

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**

**JOÃO OTÁVIO PARDO**

**PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE AERONAVES  
EVTOL CONSIDERANDO O PROBLEMA DO DESENVOLVIMENTO DA MOBILIDADE  
NA GRANDE SÃO PAULO**

São João da Boa Vista

2023

**João Otávio Pardo**

**PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE AERONAVES  
EVTOL CONSIDERANDO O PROBLEMA DO DESENVOLVIMENTO DA MOBILIDADE  
NA GRANDE SÃO PAULO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Aeronáutica .

Orientador: Profº Dr. Lucas Daniel Del Rosso Calache

Coorientador: Profº Dr. Crystopher Cardoso de Brito

São João da Boa Vista

2023



P226p	<p>Pardo, João Otávio</p> <p>Proposta de um modelo multicritério para seleção de aeronaves eVTOL considerando o problema do desenvolvimento da mobilidade na Grande São Paulo / João Otávio Pardo. -- São João da Boa Vista, 2023</p> <p>74 p. : il., tabs., mapas</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista</p> <p>Orientador: Lucas Daniel Del Rosso Calache</p> <p>Coorientador: Crystopher Cardoso de Brito</p> <p>1. Processo decisório por critério múltiplo. 2. Transporte urbano. 3. Sustentabilidade. 4. Veículos elétricos. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE  
AERONAVES EVTOL CONSIDERANDO O PROBLEMA DO DESENVOLVIMENTO  
DA MOBILIDADE NA GRANDE SÃO PAULO**

Aluno: João Otávio Pardo

Orientador: Prof. Dr. Lucas Daniel Del Rosso Calache

Banca Examinadora:

- Lucas Daniel Del Rosso Calache (Orientador)
- Éder Luiz Oliveira (Examinador)
- Rafael Ferro Munhoz Arantes (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 071/2023)

São João da Boa Vista, 12 de dezembro de 2023

Dedico este trabalho a minha mãe, pai e irmão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais Geraldo e Rachel, por me darem a vida, educação e me criar com muito amor e carinho. Por acreditar nos meus sonhos e aconselhar e incentivar em minhas escolhas.

Agradeço ao meu irmão, Theo Henrique, por ser meu companheiro e tornar minha vida muito mais completa com muito amor e carinho.

Agradeço a minha namorada, Carolina, pelo amor, carinho e companheirismo, também sempre me apoiando em minhas decisões.

Agradeço aos amigos que fiz durante a minha jornada na faculdade, em especial aos meus amigos de república que me apoiaram e não me deixaram desistir, sempre tornando momentos difíceis em momentos descontraídos e divertidos.

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Lucas Daniel Del Rosso Calache por acreditar no meu potencial e por toda assistência, paciência e incentivo. Agradeço também o meu coorientador Prof<sup>o</sup> Dr. Crystopher Cardoso de Brito, por me guiar na formulação do presente trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários da Unesp Câmpus de São João da Boa Vista que contribuíram para a minha formação.

*“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação.”*

*Carl Sagan*

## RESUMO

A procura de métodos de transporte sustentáveis surge como um tema importante, impulsionado por evidências que mostram o impacto resultante da utilização em grande escala de veículos movidos a combustíveis fósseis nas alterações climáticas. Esta inquietação transcende o setor automotivo, estendendo-se ao mercado aeronáutico, que evidencia um interesse crescente no desenvolvimento de aeronaves com baixas emissões de gases poluentes. O foco central recai sobre aeronaves movidas a bateria, especialmente os eVTOLs (sigla em inglês para Electric Vertical Take-Off and Land), uma tecnologia inovadora com potencial para revolucionar a mobilidade urbana de maneira sustentável em grandes centros urbanos. A existência de diversos projetos em andamento de aeronaves eVTOLs indicam uma tendência promissora para o mercado futuro de aeronaves. Deste modo, o estudo das tecnologias que este novo conceito envolve é algo altamente desejável, a fim de fornecer fontes alternativas para a locomoção em grandes metrópoles que diminuam a poluição. O presente estudo possui como principal objetivo analisar e compreender os conceitos e características dos eVTOLs, bem como identificar as características essenciais para sua integração eficiente em metrópoles. Além disso, o trabalho visa propor um modelo de avaliação e seleção da melhor aeronave eVTOL, dentre os variados projetos existentes, para o táxi aéreo na grande São Paulo com base no processo de decisão multicritério e em métodos de análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Os resultados indicam que a região da Grande São Paulo se apresenta como uma área propícia para a implementação de eVTOLs como táxis aéreos, enquanto as análises multicritério demonstram uma aplicação coerente dessas técnicas na tomada de decisões, resultando na seleção precisa da aeronave mais adequada às necessidades identificadas. Este estudo contribui, assim, para o avanço de alternativas de locomoção que minimizem a poluição em ambientes urbanos.

**PALAVRAS-CHAVE:** eVTOL, Mobilidade urbana aérea, Grande São Paulo, Tomada de decisão multicritério, AHP, TOPSIS.

## **ABSTRACT**

The search for sustainable transport methods emerges as an important topic, driven by evidence showing the impact of large-scale use of fossil fuel vehicles on climate change. This concern extends beyond the automotive sector, reaching into the aeronautical market, which demonstrates a growing interest in the development of aircraft with low emissions of pollutants. The central focus is on battery-powered aircraft, particularly eVTOLs (Electric Vertical Take-Off and Land), an innovative technology with the potential to revolutionize urban mobility sustainably in large urban centers. The existence of numerous ongoing projects involving eVTOLs indicates a promising trend for the future aircraft market. Thus, the study of the technologies encompassed by this new concept is highly desirable to provide alternative sources for transportation in large metropolises, aiming to reduce pollution. The present study aims to analyze and examine the concepts and characteristics of eVTOLs, as well as to identify the essential characteristics for their efficient integration in metropolises. Furthermore, the work aims to propose a model for evaluating and selecting the best eVTOL aircraft, among the various existing projects, for air taxi in greater São Paulo based on the multi-criteria decision process and multi-criteria analysis methods Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The results indicate that the Greater São Paulo region is conducive to the implementation of eVTOLs as air taxis, while multicriteria analyses demonstrate a coherent application of these techniques in decision-making, resulting in the precise selection of the aircraft best suited to identified needs. Thus, this study contributes to the advancement of alternative transportation options that minimize pollution in urban environments.

**KEYWORDS:** eVTOL, Urban Air Mobility, Greater São Paulo, Multicriteria decision making, AHP, TOPSIS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Aeronave Focke-Wulf Fw 61 a esquerda e helicóptero moderno AS350 a direita	17
Figura 2	Modelo de veículo eVTOL EHang 216 . . . . .	18
Figura 3	Matriz de Energia Elétrica Brasileira . . . . .	19
Figura 4	Modelo de <i>Wingless</i> eVTOL Volocopter VoloCity . . . . .	20
Figura 5	Modelo de eVTOL <i>Lift + Cruise</i> Wisk Aero Cora (Generation 5) . . . . .	21
Figura 6	Modelo de eVTOL <i>Vectored Thrust tilt-wing</i> Airbus A3 Vahana . . . . .	22
Figura 7	Modelo de eVTOL <i>Vectored Thrust tilt-rotor</i> VA-1X nas duas configurações de posição de rotores . . . . .	22
Figura 8	Modelo de eVTOL <i>Electric Rotorcraft</i> Sikorsky Firefly . . . . .	22
Figura 9	Modelo de eVTOL <i>Hover Bikes &amp; Personal Flying Devices</i> Kitty Hawk Flyer .	23
Figura 10	Redes de Transporte Urbano com a Contribuição de Táxis Aéreos . . . . .	24
Figura 11	Exemplos de Vertiporto . . . . .	25
Figura 12	Possíveis Arquiteturas para Vertiportos . . . . .	26
Figura 13	Envelope do espaço aéreo . . . . .	30
Figura 14	Fases do Voo UAM . . . . .	32
Figura 15	Processo de Tomada de Decisão e Abordagens Utilizadas no Processo de Seleção de Fornecedores . . . . .	34
Figura 16	Processo Decisório para Seleção de eVTOL . . . . .	37
Figura 17	Possível Área de Atuação de eVTOL . . . . .	45
Figura 18	Mapeamento dos Helipontos na Provável Área de Atuação de eVTOL . . . . .	46
Figura 19	Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo <i>Wingless Moller International Firefly (concept design)</i> . . . . .	63
Figura 20	Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo <i>Vectored Thrust Lilium Jet (7-seater)</i> . . . . .	64
Figura 21	Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo <i>Lift and Cruise Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper (concept design)</i> . . . . .	64
Figura 22	Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo <i>Electric Rotorcraft University of Maryland - Blitzen (concept design)</i> . . . . .	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens de Cada Categoria . . . . .	23
Tabela 2 – Comparações do AHP . . . . .	41
Tabela 3 – Exemplo da Matriz A Resultante da comparação par-a-par dos Critérios . . . . .	41
Tabela 4 – Valor do índice aleatório RI . . . . .	42
Tabela 5 – Exemplo da matriz D . . . . .	43
Tabela 6 – Exemplo da matriz W . . . . .	43
Tabela 7 – Tabela Comparativa da Categoria <i>Electric Rotorcraft</i> . . . . .	51
Tabela 8 – Tabela Comparativa da Categoria <i>Vectored Thrust</i> . . . . .	52
Tabela 9 – Tabela Comparativa da Categoria <i>Lift and Cruise</i> . . . . .	53
Tabela 10 – Tabela Comparativa da Categoria <i>Wingless</i> . . . . .	53
Tabela 11 – Tabela Comparativa par-a-par dos critérios . . . . .	55
Tabela 12 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria <i>Wingless</i> . . . . .	58
Tabela 13 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria <i>Vectored Thrust</i> . . . . .	59
Tabela 14 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria <i>Lift and Cruise</i> . . . . .	60
Tabela 15 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria <i>Electric Rotorcraft</i> . . . . .	61
Tabela 16 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria <i>Wingless</i> . . . . .	62
Tabela 17 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria <i>Vectored Thrust</i> . . . . .	63
Tabela 18 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria <i>Lift and Cruise</i> . . . . .	64
Tabela 19 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria <i>Electric Rotorcraft</i> . . . . .	65
Tabela 20 – Resultados da Escolha Final para Cada Categoria de Evtol . . . . .	66
Tabela 21 – Tabela Representativa da Matriz Dn da Escolha Final de Cada Categoria . . . . .	67
Tabela 22 – Resultado da Escolha Final Entre as Melhores Opções de Cada Categoria . . . . .	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

eVTOL	<i>Electric Vertical Take-Off and Land</i>
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Land</i>
DEP	<i>Distributed Electric Propulsion</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
MTOW	<i>Maximum Take-Off Weight</i>
FATO	<i>Final Approach and Takeoff Area</i>
UAM	<i>Urban Air Mobility</i>
AGL	Nível do Solo
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
$SI^-$	Solução Ideal Negativa
$SI^+$	Solução Ideal Positiva
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
IC	Índice de Consistência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
3.1	eVTOL	17
3.2	Tipos de eVTOL	19
<b>3.2.1</b>	<b><i>Wingless/Multirotor</i></b>	<b>20</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Lift + Cruise</i></b>	<b>21</b>
<b>3.2.3</b>	<b><i>Vectored Thrust</i></b>	<b>21</b>
<b>3.2.4</b>	<b><i>Electric Rotorcraft</i></b>	<b>22</b>
<b>3.2.5</b>	<b><i>Hover Bikes &amp; Personal Flying Devices</i></b>	<b>23</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Vantagens e desvantagens de cada categoria</b>	<b>23</b>
3.3	Cenário da mobilidade urbana	23
3.4	Infraestrutura	25
3.5	População	26
3.6	Operação do eVTOL	29
<b>3.6.1</b>	<b>Fases de voo</b>	<b>31</b>
3.7	Caso de estudo - Mobilidade Aérea Urbana da cidade de São Paulo	32
3.8	Análise multicritério para tomada de decisão	33
<b>3.8.1</b>	<b><i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i></b>	<b>35</b>
<b>3.8.2</b>	<b><i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i></b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
4.1	Estudo geográfico	37
4.2	Definição do problema	38
4.3	Formulação dos critérios	38
<b>4.3.1</b>	<b>Critérios não compensatórios</b>	<b>38</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Critérios compensatórios</b>	<b>39</b>
4.4	Qualificação	40
4.5	Escolha final	40
<b>4.5.1</b>	<b>AHP para definição dos pesos dos critérios</b>	<b>41</b>
<b>4.5.2</b>	<b>TOPSIS para seleção de alternativas</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
5.1	Resultado do estudo geográfico	45
5.2	Resultado da definição do problema	47
5.3	Resultado da formulação dos critérios	47

