chave	Combinações de palavras-chave
Eixo 1: Economia e UAM	economy/economic/economics	econom* AND "urban air mobility" econom* AND "advanced air mobility" econom* AND evtol
		polic* AND "urban air mobility" polic* AND "advanced air mobility" polic* AND evtol
		welfare AND "urban air mobility" welfare AND "advanced air mobility" welfare AND evtol
	externality/externalities	externalit* AND "urban air mobility" externalit* AND "advanced air mobility" externalit* AND evtol
		safety AND "urban air mobility" safety AND "advanced air mobility" safety AND evtol
		security AND "urban air mobility" security AND "advanced air mobility" security AND evtol
	emission/emissions	emission* AND "urban air mobility" emission* AND "advanced air mobility" emission* AND evtol
		privacy AND "urban air mobility" privacy AND "advanced air mobility" privacy AND evtol
		congestion AND "urban air mobility" congestion AND "advanced air mobility" congestion AND evtol
Eixo 3: Externalidades (específicas) e UAM	innovation	innovation AND "urban air mobility" innovation AND "advanced air mobility" innovation AND evtol
		jobs AND "urban air mobility" jobs AND "advanced air mobility" jobs AND evtol
		landscape AND "urban air mobility" landscape AND "advanced air mobility" landscape AND evtol

Fonte: Elaboração própria

A base de dados escolhida para o estudo bibliométrico foi a *Web of Science*, disponível para acesso por meio da rede CAFé (Comunidade Acadêmica Federada). Tal escolha justifica-se, em especial, pela facilidade de exportação dos resultados de consultas em formatos estruturados (para o presente caso, Microsoft Excel) e pelos recursos de contagem de citações e de fator de impacto de periódicos.

A busca por publicações na *Web of Science*, através de *query*³ gerada pela união das combinações de palavras-chave da Tabela 4 por meio de operadores OU (“OR”) e busca no campo “TS”⁴, resultou em um total de 995 registros⁵.

Os registros foram exportados em formato Microsoft Excel, opção pelo registro completo (incluindo colunas de palavras-chave do autor e quantidade de citações), para uso no procedimento seguinte: teste de aderência das palavras-chave e conclusão do banco de artigos bruto.

3.3 Teste de aderência das palavras-chave e composição de banco de artigos bruto

Na primeira iteração, a leitura das palavras-chaves encontradas no banco de artigos bruto (995 registros) permitiu identificar 19 (doze) novas palavras-chave (NPCs) de possível interesse para o tema (Tabela 5). Realizadas as combinações com as palavras-chave “urban air mobility”, “advanced air mobility” e “evtol”, nos mesmos moldes da busca inicial, uma nova consulta com a *query* aumentada, realizada em 29 de julho de 2025, resultou em 1.824 registros, quantidade que se aproximou do limite inferior sugerido em Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) de 2.000 registros.

³ (TS=econom* AND TS="urban air mobility") OR (TS=econom* AND TS="advanced air mobility") OR (TS=econom* AND TS=evtol) OR (TS=polic* AND TS="urban air mobility") OR (TS=polic* AND TS="advanced air mobility") OR (TS=polic* AND TS=evtol) OR (TS=welfare AND TS="urban air mobility") OR (TS=welfare AND TS="advanced air mobility") OR (TS=welfare AND TS=evtol) OR (TS=externalit* AND TS="urban air mobility") OR (TS=externalit* AND TS="advanced air mobility") OR (TS=externalit* AND TS=evtol) OR (TS=safety AND TS="urban air mobility") OR (TS=safety AND TS=evtol) OR (TS=security AND TS="urban air mobility") OR (TS=security AND TS="advanced air mobility") OR (TS=security AND TS=evtol) OR (TS=emission* AND TS="urban air mobility") OR (TS=emission* AND TS="advanced air mobility") OR (TS=emission* AND TS=evtol) OR (TS=privacy AND TS="urban air mobility") OR (TS=privacy AND TS="advanced air mobility") OR (TS=privacy AND TS=evtol) OR (TS=congestion AND TS="urban air mobility") OR (TS=congestion AND TS="advanced air mobility") OR (TS=congestion AND TS=evtol) OR (TS=innovation AND TS="urban air mobility") OR (TS=innovation AND TS="advanced air mobility") OR (TS=innovation AND TS=evtol) OR (TS=jobs AND TS="urban air mobility") OR (TS=jobs AND TS="advanced air mobility") OR (TS=jobs AND TS=evtol) OR (TS=landscape AND TS="urban air mobility") OR (TS=landscape AND TS="advanced air mobility") OR (TS=landscape AND TS=evtol)

⁴ A consulta pelo campo TS (ou Topic) engloba os campos Título (Title), Resumo (Abstract), Palavras-chave do autor (Author Keywords) e Keywords Plus®, conforme indicado em <<http://webofscience.help-clarivate.ez54.periodicos.capes.gov.br/en-us/Content/search-fields.htm>>

⁵ Consulta efetuada em 28 de julho de 2025.

Tabela 5 – Novas palavras-chave (NPCs) identificadas na primeira iteração.

Novas palavras-chave (NPCs)			
certification	pollution	savings	acceptance
employment	willingness	surveillance	"smart cities"
impact	integration	consumer	cost
efficiency	equity	regulation/regulatory	sustainable/sustainability
demand	benefit/benefits	feasibility	

Fonte: Elaboração própria

Dado que o tema pode ser considerado relativamente recente quando da elaboração da presente dissertação, entendeu-se justificado o valor ligeiramente inferior ao mínimo proposto.

Análise das palavras-chave dos novos resultados não indicaram novas palavras-chave pertinentes, de modo que a condicional ($\text{NPCs} \approx \text{PCs}$) apontada no diagrama da Figura 5 foi satisfeita, dando-se por concluída a formação do banco de artigos bruto, com 1.824 registros, entrega que servirá de insumo para o procedimento seguinte do processo.

Destaca-se que os 1.824 registros do banco de artigos incluem publicações entre os anos de 2018 e 2025.

3.4 Filtragem do banco de artigos bruto

De posse do banco de artigos bruto, foram realizados os procedimentos de filtragem indicados por Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012), ilustrados na Figura 6.

A primeira filtragem consistiu em verificar a existência de artigos duplicados (redundância). Com os dados das publicações exportados para o formato Microsoft Excel, verificou-se a ocorrência de 23 publicações que apresentavam duplicatas, não possuíam *abstract* disponível ou tratavam-se de “*reprints*” (replicações de um mesmo artigo em periódicos distintos). Com a exclusão dos 23 registros indevidos, a nova massa do banco bruto de artigos não repetidos passou a contar com 1.801 publicações.

A segunda parte do procedimento consistiu na leitura dos títulos das publicações no banco bruto de artigos não repetidos para avaliação do alinhamento do conteúdo com o assunto da pesquisa. Nesta filtragem foram excluídos 1.356 artigos, restando o total de 445 publicações não repetidas e com título alinhado ao assunto da pesquisa.

Em grande maioria, os artigos excluídos nessa segunda parte do procedimento, ainda que incluíssem as PCs buscadas, apresentavam títulos que apontavam para abordagens voltadas exclusivamente para aspectos de Engenharia, Física ou Tecnologia da Informação.

Ato contínuo, as 445 publicações resultantes do processo de filtragem pelos critérios

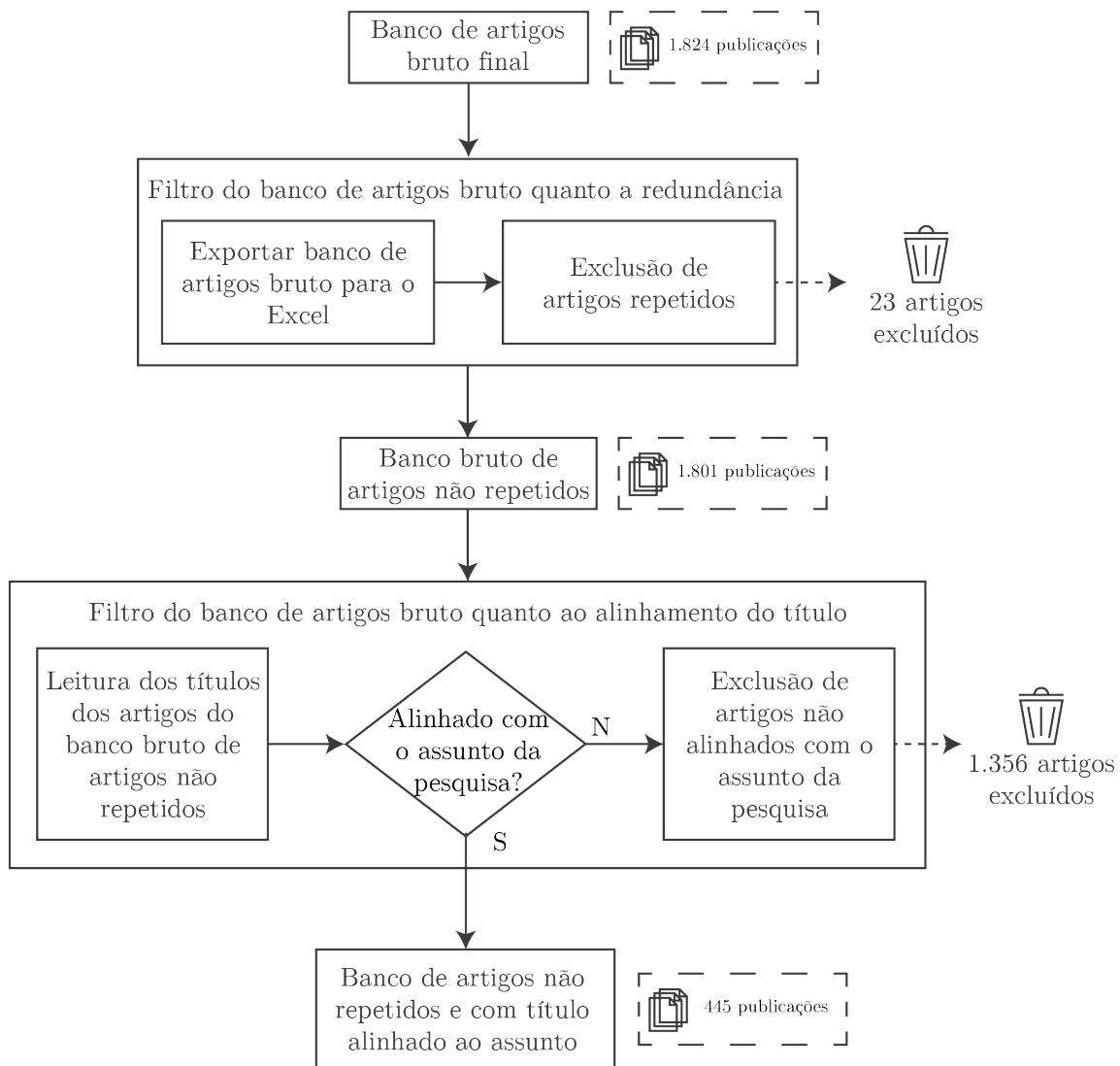


Figura 6 – Segundo fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C

Fonte: Adaptado de Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) e Ensslin (2010)

de redundância e pertinência dos títulos foram submetidas a avaliação de reconhecimento científico. Para tanto, utilizou-se a contagem de ocorrências de citação de cada uma delas, conforme disponibilizado na exportação dos resultados da consulta na *Web of Science*, no campo/coluna “*Times Cited, All Databases*” (em tradução livre, vezes citadas em todas as bases de dados).

Os registros foram ordenados em ordem decrescente de quantidades de citações, nos moldes do procedimento adotado por Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012). As 445 publicações somavam, quando do resultado da consulta, um total de 7.505 citações, sendo que 85 das 445 publicações não ocorriam em qualquer citação.

Assim como proposto por aqueles autores, foi aplicado o Princípio de Pareto (DUNFORD et al., 2014) para estabelecer um subconjunto das 445 publicações cuja soma de citações representasse o percentual arbitrado de 80% do total de 7.505 citações. O valor

mínimo de citações dos artigos nesse subconjunto corresponderia à quantidade mínima de publicações adotada como critério para aprovação dos artigos como cientificamente relevantes para a pesquisa em tela. A Figura 7 ilustra a determinação de tal linha de corte, apontando o valor de 18 citações como o mínimo identificado para aprovação de artigos para o portfólio.

Respeitados os empates no valor mínimo de citações, identificaram-se 111 artigos que atendiam aos requisitos de (i) alinhamento com o assunto da pesquisa e (ii) quantidade mínima de citações.

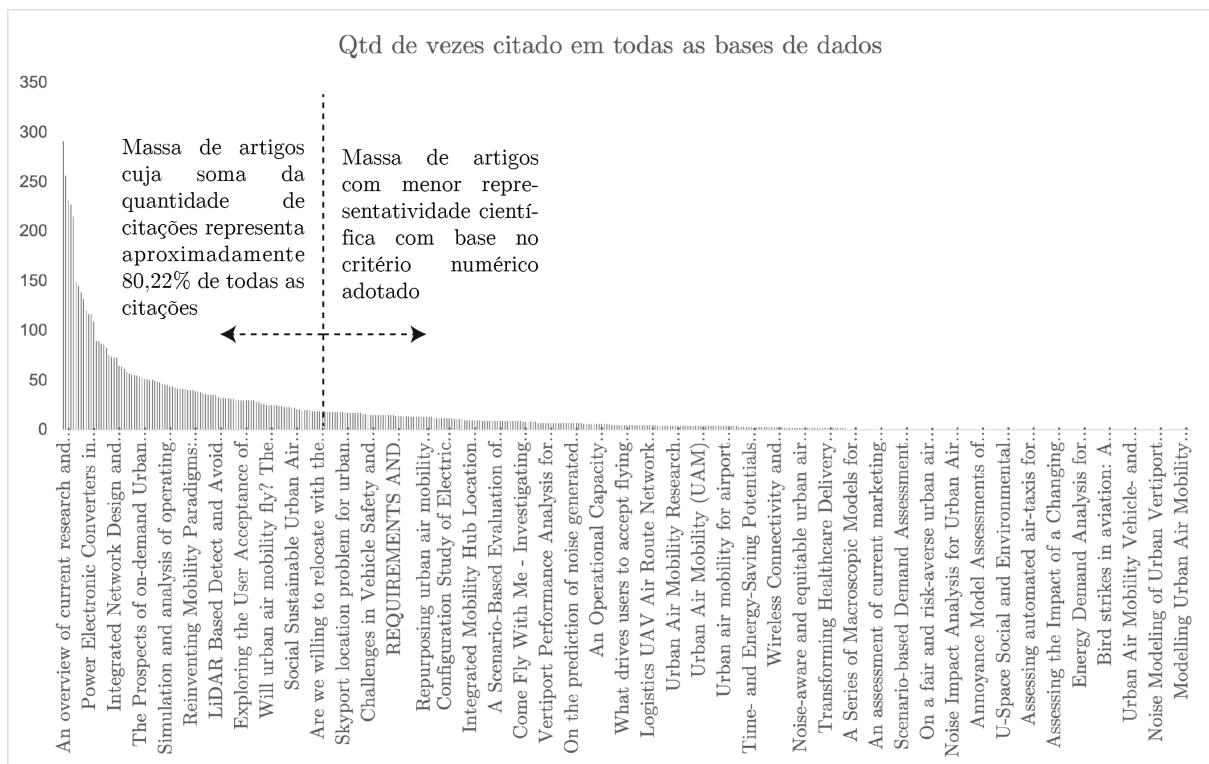


Figura 7 – Evidenciação do valor de corte de citações

Fonte: Elaboração própria, conforme modelo adotado em Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012)

O passo seguinte diz respeito à filtragem quanto à pertinência dos *abstracts* lidos, conforme ilustração na Figura 8. De início, os artigos com o reconhecimento científico confirmado pelo critério de citações foram submetidos à avaliação do alinhamento dos *abstracts* com o assunto da pesquisa. Com base nos artigos que apresentaram alinhamento de título e *abstract* com o assunto esperado, gerou-se um banco de autores (BA), a ser utilizado como critério de “reanálise” para artigos que não satisfizeram de imediato os critérios numéricos de citações, mas que atenderam ao requisito temporal de ano de publicação igual ou superior a 2024 - referente ao critério indicado por Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012)⁶. Tal medida tem por objetivo evitar distorções na seleção, vez que artigos

⁶ “Para que algum artigo com menos citações seja selecionado no portfólio final da pesquisa, o processo definiu duas condições possíveis:

i. Artigos publicados há menos de 2 anos da análise, dado que não tiveram possibilidades de serem

mais recentes estão sujeitos a um menor quantitativo de citações quando comparados com artigos mais antigos.

bem citados ainda;

ii. Quando artigos publicados há mais de 2 anos, esses devem ser de autoria de algum pesquisador já presente no grupo dos 33 artigos alinhados quanto ao resumo e com relevância científica.”(LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012, p. 8)

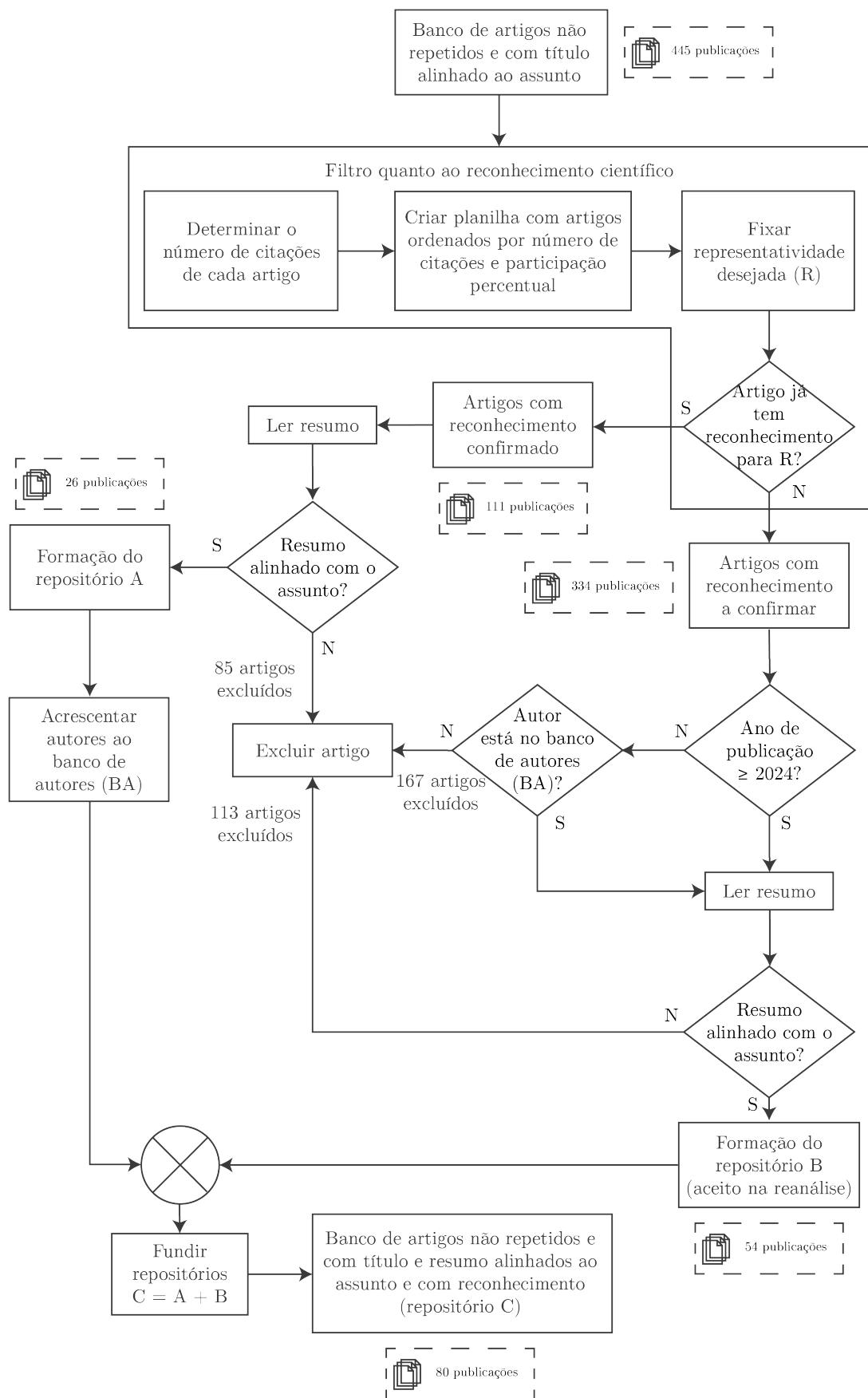


Figura 8 – Terceiro fragmento da etapa de seleção de portfólio com ProKnow-C

Fonte: Adaptado de Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012) e Ensslin (2010)

Por meio do critério numérico adotado com base no princípio de Pareto, foram selecionadas 111 publicações para confirmação da pertinência do assunto com o tema desejado por meio da leitura dos abstracts. Após a leitura, 85 publicações foram excluídas por não estarem seus abstracts alinhados ao tema de pesquisa e 26 foram selecionadas, compondo o Repositório A (vide Figura 8). A partir da listagem das 26 publicações selecionadas foi extraído o banco de autores (BA) com 88 nomes.

Para o conjunto de 334 publicações que não satisfizeram o requisito numérico de quantidade de citações, foi adotada a reanálise proposta em Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012), com base em critérios (i) temporal e (ii) de relevância da autoria para o tema. Assim, 167 publicações anteriores ao ano de 2024 e que não possuíam nenhum dos autores do BA foram excluídas. Para as 167 publicações restantes foram lidos os abstracts, tendo sido excluídas 113 publicações por não apresentarem alinhamento ao tema, restando, portanto, 54 publicações que compõem o Repositório B.

O repositório C, resultante da união entre os Re却positórios A e B, constitui o produto final desta etapa de filtragem, totalizando a lista preliminar de 80 artigos para leitura integral. Listadas as 80 publicações identificou-se que 23 delas não possuem texto integral disponível para consulta, restando o total de 56 publicações para leitura integral e análises qualitativa e bibliométrica, conforme Tabela 6.

Após os filtros descritos no procedimento adotado, o portfólio de artigos apresenta faixa temporal de publicação entre 2020 e 2025. Destaque-se que o filtro de pertinência após a leitura integral dos artigos (LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012) não resultou em exclusões, razão pela qual o fluxograma para esta etapa não foi apresentado.

A leitura integral dos textos permitiu a elaboração dos capítulos teóricos da presente dissertação - notadamente os capítulos 2 e 1 - e análises qualitativa e quantitativa da bibliografia no capítulo 4 que se segue.