<b>5.3.1</b>	<b>Critérios não compensatórios</b>	<b>47</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Critérios compensatórios</b>	<b>49</b>
5.4	Resultado do processo de qualificação	51
5.5	Resultado da escolha final	54
<b>5.5.1</b>	<b>Resultado da análise AHP</b>	<b>54</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Resultado da análise TOPSIS</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>68</b>
6.1	Contribuições do estudo	68
6.2	Limitações e desafios do estudo	69
6.3	Oportunidade de estudos futuros	70
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização, como é conhecido atualmente, se deu início durante o século 18 na revolução industrial, em que, um grande êxodo rural ocorreu devido a necessidade de mão de obra e mercado consumidor para as primeiras fábricas (SILVA, 2016). Com o passar do tempo, este processo resultou em uma geografia urbana que contempla cidades com a capacidade na casa das dezenas de milhão. Com isso, diversos estudos sobre a perspectivas de urbanização mundial buscam entender este processo e as suas consequências. Um bom exemplo destes estudos é a análise realizada pela United Nations (2014), que apontou a urbanização ao longo da história como a geradora de diversas mudanças significativas nas esferas econômicas e sociais. Dentro destas transformações, há a necessidade de uma maior mobilidade geográfica (United Nations, 2014). Uma mobilidade geográfica deficiente em áreas urbanas densamente povoadas pode se revelar uma experiência decepcionante e demorada (EMBRAER, 2019). Questões como congestionamentos, serviços de transporte público ineficientes e obras em vias motivam a população a exercer uma pressão cada vez maior sobre a infraestrutura dos nossos sistemas de transporte já existentes (EMBRAER, 2019).

Além da problemática de uma mobilidade urbana deficiente para os padrões de urbanização atuais, a dependência do transporte privado e público de veículos de combustão interna vem se tornando uma das principais causas de emissões de gases poluentes nas grandes cidades (GUITARRARA, 2023). Afetando assim, diretamente a qualidade de vida das pessoas, provocando doenças pulmonares crônicas, como bronquite, enfisema e câncer (INCA, 2022).

Com esse problemas apresentados em pauta e com o avanço da tecnologia no setor aeronáutico, um conceito inovador de mobilidade aérea urbana (UAM) vem sendo estudado para atenuar desafios como congestionamento de tráfego, poluição atmosférica e limitações na mobilidade em áreas metropolitanas. O protagonista da UAM será as aeronaves conhecidas como eVTOLs, aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (CİZRELİOĞULLARI; BARUT; IMANOV, 2022).

Apesar de já haver a utilização de aeronaves, como helicópteros, na mobilidade urbana de diversas metrópoles, a sua aplicação não visa solucionar os problemas citados. A utilização de helicópteros nos padrões atuais apresenta-se acessível apenas às classes econômicas mais altas da sociedade. Visto que, o custo operacional de um R44 II, modelo de helicóptero com os menores custos operacionais, é estimado em a partir de 1500 reais por hora de voo, valor este que ultrapassa o salário mínimo do Brasil em 2023 (SACONI, 2023). Além disso, a utilização de aeronaves de asa rotativa convencionais proporciona um incremento da poluição atmosférica pelo uso de motores de combustão interna e também aumenta os níveis de poluição sonora (GUITARRARA, 2023).

Por se tratar de um conceito inovador, como descrito anteriormente, observou-se a necessidade de realizar uma ampla revisão bibliográfica. Dessa forma, foi possível identificar três vertentes principais de pesquisas no cenário da utilização de eVTOLs na mobilidade urbana. A primeira vertente, realizada na maioria das vezes por grandes corporações como Embraer, Uber e Porsche, buscam apresentar e estruturar o cenário da mobilidade aérea urbana com a utilização de aeronaves eVTOL. Estes estudos mostram os benefícios da mobilidade aérea, previsões de mercado, os diferentes serviços

que as aeronaves eVTOL podem realizar, as necessidades para implementar este novo modelo de transporte, previsões de tempo para a implementação da mobilidade aérea urbana e as características desta mobilidade (GRANDL et al., 2018; EMBRAER, 2019; HOLDEN; GOEL, 2016).

A segunda vertente por sua vez, são em sua maioria artigos acadêmicos que procuram estudar melhor as tecnologias e conceitos presentes no uso dos eVTOLs separadamente. Como análise de eficiência energética das aeronaves, estudos iniciais sobre a regulamentação de eVTOLs, requisitos de infraestrutura, dimensionamento do volume de tráfego, aspectos-chave para o projeto de aeronaves elétricas VTOL, estudos de aceitação populacional, contribuições do eVTOL para uma mobilidade aérea sustentável, entre outros. Alguns dos exemplos destes artigos são: (VIEIRA; SILVA, 2018; PRADEEP; WEI, 2019; FERNANDO, 2018; RIBEIRO, 2022; EDWARDS; PRICE, 2020).

Por fim, a terceira vertente é composta por dois estudos que apresentam uma análise para implementação de aeronaves eVTOL em grandes metrópoles nos Estados Unidos. Propondo rotas para utilização da UAM e realizando comparações no tempo e preço entre mesmas rotas realizadas por carros e eVTOLs (RIBEIRO, 2022; ROY et al., 2020).

Baseado nos estudos escassos da terceira vertente, o presente estudo também procurou estudar a geografia de helipontos, aeroportos, criando assim uma área de atuação dos eVTOLs na grande São Paulo. Contudo, o diferencial está na pesquisa bibliográfica que procurou abranger os pontos essenciais da tecnologia eVTOL e a sua implementação na mobilidade urbana. Além disso, esta pesquisa possibilitou realizar outro ponto distinto do presente trabalho, a elaboração de um modelo de análise que utiliza processo de decisão multicritério para definir o melhor modelo de eVTOL para ser utilizado na grande São Paulo como táxi aéreo.

O presente trabalho está estruturado em 4 partes: Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Conclusão. No capítulo da revisão bibliográfica, serão apresentados diversos estudos acerca da tecnologia eVTOL e os principais conceitos necessários para implementação da Mobilidade Aérea Urbana em grandes metrópoles utilizando aeronaves eVTOL. No capítulo de Materiais e Métodos, serão apresentados as ferramentas e os materiais utilizados como sites com bancos de dados de aeronaves, sites para análise geográfica e os métodos de comparação multicritério, necessários para atingir os objetivos do presente trabalho. No capítulo de resultados serão apresentados os resultados do Estudo Geográfico, em que, será definido uma área de atuação para o eVTOL como táxi aéreo na grande São Paulo com o mapeamento dos helipontos presentes nesta área. Ainda na seção dos resultados, serão apresentadas também as resoluções obtidas através das comparações e análises utilizadas durante o modelo de processo de decisão multicritério elaborado para o cenário do eVTOL como táxi aéreo. Por último, a conclusão apresenta as contribuições do estudo, assim como as suas limitações e desafios.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a tecnologia eVTOL assim como apresentar um modelo de análise embasado no processo de decisão multicritério para selecionar o melhor eVTOL para atuar na mobilidade aérea urbana da grande São Paulo. Para isso, o presente objetivo pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

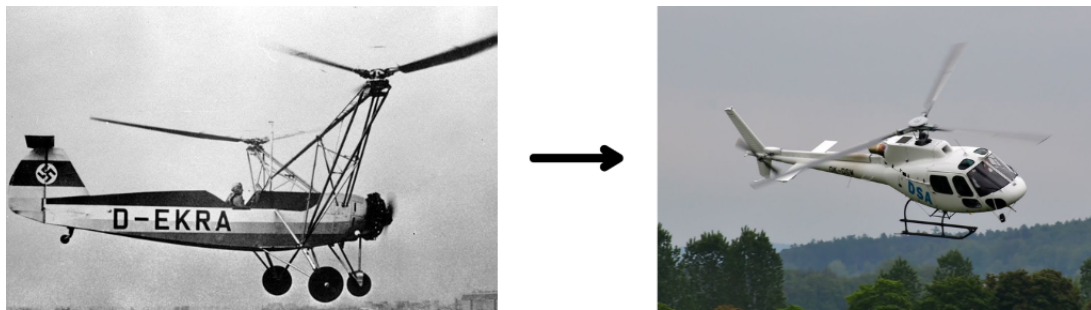
- Realizar um estudo bibliográfico abrangendo os principais pontos a serem considerados na utilização de aeronaves eVTOL para implementar a mobilidade urbana na grande São Paulo;
- Realizar um estudo geográfico da grande São Paulo, mapeando os helipontos presentes, para definir a área de atuação dos eVTOL's;
- Estruturar o problema de tomada de decisão voltado para o cenário do eVTOL e selecionar e aplicar técnicas de apoio a tomada de decisão com a implementação computacional das mesmas;
- Escolher o melhor modelo de eVTOL para cada categoria e o melhor modelo para ser utilizado como táxi aéreo através da análise multicritério para tomada de decisão estruturada no objetivo anterior.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 EVTOL

No início do século 20, com a criação das primeiras máquinas voadoras mais pesadas que o ar, pesquisadores aeronáuticos buscaram evoluir o conceito destas máquinas para aeronaves que fossem capazes de decolar e pousar na vertical sem a necessidade de pistas (VIEIRA; SILVA, 2018). Dando início assim ao conceito de aeronaves conhecidas como VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Partindo desde a criação do Focke-Wulf Fw 61 em 1938 até os mais modernos helicópteros (VIEIRA; SILVA, 2018).

Figura 1 – Aeronave Focke-Wulf Fw 61 a esquerda e helicóptero moderno AS350 a direita



Fonte: Modificada de (VIEIRA; SILVA, 2018)

Após a busca de aeronaves capazes de decolar e pousar na vertical ser concluída, temos nos dias atuais outra preocupação relacionada aos meios de transporte, a redução das emissões de poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis. Com isso, o conceito de Aeronaves Elétricas de Decolagem e Pouso Vertical (eVTOLs), começou a aparecer como o principal objetivo de diversas empresas e empreendimentos. Tendo como ideia principal a operação de táxi aéreo utilizando estas aeronaves em conjunto com os atuais sistemas de transporte urbano de maneira segura e sustentável (CICELINI et al., 2022).