Tabela 6 – Artigos que formam o portfólio para compor o referencial sobre externalidades em mobilidade aérea urbana (UAM) - publicação entre 2020 e 2025

AL-HADDAD, C. et al. Factors affecting the adoption and use of urban air mobility. <i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i> , Elsevier BV, v. 132, p. 696-712, fev. 2020. ISSN 0965-8564. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.020 >.
BARRADO, C. et al. U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. <i>Aerospace</i> , MDPI AG, v. 7, n. 3, p. 24, mar. 2020. ISSN 2226-4310. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/aerospace7030024 >.
BENNACEUR, M.; DELMAS, R.; HAMADI, Y. Passenger-centric urban air mobility: Fairness trade-offs and operational efficiency. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , Elsevier BV, v. 136, p. 103519, mar. 2022. ISSN 0968-090X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2021.103519 >.
BIAN, H. et al. Assessment of uam and drone noise impact on the environment based on virtual flights. <i>Aerospace Science and Technology</i> , Elsevier BV, v. 118, p. 106996, nov. 2021. ISSN 1270-9638. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106996 >.
BIEHLE, T. Social sustainable urban air mobility in europe. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 14, n. 15, p. 9312, jul. 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su14159312 >.
BIRINCI, F. et al. Above-building parking area and urban plan arrangement proposal for civil aircraft: the case of t̄"urkiye. <i>Aviation</i> , Vilnius Gediminas Technical University, v. 29, n. 2, p. 118-128, jun. 2025. ISSN 1822-4180. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3846/aviation.2025.23652 >.
CARRERA, C. P. et al. A comprehensive and systematic literature review on flying cars in contemporary research. <i>Journal of Applied and Computational Mechanics</i> , Shahid Chamran University of Ahvaz, IR, n. Online First, set. 2024. Disponível em: < https://doi.org/10.22055/jacm.2024.47083.4658 >.
CETIN, E. et al. Implementing mitigations for improving societal acceptance of urban air mobility. <i>Drones</i> , MDPI AG, v. 6, n. 2, p. 28, jan. 2022. ISSN 2504-446X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/drones6020028 >.
CHAE, M. et al. Potential market based policy considerations for urban air mobility. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 119, p. 102654, ago. 2024. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102654 >.
CHO, S.-H.; KIM, M. Assessment of the environmental impact and policy responses for urban air mobility: A case study of seoul metropolitan area. <i>Journal of Cleaner Production</i> , Elsevier BV, v. 360, p. 132139, ago. 2022. ISSN 0959-6526. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132139 >.
CUMMINGS, C.; MAHMASSANI, H. Comparing urban air mobility network airspaces: Experiments and insights. <i>Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board</i> , SAGE Publications, v. 2678, n. 4, p. 440-454, jul. 2023. ISSN 2169-4052. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1177/03611981231185146 >.
DU, S. et al. Safety risk modelling and assessment of civil unmanned aircraft system operations: A comprehensive review. <i>Drones</i> , MDPI AG, v. 8, n. 8, p. 354, jul. 2024. ISSN 2504-446X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/drones8080354 >.
EHRHARDT, N.; HORLACHER, P. H.; STRAUBINGER, A. Innovation strategies for non-existent markets - profiting from urban air mobility. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 118, p. 102601, jul. 2024. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102601 >.
EIBFELDT, H. Sustainable urban air mobility supported with participatory noise sensing. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 12, n. 8, p. 3320, abr. 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su12083320 >.
GAO, Z. et al. Noise-aware and equitable urban air traffic management: An optimization approach. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , Elsevier BV, v. 165, p. 104740, ago. 2024. ISSN 0968-090X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2024.104740 >.
HARIRAM, N.; MEGALINGAM, A.; SUDHAKAR, K. Flying cars and hyperloops: A glimpse into the future sustainable vehicles. <i>Sustainable Energy Technologies and Assessments</i> , Elsevier BV, v. 75, p. 104196, mar. 2025. ISSN 2213-1388. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2025.104196 >.
HOFFMANN, R.; NISHIMURA, H.; GOMES, P. Exploring safety culture in urban air mobility: System of systems perspectives using enterprise architecture. <i>Systems</i> , MDPI AG, v. 12, n. 5, p. 178, maio 2024. ISSN 2079-8954. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/systems12050178 >.
JANG, H. et al. Urban air mobility for airport access: Mode choice preference associated with socioeconomic status and airport usage behavior. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 124, p. 102719, abr. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102719 >.
KIM, S.; CHOI, Y.; CHANG, D. Techno-economic analysis of fuel cell powered urban air mobility system. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , Elsevier BV, v. 50, p. 988-1004, jan. 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.281 >.

Continuação - Artigos que formam o portfólio para compor o referencial sobre externalidades em mobilidade aérea urbana (UAM) - publicação entre 2020 e 2025

KIM, S.; YEO, J.; KWON, Y. Understanding determinants of willingness to pay for airport shuttle service of urban air mobility. <i>Research in Transportation Business & Management</i> , Elsevier BV, v. 62, p. 101444, out. 2025. ISSN 2210-5395. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101444 >.
LI, T.; XU, X.; SHEN, L. An innovation management approach for electric vertical take-off and landing. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 16, n. 16, p. 7135, ago. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su16167135 >.
LIU, M. et al. Exploring the key technologies needed for the commercialization of electric flying cars: A levelized cost and profitability analysis. <i>Energy</i> , Elsevier BV, v. 303, p. 131991, set. 2024. ISSN 0360-5442. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2024.131991 >.
LIU, Y.; GAO, C. Assessing electric vertical take-off and landing for urban air taxi services: Key parameters and future transportation impact. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 16, n. 11, p. 4732, jun. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su16114732 >.
LONG, Q. et al. Demand analysis in urban air mobility: A literature review. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 112, p. 102436, set. 2023. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102436 >.
MA, Z. et al. Assessing the resilience of multi-modal transportation networks with the integration of urban air mobility. <i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i> , Elsevier BV, v. 195, p. 104465, maio 2025. ISSN 0965-8564. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2025.104465 >.
MASCIO, P. D.; SERRONE, G. D.; MORETTI, L. Vertiports: The infrastructure backbone of advanced air mobility-a review. <i>Eng</i> , MDPI AG, v. 6, n. 5, p. 93, abr. 2025. ISSN 2673-4117. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/eng6050093 >.
MERKERT, R.; BECK, M. J.; BUSHELL, J. Will it fly? adoption of the road pricing framework to manage drone use of airspace. <i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i> , Elsevier BV, v. 150, p. 156-170, ago. 2021. ISSN 0965-8564. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.001 >.
MORADI, N.; WANG, C.; MAFAKHERI, F. Urban air mobility for last-mile transportation: A review. <i>Vehicles</i> , MDPI AG, v. 6, n. 3, p. 1383-1414, ago. 2024. ISSN 2624-8921. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/vehicles6030066 >.
MOURATIDIS, K.; PETERS, S.; WEE, B. van. Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel. <i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i> , Elsevier BV, v. 92, p. 102716, mar. 2021. ISSN 1361-9209. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2021.102716 >.
MUDUMBA, S. V. et al. Modeling co2 emissions from trips using urban air mobility and emerging automobile technologies. <i>Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board</i> , SAGE Publications, v. 2675, n. 9, p. 1224-1237, abr. 2021. ISSN 2169-4052. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1177/03611981211006439 >.
OLARIAGA, O. D. Análisis de la aceptación social de tecnología emergente. el caso de la movilidad aérea urbana. <i>Sociología y tecnociencia</i> , Universidad de Valladolid, v. 15, n. 2, p. 1-24, jun. 2025. ISSN 1989-8487. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.24197/st.2.2025.1-24 >.
OLARIAGA, O. D. Análisis del enfoque social sostenible de la tecnología emergente movilidad aérea urbana. <i>Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales</i> , Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, URBE, v. 27, n. 2, p. 705-723, maio 2025. ISSN 1317-0570. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.36390/telos272.17 >.
PEREZ, D.; ZOU, B.; FARAZI, N. P. Package delivery by electric vertical takeoff and landing aircraft? an attractiveness assessment. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 124, p. 102731, abr. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102731 >.
PONS-PRATS, J.; ŽIVOJINOVIĆ, T.; KULJANIN, J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: Commuting in a flying vehicle as a new paradigm. <i>Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review</i> , Elsevier BV, v. 166, p. 102868, out. 2022. ISSN 1366-5545. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2022.102868 >.
POSTORINO, M. N.; SARNE, G. M. L. Reinventing mobility paradigms: Flying car scenarios and challenges for urban mobility. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 12, n. 9, p. 3581, abr. 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su12093581 >.
PUKHOVA, A. et al. Flying taxis revived: Can urban air mobility reduce road congestion? <i>Journal of Urban Mobility</i> , Elsevier BV, v. 1, p. 100002, dez. 2021. ISSN 2667-0917. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.urbmob.2021.100002 >.

Continuação - Artigos que formam o portfólio para compor o referencial sobre externalidades em mobilidade aérea urbana (UAM) - publicação entre 2020 e 2025

RAGHUNATHA, A.; THOLLANDER, P.; BARTHEL, S. Addressing the emergence of drones - a policy development framework for regional drone transportation systems. <i>Transportation Research Interdisciplinary Perspectives</i> , Elsevier BV, v. 18, p. 100795, mar. 2023. ISSN 2590-1982. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2023.100795 >.
RIZZI, S. A. et al. Annoyance model assessments of urban air mobility vehicle operations. <i>Journal of Aircraft</i> , American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), p. 1-16, jul. 2025. ISSN 1533-3868. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.2514/1.C038188 >.
SADRANI, M. et al. Challenges in urban air mobility implementation: A comparative analysis of barriers in germany and the united states. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 126, p. 102780, jun. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102780 >.
SHI, Y. Aviation safety for urban air mobility: Pilot licensing and fatigue management. <i>Journal of Intelligent amp; Robotic Systems</i> , Springer Science and Business Media LLC, v. 110, n. 1, fev. 2024. ISSN 1573-0409. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1007/s10846-024-02070-x >.
SHYR, M. C.; FARRAHI, A. H.; VERMA, S. Predictive workload model for air traffic controllers during uam operations. In: 2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, 2024. p. 1-6. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1109/DASC62030.2024.10748765 >.
SIMIĆ, T. K. et al. U-space social and environmental performance indicators. <i>Drones</i> , MDPI AG, v. 8, n. 10, p. 580, out. 2024. ISSN 2504-446X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/drones8100580 >.
STRAUBINGER, A. et al. An overview of current research and developments in urban air mobility - setting the scene for uam introduction. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 87, p. 101852, ago. 2020. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101852 >.
STRAUBINGER, A.; VERHOEF, E. T.; GROOT, H. L. de. Going electric: Environmental and welfare impacts of urban ground and air transport. <i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i> , Elsevier BV, v. 102, p. 103146, jan. 2022. ISSN 1361-9209. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2021.103146 >.
STRAUBINGER, A.; VERHOEF, E. T.; GROOT, H. L. de. Will urban air mobility fly? the efficiency and distributional impacts of uam in different urban spatial structures. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , Elsevier BV, v. 127, p. 103124, jun. 2021. ISSN 0968-090X. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2021.103124 >.
SUO, Y. et al. Exploring aam acceptance in tourism: Environmental consciousness's influence on hedonic motivation and intention to use. <i>Sustainability</i> , MDPI AG, v. 16, n. 8, p. 3324, abr. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/su16083324 >.
TORRES, G. M. R. et al. Subjective assessment of initial and mid-term uam operations and the impact on air traffic controllers' workload. In: 2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, 2024. p. 1-5. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1109/DASC62030.2024.10749644 >.
VARNOUSFADERANI, E. S.; SHIHAB, S. A. Bird strikes in aviation: A systematic review for informing future directions. <i>Aerospace Science and Technology</i> , Elsevier BV, v. 163, p. 110303, ago. 2025. ISSN 1270-9638. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2025.110303 >.
WIEDEMANN, M. et al. Advanced air mobility: A comparative review of policies from around the world-lessons for australia. <i>Transportation Research Interdisciplinary Perspectives</i> , Elsevier BV, v. 24, p. 100988, mar. 2024. ISSN 2590-1982. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2023.100988 >.
WILD, G. Urban aviation: The future aerospace transportation system for intercity and intracity mobility. <i>Urban Science</i> , MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 218, nov. 2024. ISSN 2413-8851. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.3390/urbansci8040218 >.
WU, J. et al. What drives users to accept flying cars for urban air mobility? findings from an empirical study. <i>Journal of Air Transport Management</i> , Elsevier BV, v. 119, p. 102645, ago. 2024. ISSN 0969-6997. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102645 >.
YAN, Y.; WANG, K.; QU, X. Urban air mobility (uam) and ground transportation integration: A survey. <i>Frontiers of Engineering Management</i> , Springer Science and Business Media LLC, v. 11, n. 4, p. 734-758, jun. 2024. ISSN 2096-0255. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1007/s42524-024-0298-0 >.
YANG, J. et al. A review on airspace design and risk assessment for urban air mobility. <i>IEEE Access</i> , Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 12, p. 157599-157611, 2024. ISSN 2169-3536. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3481148 >.
YUNUS, F. et al. Efficient prediction of urban air mobility noise in a vertiport environment. <i>Aerospace Science and Technology</i> , Elsevier BV, v. 139, p. 108410, ago. 2023. ISSN 1270-9638. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2023.108410 >.

Continuação - Artigos que formam o portfólio para compor o referencial sobre externalidades em mobilidade aérea urbana (UAM) - publicação entre 2020 e 2025

ZHAO, Y.; FENG, T. Commuter choice of uam-friendly neighborhoods. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier BV, v. 192, p. 104338, fev. 2025. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2024.104338>>.

ZIAKKAS, D.; NATAKUSUMA, H. C. Advanced air mobility(aam)and emergency services: The association of southeast asian nations(asean)case study. *Journal of Air Transport Management*, Elsevier BV, v. 126, p. 102787, jun. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102787>>.

Fonte: Elaboração própria

4 Resultados

4.1 Análise qualitativa

A análise qualitativa dos 56 artigos constantes do portfólio de publicações que abordam UAM - listados na Tabela 6 - consistiu em identificar os assuntos de interesse e comparar, para estes assuntos, as abordagens dos autores de grande relevância para o tema da dissertação. Ainda que os assuntos tenham sido obtidos a partir do portfólio gerado através do método descrito em Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012), para fins da análise qualitativa, outras publicações julgadas relevantes para a compreensão das abordagens foram utilizadas como referência - seja quando foram identificadas em citações nos artigos do referido portfólio ou em buscas isoladas.

4.1.1 Abordagem ampla de externalidades da UAM

No que diz respeito a uma abordagem ampla do assunto das externalidades da UAM, a pesquisadora Anna Straubinger se destaca ao demonstrar preocupação com efeitos econômicos sobre terceiros na adoção de UAM, tanto na forma de externalidades positivas como negativas. Em *An overview of current research and developments in urban air mobility - Setting the scene for UAM introduction*, artigo de sua autoria com publicação no ano de 2020, afirmam os autores:

Como todos os modos de transporte, a UAM gerará externalidades. Além do ruído, da poluição do ar e do impacto visual, ocorrerão congestionamentos e danos a terceiros. Além disso, pode surgir uma demanda induzida, e alterações no uso do solo - especialmente a expansão urbana - podem se tornar um problema caso uma parcela suficientemente grande da demanda por transporte migre para a UAM. Assim, além da regulamentação rigorosa sobre os veículos e as tecnologias associadas, o mercado de UAM, de modo geral, também poderá enfrentar intervenções regulatórias com o objetivo de minimizar essas externalidades. (STRAUBINGER et al., 2020, p. 5, tradução nossa)

A autora aborda, ainda, o problema do bem-estar relacionado à UAM em artigo intitulado *Policies addressing possible urban air mobility market distortions - a first discussion*. O trabalho traz à tona a discussão incipiente sobre falhas de mercado associadas à implantação da UAM e está diretamente relacionado com o tema da presente dissertação. Destaca-se, novamente, a percepção da autora do impacto visual como uma externalidade negativa da implantação de UAM.

Além da demonstrada preocupação com as externalidades, a autora indica opções de políticas e nortes regulatórios que sejam adequados à implantação de UAM, usando

como referência os modelos de regulação para os transportes ferroviário, rodoviário e táxi e chegando a três estratégias regulatórias: determinação, pela autoridade reguladora, de preço, qualidade ou quantidade do serviço (STRAUBINGER, 2019).

Para tanto, aponta que os órgãos de regulação disporiam de medidas como controle de concessões, regulação por teto de preços (*price-cap*), tarifação por horário de pico (*peak-load pricing*), tributação, concorrência pelo mercado e subsídios à infraestrutura (STRAUBINGER, 2019).

Em *Will urban air mobility fly? The efficiency and distributional impacts of UAM in different urban spatial structures*, Straubinger simula a distribuição espacial dos benefícios da implantação da UAM. Para tanto, utiliza-se de modelo USCGE (*urban spatial computable general equilibrium*) em que as preferências, funções de utilidade e demanda são avaliadas para os agentes (i) lares, (ii) firmas e (iii) setor público (STRAUBINGER; VERHOEF; GROOT, 2021).

Dado que a UAM ainda está em desenvolvimento, os autores realizaram uma análise de sensibilidade variando parâmetros-chave do modelo, como preços, custos marginais, velocidade de cruzeiro vertical, tempos de acesso e egresso e demanda por solo para infraestrutura. Entre esses fatores, os custos marginais e os esquemas de precificação tiveram o maior impacto sobre a escolha modal e o bem-estar. Desvios em relação à precificação baseada em custo marginal geraram efeitos negativos substanciais sobre o bem-estar agregado, principalmente porque implicam subsídios implícitos à UAM e distorcem as escolhas dos usuários.

Por outro lado, mudanças na velocidade de viagem ou nos tempos de acesso e egresso apresentaram impactos reduzidos. Como a área de estudo é relativamente pequena e as distâncias percorridas são curtas, a velocidade de cruzeiro mostrou-se pouco relevante. Além disso, a omissão de possíveis congestionamentos nos vertiportos parece ser uma simplificação aceitável no cenário modelado, ainda que reconhecida como limitação importante.

A demanda por solo para infraestrutura terrestre da UAM teve um impacto significativo sobre o bem-estar, embora não tenha afetado substancialmente a escolha modal. Essa descoberta desafia a visão comum na literatura de que a UAM exige pouca infraestrutura. Os autores destacam que, mesmo que a demanda por solo seja relativamente baixa, os impactos negativos¹ gerados por essa ocupação devem ser considerados no planejamento urbano (STRAUBINGER; VERHOEF; GROOT, 2021). Projetos de vertiportos devem equilibrar cuidadosamente a necessidade de maior capacidade com os custos associados ao uso do solo.

¹ Aqui entendeu-se como principal impacto negativo a expansão urbana desordenada, em um cenário de migração substancial da demanda de deslocamento de outros modais para a UAM, tanto na utilização - para fins diversos - de áreas atualmente destinadas a rodovias quanto no aumento da quantidade de edificações para comportar vertiportos.

Apesar da abrangência dos modelos USCGE, os autores reconhecem limitações importantes. Para a presente análise, meritório destacar que não foram considerados aspectos negativos frequentemente associados à UAM, como ruído, poluição visual e aceitação social - fatores mencionados por estudos anteriores. Straubinger propõe, como sugestão de agenda de pesquisa futura, a inclusão das externalidades negativas no modelo, sobretudo os efeitos ambientais e emissões sonoras.

Cummings e Mahmassani (2023) abordam as externalidades de forma superficial, em artigo cujo objetivo principal é a análise comparativa de arquiteturas de rede aérea (são elas rede não-estruturada, rede geo-vetorizada, corredores de rotas livres e corredores de rotas fixas). Ainda que não se proponha a identificar os diferentes tipos de externalidade, a pesquisa adota como critérios para a comparação entre arquiteturas o impacto em externalidades conhecidas: ruído, segurança, privacidade e congestionamento do espaço aéreo.

Os achados resultantes das simulações apontam a relevância do impacto das grandes densidades de voos sobre a experiência do usuário, com o congestionamento resultando no dobro de tempo de voo ou mais para uma mesma viagem (CUMMINGS; MAHMASANI, 2023). A discussão é, portanto, de grande importância para o estabelecimento de um arcabouço regulatório que, no estabelecimento de uma topologia de rede aérea para UAM, considere as especificidades dos diferentes espaços urbanos e as externalidades envolvidas.

Uma possível crítica ao artigo de Cummings diz respeito à ausência do critério de impacto visual, vez que topologias como a de rede não-estruturada - em que não há o estabelecimento de corredores e altitudes para as rotas, permitindo o “voo livre” - podem promover uma desconfiguração da paisagem aérea superior à observada em outras topologias “mais organizadas”; desconfiguração essa que, entre outros, afete a visibilidade e impacte a atenção de condutores de veículos terrestres, preocupação levantada por Dulia, Sabuj e Shihab (2021) e Straubinger et al. (2020).

Sob uma ótica comportamental, Wu et al. (2024) abordam externalidades relacionadas com UAM em pesquisa voltada para a elaboração de um modelo de aceitação da implantação da mobilidade aérea urbana. Em uma avaliação *survey* proposta no estudo, três perguntas diziam respeito à preocupação dos usuários com segurança, ruído e privacidade dos usuários².

Os resultados do estudo apontam que a percepção dos riscos citados impacta negativamente a intenção de potenciais usuários, de modo que é de grande importância a mitigação desses riscos. Investimentos em tecnologias para redução de ruído podem

² Note-se que o sentido de privacidade adotado no estudo de Wu et al. (2024) é o da privacidade de dados dos usuários, e não a acepção de privacidade **de terceiros** enquanto externalidade do uso do transporte aéreo urbano.

solucionar uma das preocupações primárias de potenciais usuários. Enfatizar os recursos de segurança e os protocolos dos carros voadores, por meio de dados e estudos de caso, pode reforçar a confiança dos usuários quanto à segurança da tecnologia. Além disso, políticas de dados claras e transparentes, que protejam a privacidade dos usuários, podem aliviar preocupações relacionadas à segurança da informação, reduzindo ainda mais os riscos percebidos associados à adoção de carros voadores (WU et al., 2024).

Em *Urban air mobility (UAM) and ground transportation integration: A survey*, Yan, Wang e Qu (2024b) oferecem análise abrangente das externalidades e implicações de políticas públicas relacionadas a UAM, tratando tanto de aspectos positivos quanto negativos. No que diz respeito às externalidades positivas, o texto destaca o potencial da UAM para mitigar a crescente congestão nas vias urbanas, reduzir o tempo de deslocamento e melhorar a conectividade regional.

Os autores reconhecem as externalidades negativas já tratadas neste trabalho (em especial ruído, riscos à segurança e privacidade). Tais externalidades, conforme apontado pelos autores, podem comprometer a aceitação pública e a viabilidade econômica dos modelos de negócios propostos para a UAM. Outrossim, o artigo destaca que a adoção precipitada dessas tecnologias pode gerar desigualdades no acesso à mobilidade e sobre-carregar áreas específicas da infraestrutura urbana (YAN; WANG; QU, 2024b).

No que se refere às políticas públicas, Yan, Wang e Qu (2024b) enfatizam a necessidade de um arcabouço regulatório específico para a operação da UAM em áreas urbanas, dada a limitação das normas atuais de aviação. Os autores sugerem que políticas eficazes devem contemplar não apenas a certificação técnica e a segurança dos veículos, mas também a integração harmoniosa entre os modais aéreo e terrestre. Isso inclui a criação de vertiportos estrategicamente localizados, sistemas de controle de tráfego aéreo adaptados ao espaço urbano e medidas que assegurem equidade no acesso ao novo modal. Além disso, destacam-se iniciativas regulatórias em curso, como aquelas apoiadas pela NASA e pela FAA, que já buscam estabelecer parâmetros para o desenvolvimento seguro e sustentável da UAM.

Destaca-se a preocupação com a possibilidade de que a introdução da UAM, ainda que alivie o congestionamento em certas vias, possa agravá-lo em outras. A necessidade de conexão entre os vertiportos e a rede de transporte terrestre pode gerar novos fluxos de tráfego em áreas antes menos impactadas, criando externalidades redistributivas. Os autores enfatizam que a integração modal mal planejada pode transferir o problema de um setor do sistema de mobilidade para outro, gerando novos gargalos (YAN; WANG; QU, 2024b). De fato, o trabalho de Pukhova et al. (2021) evidencia tal efeito, em simulação com modelo da cidade de Munique, melhor descrita na seção 4.1.3, dedicada à abordagem das externalidades positivas no portfólio analisado. Assim, políticas públicas eficazes devem ser baseadas em estudos de impacto territorial e fluxos de demanda, evitando que a solução

aérea se transforme em fonte de novos desequilíbrios urbanos.