Vieira e Silva (2018) evidenciaram duas vantagens principais da utilização de aeronaves eVTOLs, em comparação com o VTOL mais utilizado nos centros urbanos, o helicóptero. A primeira vantagem está na utilização de propulsão elétrica distribuída do inglês DEP (Distributed Electric Propulsion), como no exemplo da Figura 2, em oposição aos motores de combustão interna ICE (Internal Combustion Engine). A segunda vantagem, por sua vez, está relacionada aos impactos ambientais que as aeronaves de asa rotativa com motor de combustão interna produzem, como ruídos e poluição atmosférica.

Figura 2 – Modelo de veículo eVTOL EHang 216



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

Ao contrário dos ICEs, os motores elétricos possibilitam que a DEP seja construída utilizando uma ampla gama de tamanhos de motores muito eficientes. Deste modo, múltiplos pequenos motores elétricos são utilizados sem depender de um sistema de transmissão para distribuir torque aos rotores (BROWN; HARRIS, 2018). Além do menor número de partes móveis, a utilização do modelo DEP apresentam outras vantagens em relação a motores de combustão interna: uma maior relação peso e potência, melhor integração dos sistemas fly-by-wire, custos de manutenção reduzidos e uma eficiência energética geral muito melhor, em torno de 10 vezes. Sem levar em consideração a redução nos impactos ambientais (HOLDEN; GOEL, 2016).

No âmbito dos impactos ambientais, a poluição sonora causada pelo táxi aéreo de helicópteros é gerada por três fontes principais de ruído: o rotor principal, o rotor de cauda responsável pelo anti-torque e os motores turboeixo e pistão. Além disso, dois fenômenos conhecidos como ruído impulsivo de alta velocidade e interação do Vórtice da Lâmina são responsáveis também pela geração de ruído e originados pelo uso de apenas um ou poucos rotores de grandes dimensões (ICAO, 2015). (VIEIRA; SILVA, 2018) apontam que o uso de DEPs com múltiplos rotores de pequeno raio, ao invés de apenas um, elimina esses fenômenos. Ademais, com esta configuração de propulsão não há a utilização de rotores de cauda anti-torque e motores ICE ruidosos como o turboeixo.

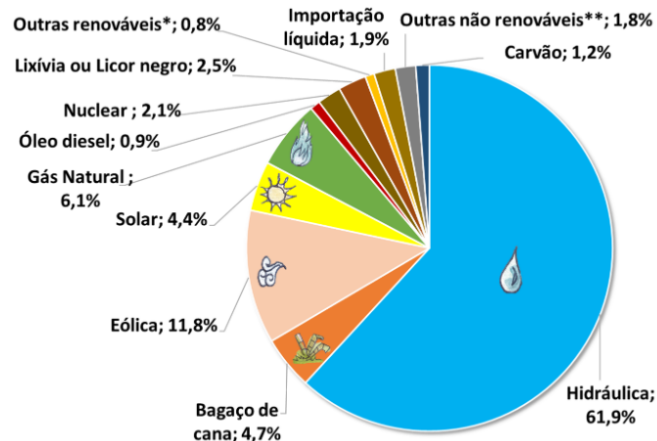
No quesito da poluição do ar, aeronaves de asa rotativa como os helicópteros recebem menos importância em suas emissões de poluentes quando comparadas às emissões de ruído. Contudo, a proximidade de centros urbanos nas operações destas aeronaves mostrou-se necessário o controle dos níveis de toxicidade das substâncias emitidas. Gases de efeito estufa, compostos contaminantes como hidrocarbonetos não queimados, o combustível de aviação Avgas que contém aditivo de chumbo tetraetila para atingir a octanagem são exemplos dos poluentes emitidos. Os eVTOLs por sua vez, apresentam uma emissão de zero gases poluentes durante a sua operação, visto a utilização de motores elétricos (VIEIRA; SILVA, 2018).

Devemos considerar também a característica da matriz energética do país em que será utilizado o uso de eVTOL para mobilidade urbana. Uma vez que, a geração de energia para recarga das aeronaves

elétricas pode ser proveniente de fontes não renováveis, podendo assim, diminuir a sustentabilidade proposta.

Felizmente, a matriz de energia elétrica brasileira é notavelmente voltada para fontes renováveis, como mostra a Figura 3. Isso se deve ao fato de que uma parcela significativa da eletricidade gerada no Brasil provém de usinas hidrelétricas. Além disso, a energia eólica tem demonstrado um crescimento substancial, o que fortalece a predominância de fontes de energia renovável em nossa matriz elétrica (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2017).

Figura 3 – Matriz de Energia Elétrica Brasileira



Fonte: Retirada de (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2017)

Em suma, considerando o funcionamento previsto da matriz energética brasileira, os eVOLTs representam uma inovação crucial no contexto do desenvolvimento sustentável. Em um mundo cada vez mais urbanizado e preocupado com os impactos ambientais, essas aeronaves elétricas oferecem uma solução promissora para melhorar a mobilidade urbana de maneira ambientalmente responsável. A seguir, serão apresentadas as principais categorias de eVTOLs propostas pelo mercado.

### 3.2 TIPOS DE EVTOL

O nível de complexidade de um projeto para criação de uma aeronave eVTOL varia consideravelmente em relação às soluções técnicas escolhidas. Deste modo, é de se esperar que os primeiros projetos a voar seus protótipos sejam de uma complexidade menor, devido a projetos simples utilizarem menos tempo nas fases de desenvolvimento e testes (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019). Vale destacar que, no âmbito da certificação, a complexidade da aeronave pode não estar necessariamente relacionada a um tempo maior ou menor (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019).

Ainda no âmbito da complexidade, outro trabalho realizado por Vieira e Silva (2018) procurou compreender o motivo da diferença de complexidades de cada eVTOL. No trabalho, fica evidente que a inclusão de componentes de inclinação no projeto da aeronave aumenta consideravelmente o seu nível de complexidade. Projetos como, *tilt rotors*, *tilt rotors wing*, e *thrust vector* apresentam desafios significativos de desenvolvimento. Isso se deve à necessidade de realizar inclinações controladas nos componentes geradores de sustentação durante a transição da sustentação proveniente dos rotores para

as asas, que ocorre durante a fase de transição do voo estacionário para o voo horizontal (VIEIRA; SILVA, 2018).

Segundo o jornal *Electric VTOL News*, no qual é gerenciado pela *The Vertical Flight Society*, a classificação de um eVTOL parte dos seguintes itens: maturidade do projeto nos dias atuais, capacidade de carga, fonte de energia, tipo de empuxo e tipo de piloto. Sendo o tipo de empuxo utilizado pela aeronave um fator diferencial entre os projetos. Deste modo, a *Electric VTOL News* divulgou cinco categorias de possíveis sistemas de propulsão do eVTOL. São elas: Empuxo vetorizado (*Vectored Thrust*), Sustentação + Cruzeiro (*Lift + Cruise*), Sem asa/Multirrotores (*Wingless/Multirotor*), Helicópteros elétricos (*Electric Rotorcraft*) e motos voadoras & dispositivos pessoais de voo (*Hover Bikes & Personal Flying Devices*) (The Electric VTOL News, 2018).

### 3.2.1 *Wingless/Multirotor*

Esta categoria de projeto apresenta uma arquitetura sem asas, possuindo múltiplas hélices para sua sustentação. As variações mais encontradas neste modelo são os quadricópteros, com quatro hélices e os multicópteros, que contam com várias hélices para elevação. Devida a sua construção, se assemelhando a um helicóptero do ponto de vista da área do rotor, os eVTOLs *Wingless* apresentam uma eficiência durante a decolagem vertical, pouso e vôo pairado (PRADEEP; WEI, 2019). Além de um controle de voo superior, graças aos múltiplos rotores, é possível perceber uma redução da produção de ruído e vibração (LU; DEBIASI; KHOO, 2016).

Esta configuração foi a utilizada em algumas das primeiras aeronaves eVTOL a realizar voos tripulados. Possivelmente pelo fato de apresentar a menor complexidade de projeto, uma vez que não contam com componentes móveis como rotores inclináveis ou asas.(VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019; VIEIRA; SILVA, 2018). Além da simplicidade, estas aeronaves utilizam a redundância da disposição de múltiplos rotores como um fator que aumenta sua segurança. Contudo, apesar de diversas vantagens, os eVTOLs *wingless* operam com uma velocidade reduzida por não possuir asa durante o cruzeiro gerando assim um alcance menor e MTOW reduzidos (GRANDL et al., 2018).

Figura 4 – Modelo de *Wingless* eVTOL Volocopter VoloCity



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

### 3.2.2 *Lift + Cruise*

A categoria *Lift + Cruise* é apresentada como uma mistura de aeronaves com asa fixa e de um multicóptero. Apresentando uma configuração de rotores usados para decolar e pousar verticalmente e rotores separados para o voo horizontal, que juntos com as asas, proporcionam maior alcance ao voo de cruzeiro. Durante o voo de cruzeiro, os rotores verticais são desativados, e 100% da sustentação é gerada pelas asas fixas. Por conta dessas características, essa categoria de eVTOL apresenta um nível de complexidade média, visto que, apesar de não apresentar componentes de inclinação no projeto (característica de alta complexidade), este modelo difere do *Wingless/Multirotor* em que seus sistemas coordenam apenas um conjunto de rotores com o mesmo propósito, para o *Lift + Cruise* há a necessidade de controle de dois grupos de rotores com propósitos diferentes. Aumentando assim a complexidade do projeto (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019) (GRANDL et al., 2018) (VIEIRA; SILVA, 2018).

Figura 5 – Modelo de eVTOL *Lift + Cruise* Wisk Aero Cora (Generation 5)



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

### 3.2.3 *Vectored Thrust*

Para o caso dos eVTOLs que utilizam a configuração *Vectored Thrust*, a direção do empuxo de seus motores pode variar de acordo com as suas necessidades (FERNANDO, 2018). Há duas opções mais comuns na arquitetura da aeronave, sendo a primeira utilizando a inclinação das asas e rotores, *tilt-wing*, e a segunda utilizando a inclinação dos rotores apenas, *tilt-rotor*. Deste modo, é possível a aeronave girar o eixo da hélice 90 graus ao passo que o eVTOL transita do voo parado ou vertical ao de cruzeiro (NATHEN et al., 2021). O *Vectored Thrust* apresenta os maiores índices de velocidade de voo durante a configuração cruzeiro (GRANDL et al., 2018; BACCHINI; CESTINO, 2019). Temos o exemplo de cada modelo *Vectored Thrust* nas figuras Figura 6 e Figura 7.

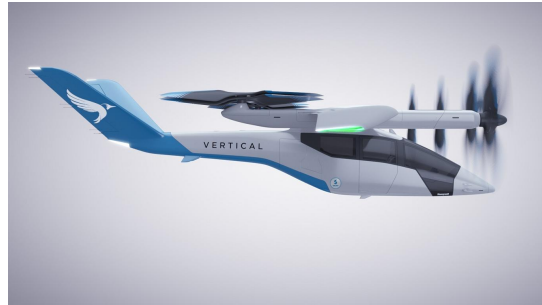
Contudo, estas aeronaves pagam o preço de possuir uma maior complexidade técnica. Juntamente com um aumento considerável no tamanho e peso para que seja possível utilizar os mecanismos de inclinação (NATHEN et al., 2021).

Figura 6 – Modelo de eVTOL *Vectored Thrust tilt-wing* Airbus A3 Vahana



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

Figura 7 – Modelo de eVTOL *Vectored Thrust tilt-rotor* VA-1X nas duas configurações de posição de rotores



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

### 3.2.4 *Electric Rotorcraft*

A categoria *Electric Rotorcraft*, conhecida também como eHelos, são projetos de eVTOLs semelhantes aos helicópteros convencionais. Contudo, enquanto as aeronaves de asa rotativas convencionais utilizam motores ICE como o motores a turbina ou a pistão, os *Electric Rotorcraft* utilizam a energia elétrica originária de baterias (BACCHINI; CESTINO, 2019).

Figura 8 – Modelo de eVTOL *Electric Rotorcraft* Sikorsky Firefly



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

### 3.2.5 Hover Bikes & Personal Flying Devices

As aeronaves denominadas *Hover Bikes & Personal Flying Devices* são pequenos eVTOLs, geralmente multirotores e para uma pessoa apenas, que possuem a característica de serem pilotados como uma motocicleta. Ou seja, temos um piloto sentado em uma sela ou em pé (BACCHINI; CESTINO, 2019).

Figura 9 – Modelo de eVTOL *Hover Bikes & Personal Flying Devices* Kitty Hawk Flyer



Fonte: Retirada de (The Electric VTOL News, 2016)

### 3.2.6 Vantagens e desvantagens de cada categoria

Não foi possível achar vantagens e desvantagens além da definição para as categorias *Electric Rotorcraft* e *Hover Bikes & Personal Flying Devices*. Dos diversos artigos analisados, ambos os modelos não estavam no escopo de estudo.

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens de Cada Categoria

Categoria	Vantagem	Desvantagem	Fonte
<i>Wingless/Multirotor</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto grau de eficiência de voo pairado, decolagem vertical e pouso</li> <li>- Controle de voo superior</li> <li>- Níveis de ruído e vibração mais baixos</li> <li>- Mecânica do rotor mais simples</li> <li>- Menor complexidade de projeto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carecem de eficiência de cruzeiro</li> </ul>	(FERNANDO, 2018) (PAUL; LORENZO; CORDIOLI, 2020) (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019) (RAJENDRAN; SRINIVAS, 2020)
<i>Lift + Cruise</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alcances mais elevados do que o multicóptero</li> <li>- Bons níveis de eficiência durante ambas as fases de voo, pairado e cruzeiro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor alcance e velocidade que o Vectored Thrust</li> <li>- Complexidade média</li> </ul>	(FERNANDO, 2018) (PAUL; LORENZO; CORDIOLI, 2020)
<i>Vectored Thrust</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior alcance e velocidade</li> <li>- Desempenho relativamente melhor na fase de voo pairado em comparação ao Lift + Cruise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Níveis mais elevados de ruído durante o voo pairado</li> <li>- Maior complexidade, dimensões e peso</li> </ul>	(FERNANDO, 2018) (PAUL; LORENZO; CORDIOLI, 2020) (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019) (RAJENDRAN; SRINIVAS, 2020)

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3.3 CENÁRIO DA MOBILIDADE URBANA

Um estudo realizado em 2014 pelas Nações Unidas para analisar a divisão populacional apontou que em 2007, pela primeira vez na história humana, a população urbana superou a rural. Sete anos mais tarde, na data de publicação do estudo, a população urbana já era de 54%. Com o crescimento

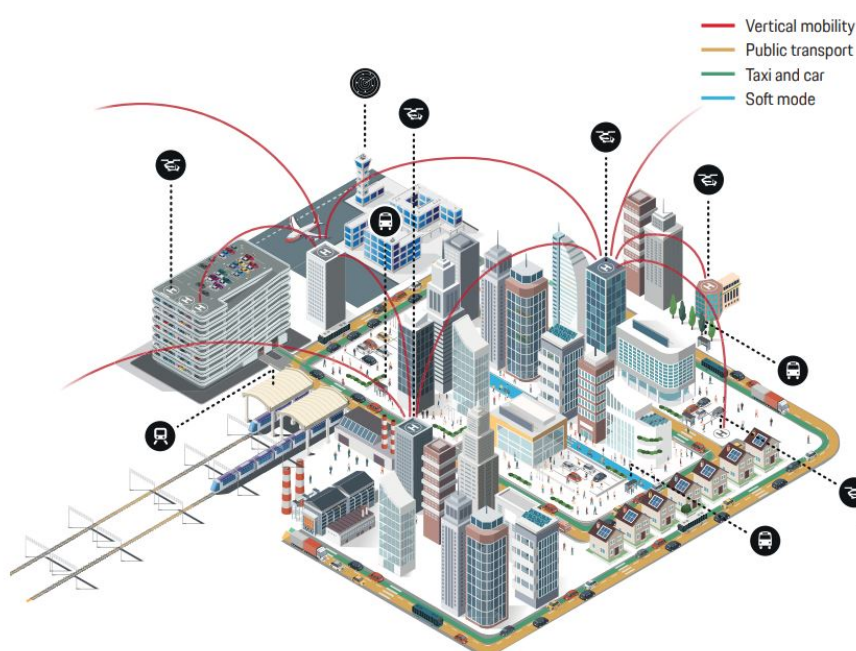
contínuo previsto de centros urbanos, as Nações Unidas estimam que em 2050 dois terços da população mundial será urbana (United Nations, 2014).

Nos dias atuais, é possível perceber claramente as consequências desse crescimento populacional urbano. Por consequência, o congestionamento gera custos de ordem social e econômica. Com estimativas de um prejuízo de 98 bilhões de reais por ano originários do congestionamento de São Paulo e Rio de Janeiro. Além disso, é previsto que residentes de grandes centros urbanos passem cerca de 1 mês inteiro dentro de seus veículos por ano. Produzindo assim, irritação, estresse e cansaço na população (BLUME, 2020).

Diante desse cenário, a Federal Aviation Administration (FAA) (2022) definiu a Mobilidade Urbana Aérea (UAM) como uma visão de um sistema de transporte aéreo seguro e eficiente. Com a utilização de aeronaves altamente automatizadas que operarão e transportarão passageiros ou cargas em altitudes reduzidas dentro de áreas urbanas e suburbanas. A composição da UAM se dá por um conjunto de elementos que leva em consideração o aprimoramento e a segurança das aeronaves, a estrutura operacional, o acesso ao espaço aéreo, o desenvolvimento de infraestrutura e a participação da comunidade (Federal Aviation Administration (FAA), 2022).

Diversos pesquisadores tal (POSTORINO; SARNÉ, 2020) apresentam a UAM como uma opção para combater o congestionamento de veículos terrestres e seus efeitos na população e economia. Uma boa representação da UAM integrada com a mobilidade urbana está na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Redes de Transporte Urbano com a Contribuição de Táxis Aéreos



Fonte: Retirado de (GRANDL et al., 2018)

### 3.4 INFRAESTRUTURA

Para o bom funcionamento e contribuição de aeronaves eVTOL à mobilidade urbana, é necessário que estas sejam cuidadosamente e corretamente integradas à rede geral de transporte de uma cidade. Sendo o componente crucial para essa integração a infraestrutura para decolar, pousar, carregar e estacionar à espera de passageiros (GRANDL et al., 2018).

Portanto, quando falamos na infraestrutura necessária para acomodar e possibilitar que tecnologias eVTOL sejam utilizadas na mobilidade urbana, devemos levar em consideração a autonomia reduzida e a necessidade de recarga dessas aeronaves. Com isto em mente, é de se esperar a criação de diversos pontos para o pouso e recarga, conhecidos como *skyports* ou vertiporto (LOUREIRO, 2021).

Deste modo, podemos definir os *skyports* como uma estrutura designada a ser operada por VTOLs podendo esta ser uma área de terra, água ou a estrutura propriamente dita. Podendo operar com um ou vários FATOs (*Final Approach and Takeoff Area*) (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020).

Figura 11 – Exemplos de Vertiporto

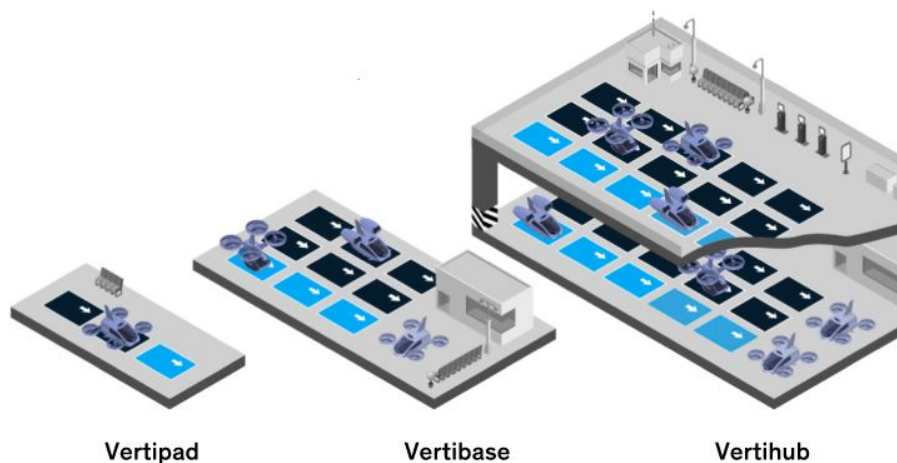


Fonte: Retirado de (REED, 2022)

A localização desses vertiportos assim como a quantidade, tamanho e estações para o carregamento rápido das aeronaves são fatores essenciais além dos recursos necessários para operacionalizar o controle de tráfego aéreo (GRANDL et al., 2018). Além disso, os *skyports* estão propensos a seguirem as mesmas regras que um aeródromo necessitando de auxílios para operação noturna e/ou instrumento, possuir um FATO de contingência emergências ou acidentes, entre outros. Podemos concluir que há uma necessidade de padronização de vertiportos para o fomento da segurança e otimização de viagens (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020).

Além dos fatores essenciais citados anteriormente, deve-se considerar o volume de tráfego das aeronaves. No qual, são disseminados de maneira desigual e direcional incluindo também horários de pico de voo. Como consequência, vertiportos com maior capacidade operacional devem ser construídos para atender horários de pico e rotas com um maior número de voo assim como vertiportos reduzidos com menos FATO para rotas menos utilizadas (RIBEIRO, 2022). A Figura 12 mostra o conceito de diferentes *skyports* escaláveis para atender os números de operações variáveis. Vale destacar que, o capital necessário assim como as despesas de operação são diretamente proporcionais às dimensões do vertiporto indicando a relevância fluxo de aeronaves (RIBEIRO, 2022).

Figura 12 – Possíveis Arquiteturas para Vertiportos



Fonte: Retirado de (JOHNSTON; RIEDEL; SAHDEV, 2020)

Saindo um pouco do cenário dos vertiportos, podemos considerar a operação de eVTOLs em locais de pouso de helicópteros já existentes, desde que cumpra com os regulamentos relevantes (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020). Temos atualmente muitas cidades com diversos heliportos já construídos e operando, possuindo assim uma infraestrutura inicial necessária para locais de pousos das aeronaves eVTOL. Grandl et al. (2018) considera que na fase inicial de implementação destas aeronaves apenas cinco heliportos serão suficientes para desenvolver rotas funcionais e atrativas ao público. Com o crescimento do conceito, as áreas selecionadas podem ter até 40 vertiportos pequenos operando com aeronaves destinadas a passageiros. Por fim, com o conceito já consolidado, espera-se até 100 *skyports* em megacidades (GRANDL et al., 2018).