Em *Análisis del enfoque social sostenible de la tecnología emergente Movilidad Aérea Urbana*, artigo publicado no ano de 2025, Oscar Olariaga recupera os seguintes critérios para que a UAM opere em um ecossistema de mobilidade caracterizado por acessibilidade, segurança e sustentabilidade ambiental:

- Melhoria evolutiva dos sistemas de mobilidade existentes: (a) a UAM ajudará a impulsionar a sustentabilidade nas redes de mobilidade; (b) a UAM será um meio complementar de mobilidade que se integrará e fortalecerá as redes de mobilidade já existentes; e (c) a UAM trará maior conectividade, tanto intraurbana quanto interurbana, tornando-se também um elo com as regiões.
- Neutralidade de carbono: (a) a UAM terá emissões líquidas zero; além disso, demonstrará zero emissões na fase de consumo e emissões minimizadas ao longo de todo o seu ciclo de vida; (b) a UAM será um contribuinte significativo para o cumprimento das políticas verdes (onde existam e/ou sejam aplicadas); e (c) a UAM contribuirá para a transição sustentável do transporte urbano.
- Proporcionar conectividade de transporte inclusiva, socialmente acessível e acessível a todos.
- Aprimoramento da liderança estratégica com a criação de empregos altamente qualificados: (a) serão necessárias novas habilidades e um amplo espectro de empregos de alto valor, tanto na produção quanto na operação dos sistemas UAM; e (b) o desenvolvimento do mercado da UAM gerará valor.
- Tecnicamente segura e protegida, oferecendo um sistema de transporte progressivo: (a) a UAM será tecnicamente segura e, ao mesmo tempo, respeitará a conservação do ecossistema natural; (b) a UAM garantirá níveis maduros de segurança, também em conformidade com a regulamentação de mercado prevista; e (c) a UAM será aplicável tanto ao transporte de passageiros quanto à cadeia de suprimentos (transporte de cargas), além da prestação de serviços públicos (saúde, emergências, segurança, etc.). (OLARIAGA, 2025b, p. 711, tradução nossa)

O artigo, publicado no periódico venezuelano *TELOS - Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, oferece relevante análise com foco nos aspectos sociais e de sustentabilidade ambiental da implantação da UAM. Olariaga aponta indicadores de sustentabilidade a serem aplicados para a UAM, com base em indicadores adotados pela União Europeia no Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (SUMP).

Em uma segunda publicação, intitulada *Análisis de la aceptación social de tecnología emergente. El caso de la Movilidad Aérea Urbana*, também de 2025, Olariaga traz a

inteligência do Fórum Econômico Mundial que definiu um marco de sete princípios vitais para a adoção e sucesso a longo prazo da UAM nas cidades como novo modal. São eles: segurança, sustentabilidade ambiental, equidade de acesso, baixo nível de ruído, conectividade multimodal, desenvolvimento da força de trabalho local e gestão segura dos dados (WEF, 2020 apud OLARIAGA, 2025a, p. 3).

Tem-se, portanto que as externalidades vêm sendo, ainda que em pequena medida, consideradas nos principais métricos e indicadores em elaboração para avaliação do sucesso de uma futura adoção de UAM. Olariaga aponta, contudo, para deficiências evidenciadas:

Finalmente, na literatura científica atual faltam estudos e pesquisas sobre indicadores de mobilidade da UAM (que servem como uma ferramenta útil para que as cidades e áreas urbanas identifiquem as fortalezas e fragilidades do sistema de mobilidade, neste caso da UAM, e concentrem-se em áreas de melhoria). Em consequência, surge uma lacuna para a avaliação de tecnologias de transporte disruptivas, baseadas em diferentes objetivos que incluem, entre outros, planos de sustentabilidade (AL-HADDAD et al., 2020 apud OLARIAGA, 2025a, p. 714, tradução nossa).

Em seu artigo *U-Space Social and Environmental Performance Indicators* Simić et al. (2024) apontam uma proposta de áreas de foco e indicadores de natureza sócio-ambiental a serem adotados na governança do U-Space. O estudo é realizado no âmbito do Projeto MUSE: *Measuring U-space Social and Environmental Impact* (SIMIĆ et al., 2024).

Os indicadores são elaborados em 8 áreas de foco: ruído, poluição visual, privacidade, acesso e equidade, emissões, aspectos econômicos, segurança e fauna silvestre, e encontram-se descritos no Anexo A.

A implementação dos indicadores tem aplicabilidade em uma possível quantificação do valor econômico das externalidades. Tome-se como exemplo o indicador “NO-6: Aumento da exposição da população a ruído em determinada área em função dos eventos”, descrito como a “diferença entre o ruído gerado pelos drones em sobrevoo e o nível de ruído de fundo local, multiplicada pelo número de pessoas expostas durante um período de tempo fixo dentro de uma área.” (SIMIĆ et al., 2024, p. 9, tradução nossa).

Com o cálculo do valor do indicador NO-6 para determinada área, conforme formulação indicada em (SIMIĆ et al., 2024, p. 4), seria possível quantificar a exposição dos habitantes daquela área. Com uma quantificação do custo econômico para a exposição ao ruído da UAM, em método análogo, por exemplo, ao adotado por Swärdh e Genell (2020) para o custo marginal do ruído de rodovias, o valor do custo social referente ao ruído poderia direcionar políticas de taxação específicas para diferentes regiões.

4.1.2 Externalidades negativas

A introdução da UAM não ocorre sem potenciais desvantagens, gerando diversas externalidades negativas que, como já pontuado exaustivamente no conteúdo teórico e evidente na literatura analisada, exigem consideração cuidadosa e, em muitos casos, políticas públicas específicas para sua internalização.

As preocupações do público geralmente giram em torno de impactos ambientais e sociais (CETIN et al., 2022). Um dos transtornos mais frequentemente citados da UAM é a poluição sonora, dado consistente com os resultados de consulta apresentados na Tabela 3, representando um custo social significativo.

Long et al. (2023) sugerem em *Demand analysis in urban air mobility: A literature review* que, mesmo com corredores de transporte dedicados, o ruído permanece como uma externalidade relevante que precisa ser minimizada (LONG et al., 2023). Essa preocupação é reforçada por Gao et al. (2024), que destacam que a aceitação comunitária da UAM depende fundamentalmente de estratégias eficazes de mitigação do impacto sonoro, implicando a necessidade de internalizar esse custo social para garantir o desenvolvimento sustentável do sistema (GAO et al., 2024).

Em *Assessment of UAM and drone noise impact on the environment based on virtual flights*, Bian et al. (2021) afirmam claramente que o impacto do ruído ambiental dos veículos de mobilidade aérea urbana e dos drones não deve ser ignorado e deve ser considerado no processo de certificação. Sua posição é a de que simulações numéricas podem avaliar de forma eficiente o impacto sonoro em ambientes urbanos complexos, e para isso empregam um método de rastreamento de feixe Gaussiano (*Gaussian beam tracing*) a fim de investigar o impacto ambiental do ruído da UAM (BIAN et al., 2021).

Rizzi et al. (2025) oferecem uma compreensão mais detalhada do ruído da UAM, demonstrando como ele varia nas paisagens sonoras urbanas. Sua pesquisa mostra que estruturas de edifícios podem amplificar em cerca de 5 dB os níveis de ruído no solo em zonas iluminadas devido a reflexões, ao mesmo tempo em que criam “zonas de sombra” onde o som é atenuado. Outrossim, condições de vento alteram substancialmente a pegada acústica das operações da UAM, influenciando tanto os padrões quanto a intensidade do ruído (RIZZI et al., 2025).

Eißfeldt (2020) identifica o ruído como uma “limitação proeminente” à introdução sustentável da UAM. O autor acrescenta que o ruído aeronáutico é considerado “o mais incômodo” entre os ruídos ambientais, e testes psicoacústicos mostraram que sons de *drones* foram avaliados como mais incômodos do que os de veículos rodoviários no mesmo nível de pressão sonora, podendo a sensação de incômodo ser até 6,4 vezes maior do que sem o ruído de *drones* em períodos de baixo tráfego (EIßFELDT, 2020).

Yunus et al. (2023) demonstram como ambientes urbanos intensificam o ruído,

mostrando que blocos de edifícios podem aumentar os níveis de ruído no solo em 5 dB na zona iluminada³ devido a múltiplas reflexões (YUNUS et al., 2023). Zhao e Feng (2025) observam que experiências negativas com helicópteros, incluindo o ruído, contribuem para uma baixa tendência de optar por bairros “amigáveis à UAM” (ZHAO; FENG, 2025).

Enfrentar o problema do ruído não é, portanto, apenas uma questão de regulamentar níveis de decibéis. Exige planejamento espacial e ambiental sofisticado, possivelmente envolvendo taxas pigouvianas sobre rotas mais ruidosas ou precificação diferenciada por horário para internalizar o custo social do ruído.

Nesse sentido, em leitura complementar ao portfólio, estudos como o de Wolfe et al. (2016) apontam para duas formas de quantificar - em valor monetário - o ruído referente à aviação. Destaque-se que a utilização de dados da aviação para previsões relacionadas à UAM é encorajada em estágio que antecipa as investidas para sua implementação (LIBERACKI et al., 2023).

A primeira forma seria a avaliação da redução de valor imobiliário em áreas afetadas por volume de movimentos de aeronaves, correlacionando dados de exposição a ruído para chegar a um valor percentual de redução no valor de propriedades afetadas para o aumento incremental de 1dB em intensidade - ponderada a frequência do ruído. O valor estaria relacionado com a disposição a pagar (*willingness to pay*, ou *WTP*) pela eliminação do ruído.

A segunda seria por meio de pesquisas de preferência da população do tipo *survey* quanto à percepção de efeitos do ruído. Tais métodos, contudo, são criticados por Wolfe et al. (2016), que indica que seu uso exclusivo considera apenas os efeitos subjetivos de percepção do ruído, ignorando efeitos em saúde pública a longo prazo. Nesse caso, são importantes estudos dos impactos de longo prazo, a exemplo do de Swinburn, Hammer e Neitzel (2015) em que estima-se um benefício de 3,9 bilhões de dólares para uma redução de 5dB na exposição a poluição sonora nos Estados Unidos.

Ainda segundo Wolfe et al. (2016), estudo de Praag e Baarsma (2004) aponta, por sua vez, evidências de que uma quantificação mais apropriada incluiria um custo residual referente a impactos não contabilizados pelos efeitos no mercado imobiliário.

Além dos impactos sonoros, a UAM também pode gerar poluição visual. Straubinger et al. (2020) identificam explicitamente o impacto visual como uma externalidade negativa da UAM, juntamente com a poluição do ar (STRAUBINGER et al., 2020). A presença constante de veículos aéreos no espaço urbano pode reduzir o valor estético das paisagens urbanas, impondo um custo social não mercantil sobre residentes e visitantes.

³ Ainda que o artigo *Efficient prediction of urban air mobility noise in a vertiport environment* trate de predição de ruído, Yunus et al. (2023) utilizam as expressões “zona iluminada” referindo-se a regiões voltadas para o tráfego de eVTOLs, e “zona de sombra” como aquelas em que não é possível enxergar diretamente o tráfego, por estarem atrás de barreiras como edificações e de relevo.

Essa intrusão visual pode exigir regulamentações sobre trajetórias de voo, design das aeronaves ou até limites de densidade operacional em áreas sensíveis, representando um ônus regulatório adicional.

Tal ponto de vista é recuperado no artigo *Implementing Mitigations for Improving Societal Acceptance of Urban Air Mobility*, em que Cetin et al. (2022) classificam aspectos visuais como uma preocupação ambiental, indicando que a poluição visual é uma externalidade negativa reconhecida que exige estratégias de mitigação (CETIN et al., 2022).

Yan, Wang e Qu (2024b), em levantamento sobre integração da UAM, também reconhecem a poluição visual como uma preocupação significativa levantada por consumidores em relação às possíveis aplicações da UAM (YAN; WANG; QU, 2024b).

A preocupação com a desconfiguração da paisagem é trazida, ainda, por Simić et al. (2024), em seu trabalho sobre indicadores de desempenho social e ambiental do U-Space, onde incluem métricas de poluição visual como pessoas expostas por trajetória e exposição visual por área, enfatizando a necessidade de quantificar e avaliar esse impacto para fins regulatórios e de planejamento (SIMIĆ et al., 2024).

As preocupações com segurança, por sua vez, são fundamentais em qualquer novo modo de transporte, sobretudo em ambientes urbanos complexos, e representam um custo social potencial elevado.

Yan, Wang e Qu (2024b) ressaltam que segurança, privacidade e estabilidade no emprego figuram entre as maiores apreensões do público em relação à UAM, fazendo um paralelo com os fracassos econômicos e de segurança de companhias de helicópteros nas primeiras décadas, quando acidentes fatais e problemas operacionais levaram ao encerramento de empresas (YAN; WANG; QU, 2024b). Esse precedente histórico serve como alerta, reforçando a importância de marcos regulatórios sólidos e de gestão de riscos proativa para evitar falhas de mercado semelhantes.

Bennaceur, Delmas e Hamadi (2022) enfatizam que equilibrar eficiência e segurança é essencial para o sucesso da UAM (BENNACEUR; DELMAS; HAMADI, 2022). Cetin et al. (2022) listam a segurança como uma preocupação pública primária, observando, contudo, que tal preocupação tem maior intensidade entre especialistas da área do que leigos (CETIN et al., 2022). O escopo dos desafios de segurança na UAM é amplo, englobando riscos tanto aéreos quanto terrestres. Shi (2024) destaca que, mesmo com o avanço da automação, a responsabilidade final pela segurança da aviação permanece com o piloto em comando.

O autor ressalta ainda que a evolução dos marcos regulatórios, com foco em padrões técnicos, é crucial para acomodar o aumento da frequência operacional (SHI, 2024). O mesmo estudo levanta preocupações quanto a “emprego atípico e/ou outras formas de

práticas trabalhistas de redução de custos” para pilotos de UAM, que poderiam comprometer tanto os direitos humanos quanto a segurança operacional.

Do ponto de vista técnico, Yan, Wang e Qu (2024b) sugerem que o uso de tecnologias inteligentes tem potencial para enfrentar os desafios de escalabilidade e segurança na aviação, especialmente no caso dos eVTOLs eletrificados com propulsão distribuída, que oferecem maior confiabilidade (YAN; WANG; QU, 2024b). Ainda que óbvio, Liu e Gao (2024) destacam o desafio técnico mais significativo para toda a discussão de UAM: ao contrário do caso dos helicópteros, aeronaves eVTOL não conseguem realizar autorotação⁴ em caso de perda de energia, revelando um aspecto ainda não validado da tecnologia (LIU; GAO, 2024).

Mais especificamente, a modelagem e a avaliação de riscos de segurança são áreas ativas de pesquisa. Du et al. (2024), em *Safety Risk Modelling and Assessment of Civil Unmanned Aircraft System Operations: A Comprehensive Review*, revisão abrangente sobre operações civis de sistemas de aeronaves não tripuladas, enfatizam a necessidade de avaliações robustas de risco para definir autorizações de operação e estratégias de mitigação. Eles destacam que as operações civis de UAS introduzem novas questões de segurança, como o risco de impacto no solo, distinto da aviação tradicional, e defendem métodos quantitativos rigorosos e estruturas colaborativas para administrar esses riscos (DU et al., 2024).

Isso também implica custos econômicos associados ao desenvolvimento e implementação desses protocolos complexos. Yang et al. (2024) revisam especificamente o *design* de espaço aéreo e a avaliação de risco para UAM, incluindo análises completas de planos de voo que consideram riscos aéreos e terrestres, bem como trajetórias de perda de controle em voo (YANG et al., 2024).

Mascio, Serrone e Moretti (2025) observam que os objetivos de segurança variam conforme as categorias de certificação das aeronaves, sendo as categorias “enhanced” obrigatórias para operações de VTOL em espaço aéreo urbano de alta densidade para transporte comercial de passageiros, o que representa regulações mais rígidas e custos operacionais mais elevados (MASCIO; SERRONE; MORETTI, 2025).

Hoffmann, Nishimura e Gomes (2024) exploram a cultura de segurança na UAM a partir de uma perspectiva de sistemas-de-sistemas, enfatizando a necessidade de um comitê unificado de segurança que promova consenso entre os diversos atores, incluindo autoridades regulatórias, para impulsionar melhorias em toda a indústria (HOFFMANN; NISHIMURA; GOMES, 2024).

O trabalho de Moradi, Wang e Mafakheri (2024), ao revisar a UAM para transporte da última milha, também aponta segurança e proteção como considerações centrais no

⁴ Autorotação é uma manobra de emergência que permite a um helicóptero, mesmo com falha do motor, manter o rotor principal a girar para garantir um pouso seguro.

contexto de entregas de pacotes, ressaltando a importância de sistemas avançados de prevenção de colisões, monitoramento em tempo real e conformidade com regulamentos de tráfego (MORADI; WANG; MAFAKHERI, 2024).

A cibersegurança é um componente vital da proteção na UAM, dado o nível de interconectividade dos veículos aéreos e suas vulnerabilidades associadas. Carrera et al. (2024) mencionam explicitamente a cibersegurança como área crítica, sugerindo soluções que integrem voo autônomo, criptografia e tecnologias de blockchain para assegurar a integridade do sistema e protegê-lo contra ameaças digitais (CARRERA et al., 2024).

Hariram, Megalingam e Sudhakar (2025) ampliam a discussão para a aceitação pública, afirmando que preocupações com segurança, dilemas éticos em situações críticas de tomada de decisão e receios sobre privacidade de dados e cibersegurança geram ceticismo entre usuários potenciais (HARIRAM; MEGALINGAM; SUDHAKAR, 2025). Isso destaca a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura digital para proteger os sistemas da UAM contra ataques maliciosos, prevenindo potenciais rupturas econômicas e sociais catastróficas.

Al-Haddad et al. (2020) verificaram que preocupações com a segurança são fator determinante para a adoção da UAM, sugerindo que formuladores de políticas devem priorizar atributos do serviço, incluindo a confiabilidade operacional, para conquistar a confiança pública (AL-HADDAD et al., 2020). Sadrani et al. (2025) corroboram essa visão, listando “segurança do sistema e questões de cibersegurança” entre as principais barreiras para a implementação da UAM nos EUA, aparecendo também em posições de destaque no caso da Alemanha (SADRANI et al., 2025).

Além disso, Zhao e Feng (2025) relacionam “preocupações de segurança em condições climáticas incertas vivenciadas com helicópteros” a uma “menor disposição em adotar bairros amigáveis à UAM”. A respeito de resultados de sua pesquisa *survey* a respeito, explicam os autores:

Por fim, os resultados da experiência com helicópteros sugerem que os respondentes que já tiveram contato com esse modal apresentam baixa tendência a optar por bairros favoráveis à UAM. Isso é compreensível devido às experiências negativas associadas aos helicópteros, como o ruído e as preocupações com a segurança em condições meteorológicas adversas. É importante destacar que a experiência com helicópteros funciona como uma aproximação da experiência com a UAM, embora os atuais fabricantes de UAM geralmente aleguem níveis reduzidos de ruído e maior segurança. No entanto, ainda podem surgir preocupações ao voar com a UAM em “cânions urbanos” ou em condições de neblina, a menos que os avanços tecnológicos se mostrem suficientes para garantir, de forma consistente, experiências positivas. Nesta etapa, permanece incerto em que medida essas melhorias serão capazes de assegurar a ampla aceitação comunitária (ZHAO; FENG, 2025, p. 10, tradução nossa).

Destaque-se que a incerteza climática como risco para as operações de UAM,

preocupação levantada por Zhao e Feng (2025), ganha ainda maior relevância quando confrontada com o cenário de eventos climáticos severos crescendo tanto em frequência como em intensidade, conforme apontado pela NASA(NASA, 2021).

Esses achados reforçam que medidas inadequadas de segurança, ou mesmo a percepção pública de risco, podem traduzir-se em desutilidade econômica significativa ao frear o crescimento do mercado e ampliar o custo social associado à percepção de insegurança.

A eletrificação das frotas de UAM, por sua vez, embora traga benefícios ambientais, introduz novos desafios para a infraestrutura energética urbana, podendo acarretar custos sociais adicionais.

Esse crescimento da demanda energética exercerá pressão adicional sobre as redes elétricas existentes, exigindo investimentos substanciais em infraestrutura e podendo resultar em aumento do preço da eletricidade ou instabilidade na rede caso não haja gestão adequada.

A intensidade de carbono da matriz elétrica, como explorado por Mudumba et al. (2021), também influencia diretamente o perfil de emissões da UAM, configurando uma externalidade negativa indireta se a geração não for limpa (MUDUMBA et al., 2021). O benefício ambiental pleno da UAM elétrica depende, portanto, da descarbonização da geração de energia, adicionando uma camada de complexidade às considerações de política pública para sua implantação.

Além disso, Liu et al. (2024), em sua análise tecnoeconômica de eVTOLs, compararam a troca de baterias (*battery swapping*) e o carregamento como abordagens de suprimento energético. O estudo observa que o carregamento resulta em menor eficiência operacional, embora isso possa ser compensado pelo uso de recarga rápida e pela redução da capacidade das baterias. Esse cenário revela *trade-offs* econômicos que impactam diretamente a demanda sobre a rede elétrica e os modelos operacionais da UAM (LIU et al., 2024). Nesse sentido, Kim, Choi e Chang (2024) examinam a viabilidade econômica de sistemas híbridos de propulsão célula a combustível-bateria, considerando mudanças atuais nos preços de eletricidade e hidrogênio (KIM; CHOI; CHANG, 2024).

A perspectiva de operações de UAM em baixas altitudes levanta, ainda, preocupações acerca de colisões com aves, um risco conhecido da aviação que adiciona custos sociais ao transporte aéreo. Varnousfaderani e Shihab (2025) discutem o aumento da frequência de colisões com aves (indicador conhecido pela expressão em língua inglesa *bird strikes*) na aviação e destacam que a chegada das aeronaves de AAM, operando em espaços aéreos de baixa altitude, agravará esse risco devido à maior concentração de aves nessas áreas (VARNOUSFADERANI; SHIHAB, 2025).

Além do custo social associado às mortes dos animais, esse risco representa uma ameaça direta à segurança das operações da UAM e pode exigir a implementação de sis-

temas dispendiosos de prevenção de colisões ou a imposição de restrições operacionais, aumentando o custo social total da UAM. Os autores também afirmam que são necessárias pesquisas para melhorar os modelos preditivos de movimentação de aves, desenvolver classificadores de espécies, reforçar partes da aeronave para resistirem a impactos e expandir modelos de prevenção de colisões para cobrir todas as fases de voo, incluindo aquelas das aeronaves AAM (VARNOUSFADERANI; SHIHAB, 2025), apontando para uma necessidade de investimentos significativos em P&D e de avanços regulatórios para mitigar essa externalidade.

O impacto econômico da UAM também se estende ao possível deslocamento de empregos em setores de transporte já existentes. Embora a literatura não apresente números explícitos sobre extinção de postos de trabalho, Shi (2024) aponta preocupações relacionadas ao “emprego atípico e/ou outras formas de práticas trabalhistas de redução de custos” para pilotos de UAM (SHI, 2024). Mesmo com a criação de novas vagas, a natureza do trabalho na aviação e no transporte terrestre pode se transformar, levando a um processo de desqualificação ou substituição de determinadas forças de trabalho.

Essa transição pode impor custos sociais de ajustamento, como a necessidade de programas de requalificação profissional ou benefícios de desemprego, geralmente suportados pelo setor público. Yan, Wang e Qu (2024b) registram que consumidores, em seu levantamento sobre as potenciais aplicações da UAM, manifestaram preocupações com a “segurança no emprego” (YAN; WANG; QU, 2024b). Isso evidencia receios sociais em torno da substituição de postos de trabalho, apontando para uma externalidade negativa que pode exigir intervenções de políticas públicas, como programas de ajuste do mercado de trabalho, a fim de amortecer o impacto sobre os trabalhadores afetados.

Por fim, para organização dos achados em externalidades negativas, as principais externalidades negativas foram elencadas na Tabela 7. Para cada aspecto identificado, são listados os efeitos com suas descrições, indicadores sociais do U-Space (SIMIĆ et al., 2024) associados (listados no Anexo A), quando existentes, e as principais publicações analisadas que abordam o tema.

Tabela 7 – Quadro das principais externalidades negativas identificadas

Aspecto	Descrição dos efeitos	Indicadores associados (projeto MUSE)	Principais publicações analisadas que tratam do tema
Poluição sonora (ruído)	<ul style="list-style-type: none"> - Exposição prolongada está associada ao estresse, doenças cardiovasculares, hipertensão e distúrbios do sono; - Concentração prejudicada e redução da eficiência no trabalho ou no aprendizado em escolas próximas a corredores de voo; - Residências e estabelecimentos comerciais próximos a vertiportos ou rotas de voo podem perder valor. 	NO-1, NO-2, NO-3, NO-4, NO-5, NO-6, NO-7	(LONG et al., 2023) (GAO et al., 2024) (BIAN et al., 2021) (RIZZI et al., 2025) (EISFELDT, 2020) (YUNUS et al., 2023) (ZHAO; FENG, 2025)
Poluição visual (desconfiguração da paisagem)	<ul style="list-style-type: none"> - Paisagem perde a harmonia visual; - Desordem visual persistente pode aumentar estresse, ansiedade e sensação de confinamento, de forma semelhante à saturação de outdoors que afeta moradores das cidades; - Áreas antes valorizadas por suas vistas abertas podem perder atratividade. 	VP-1, VP-2, VP-3, VP-4, VP-5, VP-6, VP-7, VP-8, VP-9	(STRAUBINGER et al., 2020) (CETIN et al., 2022) (YAN; WANG; QU, 2024b) (SIMIĆ et al., 2024)

Continuação - Quadro das principais externalidades negativas identificadas

Aspecto	Descrição dos efeitos	Indicadores associados (projeto MUSE)	Principais publicações analisadas que tratam do tema
Segurança (acidentes, colisões)	<ul style="list-style-type: none"> - Custo humano inclui ferimentos, fatalidades e traumas psicológicos tanto para passageiros quanto para transeuntes não envolvidos; - Danos a edifícios, veículos ou infraestrutura crítica. 	PS-1,PS-2	(DU et al., 2024) (HOFFMANN; NISHIMURA; GOMES, 2024) (SHI, 2024) (YANG et al., 2024)
Deslocamento de empregos em modais de transporte existentes	<ul style="list-style-type: none"> - Motoristas e trabalhadores de serviços deslocados podem enfrentar dificuldades no reingresso no mercado de trabalho; - Custos de requalificação profissional recaem, em grande medida, sobre os governos ou sobre os próprios trabalhadores; - Postos de trabalho altamente qualificados e de natureza técnica associados à UAM tendem a beneficiar uma parcela restrita da força de trabalho, com trabalhadores de baixa qualificação absorvendo a maior parte das perdas. 	Não há	(SHI, 2024) (YAN; WANG; QU, 2024b)
Colisões com aves (<i>bird strikes</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Colisões frequentes contribuem para o declínio das populações de aves, ameaçando a biodiversidade e o equilíbrio ecológico; - Podem ocasionar falhas mecânicas, quedas ou poucos forcados, resultando em danos. 	WL-1, WL-2, WL-3, WL-4, WL-5,WL-6	(VARNOUSFADERANI; SHIHAB, 2025)

Continuação - Quadro das principais externalidades negativas identificadas

Aspecto	Descrição dos efeitos	Indicadores associados (projeto MUSE)	Principais publicações analisadas que tratam do tema
Impactos na rede elétrica de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da demanda pode pressionar os preços da eletricidade; - Sobrecarga da infraestrutura elétrica, com eventuais interrupções no fornecimento (apagões) e impacto na qualidade do serviço; - Caso a expansão da demanda seja suprida predominantemente por fontes não renováveis, a UAM poderá contribuir indiretamente para o aumento da poluição atmosférica e para o agravamento das mudanças climáticas. 	EM-2	(LIU et al., 2024)
Impactos em privacidade	<ul style="list-style-type: none"> - A operação de UAM, por ser de baixa altitude, pode promover redução da privacidade para habitantes de áreas com grande densidade de voos; - Por tratar-se de sistema fortemente dependente da disponibilidade de dados das viagens, pode haver impacto relevante de privacidade de dados dos usuários. 	PC-1, PC-2, PC-3, PC-4, PC-5	(HARIRAM; ME-GALINGAM; SUDHAKAR, 2025) (WU et al., 2024) (YAN; WANG; QU, 2024b)

Fonte: elaboração própria

4.1.3 Externalidades positivas

Apesar das externalidades negativas, percebeu-se da literatura analisada que a UAM é capaz de gerar externalidades positivas significativas, melhorando a eficiência urbana e a qualidade de vida, para além dos benefícios diretos para os usuários.

Liu e Gao (2024) ressaltam uma gama ampla de vantagens, afirmando que a adoção de UAM oferece “redução do tempo de viagem, menores exigências de infraestrutura, maior segurança nos deslocamentos, melhoria no fluxo de talentos e benefícios operacionais” em relação ao transporte terrestre tradicional (LIU; GAO, 2024, p. 2, tradução nossa). Tal perspectiva é reforçada por Zhao e Feng (2025), que consideram a UAM uma inovação disruptiva, capaz de contornar áreas congestionadas, aumentando a conveniência tanto para a vida quanto para os deslocamentos dos residentes (ZHAO; FENG, 2025).

Entendida como a principal proposta de melhoria na mobilidade urbana com a implantação da UAM, a redução do congestionamento no tráfego terrestre é tratada em grande parte dos artigos estudados. Conforme afirmam Postorino e Sarné (2020), a característica mais interessante dos carros voadores é a “oportunidade que poderiam oferecer para reduzir congestionamentos, engarrafamentos e a perda de tempo nos deslocamentos entre pares origem/destino em contextos urbanos” (POSTORINO; SARNÉ, 2020, p.1, tradução nossa).

Yan, Wang e Qu (2024b) afirmam que a UAM pode reduzir substancialmente o congestionamento de tráfego - e, portanto, o tempo de deslocamento - ao explorar o espaço aéreo tridimensional, oferecendo uma rede nodal flexível que não é limitada pela infraestrutura terrestre tradicional (YAN; WANG; QU, 2024b), visão corroborada, ainda, por Eißfeldt (2020) - embora indique tal benefício como potencial (EİSFELDT, 2020).

Essas economias de tempo representam um ganho de eficiência econômica, ao reduzir o tempo improductivo gasto em deslocamentos e melhorar a produtividade urbana como um todo. Long et al. (2023) também sugerem que corredores aéreos da UAM podem atacar diretamente o problema do congestionamento, que é uma externalidade clássica do transporte (LONG et al., 2023). Pons-Prats, Živojinović e Kuljanin (2022) - na mesma linha - acrescentam que a UAM tem atraído atenção exatamente em razão de seu potencial de reduzir congestionamentos, apoiada por inovações disruptivas em baterias e tecnologias de propulsão (PONS-PRATS; ŽIVOJINOVIĆ; KULJANIN, 2022).

Contudo, Mouratidis, Peters e Wee (2021) trazem um achado contraintuitivo: em alguns cenários, a UAM poderia, na verdade, levar a um aumento da demanda total por viagens, principalmente em razão da demanda induzida, o que complexifica as previsões sobre o comportamento dos usuários diante de novos modais de transporte (MOURATIDIS; PETERS; WEE, 2021).

et al. (2021) realizam simulação com modelo representativo da mobilidade urbana na área metropolitana de Munique. A simulação avalia o impacto da implantação de UAM sobre o tráfego de automóveis terrestres, tanto no que diz respeito à aceitação do modal aéreo em substituição ao transporte terrestre quanto em respeito a possíveis reduções no volume de trânsito nas vias terrestres, representado pelo indicador VKT (veículos-quilômetros viajados).

Os achados da simulação apontam, também em aparente contradição, para um aumento do indicador VKT. A autora justifica os resultados indicando que a estrutura hierárquica do modelo de escolha modal atraiu mais viagens da UAM a partir do transporte coletivo do que do automóvel. Além disso, as viagens de acesso e egresso, para e de vertiportos, foram realizadas com mais frequência por carro do que por transporte público ou modos não motorizados. Embora o impacto líquido sobre o VKT seja muito pequeno, os resultados mostram que não foi possível demonstrar que a UAM reduz as viagens de automóvel (PUKHOVA et al., 2021).

Depreende-se de Pukhova et al. (2021), ainda, que os benefícios da UAM são relativos e dependem da infraestrutura de mobilidade existente nas diferentes cidades, o que, em certa medida, corrobora Mouratidis, Peters e Wee (2021). Sobre os resultados da simulação do modelo de Munique, explica:

O potencial da UAM para melhorar as condições de deslocamento é limitado em áreas urbanas como Munique, que possuem uma ampla infraestrutura viária e uma rede de transporte público. Para a maioria dos pares origem-destino, a UAM não proporciona redução no tempo de viagem quando se consideram o tempo de acesso e egresso, o tempo de embarque e o possível tempo de espera. Como consequência, a participação das viagens por UAM é relativamente baixa, variando entre 0,14% e 0,61% do número total de viagens, dependendo do tamanho da frota. Espera-se que os veículos UAM sejam menos ruidosos do que os helicópteros, mas ainda assim aumentarão a poluição sonora e gerarão poluição visual adicional se operados em larga escala.(PUKHOVA et al., 2021, p. 7, tradução nossa)

Como solução para possíveis efeitos danosos de uma demanda excessiva, sugerindo controle microeconômico do volume de voos, Merkert, Beck e Bushell (2021) indicam que tarifas variáveis para usuários poderiam ser usadas de forma eficaz para gerenciar o tráfego e, assim, contribuir para a redução do congestionamento (MERKERT; BECK; BUSHELL, 2021).

A UAM é apresentada como modal limpo, contribuindo para a redução de emissões. Em *Modeling CO₂ Emissions from Trips using Urban Air Mobility and Emerging Automobile Technologies*, Mudumba et al. (2021) desenvolvem um modelo de emissões para eVTOLs, incluindo CO₂ proveniente da produção de eletricidade, e compararam as emissões de viagens de UAM com as de automóveis movidos a gasolina e elétricos.

Embora o estudo ressalte a influência do índice de emissões da matriz elétrica sobre o benefício ambiental global (*e.g.* diferenças observadas entre Chicago e Dallas), há potencial de redução líquida das emissões urbanas, configurando uma externalidade positiva relevante para a qualidade do ar e a saúde pública. Cho e Kim (2022) também avaliam tal impacto ao calcular a redução de gases de efeito estufa no tráfego terrestre da região metropolitana de Seul, estimando que a introdução da UAM poderia reduzir de 700 a 90.000 toneladas as emissões de CO₂, graças à transferência modal (CHO; KIM, 2022), demonstrando um benefício ambiental tangível, sobretudo em regiões com tráfego rodoviário intenso.

A análise tecnoeconômica de sistemas de UAM movidos a células a combustível realizada por Kim, Choi e Chang (2024) reforça esse compromisso com fontes de energia mais limpas para o transporte aéreo urbano do futuro Kim, Choi e Chang (2024).

O surgimento de uma nova indústria naturalmente leva à criação de empregos em diversos setores, configurando uma importante externalidade econômica positiva. Embora a literatura não forneça dados quantitativos precisos sobre o número de empregos, diversos trabalhos indicam oportunidades significativas ao longo de todo o ciclo de vida da UAM. Long et al. (2023) descrevem esse ciclo, abrangendo desde projeto e construção até operação, gestão e regulação, cada fase demandando diferentes perfis profissionais (LONG et al., 2023).

Isso implica novas vagas em áreas como manufatura, engenharia, desenvolvimento de software e planejamento urbano. Ehrhardt, Horlacher e Straubinger (2024), ao discutir estratégias de comercialização de carros voadores elétricos, sugerem que a produção de novos eVTOLs exigirá uma base manufatureira altamente qualificada (EHRHARDT; HORLACHER; STRAUBINGER, 2024). Além disso, Torres et al. (2024) e Shyr, Farrahi e Verma (2024) analisam a carga de trabalho de controladores de tráfego aéreo em operações da UAM, sugerindo implicitamente que haverá demanda crescente por esses profissionais à medida que o setor escalar (TORRES et al., 2024; SHYR; FARRAHI; VERMA, 2024).

Cetin et al. (2022) referenciam um estudo (SESAR, 2016) que prevê crescimento econômico significativo a partir do mercado emergente de UAM:

Aeronaves não tripuladas farão parte do cotidiano da maioria dos setores econômicos (...) mas terão maior impacto no transporte aéreo, nos serviços públicos (*utilities*), no entretenimento e na mídia, na logística e na agricultura. De fato, espera-se que o número de drones em operação no espaço aéreo europeu aumente de alguns milhares para várias centenas de milhares até 2050, especialmente em atividades governamentais e comerciais. O benefício econômico anual poderá superar 10 bilhões de euros até 2035 na Europa e gerar 100.000 novos empregos diretos para apoiar operações relacionadas a drones. Um exemplo desse crescimento é ilustrado pelo setor agrícola, no qual os autores estimam que 150.000 drones estarão em operação até 2035. O mesmo ocorre nos setores de serviços públicos (*utilities*) e de segurança, em que cerca de 60.000 aeronaves não tripuladas deverão ser utilizadas para auxiliar no geren-

ciamento de desastres naturais ou no controle de tráfego, entre outras tarefas. (CETIN et al., 2022, p.2, tradução nossa)

O desenvolvimento da infraestrutura em solo, como os vertiportos - identificados por Mascio, Serrone e Moretti (2025) como o “esqueleto da infraestrutura” da UAM - também abrirá vagas em construção, manutenção e gestão de instalações. Esses empregos recém-criados podem compensar parcialmente os deslocamentos de mão de obra em setores tradicionais, contribuindo para o dinamismo econômico.

Outro impacto da implantação de UAM sobre atividades terceiras diz respeito ao potencial de melhorar a acessibilidade de comunidades em áreas remotas ou mal atendidas. Ao contornar as limitações da infraestrutura terrestre - e, também, hidroviária -, pode oferecer ligações mais rápidas e diretas, reduzindo tempos e custos de deslocamento onde as redes tradicionais são ineficientes ou inexistentes. Isso pode impulsionar o desenvolvimento econômico e a inclusão social em regiões que hoje enfrentam sérios desafios de mobilidade.

Raghunatha, Thollander e Barthel (2023), por exemplo, demonstram que drones utilizados em regiões rurais podem trazer benefícios ambientais ainda maiores do que em áreas urbanas; um estudo na Tailândia revelou que drones de entrega nessas regiões apresentaram impacto ambiental doze vezes menor em comparação com motocicletas elétricas (RAGHUNATHA; THOLLANDER; BARTHEL, 2023). Conforme indicado por Zhao e Feng (2025), “o conceito expandido de UAM também engloba aplicações de carga, como entrega por drones, transporte emergencial de medicamentos e suprimento de bens a áreas remotas” (ZHAO; FENG, 2025, p. 1, tradução nossa).

A agilidade e a velocidade da UAM podem trazer benefícios substanciais para serviços públicos críticos. Ma et al. (2025) indicam que a integração da UAM pode aumentar significativamente a resiliência das redes de transporte multimodal ao oferecer rotas alternativas em situações de emergência (MA et al., 2025). Essa capacidade é especialmente valiosa para transporte médico, resposta a desastres e outras demandas logísticas urgentes, com potencial de salvar vidas e reduzir tempos de resposta.

Ziakkas e Natakusuma (2025) exploram especificamente o potencial da UAM em serviços médicos de emergência nos países da ASEAN-5 (Indonésia, Malásia, Filipinas, Singapura e Tailândia), encontrando amplo apoio público ao uso de eVTOLs nesse contexto, sobretudo pela expectativa de tempos de resposta mais rápidos e menor impacto do tráfego terrestre, restando claro que a UAM pode oferecer bens públicos essenciais, especialmente em ambientes urbanos congestionados (ZIAKKAS; NATAKUSUMA, 2025).

O setor de turismo, por sua vez, pode se beneficiar da UAM por meio da criação de novas experiências aéreas e da melhoria da acessibilidade a destinos, gerando novas fontes de receita e enriquecendo a experiência do visitante. Suo et al. (2024) exploram

diretamente o papel da UAM no turismo, sugerindo significativo potencial de expansão setorial, sobretudo em serviços de passeios aéreos. Seu estudo, realizado na região cênica de Mogan Mountain, na China, mostra que a consciência ambiental e a motivação hedônica (busca de experiências prazerosas) influenciam fortemente a intenção dos turistas de utilizar eVTOLs (SUO et al., 2024).

Isso aponta para um mercado nascente de turismo aéreo, capaz de gerar novas receitas e ampliar a atratividade de destinos. Embora Wild (2024) trate do “turismo suborbital” em um contexto mais amplo - incluindo o turismo espacial oferecido por empresas como Virgin Galactic e Blue Origin -, os impactos mais imediatos parecem residir nos serviços de táxis aéreos urbanos ou intermunicipais, oferecendo voos panorâmicos e conexões rápidas com pontos turísticos (WILD, 2024).

Em *Urban Air Mobility: Opportunities for the Weather Community*, publicação complementar ao portfólio, Steiner (2019) identifica como importante externalidade positiva da implantação da UAM a contribuição potencial dos eVTOLs para o aprimoramento do monitoramento meteorológico urbano em tempo real. Com uma operação intensiva desses veículos em regiões metropolitanas densas, abre-se a possibilidade de equipá-los com sensores atmosféricos, permitindo a coleta sistemática e contínua de dados meteorológicos em áreas atualmente pouco monitoradas.

Essa nova capacidade observacional pode gerar benefícios amplos à sociedade - não apenas para a segurança operacional da própria UAM, mas também para o enfrentamento de desafios urbanos como ondas de calor, alagamentos, qualidade do ar e eventos extremos. A possibilidade de obtenção de dados meteorológicos em microescala e de forma geograficamente distribuída representa um avanço importante para a ciência atmosférica e para a gestão urbana, especialmente considerando que a infraestrutura atual de observação é insuficiente para cobrir de forma eficaz o espaço aéreo sobre as cidades (STEINER, 2019).

Por fim, entende-se meritório tratar dos aspectos de inovação relacionados com o modal. A própria UAM é fruto de intensa inovação tecnológica e sua continuidade tende a impulsionar avanços em diversos setores de alta tecnologia. Pons-Prats, Živojinović e Kuljanin (2022) caracterizam a UAM como uma “inovação disruptiva” que transcende a aviação e transforma sistemas de mobilidade e planejamento urbano, sustentada principalmente pelos progressos em baterias e propulsão elétrica (PONS-PRATS; ŽIVOJINOVIĆ; KULJANIN, 2022).

Li, Xu e Shen (2024) focam extensivamente na gestão da inovação, analisando tecnologias, características de produtos e políticas relacionadas a eVTOLs, desenvolvendo um modelo de Roadmap Político-Tecnológico (P-TRM) para orientar o processo de P&D de eVTOLs (LI; XU; SHEN, 2024). Essa dedicação em fomentar avanços tecnológicos e inovações de produtos é vista como crucial para a comercialização. A exploração de

sistemas de propulsão avançados, como os híbridos célula a combustível-bateria de Kim, Choi e Chang (2024), exemplifica ainda mais o ímpeto inovador em curso no setor de UAM (KIM; CHOI; CHANG, 2024).

Ehrhardt, Horlacher e Straubinger (2024) abordam explicitamente as “estratégias de inovação para mercados inexistentes”, destacando como os avanços tecnológicos possibilitaram esse novo modal de transporte e como as empresas buscam capturar valor a partir dessas inovações (EHRHARDT; HORLACHER; STRAUBINGER, 2024). Liu et al. (2024) acrescentam que a implantação de tecnologias avançadas pode melhorar significativamente a lucratividade no setor de UAM, indicando que o investimento contínuo em P&D gerará ganhos de eficiência e redução de custos operacionais (LIU et al., 2024).

Esse processo cria *spillovers* tecnológicos positivos, estimulando o investimento em setores correlatos e consolidando um ecossistema de alto valor agregado.

Assim como no tratamento dos achados em externalidades negativas, as principais externalidades positivas foram elencadas na Tabela 8. Para cada aspecto identificado, são listados os efeitos com suas descrições, indicadores sociais do U-Space (SIMIĆ et al., 2024) associados (listados no Anexo A), quando existentes, e as principais publicações analisadas que abordam o tema.

Tabela 8 – Quadro das principais externalidades positivas identificadas

Aspecto	Descrição dos efeitos	Indicadores associados (projeto MUSE)	Principais publicações analisadas que tratam do tema
Redução de congestionamento	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto financeiro da redução de tempo improductivo; - Redução de efeitos de saúde adversos do congestionamento; - Melhora no tempo de entrega de produtos. 	AE-2	(LIU; GAO, 2024) (ZHAO; FENG, 2025) (POSTORINO; SARNé, 2020) (YAN; WANG; QU, 2024b) (EISFELDT, 2020) (LONG et al., 2023) (PONS-PRATS; ŽIVOJINOVIć; KULJANIN, 2022) (MOURATIDIS; PETERS; WEE, 2021) (PUKHOVA et al., 2021) (MERKERT; BECK; BUSHELL, 2021)
Redução de emissões de CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - A depender do grau de substituição dos modais a combustível fóssil, a propulsão elétrica pode representar redução significativa nas emissões; - A redução depende, ainda, da predominância de geração limpa na matriz energética. 	EM-1, EM-2, EM-3, EM-4, EM-5	(MUDUMBA et al., 2021) (CHO; KIM, 2022) (KIM; CHOI; CHANG, 2024)
Geração de empregos	<ul style="list-style-type: none"> - Oportunidades em alto nível de qualificação em um campo inovador; - Deslocamento de empregos de outros modais. 	EC-1	(LONG et al., 2023) (EHRHARDT; HORLACHER; STRAUBINGER, 2024) (TORRES et al., 2024) (SHYR; FARRAHI; VERMA, 2024) (CETIN et al., 2022) (MASCIO; SERONE; MORETTI, 2025)

Continuação - Quadro das principais externalidades positivas identificadas

Aspecto	Descrição dos efeitos	Indicadores associados (projeto MUSE)	Principais publicações analisadas que tratam do tema
Acesso a comunidades remotas	- Possibilidade de conectar, através da UAM, regiões isoladas em razão de relevo acidentado ou outras barreiras de acesso.	AE-1	(RAGHUNATHA; THOLLANDER; BARTHEL, 2023) (ZHAO; FENG, 2025)
Serviços críticos e de emergência	- Melhoria no tempo de resposta a incidentes, com a prestação de serviços médicos <i>in loco</i> ou entrega de materiais críticos de saúde.	AE-2	(MA et al., 2025) (ZIAKKAS; NATAKUSUMA, 2025)
Atratividade turística	- Criação de novas experiências aéreas como atração turística (motivação hedônica); - Acessibilidade a destinos.	Não há	(SUO et al., 2024) (WILD, 2024)
Ampliação da coleta e disponibilidade de dados meteorológicos	- Possibilidade de obtenção de dados meteorológicos por meio de rede de sensores dos eVTOLs em operação; - Aumento da precisão de previsão e avaliação de fenômenos meteorológicos em escala mais refinada.	Não há	(STEINER, 2019) - estudo complementar ao portfólio de publicações
Fomento à inovação	- Desenvolvimento paralelo de tecnologias de suporte à UAM; - Tecnologias como <i>enablers</i> para a adoção de UAM incluem: telecomunicações, inteligência artificial, otimização de baterias, etc.	Não há	(PONS-PRATS; ŽIVOJINOVIĆ; KULJANIN, 2022) (LI; XU; SHEN, 2024) (KIM; CHOI; CHANG, 2024) (EHRHARDT; HORLACHER; STRAUBINGER, 2024) (LIU et al., 2024)

Fonte: elaboração própria

4.1.4 Equidade e políticas públicas

Do ponto de vista de equidade, uma preocupação econômica e social crucial é o potencial da UAM de exacerbar desigualdades existentes ou criar novas. Pons-Prats, Živojinović e Kuljanin (2022) alertam que, se os serviços de UAM forem percebidos como elitistas em razão de preços elevados, isso poderá comprometer seriamente a aceitação pública e limitar a concorrência benéfica no mercado (PONS-PRATS; ŽIVOJINOVIĆ; KULJANIN, 2022).