### 3.5 POPULAÇÃO

Edwards e Price (2020), juntamente com a NASA, realizaram um estudo sobre a aceitação de passageiros para aeronaves eVTOL. Evidenciando a sua importância para fabricantes e operadores visto a esperada utilização destas aeronaves elétricas no cenário mobilidade aérea urbana (UAM). Deste modo, os autores realizaram uma pesquisa literária dialogando com acadêmicos, pesquisadores da NASA e representantes das principais indústrias relacionadas ao eVTOL. Como base, utilizaram sites das operadoras de helicópteros para obter opiniões sobre a experiência dos passageiros em suas operações. Além disso, sete membros da comunidade de aeronaves de asas rotativas foram entrevistados com o intuito de capturar algumas das preocupações dos passageiros.

De acordo com as pesquisas realizadas, cinco categorias gerais foram evidenciadas como as principais preocupações dos passageiros. Sendo elas: percepção dos passageiros sobre segurança, ruído e vibração, disponibilidade e acesso, bem-estar do passageiro e movimento do veículo. A seguir tem-se alguns subitens dessas categorias, para melhor entendimento, retirados e traduzidos diretamente de (EDWARDS; PRICE, 2020).

#### Percepção dos passageiros sobre segurança

- Requisitos de proficiência do piloto

- Modos de falha (motor, rotor, estrutural, sistema de controle, etc.)
- Mitigação de colisão (sistemas de retenção, zonas de deformação, autorrotação)
- Detecção e resolução de conflitos, prevenção de colisões
- Robustez ao clima
- Abortar procedimentos, incluindo capacidade de executar pouso de emergência
- Lidar com emergências médicas de passageiros
- Como se proteger de um passageiro desonesto em uma carona compartilhada
- Como se proteger de um voo autônomo hackeado ou piloto incapacitado

#### Movimento do veículo

- Aceleração e solavanco
- Suscetibilidade a enjôo

#### Ruído e vibração

- Movimento, ruído e vibração da cabine em todas as fases do voo
- Amplitude e frequência de vibração contínua aceitável (por exemplo, vibrações estruturais, turbulência atmosférica normal em altitude)
- Níveis aceitáveis de amplitude e frequência de vibração transitória (por exemplo, vibrações de rajadas ou manobras)

#### Disponibilidade e acesso

- Integridade do cronograma
- Acessibilidade dos Vertiport
- Acomodação para passageiros com deficiência

#### Bem-estar do passageiro

- Capacidade de embarcar e desembarcar de forma independente
- Facilidade de assento e movimentação na cabine
- Capacidade de sentar em grupos, se desejado
- Acomodações para bagagem de mão e cargas maiores
- Visibilidade da cabine - campo de visão fora da janela, controle de luz através da janela, proximidade de rotores e motores
- Controle de temperatura da cabine e requisitos de energia
- Capacidade de conversar, conectar-se à internet, ler, escrever e usar um teclado
- Capacidade de beber, comer e dormir
- Privacidade

Como citado anteriormente, o estudo conduziu sete entrevistas com membros ligados a operações de helicópteros para coleta de dados e também para obter um julgamento e poder priorizar as principais preocupações dos viajantes. A lista a seguir foi retirada e traduzida diretamente de (EDWARDS; PRICE, 2020), evidenciando as maiores apreensões dos passageiros.

Citado por seis entrevistados

- Segurança

Citado por cinco entrevistados

- Perfis de decolagem
- Movimento do veículo

Citado por quatro entrevistados

- Reação à turbulência
- Ruído interno
- Assentos
- Familiaridade com o ambiente da cabine

Citado por três entrevistados

- Vibração
- Qualidade do ar da cabine

Preocupações restantes

- Aceitação de novas tecnologias
- Interação com a tripulação de voo
- Facilidade de acesso (embarque e assento)
- Lavagem do rotor no vertiport
- Acesso para pessoas com deficiência
- Disponibilidade de vertiportos
- Desempenho em qualquer clima
- Pegada de ruído no solo
- Visibilidade da cabine
- Design interior da cabine
- Espaço na cabine
- Disposição dos assentos
- Espaço para bagagem de mão
- Facilidade de manutenção da limpeza

- Controle de passageiros da iluminação
- Conforto
- Eletricidade estática
- Fumos de combustível e hidráulica
- Conectividade com o solo
- Uso produtivo do tempo

Como foi possível observar, o maior receio das pessoas que utilizam as operações de helicópteros é a segurança. Para o cenário eVTOL, novas técnicas precisarão ser utilizadas para estabelecer os níveis de segurança necessários, principalmente no caso de falta de energia. Uma vez que, aeronaves convencionais de asa rotativa dispõem da autorotação para um pouso de emergência controlado, no qual não é possível de se realizar em aeronaves VTOL elétricas (EDWARDS; PRICE, 2020). Sistemas de redundância confiáveis, paraquedas e estruturas de absorção de energia são alguns exemplos das possíveis técnicas que possam ser empregadas para demonstrar que passageiros, população e estruturas no terreno não correm riscos indevidos. Contudo, a certificação de segurança dessas aeronaves ainda apresenta um desafio significativo para os operadores (EDWARDS; PRICE, 2020).

Além das principais preocupações dos passageiros, o estudo de considera também a concepção de aeronaves autônomas. Sendo um conceito bastante visado pelas empresas que veem ambicionando o uso de eVTOL na UAM, como a Uber e Embraer (HOLDEN; GOEL, 2016; EMBRAER, 2019). Deste modo, Edwards e Price (2020) destacam, com base no consenso da comunidade de aviação, o atraso da certificação de tecnologias para que aeronaves autônomas realizem o transporte de passageiros. Ademais, apontam a hesitação dos passageiros em voar sem um piloto. Visto que, a confiança dos viajantes se dá em aeronaves que utilizam pilotos humanos e estejam associadas a grandes marcas conhecidas (EDWARDS; PRICE, 2020).

Ainda no âmbito de aeronaves autônomas, outro conceito interessante a ser analisado é a utilização de Operações de Piloto Único. Em que, grandes aeronaves de transporte terão a tripulação de voo reduzida de dois para um indivíduo que contará com o apoio da automação das aeronaves (DAO et al., 2015). Este conceito surgiu principalmente pelas demandas de redução de custos, do notável aumento na demanda por viagens aéreas comerciais e da crescente escassez global de profissionais qualificados na aviação (DAO et al., 2015; LIU et al., 2016).

Contudo, as Operações de Piloto Único ainda demandam consideráveis avanços no suporte à automação, tanto nos sistemas de controle de voo quanto em solo, e implica mudanças substanciais nos papéis e responsabilidades dos pilotos e operadores de gestão de tráfego aéreo. Especificamente, observa-se uma transição progressiva das responsabilidades primárias dos pilotos para funções de supervisão, intervindo apenas em situações necessárias (LIU et al., 2016).

### 3.6 OPERAÇÃO DO EVTOL

As operações UAM, no qual espera-se a utilização de veículos eVTOLs, seriam iniciadas a partir do planejamento e voo de uma aeronave de um FATO de um vertiporto em direção a outro FATO de

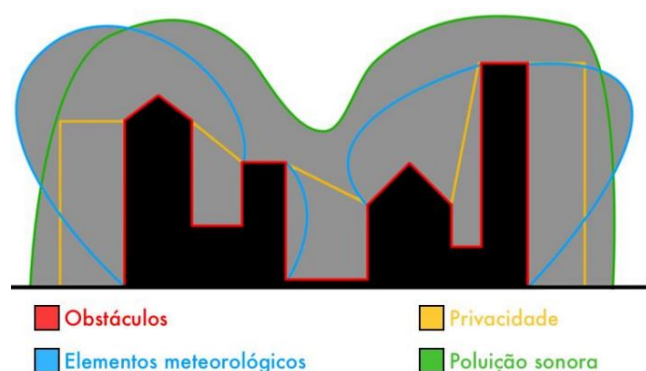
outro vertiporto. Esta viagem pode ser realizada dentro do ambiente urbano ao longo de uma rota específica (horizontal e/ou verticalmente), ou também pode optar por permanecer em um local por um período, por exemplo, para realizar voos turísticos. Sendo as viagens planejadas previamente ou realizadas sob demanda, conforme necessário (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020).

Além disso, Ribeiro (2022) em seu estudo, evidenciou recomendações de quatro pesquisadores em diferentes trabalhos para operações UAM. Estas recomendações, com base em estimativas de demanda, estão alinhadas com a expectativa de que o transporte de passageiros entre cidades e aeroportos seja uma das principais aplicações iniciais da Mobilidade Urbana Aérea. Em seguida temos a implementação nos principais centros financeiros e áreas centrais da cidade.

Vale ressaltar que, durante as operações é possível que ocorram paradas em vertiportos intermediários. Tanto para permitir o embarque e desembarque de passageiros e/ou carga, como alterar o destino devido a motivos de: falhas técnicas, questões envolvendo passageiros ou pilotos, indisponibilidade de vertiporto e clima. Assim como na aviação convencional, antes da decolagem, é necessário pré-determinar vertiportos alternativos ou locais de pouso apropriados, a fim de assegurar que quaisquer eventualidades relacionadas ao vertiporto de destino possam ser adequadamente enfrentadas e solucionadas (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020).

A definição do espaço aéreo a ser utilizado por essas aeronaves é um aspecto que requer uma análise criteriosa, considerando diversos fatores que influenciam na delimitação de uma área adequada para o voo. Esses fatores podem ser agrupados em quatro categorias: segurança operacional (obstáculos e condições climáticas), aspectos sociais (privacidade e impacto sonoro e visual), características das operações do sistema e características das aeronaves envolvidas (CAMARA et al., 2022). Na representação a seguir, Figura 13, o autor aborda apenas as duas primeiras categorias, visto a complexidade de definir previamente as categorias restantes.

Figura 13 – Envelope do espaço aéreo



Fonte: Retirado de (CAMARA et al., 2022)

No contexto das questões de segurança operacional, os obstáculos não se limitam apenas às grandes estruturas, mas também incluem outras aeronaves que compartilham o mesmo espaço aéreo (CAMARA et al., 2022). Sendo elas, aeronaves como helicópteros, balões de ar quente, sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e aeronaves de asa fixa que também utilizarão o espaço aéreo de baixa altitude. Antecipa-se que as operações do UAM ocorram principalmente abaixo de 1.500 pés acima do

nível do solo (AGL), embora também possam ocorrer em altitudes superiores (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020).

Dada a problemática descrita anteriormente, (CAMARA et al., 2022) analisou estudos que sugerem três tipos de separação entre as aeronaves: fixa, dinâmica e não padronizada. Alguns especialistas propõem uma separação fixa horizontalmente de 0,1 a 0,3 milhas náuticas e verticalmente de 100 pés, enquanto outros defendem uma separação de 0,36 milhas náuticas e 450 pés de outras aeronaves. Já a separação dinâmica leva em consideração as características das aeronaves. Por exemplo, aeronaves altamente automatizadas podem manter uma separação menor em comparação com aeronaves mais simples devido à tecnologia embarcada. Por fim, a separação não padronizada é baseada na abordagem "ver e evitar", em que os pilotos estabelecem contato visual com outras aeronaves e mantêm uma distância considerada segura. Uma alternativa mais tecnológica ao "ver e evitar" é o "detectar e evitar", em que a aeronave utiliza uma combinação de software e hardware para detectar e evitar obstáculos.

### **3.6.1 Fases de voo**

As fases do voo UAM, por sua vez, são representadas pela Figura 14 e definidas pelos seguintes conceitos traduzidos e retirados de (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020):

#### **Pré-voo**

Todas as etapas envolvidas na preparação do voo antes da decolagem, como as verificações pré-voo do veículo, o carregamento adequado, o planejamento da rota, assim como o embarque de passageiros e/ou carga, compõem as atividades essenciais nesse processo. É fundamental realizar todas essas etapas com cuidado e atenção, garantindo a segurança e a eficiência da operação.

#### **Decolagem**

O período de partida do veículo ocorre desde o momento em que ele se afasta fisicamente do ponto de partida (FATO) ou da parada (caso exista) até o momento em que atinge a altitude de cruzeiro. Durante a partida, são realizadas as manobras de táxi, decolagem e subida inicial, visando um início suave e seguro do voo.

#### **Em Rota**

O período compreendido entre o momento em que o veículo atinge a altitude de cruzeiro e o momento em que inicia a aproximação ao vertiporto de destino.

#### **Aproximação**

Compreende o período de alinhamento do veículo com a rota ideal em direção ao FATO do vertiporto de destino até o momento em que se atinge o ponto de decisão (ou altitude/altura de decisão), no qual, o piloto/operador do UAM terá a responsabilidade de decidir entre prosseguir com a aproximação para o pouso ou efetuar uma subida para atingir uma altitude de manobra segura, em caso de necessidade de realizar uma aproximação perdida. No caso em que a decisão de realizar uma aproximação perdida for tomada, isso será considerado uma variação da

fase de aproximação. Se uma decisão adicional for feita para redirecionar o veículo para um vertiport de destino alternativo, a fase de aproximação será concluída assim que uma altitude de manobra segura for alcançada. Por outro lado, se a decisão for prosseguir com o pouso, a fase de aproximação termina e dá lugar à fase de aterrissagem.

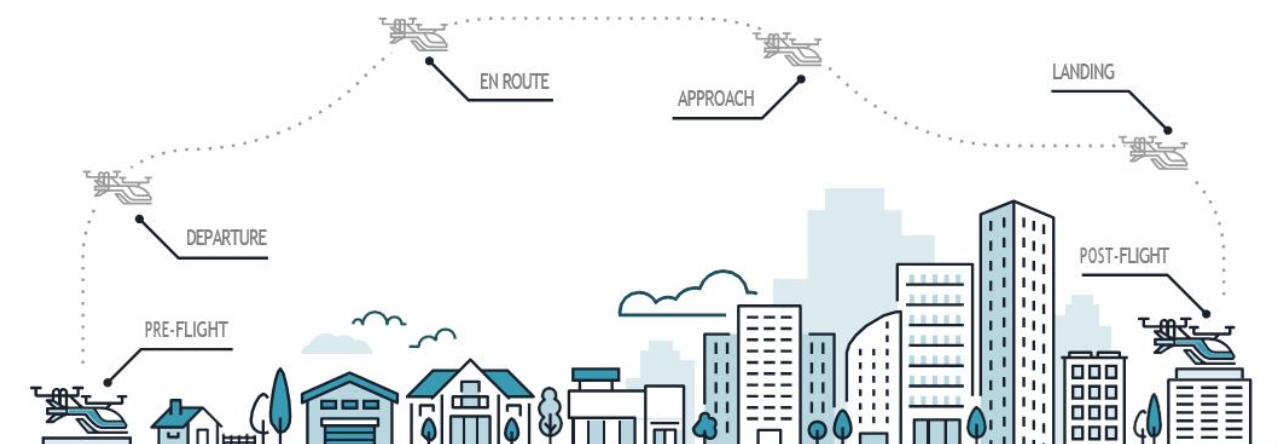
### Aterrissagem

A partir do momento em que a decisão de prosseguir até o vertiporto de destino é tomada durante o ponto de decisão (ou altitude/altura de decisão), o veículo UAM segue em direção ao pouso ou inicia o táxi para um ponto designado (caso o vertiporto disponha dessas áreas). Nessa fase, é crucial manter a precisão e a segurança durante a descida e aterrissagem.

### Pós-voos

Após o veículo UAM cessar o movimento, encerra-se o voo e inicia-se a etapa de segurança da aeronave. As atividades pós-voos geralmente abrangem o desembarque de passageiros e/ou carga, bem como as operações de manutenção do veículo (como o carregamento). É nessa fase que são tomadas medidas para garantir a integridade e o funcionamento adequado da aeronave, visando a próxima operação com máxima segurança e eficiência.

Figura 14 – Fases do Voo UAM



Fonte: Retirado de (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020)

### 3.7 CASO DE ESTUDO - MOBILIDADE AÉREA URBANA DA CIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo é reconhecida como uma das cidades líderes no cenário mundial de aviação de asa rotativa. De acordo com dados da Abraphe – Associação Brasileira dos Pilotos de Helicóptero, em análises referentes à frota e atividades operacionais de aeronaves de asa rotativa, a cidade se destaca como uma das maiores em termos de quantidade de helicópteros em operação. Registrando um número significativo, superior a 400 aeronaves (ABRAPHE, 2013).

Com base nesse fenômeno, diversos pesquisadores estudaram as causas para o rápido crescimento do tráfego de helicópteros. De acordo com Graham e Marvin (2001), o crescimento acelerado pode

ser interpretado dentro do contexto do que eles denominam urbanismo fragmentado. Ao analisarem o surgimento de novas paisagens urbanas que promovem a exclusão social, os helicópteros pessoais representam, por conclusão lógica, processos de segregação, permitindo aos utilizadores de se libertarem da necessidade de compartilhar espaços terrestres com os demais 16 milhões de habitantes da cidade (GRAHAM; MARVIN, 2002).

Contudo, o estudo de Saulo (2006) considera a explicação de Graham e Marvin bastante limitada. Dado que, todas as grandes cidades do mundo seriam propícias a desenvolvimentos significativos nas viagens aéreas urbanas, impulsionadas pela desigualdade e divisões sociais. Portanto, Saulo considera que deve haver uma combinação de fatores que tenham contribuído para o desenvolvimento singular dessa realidade em São Paulo. Esta combinação de fatores traduziu-se em duas condições sociais importantes: o receio em relação à violência e o anseio por um símbolo de status de grande impacto (CWERNER, 2006).

A primeira condição originou-se a partir da existência de uma percepção e preocupação com a violência na cidade. Esta agressividade levou ao desenvolvimento de uma cultura de segurança pessoal e residencial, que abrange medidas como cercas eletrificadas, veículos blindados e uma tendência crescente de optar por morar em condomínios fechados com segurança 24 horas por dia (CALDEIRA, 2000). Além disso, o aumento significativo dos casos de sequestro no final da década de 1990 acabou se tornando um incentivo adicional para a utilização de helicópteros por parte daqueles que possuíam recursos financeiros para tal (CWERNER, 2006).

Além de servirem como uma forma para um grupo restrito de indivíduos enfrentarem o medo da violência, os helicópteros passaram a representar um símbolo de status altamente desejado em São Paulo. Embora não haja informações oficiais sobre a distribuição de uso dos helicópteros na cidade, existem indícios de que as viagens aéreas urbanas em São Paulo expandiram seu escopo original, que era focado em deslocamentos pessoais e corporativos relacionados ao trabalho e reuniões, para abranger uma ampla variedade de usos sociais como viagens realizadas para fins de lazer. Deste modo, muitos edifícios comerciais, como hotéis, shopping centers e arranha-céus corporativos, é comum encontrar helipontos construídos em seus telhados. Com helipontos elevados se tornando rapidamente uma tendência comparável ao que as piscinas eram há cerca de uma década atrás, todos os tipos de edifícios, incluindo residenciais, estão buscando tê-los em suas estruturas. Em suma, o helicóptero trouxe uma nova forma de distinção social para uma classe privilegiada que está cada vez mais interessada em estabelecer barreiras e buscar separação (CWERNER, 2006).

### 3.8 ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO

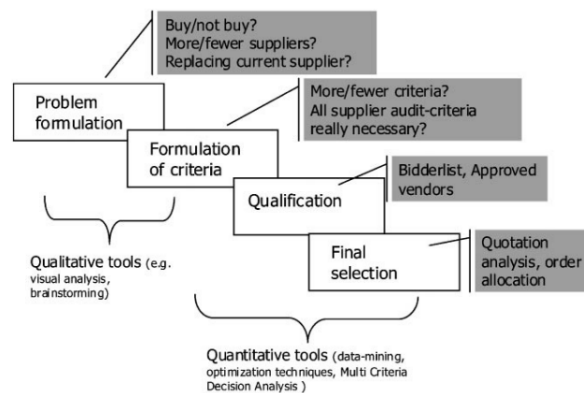
A capacidade de tomar decisões informadas e eficazes é fundamental para o sucesso de qualquer organização. Em um ambiente de negócios cada vez mais complexo e dinâmico, a pressão para tomar a decisão certa é mais intensa do que nunca. Nesse contexto, a criação de ferramentas avançadas de análise de dados e informações tornou-se uma prioridade estratégica para as organizações.

Boer, Labro e Morlacchi (2001) em seu estudo exemplifica essa dinâmica em que as organizações se tornam mais interdependentes de seus fornecedores, os impactos diretos e indiretos de decisões inadequadas no setor de compras tornam-se cada vez mais significativos. Além disso, graças a

globalização e internet, as opções de compras se tornaram diversas. Diante desses avanços, surge a necessidade premente de abordar a tomada de decisões de compras de forma mais estruturada e transparente, com foco especial na seleção criteriosa de fornecedores. Exemplos de tais abordagens incluem o uso de técnicas de apoio à decisão multicritério, métodos para estruturação de problemas, aplicação de programação matemática e a utilização de técnicas avançadas de análise de dados.

Ainda visando a seleção criteriosa de fornecedores, Boer, Labro e Morlacchi (2001) caracterizam esta apuração de fornecedores através de 4 etapas com o objetivo de identificar inicialmente um amplo conjunto de potenciais fornecedores e, gradualmente, estreitar essa escolha até chegar à seleção final. Como indica a Figura 15.

Figura 15 – Processo de Tomada de Decisão e Abordagens Utilizadas no Processo de Seleção de Fornecedores



Fonte: Retirado de (BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001)

A primeira etapa é a definição do problema a ser resolvido. Isso envolve questionar e esclarecer os objetivos que se pretendem alcançar por meio desse processo. Visto que, há diversas abordagens em relação à busca de fornecedores. Novos fornecedores diversifica e atualiza seu portfólio, já relacionamentos de longo prazo estabelecem parcerias com seus fornecedores. Deste modo é importante definir claramente os objetivos da seleção, para resultar em um julgamento correto acerca da situação em que a companhia se encontra (JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013b).

A próxima etapa é a formulação de critérios, nela o comprador concentra-se na definição de critérios de decisão que representem de forma nítida seus requisitos, abrangendo desde aspectos operacionais até estratégicos. É essencial traduzir esses conceitos em critérios tangíveis e utilizáveis para orientar o processo de seleção (JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013b).

A terceira etapa é a qualificação. O objetivo desta fase é reduzir o conjunto inicial de fornecedores para um grupo que será avaliado em detalhes durante a fase de seleção final (JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013b).