Biehle (2022) apresenta um achado contundente específico para a Europa, concluindo que a pegada social global dos eVTOLs era (ao menos à época da publicação) negativa. Esse trabalho sugere que as operações de mercado em fase inicial tendem a produzir uma distribuição desequilibrada dos potenciais benefícios, atendendo principalmente a um público restrito de alta renda e falhando em preencher lacunas mais amplas de acessibilidade nos sistemas de transporte urbano (BIEHLE, 2022).

Por exemplo, uma viagem de UAM de 10 quilômetros em área urbana europeia é estimada em cerca de 70 euros, o que a torna inacessível para a maioria da sociedade como meio de deslocamento regular, impactando negativamente a avaliação de acessibilidade geral do sistema de transportes (BIEHLE, 2022).

Essa realidade levanta questões sobre segmentação de mercado e acesso, e se será necessário recorrer a subsídios públicos ou a intervenções regulatórias, como tetos de preços ou exigências de prestação de serviço em áreas carentes, para garantir uma distribuição mais equitativa dos benefícios potenciais da UAM. Sadrani et al. (2025) corroboram essa perspectiva ao identificarem a acessibilidade de preços e a incerteza de investimentos como barreiras socioeconómicas significativas para a implementação da UAM, particularmente na Alemanha (SADRANI et al., 2025).

Bennaceur, Delmas e Hamadi (2022) reconhecem implicitamente a necessidade de justiça ao focar em “*trade-offs* de equidade” e buscar resolver questões ocultas de justiça no design dos serviços de táxis aéreos (BENNACEUR; DELMAS; HAMADI, 2022). De forma mais explícita, Jang et al. (2025) indicam que indivíduos com maiores rendas são mais propensos a utilizar a UAM - em sua aplicação como serviço de táxi - para acesso a aeroportos, e que tarifas elevadas podem desencorajar sua popularização (JANG et al., 2025).

Kim, Yeo e Kwon (2025) verificaram que usuários de táxi apresentaram probabilidade 97% maior de disposição a pagar pela UAM em comparação aos usuários de ônibus de aeroporto, e motoristas de carro particular mostraram aumento de 34%, sugerindo o potencial da UAM como um serviço *premium* (KIM; YEO; KWON, 2025).

Em sentido contrário à perspectiva de uma UAM elitista, Li, Xu e Shen (2024) oferecem uma visão otimista de longo prazo, prevendo que com avanços tecnológicos e redu-

ção de custos, os eVTOLs deixarão de ser exclusivos de grupos de alta renda, com a classe média vindo a tornar-se importante usuária (LI; XU; SHEN, 2024). Hariram, Megalingam e Sudhakar (2025) defendem explicitamente políticas que abordem fatores socioeconômicos, garantindo acesso equitativo para grupos desfavorecidos, incluindo comunidades de baixa renda e pessoas com deficiência (HARIRAM; MEGALINGAM; SUDHAKAR, 2025).

Entende-se, portanto, que as forças de mercado não aparentam poder, sozinhas (sem certa intervenção estatal), conduzir a resultados socialmente ótimos em termos de bem-estar e equidade. A literatura enfatiza universalmente o papel crítico das políticas públicas no desenvolvimento e integração bem-sucedidos da UAM.

Li, Xu e Shen (2024) afirmam que sistemas eficazes de gerenciamento do tráfego aéreo e padrões rigorosos de segurança são essenciais para a confiança pública e o crescimento do mercado (LI; XU; SHEN, 2024).

Merkert, Beck e Bushell (2021) defendem um modelo de tarifação inspirado nas cobranças de usuários de rodovias para gerenciar o uso do espaço aéreo, argumentando que abordagens regulatórias atuais, como taxas anuais de registro (para o caso do Brasil, equivalentes ao IPVA e licenciamento), estão no caminho errado (MERKERT; BECK; BUSHELL, 2021).

Cetin et al. (2022) detalham medidas de mitigação, enfatizando que sua implementação requer a participação de órgãos reguladores que precisam seguir um longo período de procedimentos legais (CETIN et al., 2022). Kim, Yeo e Kwon (2025) e Jang et al. (2025) oferecem subsídios para que formuladores de políticas desenvolvam estratégias de precificação e políticas eficazes para a integração bem-sucedida da UAM aos sistemas de transporte existentes (KIM; YEO; KWON, 2025; JANG et al., 2025). Além disso, Birinci et al. (2025) - em estudo que aborda a adaptação de edificações para a implantação de UAM na Turquia - destacam que as regulamentações atuais de aviação civil são inadequadas para reger o uso seguro e eficiente de aeronaves eVTOL em ambientes urbanos e recomenda nova legislação adaptada às características operacionais únicas dessas aeronaves (BIRINCI et al., 2025).

4.2 Análise bibliométrica

Os 56 artigos constantes do portfólio gerado através das consultas e seleção conforme os critérios descritos no Capítulo 3 (Metodologia) foram submetidos a análise bibliométrica no *software RStudioTM*, através da interface *biblioshiny* na plataforma *bibliometrix* (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

Para a importação das informações sobre os artigos no ambiente do RStudioTM, foi utilizado arquivo gerado a partir da base de dados Web of Science em formato BibTeX

(.bib).

A análise descritiva inicial apresentou informações acerca da evolução da produção científica do portfólio, contemplando as fontes de publicação, os tipos de documentos, as palavras-chave, os autores e coautores, o número de citações por documento, bem como a produtividade por país e por ano de publicação dos artigos.

A Tabela 9 apresenta uma visão geral dos dados coletados.

Tabela 9 – Descrição dos resultados quantitativos da coleta de dados

Descrição	Resultados
Período da pesquisa	2020-2025
Fontes de publicação	30
Documentos	56
Taxa de crescimento anual (Média de anos a partir da publicação)	1,68
Média de citações por documento	24,16
Referências	3613
Palavras-chave plus da revista (ID)	145
Palavras-chave do autor (DE)	254
Total de autores	196
Autores de documentos de autoria única	5
Documentos de autoria única	6
Número de coautores por documento	3,84

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

Ainda que os dados apresentados na Tabela 9, por si só, não permitam oferecer conclusões imediatas sobre a avaliação quantitativa da produção levantada, é possível interpretar o período de pesquisa. Considerando que o tema da UAM passa a ganhar certa notoriedade nos últimos anos - em especial a abordagem dos pontos de vista ambiental e econômico -, é de se esperar que os artigos mais relevantes, filtrados para a compilação do portfólio, concentrem-se nos últimos 6 anos.

A leitura dos artigos permitiu perceber a predominância de citações de publicações da pesquisadora Anna Straubinger. Seu artigo intitulado *An overview of current research and developments in urban air mobility - Setting the scene for UAM introduction* foi, entre os artigos do portfólio, o mais citado, tanto globalmente quanto localmente em produções oriundas da Alemanha, o que resta evidenciado na Figura 9.

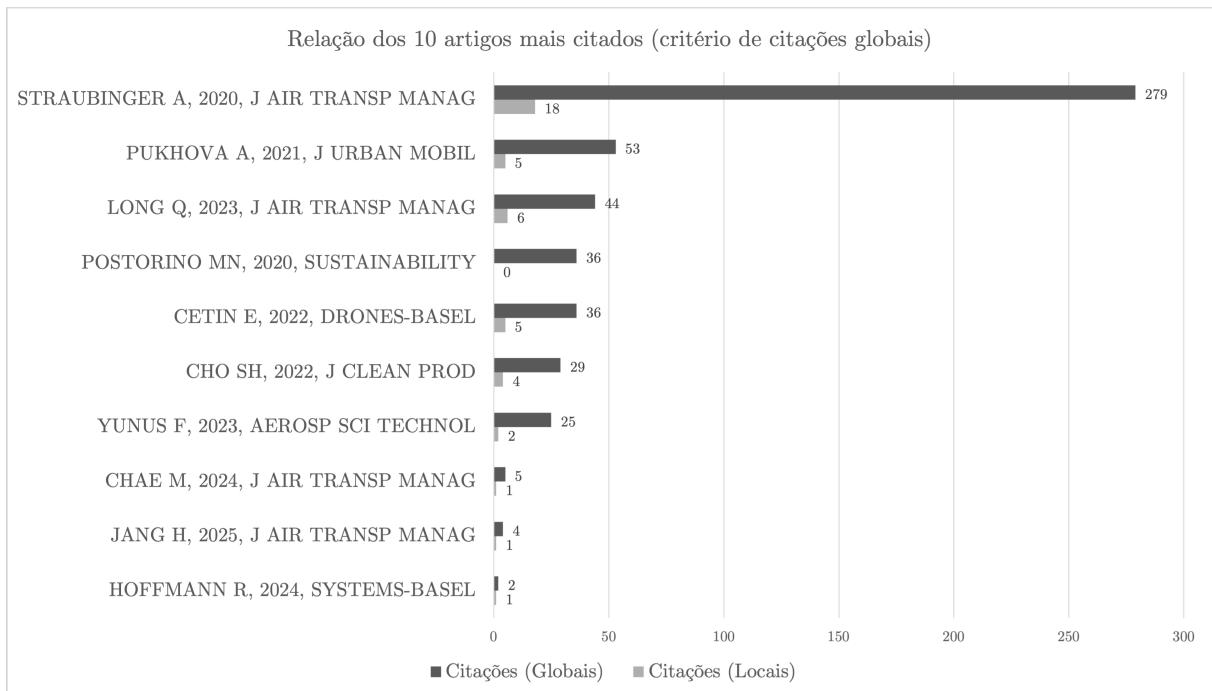


Figura 9 – Relação dos 10 artigos mais citados, pelo critério de citações globais

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

Straubinger figura como autora ou coautora em um total de 5 dos artigos do portfólio. Dado o volume de citações de sua obra globalmente nos últimos 5 anos, a autora tem participação significativa na visibilidade da Alemanha como um dos líderes de produção científica sobre o tema em comento.

De fato, como é possível observar no Diagrama Sankey na Figura 10 abaixo, Anna Straubinger acumula grande volume de referências citadas (fluxos da coluna CR - *Cited References*, na base do *Web of Science*, para a coluna AU - *Author*) e tem seu trabalho fortemente relacionado com as palavras-chave (coluna KW) “urban air mobility” (como indica o fluxo da segunda para a terceira coluna).

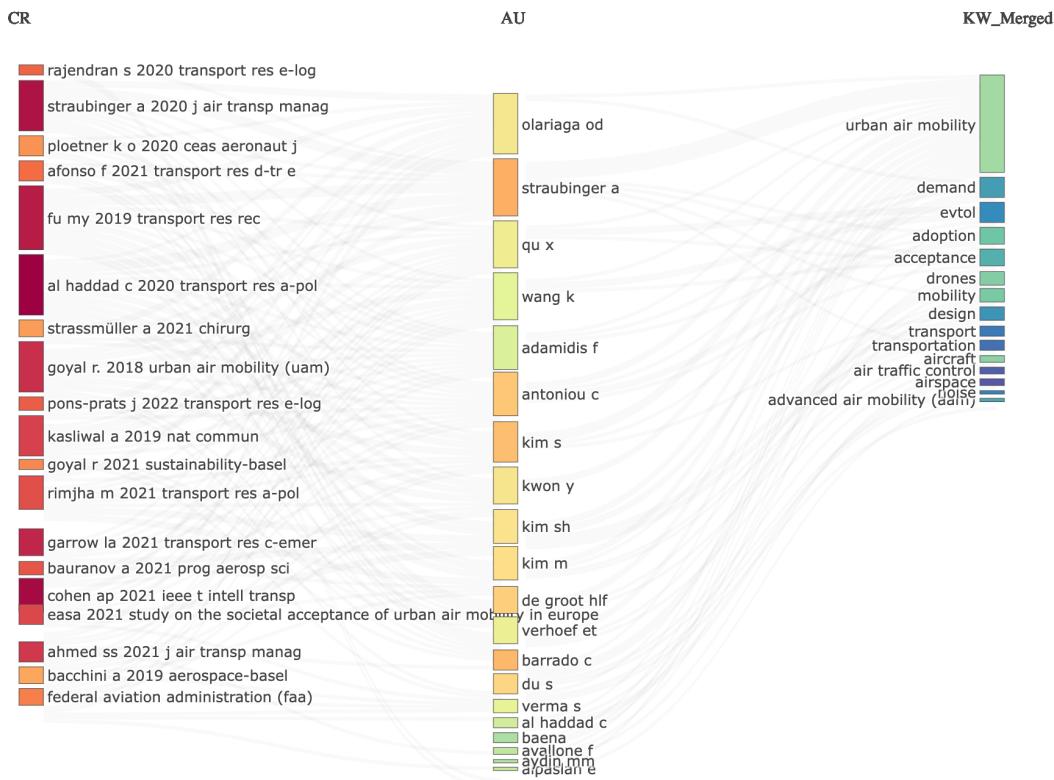


Figura 10 – Diagrama Sankey (*Three-Field Plot*), relacionando as colunas CR (referências citadas), AU (autor) e KW_merged (palavras-chave) para os dados do portfólio de artigos

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

Destaque-se que a complexidade do Diagrama Sankey para o estudo desta dissertação está fortemente relacionada com a dispersão de palavras-chave dos artigos - vez que os objetivos propostos incluem a identificação de externalidades diversas, ao invés de um tema único especificado. Como esperado, contudo, há concentração das palavras-chave “urban air mobility”, facilmente visível na parte superior do fluxo entre as colunas AU (central) e KW_merged (direita).

Dos dados dispostos nas Tabelas 10 e 11, referentes ao volume de produção acadêmica por país sobre o tema de externalidades da UAM e a quantidade de citações dos artigos oriundos de cada país, respectivamente, é possível compreender aspectos dos principais países em destaque: China, EUA e Alemanha.

Os três países concentram 80% das maiores empresas do ramo de design e fabricação de eVTOLs. Publicação do IEEE Spectrum, de 2022 com atualização em 2024, aponta as seguintes organizações de destaque na atividade (ZORPETTE; ACKERMAN, 2022):

- **EUA:** Joby Aviation, Archer Aviation, Beta Technologies, Kittyhawk e Wisk

- **Alemanha:** Lilium, Volocopter
- **China:** EHang
- **França:** Airbus
- **Reino Unido:** Vertical Aerospace

Importante destacar que as *startups* alemãs Lilium e Volocopter apresentaram instabilidade financeira ao longo do ano de 2025 (BROWNLOW, 2025).

Tabela 10 – Produção científica (por país) dos 10 países com maior frequência

País	Frequência
China	40
EUA	28
Alemanha	25
Coréia do Sul	18
Países Baixos	12
Itália	10
Espanha	10
Austrália	9
França	7
Malásia	5

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

Tabela 11 – Relação dos 10 países com publicações mais citadas

País	Total de citações	Média de citações por artigo
Alemanha	632	70,20
França	149	74,50
China	145	12,10
Noruega	109	109,00
Espanha	102	51,00
Coréia do Sul	43	8,60
Itália	37	12,30
Austrália	33	11,00
EUA	32	4,00
Países Baixos	28	14,00

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

Por fim, destaca-se a relevância das fontes em que foram publicados os artigos do portfólio. A Tabela 12 aponta as 10 fontes mais relevantes, com base no critério do h-index (índice H), métrica usada para avaliar a produtividade e o impacto de pesquisadores, universidades, grupos de pesquisa e, no caso em tela, revistas científicas, indicando o

maior número “h” de publicações de um periódico que foram citadas pelo menos “h” vezes (CAPES, 2025). Por exemplo, se um pesquisador tem um índice H de 5, significa que ele publicou 5 artigos que receberam pelo menos 5 citações cada um.

O periódico *Journal of Air Transport Management* encabeça a lista, dada a pertinência de sua proposta ao tema das externalidades da UAM. Em seu site, o periódico indica que tem como objetivo abordar as principais questões econômicas, de gestão e de políticas que desafiam atualmente a indústria do transporte aéreo. A revista oferece a profissionais e acadêmicos um fórum internacional e dinâmico para análise e discussão desses temas, conectando pesquisa e prática e estimulando a interação entre ambas.

Tabela 12 – Relação das 10 fontes de publicação mais relevantes de acordo com o índice H (h-index)

Fonte de publicação	h_index	Publicações
JOURNAL OF AIR TRANSPORT MANAGEMENT	4	9
SUSTAINABILITY	4	6
TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE	3	4
AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY	2	3
DRONES	2	3
TRANSPORTATION RESEARCH INTER-DISCIPLINARY PERSPECTIVES	2	2
TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES	2	3
TRANSPORTATION RESEARCH PART D-TRANSPORT AND ENVIRONMENT	2	2
TRANSPORTATION RESEARCH RECORD	2	2
AEROSPACE	1	1

Fonte: Elaboração própria - gerado através do RStudio/biblioshiny

A análise bibliométrica realizada permitiu confirmar a relevância dos artigos selecionados para o tema em estudo, uma vez que evidenciou a consistência das fontes e a recorrência de autores de referência em relação ao campo investigado. Esse resultado demonstra que o portfólio construído reflete de forma representativa o estado da arte da produção científica sobre o assunto, oferecendo uma base sólida para o aprofundamento das discussões teóricas e para a construção de análises críticas no âmbito da pesquisa desenvolvida.

4.3 Cases regionais

O portfólio de artigos analisado inclui considerações a respeito de cidades e regiões específicas. Gao et al. (2024) tratam da implantação de UAM tomando como exemplo a cidade de Austin - capital do estado do Texas, nos EUA. O estudo enfatiza o planejamento do espaço aéreo e a gestão de ruído.

As altitudes de cruzeiro são definidas em 1.000, 2.000 e 3.000 pés acima do nível do solo (AGL), com altitude de referência de 500 pés acima do nível médio do mar (MSL). O projeto integra-se ao sistema de transporte público, aos padrões de tráfego, à localização das comunidades e à topografia urbana.

O estudo não propõe-se a indicar se a implantação de UAM é benéfica ou danosa, mas sim indicar manejo operacional para estabelecer rotas de voo que permitam equilibrar o *trade-off* entre gasto de energia, exposição a ruído e suprimento da demanda (GAO et al., 2024).

O estudo de Pukhova et al. (2021) descreve uma modelagem de demanda e viabilidade econômica, simulando a demanda para 2030 na cidade de Munique, Alemanha. Apontam os autores que o potencial da UAM de melhorar as condições de trânsito é limitado em áreas como Munique - em que há ampla infraestrutura rodoviária e de transporte público. Para a maioria dos pares origem-destino, a UAM não promove redução no tempo de viagem quando incluídos os tempos de acesso e egresso, embarque e espera (PUKHOVA et al., 2021).

O estudo de Cho e Kim (2022) estimou o impacto ambiental das mudanças nas emissões de CO₂ provenientes do tráfego rodoviário antes e depois da introdução da UAM em Seul. Foram apresentados os impactos decorrentes da variação no volume de tráfego em função da mudança modal para a UAM, afetando a velocidade média das viagens nas vias e a quantidade de emissões de gases de efeito estufa geradas por cada tipo de veículo.

Nas viagens com destino a aeroportos, as reduções nas emissões de CO₂ foram relativamente pequenas - como há uma variação reduzida no volume de tráfego nas vias, não ocorre uma mudança significativa nas emissões de CO₂. Mesmo que o impacto ambiental seja relativamente baixo, destaca-se que houve, ainda assim, uma redução nas emissões decorrente da introdução da UAM.

A demanda por viagens urbanas via UAM resultou em uma redução mais significativa das emissões de CO₂ em comparação com viagens de acesso a aeroportos, com reduções anuais nas emissões da ordem de 90 mil toneladas por ano (CHO; KIM, 2022).

Ao traçar um panorama regulatório em diversos países, Wiedemann et al. (2024) aborda, entre outros, os casos dos Emirados Árabes Unidos (especialmente em Dubai, sua maior cidade) e Singapura.

Dubai é caracterizada por uma política de AAM altamente desenvolvida e abrangente, incluindo o CAR-UAM e a Lei nº 04 de 2020, que aborda 15 requisitos regulatórios. O emirado adota uma estratégia de “*first-mover*” para obter benefícios sociais e estimular uma indústria competitiva de manufatura e serviços (WIEDEMANN et al., 2024).

A “Lei dos Drones” define papéis claros para órgãos como a Autoridade de Aviação Civil de Dubai (DCAA), responsável pela implementação geral; os Serviços de Navegação Aérea de Dubai (DANS), pela gestão do espaço aéreo; os Projetos de Engenharia de Aviação de Dubai (DAEP), pelo desenvolvimento de infraestrutura; e a Polícia de Dubai (DP), pela segurança.

Singapura também possui uma estrutura regulatória avançada para UAM, integrada à sua estratégia “*Smart Nation*”, voltada ao fomento de tecnologias e novas oportunidades. Um diferencial é sua política unificada para sistemas de aeronaves não tripuladas, sem distinção rígida entre drones e UAM. A colaboração é fundamental, com um Memorando de Entendimento assinado com a EASA e a Airbus para regulamentação da UAM.

Dubai e Singapura compartilham requisitos abrangentes de documentação, especificações de veículos, centros de comando, seguros e procedimentos de emergência (WIEDEMANN et al., 2024).

Yan, Wang e Qu (2024b) apontam que em cidades como Nova Iorque e São Paulo, empresas de rede de transporte como Uber, Airbus e Blade UAM passaram a disponibilizar serviços de compartilhamento aéreo e fretamento. As duas cidades são identificadas como grandes centros urbanos com problemas de congestionamento e mobilidade, o que indica potencial interesse em soluções UAM.

4.4 Avaliação do impacto da implantação de UAM

A avaliação do impacto social da implantação da UAM enfrenta o desafio da insuficiência de dados empíricos consolidados que permitam mensurar - em valor monetário - suas externalidades. Diante de tal situação, a abordagem metodológica adotada nesta avaliação baseia-se na construção de cenários comparativos - um cenário base (sem o uso de eVTOLs) e cenários projetados correspondentes a diferentes fases de maturidade do modal. Essa estratégia permite analisar, de forma qualitativa e prospectiva, os possíveis efeitos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da adoção gradual da UAM.

Para a avaliação, foram escolhidos cenários referentes às fases de maturidade em relevância social e econômica propostas por Grandl, Salib e Kirsch (2021) no estudo “*The Economics of Vertical Mobility: A Guide for Investors, Players, and Lawmakers*”.

O cenário base representa o contexto atual de mobilidade urbana, em que o transporte terrestre domina os deslocamentos intraurbanos e interurbanos de curta distância.

Nele, como já descrito, persistem problemas como congestionamentos, altos custos de tempo, emissões elevadas e desigualdades no acesso à mobilidade.

No cenário base, a mobilidade aérea urbana é representada apenas pelo uso de helicópteros, com acesso restrito à elite econômica da população, em razão de preços proibitivos e de infraestrutura pouco desenvolvida.

A partir desse ponto de referência, são definidos outros dois níveis de maturidade da UAM:

- Fase 1 (“Fazer acontecer”): algumas pessoas utilizam eVTOLs em algumas ocasiões, a exemplo de viagens de negócios;
- Fase 2 (“Tornar relevante”): todas as pessoas utilizam eVTOLs em algumas ocasiões.

A Figura 11 abaixo ilustra as fases que representam os diferentes cenários.