Por fim, a quarta etapa é a escolha final, nela é essencial classificar os fornecedores qualificados na etapa anterior e, se necessário, escolher um ou mais fornecedores (JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013b).

A seguir serão apresentados os dois métodos de análises multicritério utilizados no presente trabalho.

### 3.8.1 *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

O Método da Análise Hierárquica (AHP) é uma técnica amplamente utilizada na avaliação de múltiplos objetivos e critérios em problemas caracterizados por complexidade e subjetividade (RIBEIRO; ALVES, 2016). O método foi desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970 e busca replicar o processo de tomada de decisão humana diante de problemas complexos. Ou seja, convertendo julgamentos subjetivos intrínsecos do ser humano em medidas quantitativas (RIBEIRO; ALVES, 2016).

Um exemplo desta subjetividade está no fato do avaliador não precisar se envolver em processos detalhados de medição. Em vez disso, basta fornecer declarações verbais e qualitativas que expressem a importância relativa de um critério em relação a outro, bem como a preferência relativa entre fornecedores ou alternativas dentro de um critério. Essa abordagem simplificada torna o processo de tomada de decisão mais acessível e menos dependente de medições quantitativas (BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001).

Contudo, apesar do método utilizar medidas qualitativas, as imprecisões e ambiguidades de opiniões humanas ainda podem apresentar-se como empecilhos durante a análise. É neste contexto que a junção da teoria FUZZY (Lógica difusa) ao método AHP pode ser adequada a diversas situações onde a opinião humana apresenta incertezas, flexibilizando o processo (LINHARES; GUSSEN; RIBAS, 2012; HERNANDES, 2022). Uma boa comparação figurativa feita por Kohagura (2007) apresenta a forma clássica do método AHP como uma ferramenta que enxerga apenas o preto ou branco, em que, com a combinação da lógica FUZZY a ferramenta passa a enxergar diversos tons de cinza (KOHAGURA, 2007). Porém vale ressaltar que, para o presente trabalho será utilizado apenas a avaliação inicial dos critérios presentes no AHP, sem a necessidade de aplicar a lógica FUZZY durante a análise.

De acordo com Vieira (2006) o método AHP é fundamentado em três elementos essenciais. O primeiro é a estruturação dos critérios em hierarquias. Uma vez que, ao se deparar com problemas complexos, é comum formar uma ordem de importância nos princípios que irão criar a sua escolha ou decisão, o que reflete um processo natural de pensamento humano. A técnica AHP facilita essa estruturação, frequentemente realizada em uma forma de árvore, onde o critério de nível superior é decomposto em critérios mais detalhados. O segundo elemento é a definição de prioridades que são estabelecidas por meio de comparações diretas entre os elementos, considerando um critério específico. Por fim, temos a consistência lógica, em que o método oferece ferramentas, como índices, para avaliar a consistência das prioridades definidas. Isso significa que ele pode verificar se as decisões tomadas são coerentes com os julgamentos realizados.

Por fim, o método AHP pode ser encontrado na solução de problemas do setor aeronáutico. Um bom exemplo encontrado é o artigo realizado por Kartika e Hanani (2019), em que técnicas AHP foram utilizadas para selecionar o tipo de aeronave que será usada em rotas domésticas de alta frequência. Outro exemplo se encontra no artigo de Leite e Andrade (2015), em que a ferramenta foi utilizada em uma linha de produção de uma indústria aeronáutica de Minas Gerais.

### 3.8.2 *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*

Assim como o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) de Saaty, descrito na subseção anterior, o método TOPSIS desenvolvido por Hwang e Yoon se encontra como o segundo método mais utilizado para a tomada de decisão multicritério (ÇELIKBILEK; TÜYSÜZ, 2020). Contudo, além de ser simples e fácil de ser aplicado, este método pode ser utilizado em problemas que consistem em um grande número de critérios e alternativas, em que não se deseja realizar comparações pareadas entre as alternativas, diferente do AHP (ÇELIKBILEK; TÜYSÜZ, 2020).

O procedimento do TOPSIS envolve várias etapas essenciais. Primeiramente, realiza-se a normalização da matriz de decisão por meio da aplicação da normalização vetorial. Em seguida, é calculada a matriz de decisão normalizada ponderada. Após essa etapa, determinam-se a Solução Ideal Positiva (PIS) e a Solução Ideal Negativa (NIS). Posteriormente, é feito o cálculo da separação ou distância de cada alternativa em relação ao PIS e ao NIS. Isso possibilita a avaliação da proximidade relativa de cada alternativa em relação ao PIS por meio do cálculo do Índice de Classificação. Por fim, as alternativas são classificadas de acordo com a ordem de preferência estabelecida. Esse processo fornece uma base sólida para a tomada de decisões embasada em múltiplos critérios (ÇELIKBILEK; TÜYSÜZ, 2020).

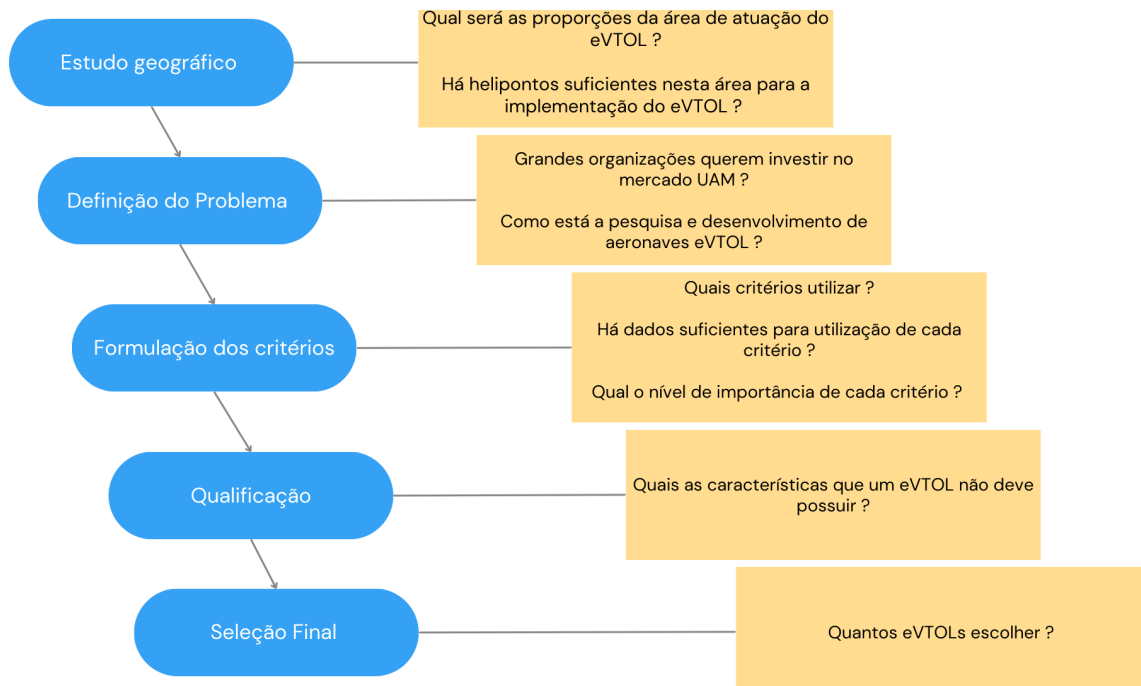
O objetivo fundamental do método TOPSIS é identificar a solução de compromisso que apresente a menor distância em relação à Solução Ideal Positiva ( $SI^+$ ) e, ao mesmo tempo, a maior distância em relação à Solução Ideal Negativa ( $SI^-$ ). Esse enfoque permite determinar a alternativa que melhor se ajusta aos critérios estabelecidos, proporcionando um balanço entre as melhores características desejadas e a minimização das indesejadas (ÇELIKBILEK; TÜYSÜZ, 2020).

Por último, assim como o método AHP, o TOPSIS também pode ser encontrado em uso para solucionar problemas do setor aeronáutico. O estudo feito por Dhara et al. (2022) utilizou o método para selecionar um jato executivo muito leve e mais adequado e preferido pelos passageiros com base na eficácia e conforto estético. Outro exemplo que pode ser citado é o artigo de Wang e Chang (2007) que utilizou a aplicação do TOPSIS na avaliação de aeronaves de treinamento para ajudar a Academia da Força Aérea em Taiwan a escolher o melhor treinador.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a comparação e escolha de um modelo eVTOL para atuar na mobilidade urbana de São Paulo, utilizará o método de decisão multicritério na seleção de fornecedores descrito na revisão bibliográfica, porém voltado para seleção de uma aeronave eVTOL. As etapas deste processo estão descritas na Figura 16.

Figura 16 – Processo Decisório para Seleção de eVTOL



Fonte: Adaptado de (BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001)

### 4.1 ESTUDO GEOGRÁFICO

Para uma melhor compreensão da utilização de aeronaves eVTOL na grande São Paulo, procurou definir uma área de atuação do táxi aéreo. Para isso, será utilizado a ferramenta disponibilizada no site GeoAISWEB, no qual é um serviço dedicado à disseminação das informações originadas pelo DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) em múltiplos formatos geográficos com visualizador de mapas (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2023).

Utilizará também o estudo de Ribeiro (2022), abordado na revisão bibliográfica, como base inicial para definir a área de atuação. Em seu trabalho, Ribeiro cita que há uma previsão de que o transporte de passageiros entre cidades e aeroportos se torne uma das principais aplicações iniciais da Mobilidade Urbana Aérea. Desta forma, o espaço de atuação do eVTOL deve procurar englobar os três aeroportos presentes na grande São Paulo, sendo estes, o aeroporto de Guarulhos, Congonhas e o Campo de Marte. Para simular a área de atuação, será considerado como centro da circunferência a Praça da Sé, por ser o centro geográfico da cidade de São Paulo.

## 4.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A definição do problema começou a ser estruturada a partir do estudo bibliográfico realizado. Durante a revisão, diversos problemas foram evidenciados a respeito da mobilidade urbana nas grandes metrópoles. Problemas como, congestionamentos, emissões de poluentes, poluição sonora, tempo de deslocamento elevados, entre outros. Uma das soluções apresentadas em diversos estudos foi a utilização de aeronaves elétricas VTOL para otimizar a mobilidade urbana nas grandes metrópoles.

Desta maneira, a definição do problema que guia este estudo será estruturada a partir de dois fatos cruciais. Primeiramente, é possível observar o crescente interesse e investimento de gigantes corporativos, como a Uber e Embraer, na integração de aeronaves eVTOL na mobilidade urbana em um futuro próximo. Esta tendência reflete uma clara demanda por soluções de transporte inovadoras e sustentáveis nas metrópoles modernas.

Em segundo lugar, à medida que analisou-se o amplo diretório de aeronaves eVTOL disponibilizado pela The Electric VTOL News™ by Vertical Flight Society, nos deparamos com uma impressionante lista de 890 aeronaves (The Electric VTOL News, 2016). Esse amplo número de projetos e conceitos ilustra a agitação nesse novo mercado emergente de eVTOL. Tendo em vista essa abundância de aeronaves em desenvolvimento, torna-se evidente que será importante levar em consideração a quantidade de aeronaves sendo desenvolvidas na formulação do problema.