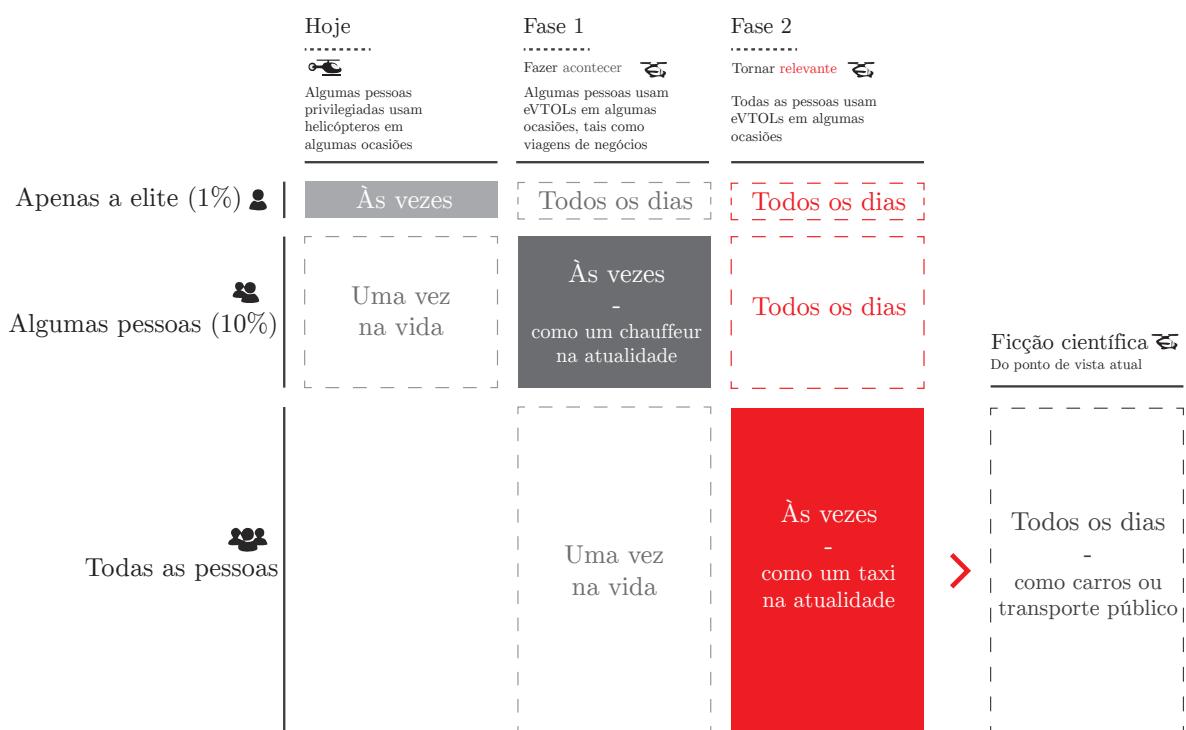


Figura 11 – Fases de desenvolvimento da mobilidade vertical

Fonte: Adaptado de Grandl, Salib e Kirsch (2021), tradução nossa

Destaque-se que, conforme indicado na Figura 11, após a Fase 2 haveria uma fase em que todas as pessoas utilizariam eVTOLs todos os dias, como carros ou transporte público. Tal cenário, contudo, é apontado como “ficção científica”, vez que a liberdade de decolagens e pouso é limitada pela necessidade de infraestrutura de vertiportos (GRANDL; SALIB; KIRSCH, 2021).

Uma avaliação de cada fase permite observar a evolução dos impactos diretos e indiretos, positivos e negativos, que compõem o balanço das externalidades da UAM. Para a avaliação, foram consideradas as externalidades identificadas na bibliografia analisada, dispostas nas Tabelas 7 e 8, com exceção de (i) serviços críticos e de emergência e (ii) fomento à inovação, vez que entende-se que a natureza dos seus benefícios não é impactada pelos cenários adotados.

Sobre a Fase 1, prevista para o período entre os anos de 2025 e 2027, em que são esperados utilização diária de eVTOLs pela elite e uso em ocasiões específicas por uma pequena faixa da população, o estudo de Grandl, Salib e Kirsch (2021) tece as seguintes suposições:

- A frota global de eVTOLs terá um volume de 0 a 1.000 unidades, variando entre previsões conservadora, de base e progressiva;
- A UAM será um serviço para ocasiões especiais;
- A infraestrutura de heliportos existente será adaptada para processamento de voos de eVTOLs;
- Os eVTOLs suportarão um volume de cerca de 15 viagens diárias;
- Os serviços serão inicialmente disponibilizados em poucas cidades definidas como “ambientes de teste”.

Nessa fase, é possível esperar um aumento discreto da poluição sonora nas regiões centrais de negócios (CBDs). Isso se deve ao fato de que o volume inicial de operações de eVTOLs não implicará substituição significativa de modais terrestres, adicionando apenas um componente adicional de ruído ao já existente proveniente do tráfego urbano.

De modo análogo, o impacto sobre a poluição visual é considerado pouco relevante, uma vez que não se espera que a frequência de voos nessa fase será suficiente para alterar perceptivelmente a paisagem urbana.

Quanto à segurança operacional, estima-se que não ocorra aumento expressivo no custo social decorrente de acidentes, dado o baixo volume de aeronaves e, consequentemente, de voos realizados. Por essa mesma razão, a probabilidade de colisões com aves é considerada residual.

No âmbito econômico e laboral, a substituição marginal de viagens terrestres por voos de eVTOL não deverá gerar realocação significativa de empregos entre modais. Entretanto, mesmo nesta fase inicial, é razoável projetar a criação de novos postos de trabalho em setores diretamente vinculados ao novo modal, como engenharia de desenvolvimento de produto, controle e gestão do tráfego aéreo, operação de veículos e gestão da infraestrutura vertiportuária.

No que se refere à infraestrutura urbana, considerando-se que o número de vertiportos será limitado e que o volume de operações aéreas permanecerá reduzido, não se esperam impactos substanciais sobre a rede elétrica de distribuição.

Sob o ponto de vista social, observa-se que, em áreas onde há proximidade entre CBDs e zonas residenciais, pode ocorrer aumento perceptível do desconforto relacionado à privacidade, decorrente da sobreposição de trajetórias de voo sobre espaços habitados. Além disso, dado que a maior parte da população não terá acesso rotineiro ao serviço de eVTOLs, não se projeta redução significativa dos congestionamentos nem diminuição relevante das emissões de poluentes atmosféricos nessa fase inicial.

Por outro lado, espera-se que a implantação pioneira do modal em determinadas localidades (*first-movers*) gere benefícios indiretos sob a forma de atração turística e fortalecimento da imagem de inovação urbana.

Mesmo com uma frota operacional reduzida, a coleta sistemática de dados sobre operação, tráfego e condições meteorológicas locais constituirá um ativo estratégico para o desenvolvimento da fase posterior, contribuindo para o avanço de áreas como micrometeorologia urbana e modelagem de tráfego aéreo em baixa altitude.

Na Fase 2, com início previsto para o ano de 2035, Grandl, Salib e Kirsch (2021) esperam que os eVTOLs passem a ser utilizados diariamente por parte da população, e que sejam acessíveis a todos, assumindo as seguintes premissas:

- A frota global de eVTOLs terá um volume de 3.000 a 43.000 unidades, variando entre previsões conservadora, de base e progressiva;
- A UAM estará integrada com modais terrestres, através de uma rede de vertiportos.

Projeta-se um aumento significativo da poluição sonora, especialmente nas áreas centrais e nos corredores de alta densidade de tráfego aéreo. O elevado número de voos tenderá a produzir uma alteração substancial na paisagem urbana, com impacto relevante na percepção de poluição visual e na qualidade estética dos espaços metropolitanos.

A complexificação da malha de rotas aéreas, necessária para acomodar o crescimento do número de eVTOLs, eleva a probabilidade de incidentes operacionais, incluindo colisões entre eVTOLs, quedas e interações indesejadas com edificações altas. Essa mesma complexidade pode exercer efeitos adversos sobre a fauna urbana e periurbana, sobretudo aves, cuja rota de voo natural tende a se sobrepor às novas trajetórias aéreas de baixa altitude.

No âmbito energético e de infraestrutura, o aumento do número de vertiportos impõe a necessidade de ampliação da capacidade da rede de distribuição elétrica, a fim de suportar as cargas associadas às operações de recarga simultânea. Em períodos de

pico de demanda, é possível que usuários convencionais da rede elétrica sejam afetados por variações na qualidade do fornecimento de energia, configurando uma externalidade negativa indireta.

Quanto aos impactos sociais, a instalação de vertiportos e rotas aéreas em áreas predominantemente residenciais tende a gerar desconforto relacionado à privacidade e à exposição sonora, ampliando tensões entre eficiência de mobilidade e qualidade de vida urbana. Apesar da maior disponibilidade de eVTOLs para a população, não se antecipa uma substituição significativa dos modais terrestres, pois a maioria dos deslocamentos cotidianos (especialmente os de padrão casa-trabalho-casa) permanecerá dependente do transporte rodoviário - incluídos os deslocamentos de acesso aos vertiportos. Consequentemente, o impacto sobre congestionamentos urbanos e emissões de gases de efeito estufa deve permanecer modesto.

No plano econômico e laboral, a geração de empregos diretos relacionados à operação e manutenção dos eVTOLs tende a ser moderada, uma vez que o setor deverá incorporar tecnologias avançadas de automação e controle operacional. Por outro lado, a disponibilidade de infraestrutura aérea abrangente poderá ampliar o acesso a áreas remotas, contribuindo para a redução de desigualdades territoriais e o fortalecimento de economias locais.

Sob o aspecto cultural e de percepção pública, o caráter de novidade e atratividade turística observado na fase inicial tende a se diluir com a difusão do modal em múltiplas cidades, reduzindo seu valor simbólico.

O aumento do volume de voos viabilizará a coleta de dados em larga escala, permitindo melhorias substanciais na precisão de modelos de previsão meteorológica e no monitoramento de fenômenos climáticos extremos.

De modo a identificar relações dos impactos da implantação nas duas fases previstas com as externalidades identificadas, ainda que na ausência de dados monetários, foram avaliados os indicadores de performance social e ambiental MUSE (SIMIć et al., 2024) descritos na Tabela 14, no Anexo A. Os impactos esperados nos indicadores encontram-se dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Avaliação dos impactos por meio dos indicadores MUSE

Aspecto	Indicador MUSE	Unidade	Impacto esperado (Fase 1)	Impacto esperado (Fase 2)
	NO-1: Exposição da população a ruído em determinada área	pessoa	Aumento moderado da quantidade de pessoas expostas a ruído de eVTOLs em horário comercial, e valor inexpressivo fora do horário comercial.	Aumento relevante da quantidade de pessoas expostas a ruído com o aumento da quantidade de rotas e voos.
	NO-2: Exposição (manhã-tarde-noite) da população a ruído em determinada área	pessoa	Considerando a utilização diária apenas pela elite, a exposição a um nível de limite de dBA ao longo de todo o dia não deve apresentar valor expressivo.	Com a utilização diária por uma parte da população (não apenas a elite), espera-se valor significativo de pessoas expostas ao valor limite de dBA ao longo do dia.
	NO-3: Exposição da população a ruído para determinada trajetória	pessoa	Não se aplica (valor específico para uma dada trajetória).	Não se aplica (valor específico para uma dada trajetória).
	NO-4: Índice pessoas-eventos para determinada área	N.pessoa	Aumento moderado em horário comercial, e valor inexpressivo fora do horário comercial.	Aumento expressivo em horário comercial, e moderado fora do horário comercial.
Polução sonora (ruído)	NO-5: Duração da exposição da população a ruído em determinada área	D.pessoa	Considerando o baixo volume de voos, não se espera que as exposições sejam duradouras.	Com voos mais frequentes, espera-se um aumento de voos consecutivos, aumentando assim a duração de exposição.
	NO-6: Aumento da exposição da população a ruído em determinada área em função dos eventos	dB.pessoa	Dado que a composição de ruído de fundo com o ruído de eVTOLs consiste em soma em escala logarítmica, áreas com maior ruído de fundo sofrerão menos impacto com a poluição sonora da UAM, enquanto em áreas de maior silêncio (especialmente aquelas em que não há volume de tráfego terrestre relevante) espera-se um valor elevado do aumento da exposição.	Com o volume superior de voos, é esperado que o aumento do ruído em dB seja superior ao experimentado na Fase 1, com a composição de ruído de voos simultâneos.
	NO-7: Exposição intermitente da população a ruído em determinada área	%pessoa	Espera-se valor baixo na Fase 1, dado o volume baixo de voos. Como o indicador considera o ruído de fundo na composição do ruído constante, áreas com maior ruído de trânsito terrestre podem sofrer menor impacto.	Com um volume superior de voos, espera-se que o valor do indicador seja elevado (aumenta a chance de múltiplas passagens de voos pela área em determinado espaço de tempo).

Continuação - Avaliação dos impactos por meio dos indicadores MUSE

Aspecto	Indicador MUSE	Unidade	Impacto esperado (Fase 1)	Impacto esperado (Fase 2)
Poluição visual (desconfiguração da paisagem)	VP-1 a VP-3: Pessoas expostas a poluição visual	pessoa	eVTOLs visíveis esporadicamente, sem gerar saturação visual.	Céu frequentemente ocupado, com aumento da sensação de “poluição visual” e perda de qualidade paisagística.
	VP-4 a VP-8: Exposição agrada em área	pessoa.vp.h; pessoa	Impactos localizados próximos a vertiportos, percepção limitada.	Impacto generalizado em áreas urbanas e suburbanas, aumento da percepção negativa, sobretudo em regiões densas.
	VP-9: Exposição visual por quilômetro	%pessoa	Baixo volume de tráfego e cobertura limitada.	Cobertura aérea densa com maior impacto visual e percepção de vigilância constante.
Impactos em privacidade	PC-1 a PC-5: Pessoas expostas/irritadas ou visualmente observadas	pessoa; pessoa.vp.h	Baixo risco de invasão de privacidade, com voos pontuais e previsíveis.	Percepção generalizada de vigilância aérea, em meio a preocupações amplas com coleta de dados e câmeras embarcadas.
Accesso e equidade	AE-1: Entregas de bens em áreas sem conexão de transportes ou com conexão limitada	número	Pouco ou nenhum benefício, serviço concentrado em zonas ricas	Maior cobertura territorial e melhora da conectividade em regiões remotas e carentes.
	AE-2: Tempo de viagem reduzido para entregas relacionadas a atividades de saúde	segundos	Benefício restrito a serviços premium.	Democratização do acesso, ganho social real em saúde pública.
	AE-3 e AE-4: Desvios de ruído e poluição visual em relação à média	número	Desigualdade alta, com a elite menos exposta, e periferias pouco impactadas.	Maior homogeneidade da exposição, riscos mais distribuídos, mas com sensação de injustiça em áreas vulneráveis.

Continuação - Avaliação dos impactos por meio dos indicadores MUSE

Aspecto	Indicador MUSE	Unidade	Impacto esperado (Fase 1)	Impacto esperado (Fase 2)
EM-1 a EM-3: Emissão de CO ₂ e consumo por voos e trajétorias	gCO ₂ ; kWh; kgCO ₂		Forte dependência da matriz energética limpa.	Com maior eficiência energética, a média de emissão por voo pode diminuir com uma maior maturidade da UAM.
Emissões de CO ₂	EM-4: Emissão de CO ₂ -eq em determinada área	kg CO ₂ -eq/h	Emissões baixas pela baixa quantidade de operações.	Emissões totais maiores pelo volume de voos, mas eficiência por passageiro tende a melhorar com aumento de escala.
	EM-5: Redução na emissão de CO ₂ -eq em determinada área	kg CO ₂ -eq/h	Impacto marginal sobre a mobilidade urbana.	Potencial relevante de redução de emissões, se substituir deslocamentos terrestres.
Influência econômica	EC-1: Área de influência econômica positiva EC-2: Área de influência econômica negativa	km ²	Geração de empregos e investimentos concentrados no setor de luxo e tecnologia. Sem impacto perceptível em valores imobiliários.	Novos serviços e empregos de base técnica, estímulo ao desenvolvimento urbano. Possível desvalorização de imóveis sob rotas frequentes e necessidade de maior regulação do uso do espaço aéreo urbano.
Segurança (acidentes, colisões)	PS-1 e PS-2: Exposição e duração de drones em voo baixo	drones; minutos	Com o baixo volume de voos, não se espera grande volume de acidentes.	Maior complexidade das rotas e volume de voos podem gerar número relevante de acidentes.
Fauna (<i>bird strikes</i> e incomodo em geral)	WL-1 a WL-6: Exposição, incomodo e disruptão da fauna nativa	fauna silvestre	Impactos limitados a áreas pontuais - fauna urbana pouco afetada, com nível de ruído e presença sensíveis. Alterações mínimas detectáveis.	Perturbações contínuas em ecossistemas urbanos e perurbanos, com risco maior a aves e espécies sensíveis. Aumento expressivo de ruído e sobrevoos em áreas naturais. Redução de biodiversidade local se não houver regulação.

Fonte: Elaboração própria, com base nos indicadores em (SIMIC et al., 2024)

Destaque-se que a descrição das fases por Grandl, Salib e Kirsch (2021) são consonantes com a natureza esperada de mercado de nicho atribuída à UAM nos estudos de Olariaga (2025b), Suo et al. (2024), Straubinger et al. (2020) e Sadrani et al. (2025).

Entendida como uma “fase de transição”, a avaliação qualitativa das externalidades na Fase 1 aponta para um possível saldo social positivo, com pequena expressividade de externalidades negativas e preponderância das externalidades positivas avaliadas. Do ponto de vista de equidade, contudo, nessa fase a UAM distancia-se de um ideal de modal que proponha-se a solucionar problemas para a população como um todo - seja pelos preços proibitivos das viagens ou pela utilização de infraestrutura existente de heliportos, que concentram-se em edificações de grande valor econômico.

Com o aumento do volume de voos, contudo, a avaliação do impacto social da UAM na Fase 2 aponta que externalidades negativas aumentam em níveis relevantes, enquanto benefícios sociais podem ter crescimento moderado.

Considerações finais

Os objetivos propostos para o presente trabalho - notadamente (i) a identificação de possíveis externalidades negativas e positivas na implantação da UAM, (ii) análise de políticas públicas que abordem as externalidades e (iii) análise bibliométrica da produção científica disponível - foram cumpridos ao longo da pesquisa realizada.

Os resultados, contudo, não limitaram-se à listagem de externalidades identificadas. A leitura da bibliografia permitiu confirmar aspectos de equidade como fatores determinantes para o sucesso da UAM.

Para enfrentar potenciais disparidades sociais, políticas públicas devem buscar ampliar a acessibilidade da UAM além de uma base inicial de usuários de alta renda, explorando incentivos financeiros que tornem o serviço mais acessível a um público mais amplo, incluindo viajantes não corporativos.

No entanto, autoridades governamentais e de aviação precisam avaliar cuidadosamente as implicações de longo prazo e os possíveis efeitos colaterais negativos desse tipo de apoio financeiro. O valor do tempo (*value of time* - VOT) para os usuários da UAM é notavelmente elevado, superior ao do associado ao automóvel particular e ao dos táxis, o que indica que aqueles que mais valorizam o tempo, em geral indivíduos de alta renda, constituem o mercado-alvo primário.

Uma diretriz política crítica para a implementação da UAM é sua integração harmoniosa com os sistemas de transporte terrestre já existentes, posicionando o modal como componente central da mobilidade como serviço (MaaS). Essa integração é vital para garantir transferências eficientes e experiências amigáveis para os usuários, facilitando, assim, maior inclusão social.

Tal abordagem pode incorporar tanto pessoas que não possuem automóveis quanto operadores de táxi já atuantes no ecossistema da UAM. As políticas devem promover eficiência operacional e o desenvolvimento de infraestrutura essencial para apoiar essa integração.

Estudos indicam que a demanda por UAM depende fortemente do nível de renda, do valor da tarifa e de atrasos nas viagens, sugerindo que políticas focadas na redução de tarifas e no aumento da eficiência operacional para minimizar atrasos são fundamentais.

A implementação da UAM deve gerar diversos custos externos, semelhantes àqueles associados ao tráfego rodoviário convencional, ainda que com aeronaves eletricamente propulsionadas. Entre os principais efeitos sociais negativos identificados destacam-se a poluição sonora, a intrusão visual e a segurança das operações de UAM.

Ademais, um modelo de UAM sob demanda pode acarretar perdas de eficiência devido a tempos de espera potenciais. Uma preocupação relevante é a possibilidade de a UAM induzir à expansão urbana desordenada, ao influenciar escolhas de localização de empresas e residências, criando, assim, novos desafios para o desenvolvimento urbano.

Para mitigar essas externalidades negativas, autoridades regulatórias podem precisar intervir por meio de diferentes estratégias. Entre elas estão o controle do preço, da qualidade ou da quantidade dos serviços de UAM. Cenários específicos de política sugeridos para consideração incluem concessões, regulamentação de preços-teto, precificação em horário de pico, tributação, promoção da concorrência no mercado e subsídios de infraestrutura. Essas ferramentas são essenciais para garantir acessibilidade, assegurar equidade no acesso e lidar com os impactos ambientais e espaciais da UAM.

Como restou comprovado nos estudos analisados, a percepção de segurança da UAM influencia fortemente a aceitação pública e o comportamento de escolha dos usuários. Por esse motivo, as políticas devem fomentar transparência e comunicação clara a respeito da segurança da UAM, a fim de construir e manter a confiança do público. Isso é particularmente importante diante da ausência, até o momento, de um histórico robusto de segurança para as aeronaves de UAM.

Estabelecendo paralelos com a entrada de serviços de transporte por aplicativo, como o Uber, a literatura sugere que uma abordagem regulatória adaptativa é crucial para a UAM. Essa abordagem deve equilibrar a inovação tecnológica com a implementação de salvaguardas sociais. Evitar tanto a proibição absoluta quanto a desregulação irrestrita é fundamental para alcançar ganhos significativos de bem-estar social.

Tanto a análise bibliométrica quanto a busca por literatura ao longo deste trabalho revelaram uma lacuna significativa no que diz respeito a uma análise econômico-ambiental da UAM. Embora exista um conjunto expressivo de estudos voltados para questões técnicas e operacionais, são relativamente escassos os artigos que abordam de forma sistemática os aspectos econômicos do custo social de sua implantação.

As exceções concentram-se, sobretudo, no trabalho do Projeto MUSE referente a indicadores de performance ambiental da UAM (SIMIć et al., 2024) e em trabalhos que discutem externalidades negativas mais visíveis (ou que ocorrem em outros modais mais consolidados), como o ruído e os riscos à segurança, enquanto outras dimensões - como impactos sobre o bem-estar coletivo, a distribuição de benefícios e custos ou a integração com políticas públicas de mobilidade - permanecem pouco exploradas.

Nesse contexto, a existência de um *framework* como o U-Space oferece uma oportunidade promissora. Ao padronizar arquiteturas, indicadores e métricas, tais estruturas possibilitam a criação de simulações robustas, capazes de explorar diferentes cenários de implantação da UAM. O uso de poderio computacional, associado a metodologias de modelagem avançada, torna factível a quantificação de custos e benefícios sociais decorrentes

da operação de veículos aéreos urbanos, fornecendo um suporte empírico relevante para a formulação de políticas públicas baseadas em evidências. Assim, o U-Space não apenas promove a harmonização regulatória, mas também se configura como uma ferramenta para reduzir incertezas e subsidiar decisões de investimento e regulação.

A avaliação qualitativa dos impactos sociais através das fases de maturidade da implantação da UAM permitiu identificar que externalidades negativas podem sobrepor benefícios sociais para maiores volumes de operações. Sem o estabelecimento de valores monetários para os custos e benefícios sociais, contudo, não é possível determinar qual o ganho social para a escala esperada da UAM.

A continuidade de pesquisas que preencham esse vazio acadêmico é fundamental para consolidar a UAM como objeto legítimo de análise socioeconômica. Estudos que busquem mensurar externalidades, comparar a UAM com outras soluções e avaliar impactos distributivos podem desconstruir a percepção, ainda presente em certos círculos, de que a UAM representa uma “solução em busca de um problema”.

Pelo contrário, ao evidenciar seus efeitos econômicos e sociais, tanto positivos quanto negativos, a pesquisa acadêmica terá papel essencial na construção de narrativas mais realistas e fundamentadas, capazes de orientar a sociedade e o poder público em escolhas estratégicas sobre sua adoção, e que se afastem de um aspecto de “crescimento pelo crescimento”, já mencionada *growthmania*.

Por fim, deve-se reconhecer que a implantação de um modal tão disruptivo quanto a UAM terá impactos transversais sobre a sociedade. A análise econômica dos custos de oportunidade é, nesse sentido, indispensável. Estudos futuros devem se dedicar a comparar, de forma abrangente, as alternativas disponíveis para enfrentar os desafios da mobilidade urbana, variando conforme o contexto de cada cidade.

Isso significa confrontar os benefícios potenciais da UAM com investimentos em transporte público de massa, infraestrutura cicloviária e outros incentivos à mobilidade ativa, corredores de ônibus ou soluções baseadas em tecnologias digitais. Apenas a partir de uma perspectiva comparativa, que considere os diferentes caminhos possíveis, será possível avaliar com clareza se a UAM deve ocupar papel central ou complementar nas políticas de mobilidade urbana do futuro.

Referências

- ABDELFATTAH, L.; DEPONTE, D.; FOSSA, G. The 15-minute city: interpreting the model to bring out urban resiliencies. **Transportation Research Procedia**, Elsevier BV, v. 60, p. 330–337, 2022. ISSN 2352-1465. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.043>>.
- AL-HADDAD, C. et al. Factors affecting the adoption and use of urban air mobility. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 132, p. 696–712, fev. 2020. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.020>>.
- ALJOUFIE, M. et al. Urban growth and transport: understanding the spatial temporal relationship. In: **Urban Transport XVII**. WIT Press, 2011. (UT11). ISSN 1746-4498. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2495/UT110271>>.
- ANAC. **Nota Técnica nº 3/2023/GCEP/SPL: Proposta regulatória de requisitos PEL para pilotos e mecânicos de aeronaves VTOL**. 2023. Documento interno / Nota Técnica. SEI nº 8998819, assinatura eletrônica de 21/08/2023; acesso mediante consulta ao sistema SEI da ANAC.
- ANAC. **Nota Técnica nº 1/2024/GCEP/SPL: Regulamentação inicial de requisitos PEL para pilotos e mecânicos de manutenção aeronáutica relacionados a aeronaves com capacidade de pouso e decolagem verticais – VTOLs**. 2024. Documento técnico interno / Nota Técnica.
- ANAC. **Anac divulga resultado do chamamento público para elaboração de regras para vertiportos**. 2025. Comunicado no portal do Governo Federal. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2025/anac-divulga-resultado-do-chamamento-publico-para-elaboracao-de-regras-para-veriportos>>.
- ANAC. **ANACpedia - Aeronavegabilidade: definição**. 2025. <Https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por-por/tr2926.htm>.
- ANDRÉ, N.; HAJEK, M. Robust environmental life cycle assessment of electric vtol concepts for urban air mobility. In: **AIAA Aviation 2019 Forum**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2514/6.2019-3473>>.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, Elsevier BV, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017. ISSN 1751-1577. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>>.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. 1. ed. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BARRADO, C. et al. U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. **Aerospace**, MDPI AG, v. 7, n. 3, p. 24, mar. 2020. ISSN 2226-4310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/aerospace7030024>>.

- BASNÉR, M. et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. **The Lancet**, Elsevier BV, v. 383, n. 9925, p. 1325–1332, abr. 2014. ISSN 0140-6736. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X)>.
- BENNACEUR, M.; DELMAS, R.; HAMADI, Y. Passenger-centric urban air mobility: Fairness trade-offs and operational efficiency. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier BV, v. 136, p. 103519, mar. 2022. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2021.103519>>.
- BHEST. **Análise Preliminar de Segurança Operacional para eVTOLs e Helicópteros**. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/gerenciamento-da-seguranca-operacional/arquivos/apresentacoes-e-material-educativo/AnalisePreliminardeSegurancaOperacionalparaeVTOLSeHelicopterosvFinal.pdf>>.
- BIAN, H. et al. Assessment of uam and drone noise impact on the environment based on virtual flights. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier BV, v. 118, p. 106996, nov. 2021. ISSN 1270-9638. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106996>>.
- BIEHLE, T. Social sustainable urban air mobility in europe. **Sustainability**, MDPI AG, v. 14, n. 15, p. 9312, jul. 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su14159312>>.
- BIRİNÇİ, F. et al. Above-building parking area and urban plan arrangement proposal for civil aircraft: the case of türkiye. **Aviation**, Vilnius Gediminas Technical University, v. 29, n. 2, p. 118–128, jun. 2025. ISSN 1822-4180. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3846/aviation.2025.23652>>.
- BOCANEGRA, B. **Metodologia para valoração ambiental em estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA) de empreendimentos de infraestrutura de transportes rodoviários**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Econômica do Meio Ambiente) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017. Defendida em 27 de junho de 2017; orientador: Jorge Madeira Nogueira; coorientador: Joana D'arc Bardella Castro. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/31102>>.
- BROWNLOW, J. European evtol developers struggle: Volocopter & lilium. **Aerospace Tech Review**, Mar 2025. Publicado na seção “Innovation”. Disponível em: <<https://aerospacetechreview.com/european-evtol-developers-struggle-volocopter-lilium/>>.
- BUCHANAN, J. M. An economic theory of clubs. In: **Public Goods and Market Failures**. [S.l.]: Routledge, 2024. p. 193–208.
- BUTTON, K. **Transport Economics**. 3. ed. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2010. ISBN 9781847202891.
- CABUKOGLU, E. et al. Battery electric propulsion: An option for heavy-duty vehicles? results from a swiss case-study. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier BV, v. 88, p. 107–123, mar. 2018. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.013>>.

- CAPES. **Índice H para pesquisadores: entenda o que significa e como obter.** 2025. <https://www.periodicos.capes.gov.br/?option=com_pnews&component=Clipping&view=pnewsclipping&cid=970>. Portal de Periódicos CAPES.
- CARRERA, C. P. et al. A comprehensive and systematic literature review on flying cars in contemporary research. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, Shahid Chamran University of Ahvaz, IR, n. Online First, set. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.22055/jacm.2024.47083.4658>>.
- CETIN, E. et al. Implementing mitigations for improving societal acceptance of urban air mobility. **Drones**, MDPI AG, v. 6, n. 2, p. 28, jan. 2022. ISSN 2504-446X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/drones6020028>>.
- CHAGAS, A. L. S. Governo, escolha pública e externalidades. In: PINHO, D. B.; VASCONCELLOS, M. A. de; JUNIOR, R. T. (Ed.). **Manual de Economia**. 6. ed. [S.l.]: Editora Saraiva, 2011. cap. 12.
- CHANG, X. et al. Impacts of transportation networks on the landscape patterns-a case study of shanghai. **Remote Sensing**, MDPI AG, v. 14, n. 16, p. 4060, ago. 2022. ISSN 2072-4292. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/rs14164060>>.
- CHO, S.-H.; KIM, M. Assessment of the environmental impact and policy responses for urban air mobility: A case study of seoul metropolitan area. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 360, p. 132139, ago. 2022. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132139>>.
- CHRISTIAN, A.; CABELL, R. **Initial Investigation into the Psychoacoustic Properties of Small Unmanned Aerial System Noise**. [S.l.], 2017.
- CLARK, C.; PAUNOVIC, K. Who environmental noise guidelines for the european region: A systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI AG, v. 15, n. 11, p. 2400, out. 2018. ISSN 1660-4601. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15112400>>.
- COASE, R. H. The problem of social cost. **The Journal of Law and Economics**, University of Chicago Press, v. 3, p. 1–44, out. 1960. ISSN 1537-5285. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/466560>>.
- COKORILO, O. Urban air mobility: Safety challenges. **Transportation Research Procedia**, Elsevier BV, v. 45, p. 21–29, 2020. ISSN 2352-1465. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.058>>.
- COPPOLA, P.; FABIIS, F. D.; SILVESTRI, F. Urban air mobility demand forecasting: modeling evidence from the case study of milan (italy). **European Transport Research Review**, Springer Science and Business Media LLC, v. 17, n. 1, jan. 2025. ISSN 1866-8887. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s12544-024-00700-x>>.
- CORNES, R.; SANDLER, T. **The Theory of Externalities, Public Goods, and Club Goods**. Cambridge University Press, 1996. ISBN 9781139174312. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/cbo9781139174312>>.

- CROSIER, S. Johann-Heinrich von Thünen: Balancing Land-Use Allocation with Transport Cost. 2001. CSISS Classics. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/02r7z6qw>>.
- CUMMINGS, C.; MAHMASSANI, H. Comparing urban air mobility network airspaces: Experiments and insights. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, SAGE Publications, v. 2678, n. 4, p. 440–454, jul. 2023. ISSN 2169-4052. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/03611981231185146>>.
- DALY, H. E. Steady-state economics versus growthmania: A critique of the orthodox conceptions of growth, wants, scarcity, and efficiency. **Policy Sciences**, Springer Science and Business Media LLC, v. 5, n. 2, p. 149–167, jun. 1974. ISSN 1573-0891. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF00148038>>.
- DEKKER, J. Introducing free airspace, a way to solve europe's airspace capacity issues. **Transportation Research Procedia**, Elsevier BV, v. 56, p. 19–28, 2021. ISSN 2352-1465. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.003>>.
- DEVINE-WRIGHT, P. Rethinking nimbyism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action. **Journal of Community & Applied Social Psychology**, Wiley, v. 19, n. 6, p. 426–441, jan. 2009. ISSN 1099-1298. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/casp.1004>>.
- DIENSTMANN, J. S. et al. Gestão da inovação e avaliação de desempenho: processo estruturado de revisão da literatura. **Revista Produção Online**, Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO, v. 14, n. 1, p. 2–30, mar. 2014. ISSN 1676-1901. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v14.i1.1042>>.
- DLR German Aerospace Center. **Safety & Privacy in Urban Air Mobility: A User-Centric Design Approach**. 2022. Conference Presentation.
- DOOLE, M. et al. Constrained urban airspace design for large-scale drone-based delivery traffic. **Aerospace**, MDPI AG, v. 8, n. 2, p. 38, fev. 2021. ISSN 2226-4310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/aerospace8020038>>.
- DU, S. et al. Safety risk modelling and assessment of civil unmanned aircraft system operations: A comprehensive review. **Drones**, MDPI AG, v. 8, n. 8, p. 354, jul. 2024. ISSN 2504-446X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/drones8080354>>.
- DULIA, E. F.; SABUJ, M. S.; SHIHAB, S. A. M. Benefits of advanced air mobility for society and environment: A case study of ohio. **Applied Sciences**, MDPI AG, v. 12, n. 1, p. 207, dez. 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/app12010207>>.
- DUNFORD, R. et al. The pareto principle. **The Plymouth Student Scientist**, v. 7, n. 1, p. 140–148, 2014.
- EASA. **Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu>>.
- EASA. **Special Condition for Small-Category Vertical Take-Off and Landing (SC-VTOL)**. Cologne, Germany, 2023. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/special-conditions/sc-vtol>>.

- EASA. **What is U-Space.** 2025. <<https://www.easa.europa.eu/en/what-u-space>>.
- EHRHARDT, N.; HORLACHER, P. H.; STRAUBINGER, A. Innovation strategies for non-existent markets - profiting from urban air mobility. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 118, p. 102601, jul. 2024. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102601>>.
- EIßFELDT, H. Sustainable urban air mobility supported with participatory noise sensing. **Sustainability**, MDPI AG, v. 12, n. 8, p. 3320, abr. 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su12083320>>.
- ENSSLIN, L. **ProKnow-C, knowledge development process - constructivist.** 2010. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Patente pendente, Brasil.
- EUA. United states v. causby. **United States Reports**, v. 328, p. 256, 1946. Decisão em 27 de maio de 1946. Disponível em: <<https://supreme.justia.com/cases/federal/us/328/256/>>.
- EVANS, G. W. The built environment and mental health. **Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine**, Springer Science and Business Media LLC, v. 80, n. 4, p. 536–555, dez. 2003. ISSN 1471-8505. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/jurban/jtg063>>.
- FEARON, D. **Alfred Weber, Theory of the Location of Industries (1909).** 2002. CSISS Classics. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/1k3927t6>>.
- FIELDS, J. M. Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America (ASA), v. 93, n. 5, p. 2753–2763, maio 1993. ISSN 1520-8524. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1121/1.405851>>.
- FINN, R. L.; WRIGHT, D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications. **Computer Law & Security Review**, Elsevier BV, v. 28, n. 2, p. 184–194, abr. 2012. ISSN 2212-473X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clsr.2012.01.005>>.
- GAKENHEIMER, R. Urban mobility in the developing world. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 33, n. 7–8, p. 671–689, set. 1999. ISSN 0965-8564. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00005-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00005-1)>.
- GAO, Z. et al. Noise-aware and equitable urban air traffic management: An optimization approach. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier BV, v. 165, p. 104740, ago. 2024. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2024.104740>>.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- GJESTLAND, T. Assessment of helicopter noise annoyance: a comparison between noise from helicopters and from jet aircraft. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier BV, v. 171, n. 4, p. 453–458, abr. 1994. ISSN 0022-460X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1994.1133>>.

- GOUVEIA, M.; DIAS, V.; SILVA, J. Management of urban air mobility for sustainable and smart cities: Vertiport networks using a user-centred design. **Journal of Airline and Airport Management**, Omnia Publisher SL, v. 12, n. 1, p. 15, jun. 2022. ISSN 2014-4865. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3926/jairm.207>>.
- GRAMPELLA, M. et al. The impact of technology progress on aviation noise and emissions. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 103, p. 525–540, set. 2017. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.022>>.
- GRANDL, G.; SALIB, J.; KIRSCH, J. **The Economics of Vertical Mobility: A Guide for Investors, Players, and Lawmakers**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.porsche-consulting.com/sites/default/files/2023-04/the_economics_of_vertical_mobility_-_2021_c_porsche_consulting.pdf>.
- HAO, H. et al. Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The china 2025 case. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier BV, v. 122, p. 114–125, jul. 2017. ISSN 0921-3449. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.005>>.
- HARDIN, G. The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, 1968.
- HARIRAM, N.; MEGALINGAM, A.; SUDHAKAR, K. Flying cars and hyperloops: A glimpse into the future sustainable vehicles. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier BV, v. 75, p. 104196, mar. 2025. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2025.104196>>.
- HOFFMANN, R.; NISHIMURA, H.; GOMES, P. Exploring safety culture in urban air mobility: System of systems perspectives using enterprise architecture. **Systems**, MDPI AG, v. 12, n. 5, p. 178, maio 2024. ISSN 2079-8954. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/systems12050178>>.
- ISARD, W. **Location and Space-Economy: A General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, Trade, and Urban Structure**. Cambridge, MA: MIT Press, 1956.
- JAKOB, A.; CRAIG, J. L.; FISHER, G. Transport cost analysis: a case study of the total costs of private and public transport in auckland. **Environmental Science & Policy**, Elsevier BV, v. 9, n. 1, p. 55–66, fev. 2006. ISSN 1462-9011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2005.09.001>>.
- JANG, H. et al. Urban air mobility for airport access: Mode choice preference associated with socioeconomic status and airport usage behavior. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 124, p. 102719, abr. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102719>>.
- JANIC, M. Aviation and externalities: the accomplishments and problems. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier BV, v. 4, n. 3, p. 159–180, maio 1999. ISSN 1361-9209. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00003-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00003-6)>.

- JONES, P. The evolution of urban mobility: The interplay of academic and policy perspectives. **IATSS Research**, Elsevier BV, v. 38, n. 1, p. 7–13, jul. 2014. ISSN 0386-1112. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.iatssr.2014.06.001>>.
- JORDAN, A. et al. Systematic evaluation of cybersecurity risks in the urban air mobility operational environment. In: **2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)**. IEEE, 2022. p. 1–15. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICNS54818.2022.9771507>>.
- KELLEHER ENVIRONMENTAL. **Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles: The Technical, Environmental, Economic, Energy and Cost Implications of Reusing and Recycling EV Batteries — Summary Report**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.api.org/-/media/files/oil-and-natural-gas/fuels/ev%20battery%20reuse%20recyc%20api%20summary%20report%202024nov2020.pdf>>.
- KIM, S.; CHOI, Y.; CHANG, D. Techno-economic analysis of fuel cell powered urban air mobility system. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier BV, v. 50, p. 988–1004, jan. 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.281>>.
- KIM, S.; YEO, J.; KWON, Y. Understanding determinants of willingness to pay for airport shuttle service of urban air mobility. **Research in Transportation Business & Management**, Elsevier BV, v. 62, p. 101444, out. 2025. ISSN 2210-5395. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101444>>.
- LACERDA, R. T. d. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, FapUNIFESP (SciELO), v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012. ISSN 0104-530X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2012000100005>>.
- LEVINSON, D. M.; GILLEN, D.; KANAFANI, A. The social costs of intercity transportation: a review and comparison of air and highway. **Transport Reviews**, Informa UK Limited, v. 18, n. 3, p. 215–240, jul. 1998. ISSN 1464-5327. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01441649808717014>>.
- LI, T.; XU, X.; SHEN, L. An innovation management approach for electric vertical take-off and landing. **Sustainability**, MDPI AG, v. 16, n. 16, p. 7135, ago. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su16167135>>.
- LIBERACKI, A. et al. The environmental life cycle costs (elcc) of urban air mobility (uam) as an input for sustainable urban mobility. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 389, p. 136009, fev. 2023. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136009>>.
- LITMAN, T. **Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications**. 2. ed. Victoria Transport Policy Institute, 2009. Atualizado em outubro de 2016. Disponível em: <<https://www.vtpi.org/tca/>>.
- LIU, M. et al. Exploring the key technologies needed for the commercialization of electric flying cars: A levelized cost and profitability analysis. **Energy**, Elsevier BV, v. 303, p. 131991, set. 2024. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2024.131991>>.

- LIU, Y.; GAO, C. Assessing electric vertical take-off and landing for urban air taxi services: Key parameters and future transportation impact. **Sustainability**, MDPI AG, v. 16, n. 11, p. 4732, jun. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su16114732>>.
- LONG, Q. et al. Demand analysis in urban air mobility: A literature review. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 112, p. 102436, set. 2023. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102436>>.
- MA, Z. et al. Assessing the resilience of multi-modal transportation networks with the integration of urban air mobility. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 195, p. 104465, maio 2025. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2025.104465>>.
- MANKIW, N. G. **Principles of Microeconomics**. 7. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2014. ISBN 9781285165905.
- MARTENS, R.; BECKER, M. Urban air mobility noise: Further considerations on indoor space. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 2, p. 612, 2023.
- MASCIO, P. D.; SERRONE, G. D.; MORETTI, L. Vertiports: The infrastructure backbone of advanced air mobility-a review. **Eng**, MDPI AG, v. 6, n. 5, p. 93, abr. 2025. ISSN 2673-4117. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/eng6050093>>.
- MAYOR, K.; TOL, R. S. Aviation and the environment in the context of the eu-us open skies agreement. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 15, n. 2, p. 90–95, mar. 2009. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.09.018>>.
- MCNAB, R. M. Advanced air mobility, economic impacts, and equity considerations. **Journal of Economic Analysis**, Anser Press Pte. Ltd., v. 3, n. 2, p. 134–146, set. 2023. ISSN 2811-0943. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.58567/jea03020009>>.
- MERKERT, R.; BECK, M. J.; BUSHELL, J. Will it fly? adoption of the road pricing framework to manage drone use of airspace. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 150, p. 156–170, ago. 2021. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.001>>.
- MINCER, J. A. **Schooling, Experience, and Earnings**. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1974. ISBN 0-87014-265-8.
- MINER, P. et al. Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment. **Journal of Transport Geography**, Elsevier BV, v. 115, p. 103817, fev. 2024. ISSN 0966-6923. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817>>.
- MORADI, N.; WANG, C.; MAFAKHERI, F. Urban air mobility for last-mile transportation: A review. **Vehicles**, MDPI AG, v. 6, n. 3, p. 1383–1414, ago. 2024. ISSN 2624-8921. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/vehicles6030066>>.
- MOTTA, R. de C. Trabalho de Conclusão de Curso, **Perigo Aéreo: o uso indevido de drones e a responsabilidade civil decorrente da violação dos direitos à**

privacidade e à intimidade. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Direito) – Escola da Magistratura do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOURATIDIS, K.; PETERS, S.; WEE, B. van. Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier BV, v. 92, p. 102716, mar. 2021. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2021.102716>>.

MUDUMBA, S. V. et al. Modeling co2 emissions from trips using urban air mobility and emerging automobile technologies. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, SAGE Publications, v. 2675, n. 9, p. 1224–1237, abr. 2021. ISSN 2169-4052. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/03611981211006439>>.

MUMFORD, L. **The Culture of Cities**. Nova Iorque: Harcourt, Brace and Company, 1938. ISBN 978-0156233019.

NASA. **Extreme Makeover: Human Activities Are Making Some Extreme Events More Frequent or Intense**. 2021. Publicado em 8 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/extreme-makeover-human-activities-are-making-some-extreme-events-more-frequent-or-intense/>>.

NASA. **Urban Air Mobility Noise: Current Practice, Gaps, and Needs**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov>>.

OECD. **Internalising the Social Costs of Transport**. Paris: OECD Publications and Information Centre, 1994. Publicado através do Fórum Internacional de Transportes (ITF). Disponível em: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/94socialcosts_0.pdf>.

OLARIAGA, O. D. Análisis de la aceptación social de tecnología emergente. el caso de la movilidad aérea urbana. **Sociología y tecnociencia**, Universidad de Valladolid, v. 15, n. 2, p. 1–24, jun. 2025. ISSN 1989-8487. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.24197/st.2.2025.1-24>>.

OLARIAGA, O. D. Análisis del enfoque social sostenible de la tecnología emergente movilidad aérea urbana. **Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales**, Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, URBE, v. 27, n. 2, p. 705–723, maio 2025. ISSN 1317-0570. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.36390/telos272.17>>.

OLIVEIRA, G. C.; WILTGEN, F. Uma visão da mobilidade urbana: Passado, presente e futuro. **Revista Tecnologia**, Fundacao Edson Queiroz, v. 41, n. 1, fev. 2020. ISSN 0101-8191. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5020/23180730.2020.10043>>.

OMS. **Environmental Noise Guidelines for the European Region**. Copenhagen, 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>>.

OSTROM, E.; GARDNER, R. Coping with asymmetries in the commons: Self-governing irrigation systems can work. **Journal of Economic Perspectives**, American

- Economic Association, v. 7, n. 4, p. 93–112, nov. 1993. ISSN 0895-3309. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1257/jep.7.4.93>>.
- PARISI, F. Coase theorem. In: DURLAUF, S. N.; BLUME, L. E. (Ed.). **The New Palgrave Dictionary of Economics**. 2. ed. Palgrave Macmillan, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_517-2>.
- PARRY, I. W. H.; WALLS, M.; HARRINGTON, W. Automobile externalities and policies. **Journal of Economic Literature**, American Economic Association, v. 45, n. 2, p. 373–399, maio 2007. ISSN 0022-0515. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1257/jel.45.2.373>>.
- PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T. **Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992–2009): diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/527d5935-e32a-47d0-b877-c6a2fc3d4492>>.
- PEREIRA, R. H. M. et al. **Tendências e desigualdades da mobilidade urbana no Brasil I: o uso do transporte coletivo e individual**. Brasília, Brasil, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10713>>.
- PEREZ, D. et al. Advanced air mobility for commuting? an exploration of economic, energy, and environmental feasibility. **Transport Economics and Management**, Elsevier BV, v. 3, p. 135–152, dez. 2025. ISSN 2949-8996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.team.2025.03.001>>.
- PEREZ, G. de S. **Capital Humano e Desigualdade: Um Estudo sobre os Salários no Distrito Federal**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024. Programa de Pós-Graduação em Economia – Mestrado Profissional em Gestão Econômica de Finanças Públicas.
- PEÑA, A. D. The potential role of air taxis in reducing emissions and enhancing mobility: A case study of the philippines. **Sustainable Futures**, Elsevier BV, v. 9, p. 100586, jun. 2025. ISSN 2666-1888. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100586>>.
- PIGOU, A. **The Economics of Welfare**. 4. ed. Macmillan, 1938. (Papermac (London, England)). Disponível em: <https://oll-resources.s3.us-east-2.amazonaws.com/oll3/store/titles/1410/0316_Bk_Sm.pdf>.
- PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomics**. 8. ed. Boston, MA: Pearson Education, 2013. (The Pearson Series in Economics). ISBN 978-0-13-285712-3.
- PONS-PRATS, J.; ŽIVOJINOVIĆ, T.; KULJANIN, J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: Commuting in a flying vehicle as a new paradigm. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier BV, v. 166, p. 102868, out. 2022. ISSN 1366-5545. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2022.102868>>.
- POSTORINO, M. N.; SARNE, G. M. L. Reinventing mobility paradigms: Flying car scenarios and challenges for urban mobility. **Sustainability**, MDPI AG, v. 12, n. 9, p. 3581, abr. 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su12093581>>.

- PRAAG, B. M. S. V.; BAARSMA, B. E. Using happiness surveys to value intangibles: The case of airport noise. **The Economic Journal**, Oxford University Press (OUP), v. 115, n. 500, p. 224–246, dez. 2004. ISSN 1468-0297. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0297.2004.00967.x>>.
- PUKHOVA, A. et al. Flying taxis revived: Can urban air mobility reduce road congestion? **Journal of Urban Mobility**, Elsevier BV, v. 1, p. 100002, dez. 2021. ISSN 2667-0917. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.urbmob.2021.100002>>.
- RAGHUNATHA, A.; THOLLANDER, P.; BARTHEL, S. Addressing the emergence of drones – a policy development framework for regional drone transportation systems. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, Elsevier BV, v. 18, p. 100795, mar. 2023. ISSN 2590-1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2023.100795>>.
- RAJENDRAN, S.; SRINIVAS, S.; GRIMSHAW, T. Predicting demand for air taxi urban aviation services using machine learning algorithms. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 92, p. 102043, maio 2021. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102043>>.
- RIZZI, L. I.; MAZA, C. D. L. The external costs of private versus public road transport in the metropolitan area of santiago, chile. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 98, p. 123–140, abr. 2017. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.002>>.
- RIZZI, S. A. et al. Annoyance model assessments of urban air mobility vehicle operations. **Journal of Aircraft**, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), p. 1–16, jul. 2025. ISSN 1533-3868. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2514/1.C038188>>.
- SADRANI, M. et al. Challenges in urban air mobility implementation: A comparative analysis of barriers in germany and the united states. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 126, p. 102780, jun. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102780>>.
- SAMUELSON, P. Some uneasiness with the coase theorem. **Japan and the World Economy**, Elsevier BV, v. 7, n. 1, p. 1–7, maio 1995. ISSN 0922-1425. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0922-1425\(94\)00040-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0922-1425(94)00040-Z)>.
- SAMUELSON, P. Modern finance theory within one lifetime. In: **Mathematical Finance - Bachelier Congress 2000**. Springer Berlin Heidelberg, 2002. p. 41–45. ISBN 9783662124291. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-12429-1_2>.
- SAMUELSON, P. The resurrection of keynes. **New Perspectives Quarterly**, Wiley, v. 26, n. 2, p. 42–44, mar. 2009. ISSN 1540-5842. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-5842.2009.01070.x>>.
- SANSON, J. R. Aspectos comuns aos conceitos de bens públicos, externalidades e bens meritórios. **Cadernos de Finanças Públicas**, v. 20, n. 2, p. 1–32, 2020.
- SCHIPPER, F.; EMANUEL, M.; OLDENZIEL, R. Sustainable urban mobility in the present, past, and future. **Technology and Culture**, Project MUSE, v. 61, n. 1, p. 307–317, 2020. ISSN 1097-3729. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1353/tech.2020.0004>>.

- SCHIPPER, Y.; RIETVELD, P.; NIJKAMP, P. Environmental externalities in air transport markets. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 7, n. 3, p. 169–179, maio 2001. ISSN 0969-6997. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6997\(01\)00002-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00002-3)>.
- SCHNEIDER, N. Internalizing environmental externalities and the coase theorem. **World Journal of Applied Economics**, v. 8, n. 2, p. 93–100, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.22440/wjae.8.2.4>>.
- SENADO FEDERAL. **Projeto de Lei nº 743/2025 - Altera o Código Brasileiro de Aeronáutica e outras leis para regulamentar eVTOLs**. 2025. Autoria: Senador Esperidião Amin. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/167437>>.
- SESAR. **European Drones Outlook Study: Unlocking the Value for Europe**. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf>.
- SHI, Y. Aviation safety for urban air mobility: Pilot licensing and fatigue management. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Springer Science and Business Media LLC, v. 110, n. 1, fev. 2024. ISSN 1573-0409. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10846-024-02070-x>>.
- SHYR, M. C.; FARRAHI, A. H.; VERMA, S. Predictive workload model for air traffic controllers during uam operations. In: **2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)**. IEEE, 2024. p. 1–6. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/DASC62030.2024.10748765>>.
- SIEBERT, H. **Der Kobra-Effekt**. 1. ed. Munique, Alemanha: Piper, 2003. (Piper Taschenbuch).
- SIMIĆ, T. K. et al. U-space social and environmental performance indicators. **Drones**, MDPI AG, v. 8, n. 10, p. 580, out. 2024. ISSN 2504-446X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/drones8100580>>.
- SRIDHAR, B.; CHATTERJI, G. B. Airspace systems technologies-overview and opportunities. In: _____. **International Encyclopedia of Transportation**. Elsevier, 2021. p. 363–379. ISBN 9780081026724. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102671-7.10353-7>>.
- STEINER, M. Urban air mobility: Opportunities for the weather community. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 100, n. 11, p. 2131–2133, nov. 2019. ISSN 1520-0477. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-19-0148.1>>.
- STETTLER, M.; EASTHAM, S.; BARRETT, S. Air quality and public health impacts of uk airports. part i: Emissions. **Atmospheric Environment**, Elsevier BV, v. 45, n. 31, p. 5415–5424, out. 2011. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>>.
- STRAUBINGER, A. Policies addressing possible urban air mobility market distortions – a first discussion. **Transportation Research Procedia**, Elsevier BV, v. 41, p. 64–66, 2019. ISSN 2352-1465. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.013>>.

- STRAUBINGER, A. et al. An overview of current research and developments in urban air mobility – setting the scene for uam introduction. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 87, p. 101852, ago. 2020. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101852>>.
- STRAUBINGER, A.; VERHOEF, E. T.; GROOT, H. L. de. Will urban air mobility fly? the efficiency and distributional impacts of uam in different urban spatial structures. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier BV, v. 127, p. 103124, jun. 2021. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2021.103124>>.
- STUTZER, A.; FREY, B. S. Stress that doesn't pay: The commuting paradox*. **The Scandinavian Journal of Economics**, Wiley, v. 110, n. 2, p. 339–366, jun. 2008. ISSN 1467-9442. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9442.2008.00542.x>>.
- SUO, Y. et al. Exploring aam acceptance in tourism: Environmental consciousness's influence on hedonic motivation and intention to use. **Sustainability**, MDPI AG, v. 16, n. 8, p. 3324, abr. 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su16083324>>.
- SWÄRDH, J.-E.; GENELL, A. Marginal costs of road noise: Estimation, differentiation and policy implications. **Transport Policy**, Elsevier BV, v. 88, p. 24–32, mar. 2020. ISSN 0967-070X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.01.009>>.
- SWINBURN, T. K.; HAMMER, M. S.; NEITZEL, R. L. Valuing quiet. **American Journal of Preventive Medicine**, Elsevier BV, v. 49, n. 3, p. 345–353, set. 2015. ISSN 0749-3797. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.amepre.2015.02.016>>.
- TALIB, M. A. et al. Future aviation jobs: The role of technology in shaping skills and competencies. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, Elsevier BV, v. 11, n. 2, p. 100517, jun. 2025. ISSN 2199-8531. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100517>>.
- THIPPHAVONG, D. P. **Analysis of Electrical Grid Capacity by Interconnection for Urban Air Mobility**. [S.l.], 2022. NASA Technical Paper. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220006834/downloads/20220006834.pdf>>.
- THISSE, J.-F. Geografia econômica. In: CRUZ, B. de O. et al. (Ed.). **Economia Regional e Urbana: Teorias e métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2011. p. 17–42. ISBN 978-85-7811-110-6. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/livro_econregionalurbanaa.pdf>.
- THOMAS, K.; GRANBERG, T. A. Quantifying visual pollution from urban air mobility. **Drones**, MDPI AG, v. 7, n. 6, p. 396, jun. 2023. ISSN 2504-446X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/drones7060396>>.
- TOMASIELLO, D.; PEREIRA, R. H. M.; NADALIN, V. G. Os impactos desiguais do congestionamento urbano no acesso a empregos. **Texto para Discussão (TD) 2922**, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), sept 2023. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/portal/publicacao-item?id=854ccf4c-f1aa-4bdf-8135-7b7e90857e02>>.

- TORRES, G. M. R. et al. Subjective assessment of initial and mid-term uam operations and the impact on air traffic controllers' workload. In: **2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)**. IEEE, 2024. p. 1–5. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/DASC62030.2024.10749644>>.
- UGWUEZE, O. et al. Trends in evtol aircraft development: The concepts, enablers and challenges. In: **AIAA SCITECH 2023 Forum**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2514/6.2023-2096>>.
- VARNOUSFADERANI, E. S.; SHIHAB, S. A. Bird strikes in aviation: A systematic review for informing future directions. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier BV, v. 163, p. 110303, ago. 2025. ISSN 1270-9638. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2025.110303>>.
- VELAZ-ACERA, N.; GARCÍA, J. Álvarez; BORGE-DIEZ, D. Economic and emission reduction benefits of the implementation of evtol aircraft with bi-directional flow as storage systems in islands and case study for canary islands. **Applied Energy**, Elsevier BV, v. 331, p. 120409, fev. 2023. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120409>>.
- VENABLES, A. J. **Evaluating urban transport improvements: cost-benefit analysis in the presence of agglomeration and income taxation**. Paris: OECD Publishing, 2007. (OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Papers, 2007/16). Disponível em: <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/07venables.pdf>>.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2016.
- WEF. **Principles of the Urban Sky**. 2020. <<https://www.weforum.org/publications/principles-of-the-urban-sky/principles-of-the-urban-sky/>>. Publicado em 15 de setembro de 2020.
- WELLS, C. W. The road to the model t: Culture, road conditions, and innovation at the dawn of the american motor age. **Technology and Culture**, Project MUSE, v. 48, n. 3, p. 497–523, jul. 2007. ISSN 1097-3729. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1353/tech.2007.0142>>.
- WIEDEMANN, M. et al. Advanced air mobility: A comparative review of policies from around the world-lessons for australia. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, Elsevier BV, v. 24, p. 100988, mar. 2024. ISSN 2590-1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2023.100988>>.
- WILD, G. Urban aviation: The future aerospace transportation system for intercity and intracity mobility. **Urban Science**, MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 218, nov. 2024. ISSN 2413-8851. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/urbansci8040218>>.
- WOLFE, P. J. et al. Costs and benefits of us aviation noise land-use policies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier BV, v. 44, p. 147–156, maio 2016. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.010>>.

- WU, J. et al. What drives users to accept flying cars for urban air mobility? findings from an empirical study. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 119, p. 102645, ago. 2024. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102645>>.
- YAN, Y.; WANG, K.; QU, X. On the prediction of noise generated by urban air mobility (uam) vehicles. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 1, p. 016107, 2024.
- YAN, Y.; WANG, K.; QU, X. Urban air mobility (uam) and ground transportation integration: A survey. **Frontiers of Engineering Management**, Springer Science and Business Media LLC, v. 11, n. 4, p. 734–758, jun. 2024. ISSN 2096-0255. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s42524-024-0298-0>>.
- YANG, J. et al. A review on airspace design and risk assessment for urban air mobility. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 12, p. 157599–157611, 2024. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3481148>>.
- YUNUS, F. et al. Efficient prediction of urban air mobility noise in a vertiport environment. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier BV, v. 139, p. 108410, ago. 2023. ISSN 1270-9638. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2023.108410>>.
- ZHANG, J.; LIU, Y.; ZHENG, Y. Overall evtol aircraft design for urban air mobility. **Green Energy and Intelligent Transportation**, Elsevier BV, v. 3, n. 2, p. 100150, abr. 2024. ISSN 2773-1537. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geits.2024.100150>>.
- ZHAO, P. et al. Environmental impact analysis of on-demand urban air mobility: A case study of the tampa bay area. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier BV, v. 110, p. 103438, set. 2022. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.103438>>.
- ZHAO, Y.; FENG, T. Commuter choice of uam-friendly neighborhoods. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier BV, v. 192, p. 104338, fev. 2025. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2024.104338>>.
- ZHYRIAKOV, D.; PTAK, M.; SAWICKI, M. Urban air mobility, personal drones, and the safety of occupants-a comprehensive review. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, MDPI AG, v. 14, n. 2, p. 39, abr. 2025. ISSN 2224-2708. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/jsan14020039>>.
- ZIAKKAS, D.; NATAKUSUMA, H. C. Advanced air mobility(aam)and emergency services: The association of southeast asian nations(asean)case study. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier BV, v. 126, p. 102787, jun. 2025. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102787>>.
- ZIEHER, S. et al. Drones for automated parcel delivery: Use case identification and derivation of technical requirements. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, Elsevier BV, v. 28, p. 101253, nov. 2024. ISSN 2590-1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2024.101253>>.
- ZOLIN, R.; LEWIS, I. Air navigation services in australia and the united states: A comparative case study. **Case Studies in Business and Management**, Macrothink Institute, Inc., v. 1, n. 1, p. 96, maio 2014. ISSN 2333-3324. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5296/csbm.v1i1.5312>>.

ZORPETTE, G.; ACKERMAN, E. Evtol companies are worth billions—who are the key players? **IEEE Spectrum**, Feb 2022. Atualizado em 27 Mar 2024. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/evtol-air-taxi-industry>>.

Apêndices

APÊNDICE A – Código-fonte: script desenvolvido em linguagem Python para obtenção de *abstracts*

```

import pandas as pd
import requests
from time import sleep

caminho_arquivo = "Referencias_CAPES_BibTex.xlsx"

df = pd.read_excel(caminho_arquivo)

def buscar_crossref(titulo):
    url = "https://api.crossref.org/works"
    params = {
        "query.bibliographic": titulo,
        "rows": 1
    }
    try:
        r = requests.get(url, params=params, timeout=15)
        if r.status_code == 200:
            items = r.json().get("message", {}).get("items", [])
            if items:
                item = items[0]
                return {
                    "DOI": item.get("DOI", ""),
                    "Abstract": item.get("abstract", "").replace("<jats:p>", "").replace("</jats:p>", "").replace("\n", " "),
                    "Fonte": "CrossRef"
                }
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao buscar título: {titulo[:50]}... -> {e}")
    return {"DOI": "", "Abstract": "", "Fonte": ""}

dois, abstracts, fontes = [], [], []

```

```
for i, row in df.iterrows():
    resultado = buscar_crossref(str(row['title']))
    dois.append(resultado['DOI'])
    abstracts.append(resultado['Abstract'])
    fontes.append(resultado['Fonte'])
    print(f"[{i+1}/{len(df)}] DOI encontrado: {resultado['DOI']}") 
    sleep(1)

df["DOI"] = dois
df["Abstract"] = abstracts
df["Fonte"] = fontes

arquivo_saida = "Referencias_CAPES_Com_Doi_Abstract.xlsx"
df.to_excel(arquivo_saida, index=False)

print("Fim")
```

Anexos

**ANEXO A – Indicadores de performance
ambiental propostos no âmbito do Projeto
MUSE**

Tabela 14 – Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
NO-1: Exposição da população a ruído em determinada área	pessoa	O número de pessoas expostas a um nível de ruído equivalente superior a um certo limite em dBA por um período fixo de tempo em determinada área.
NO-2: Exposição (manhã-tarde-noite) da população a ruído em determinada área	pessoa	O número de pessoas expostas a um nível de ruído equivalente superior a um certo limite em dBA pelo período de um dia inteiro (24h) em determinada área.
NO-3: Exposição da população a ruído para determinada trajetória	pessoa	O número de pessoas expostas a um nível de exposição sonora superior a um determinado limite em dBA durante uma única operação de drone, por um período de tempo fixado pela trajetória do drone dentro de uma área. O mesmo pode ser realizado para uma única operação de drone para NO-1.
NO-4: Índice pessoas-eventos para determinada área	N.pessoa	O número de eventos N que excedem um determinado nível de ruído em dBA multiplicado pelo número de pessoas expostas durante um período de tempo fixo dentro de uma área.
NO-5: Duração da exposição da população a ruído em determinada área	D.pessoa	Uma determinada duração D de níveis de ruído que excedem um certo limite em dBA, multiplicada pelo número de pessoas expostas durante um período de tempo fixo dentro de uma área.
NO-6: Aumento da exposição da população a ruído em determinada área em função dos eventos	dB.pessoa	Diferença entre o ruído gerado pelos drones em sobrevoo e o nível de ruído de fundo local, multiplicada pelo número de pessoas expostas durante um período de tempo fixo dentro de uma área.
NO-7: Exposição intermitente da população a ruído em determinada área	%.pessoa	O número de pessoas multiplicado pela razão entre o som intermitente e o som contínuo (Razão de Intermitência) durante um período de tempo fixo dentro de uma área.

Continuação - Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
VP-1: Pessoas expostas a poluição visual em determinada trajetória	pessoa	O número de pessoas expostas a uma única operação de drone, ou seja, a soma dos indivíduos que conseguem ver o drone.
VP-2: Pessoas expostas a poluição visual em determinada trajetória a um limiar de concentração	pessoa	O número de pessoas expostas a uma concentração de poluição visual superior a um determinado limite durante uma única operação de drone.
VP-3: Pessoas expostas a poluição visual em determinada trajetória a limiares de concentração e tempo	pessoa	O número de pessoas expostas a uma concentração de poluição visual superior a um determinado limite por um período superior a T durante uma única operação de drone.
VP-4: Exposição a poluição visual em determinada trajetória	pessoa. vp. h	Exposição total à poluição visual percebida pelas pessoas expostas a uma única operação de drone.
VP-5: Pessoas expostas a poluição visual em determinada área	pessoa	O número de pessoas expostas ao tráfego de UAM dentro de uma área.
VP-6: Pessoas expostas a poluição visual em determinada área a um limiar de concentração	pessoa	O número de pessoas expostas a uma concentração de poluição visual superior a um determinado limite pelo menos uma vez ao dia dentro de uma área.
VP-7: Pessoas expostas a poluição visual em determinada área a limiares de concentração e tempo	pessoa	O número de pessoas expostas a uma concentração de poluição visual superior a um determinado limite por um período superior a T ao longo do dia dentro de uma área.

Continuação - Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
VP-8: Exposição a poluição visual em determinada área	pessoa. vp. h	Concentração total de poluição visual percebida pelas pessoas expostas ao tráfego de UAM dentro de uma área.
VP-9: Exposição visual por quilômetro	pessoa/ km	Quilômetros percorridos acima de uma zona multiplicados pela densidade populacional nessa zona.
PC-1: Pessoas visualmente perturbadas em determinada trajetória	pessoa	Número total de pessoas incomodadas por (presença de uma) única operação de drone.
PC-2: Pessoas expostas a drones sobrevoando em determinada trajetória	pessoa	Número total de pessoas visualmente expostas a um drone pairando a uma distância inferior a um determinado limite durante uma única operação de drone.
PC-3: Pessoas visualmente perturbadas em determinada área	pessoa	Número total de pessoas incomodadas pela presença de UAs dentro de uma área durante um período de tempo observado.
PC-4: Pessoas expostas a drones sobrevoando em determinada área	pessoa	Número total de pessoas visualmente expostas a drone(s) pairando a uma distância inferior a um determinado limite dentro de uma área durante um período de tempo observado.
PC-5: Duração da exposição visual a diferentes drones sobrevoando determinada área	pessoa. vp (drones sobre- vo- ando).h	A exposição visual acumulada a drones pairando em uma determinada área durante um determinado período de tempo.

Continuação - Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
AE-1: Entregas de bens em áreas sem conexão de transportes ou com conexão limitada	número	O número de entregas de bens e equipamentos para áreas com conexões de transporte limitadas ou inexistentes durante o período de tempo observado.
AE-2: Tempo de viagem reduzido para entregas relacionadas a atividades de saúde	segundos	A quantidade de tempo reduzido em entregas relacionadas à saúde realizadas por UAs em comparação com as entregas por transporte rodoviário durante o período de tempo observado.
AE-3: Desvio da exposição a ruído do valor médio	número	A quantidade pela qual a exposição ao ruído dentro de uma área se desvia do valor médio de todas as áreas.
AE-4: Desvio da exposição a poluição visual do valor médio	número	A quantidade pela qual a exposição à poluição visual dentro de uma área se desvia do valor médio de todas as áreas.
EM-1: Média efectiva de emissão de CO2 por voo	g CO2 por voo	Quantidade total de CO2 emitida por um determinado número de voos (com base no índice de emissões do combustível utilizado, por exemplo, combustível convencional ou sustentável) dividida pelo número de voos.
EM-2: Consumo de energia em determinada trajetória	kWh	A quantidade de energia consumida por uma única operação de drone (com base no tipo de UAM e na trajetória).
EM-3: Emissão de CO2-eq em determinada trajetória	kg CO2-eq	A quantidade de CO2-eq emitida por uma única operação de drone.

Continuação - Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
EM-4: Emissão de CO2-eq em determinada área	kg CO2-eq/h	A quantidade de CO2-eq emitida por UAs dentro de uma área durante o período de tempo observado.
EM-5: Redução na emissão de CO2-eq em determinada área	kg CO2-eq/h	A quantidade a menos de CO2-eq emitida nas entregas observadas com a introdução de UAs (em comparação com a entrega por transporte rodoviário) dentro de uma área durante o período de tempo observado.
EC-1: Área de influência econômica positiva	km2	Área expressa em km2 que passaria a integrar a zona com novos empregos como consequência das operações de drones.
EC-2: Área de influência econômica negativa	km2	Área expressa em km2 que passaria a integrar a zona onde os valores imobiliários diminuem como consequência da exposição a operações de drones regulares/frequentes.
PS-1: Exposição a sobrevoo de drones em determinada área	drones	Número total de drones pairando a uma altura abaixo de um determinado limite dentro de uma área durante o período de tempo observado.
PS-2: Duração da exposição a sobrevoo de drones em determinada área	minutos	Duração total de drones pairando a uma altura abaixo de um determinado limite dentro de uma área durante o período de tempo observado.
WL-1: Exposição de fauna silvestre em determinada trajetória	fauna silvestre	Quantidade total de fauna silvestre exposta dentro dos contornos de ruído e de aparência.

Continuação - Proposta de indicadores ambientais para UAM

Indicador de performance	Unidade	Descrição
WL-2: Exposição de fauna silvestre para um cenário de tráfego	fauna silvestre	Quantidade total de fauna silvestre exposta dentro de uma área durante o período de tempo observado.
WL-3: Nível de perturbação para uma única trajetória	fauna silvestre	Quantidade total de fauna silvestre afetada dentro dos contornos de ruído e de aparência.
WL-4: Nível de perturbação para um cenário de tráfego	fauna silvestre	Quantidade total de fauna silvestre afetada dentro de uma área durante o período de tempo observado.
WL-5: Disrupção de fauna silvestre para um cenário de tráfego - contorno de ruído	fauna silvestre	A diferença entre a quantidade total de fauna silvestre dentro dos contornos de ruído em duas medições consecutivas.
WL-6: Disrupção de fauna silvestre para um cenário de tráfego - contorno de aparições	fauna silvestre	A diferença entre a quantidade total de fauna silvestre dentro de seus contornos de aparência em duas medições consecutivas.

Fonte: Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 em (SIMIć et al., 2024), tradução nossa