## 4.3 FORMULAÇÃO DOS CRITÉRIOS

O estágio de formulação de critérios será desenvolvido em duas etapas. Visto que, Junior, Osiro e Carpinetti (2013a) ressaltam a existência de dois tipos de abordagens na seleção de fornecedores: as compensatórias e as não compensatórias. Na abordagem compensatória, as decisões são fundamentadas na ideia de que um desempenho insatisfatório em um determinado critério pode ser compensado por um desempenho excepcional em outros critérios. Portanto, a avaliação global do fornecedor e sua classificação podem refletir essa compensação. No entanto, em uma abordagem não compensatória, não há espaço para compensações na fase de qualificação da seleção de fornecedores. Nesta fase, o objetivo principal é classificar os fornecedores que atendem aos requisitos mínimos em critérios de desempenho específicos, a fim de qualificá-los como potenciais fornecedores. Nesse contexto, qualquer fornecedor que não atenda ao requisito mínimo em um determinado critério não é qualificado. Em suma, na etapa de qualificação, uma abordagem não compensatória é mais adequada. Por outro lado, na seleção final, todos os fornecedores qualificados atendem aos requisitos mínimos, permitindo que as decisões sejam tomadas com base em abordagens compensatórias.

Vale ressaltar que, a metodologia descrita por Junior, Osiro e Carpinetti (2013a) tomou como base a seleção de fornecedores. Para o presente trabalho, deverá ser aplicado o mesmo conceito de critérios, porém tendo em mente que os fornecedores serão diferentes tipos de eVTOLs.

### 4.3.1 Critérios não compensatórios

Para a formulação dos critérios não compensatórios utilizará como base o estudo realizado na referência bibliográfica e no diretório de aeronaves descrito anteriormente. A seguir serão apresentados

os principais argumentos que definirão os critérios não compensatórios.

Para o caso da pesquisa bibliográfica, será utilizado na formulação dos critérios não compensatórios o fato de que aeronaves eVTOL com um grau de complexidade mais elevado enfrentam desafios substanciais no processo de desenvolvimento, podendo resultar em atrasos significativos em relação a projetos de menor complexidade, que apresentam uma jornada de desenvolvimento mais direta e, portanto, apresentam protótipos funcionais em um prazo mais curto. Além disso, a análise de literatura mostrou que as aeronaves eVTOL e os skyports devem aderir a regulamentações similares às de aeródromos tradicionais. Portanto, a busca por regulamentações claras e diretrizes específicas para skyports é fundamental, visando assegurar um ambiente de operações seguro e eficiente para as aeronaves eVTOL, bem como para os passageiros e a comunidade em geral. Esta necessidade de regulamentação servirá também na formulação dos critérios.

Ainda no âmbito da pesquisa bibliográfica, será aproveitado o estudo populacional que evidencia o fato de que as aeronaves eVTOL não tripuladas enfrentam consideráveis desafios no que diz respeito à obtenção de certificações, bem como carecem do apoio da população.

Aproveitará também para a formulação dos critérios o diretório de aeronaves. Em razão de, um dado que será importante para a criação dos parâmetros não compensatórios se manifestou após identificar modelos de aeronaves que não estão direcionados ao transporte de passageiros. Dentre essas variedades de eVTOLs, é possível identificar projetos com aplicações voltadas para finalidades diversas, como transporte de cargas, serviços de emergência e funções especializadas. Não apenas diferentes propósitos de aeronaves foram identificados, como também eVTOLs que utilizam a combustão interna de forma híbrida, sendo outro ponto importante a ser considerado na criação dos critérios.

#### **4.3.2 Critérios compensatórios**

De maneira similar aos critérios não compensatórios, será utilizado a revisão bibliográfica como base para definição dos critérios da escolha final. A seguir serão apresentados os principais argumentos que definirão os critérios compensatórios.

Em princípio a pesquisa bibliográfica empregará o papel fundamental na formulação dos compensatórios. Uma vez que, ficou claro através dos estudos que o fluxo de pessoas na utilização do eVTOL como táxi aéreo é um elemento de considerável importância. Além disso, o volume de tráfego das aeronaves é um fator crítico a ser avaliado. Esse volume não é uniforme, sendo distribuído de maneira desigual e em direções variadas, incluindo também a consideração dos horários de pico de voo. Como resultado, é imperativo que a aeronave eVTOL consiga suportar um fluxo considerável de pessoas e viagens caso necessário. É importante ressaltar que o montante de investimento e as despesas operacionais estão diretamente ligados à quantidade de passageiros.

Outro fator importante da revisão que auxiliará a formulação de critérios é o estudo populacional empregado por Edwards e Price (2020). Neste estudo, ficou evidente que a maior preocupação da população em relação ao uso do eVTOL como táxi aéreo é a segurança. Esta é uma questão fundamental que precisa ser abordada com rigor e precisão para garantir a aceitação e confiança do público nesse novo meio de transporte aéreo.

#### 4.4 QUALIFICAÇÃO

Para esta etapa do processo decisório de seleção, será utilizado o diretório de aeronaves eVTOL disponibilizado pela The Electric VTOL News™ by the Vertical Flight Society para analisar um total de 890 aeronaves. Sendo deste total, 320 aeronaves Vectored Thrust, 110 Hover Bikes/Personal Flying Devices, 149 Lift + Cruise, 255 Wingless e 56 aeronaves Electric Rotorcraft (The Electric VTOL News, 2016). Como o objetivo da qualificação é reduzir o conjunto de alternativas para um grupo que possa ser analisado com mais riqueza e detalhe durante a última etapa de escolha final, serão aplicados os critérios não compensatórios. Para que assim, alguma aeronave que apresente um ou mais dos critérios independentes como característica seja excluída da escolha final. Com isso, será possível eliminar da análise eVTOLs que não contemplem os atributos julgados necessários para introduzir esta tecnologia na mobilidade urbana de São Paulo.

#### 4.5 ESCOLHA FINAL

A etapa da escolha final será realizada em duas fases. A primeira etapa implicará no uso do método AHP para estruturação e hierarquização dos critérios compensatórios. Realizada esta etapa, a ferramenta TOPSIS será utilizada para gerar uma "solução ideal" e "solução não ideal" para cada critério avaliado. Calculando assim a distância em termos quantitativos entre cada alternativa e essas soluções ideais e não ideais gerando uma pontuação para cada alternativa. Quanto mais próxima de uma solução ideal e mais distante de uma solução não ideal, maior é a pontuação da alternativa. Por fim, após obter as pontuações, pode-se aplicar a ponderação realizada dos critérios durante o método AHP, obtendo assim, o modelo de eVTOL que apresenta menor distância da solução ideal nos critérios julgados mais relevantes.

A escolha de utilizar dois métodos de comparação durante a análise se deu pelo fato de que como citado anteriormente no tópico de qualificação, há no diretório um total de 890 aeronaves, mesmo após a utilização dos critérios não compensatórios, é de se esperar um grande número de aeronaves qualificadas para a seção final. Dessa maneira, o método AHP, por utilizar comparações par-a-par das alternativas (no caso modelos de eVTOL) necessitaria de um elevado número de comparações. Podendo assim, gerar riscos de inconsistências nos julgamentos e tornar o processo de tomada de decisão multicritério menos confiável. Uma vez que, os decisores podem inadvertidamente fornecer informações contraditórias. Isso pode ocorrer devido à complexidade crescente quando se tenta manter a coerência entre muitas comparações. Logo, optou pela utilização do método AHP apenas para obter a importância comparativa dos critérios, podendo ser chamado de peso. A análise TOPSIS por trabalhar com as distâncias quantitativas de um valor ideal e um não ideal funcionará melhor para o caso em questão.

A seguir serão apresentados as metodologias de cada um das ferramentas de decisão descritos nos parágrafos anteriores.

#### 4.5.1 AHP para definição dos pesos dos critérios

Como foi apresentado anteriormente, o método AHP será utilizado para definir a importância comparativa dos critérios. Isso envolve a comparação das características de cada par de elementos em diferentes níveis por meio de matrizes e, posteriormente, a síntese das prioridades.

Portanto, após a definição dos critérios compensatórios, será realizada a avaliação par-a-par entre os critérios, no qual uma tabela cinco por cinco será desenvolvida com os critérios em ambas as colunas e linhas na mesma ordem. Dessa maneira, o primeiro critério será comparado em nível de importância com ele mesmo, depois com o segundo, terceiro e quarto. Após realizar a comparação da primeira linha, o segundo critério acomodado na segunda linha será comparado com o primeiro, depois com ele mesmo, e seguida com o terceiro e com o quarto. O mesmo ocorre para as demais linhas que comportam os critérios restantes. Um exemplo desta técnica está na tabela 3.

A pontuação equivalente para o grau de importância de um critério em relação ao outro seguirá a tabela 2.

Tabela 2 – Comparações do AHP

PONTUAÇÃO	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Igual importância	Critérios/ alternativas contribuem igualmente para o objetivo
2	Importância pequena de um critério sobre o outro	Leve preferência de um critério/ alternativa em relação ao outro
4	Importância grande ou essencial	Forte preferência de um critério/ alternativa em relação ao outro
6	Importância muito grande ou demonstrada	Muito forte preferência de um critério/ alternativa em relação ao outro
8	Importância absoluta	A preferência é da mais alta ordem possível

Fonte: (SAATY, 1991).

Após realizada a comparação par a par de cada critério, deverá ser obtido uma tabela similar a do exemplo abaixo.

Tabela 3 – Exemplo da Matriz A Resultante da comparação par-a-par dos Critérios

	C1	C2	C3	C4
C1	1	5	2	1/3
C2	1/5	1	1/4	1/6
C3	1/2	4	1	1/4
C4	3	6	4	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode-se observar na tabela 3, a diagonal principal é apresentada pela pontuação 1, visto que, comparar um critério com ele mesmo sempre manifestará igual importância. As demais comparações indicam a preferência de um critério em relação ao outro, utilizando também a relação inversamente proporcional entre dois critérios avaliados.

Por fim, deverá ocorrer uma ponderação normalizada dos critérios. Primeiramente utilizará a fórmula 1 para obter os pesos, identificado pela letra P. Em seguida, aplicará a fórmula 2 para

normalizar os pesos obtidos. Vale ressaltar que, a participação da metodologia AHP acabará aqui, após obter os valores dos pesos normalizados de cada critério.

$$P = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

$$P_{norm} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Contudo, apesar do método AHP já ter cumprido o seu objetivo até este ponto, é necessário realizar uma avaliação das consistências. Ou seja, será realizado o cálculo da proporção de consistência (CR), que é usado para mensurar a confiabilidade das comparações par-a-par realizadas nas etapas anteriores. A equação a seguir representa o cálculo deste índice, em que, após calculado o valor de CR deve ser menor ou igual a 0,10.

$$CR = \frac{CI}{RI} \Rightarrow CR \leq 0,10 \quad (3)$$

Para o cálculo da proporção de consistência deverá ser determinado o Índice de Consistência (CI) representado pela fórmula 4 e o Índice de consistência aleatória (RI) pela tabela 4 com seus valores predefinidos, em que n será a ordem da matriz de comparação.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (4)$$

Tabela 4 – Valor do índice aleatório RI

n	RI
3	0,58
4	0,9
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45

Fonte: (RIBEIRO; ALVES, 2016).

Para o cálculo da fórmula 4 deverá ser definido  $\lambda_{max}$  que representa o autovalor máximo da matriz de comparação (A), retratado pela fórmula a seguir.

$$\lambda = \frac{A \cdot P_{norm}}{P_{norm}} \quad (5)$$

$$\lambda_{max} = média[\lambda] \quad (6)$$

Para o cálculo do autovalor, deverá então dividir o resultado da multiplicação entre a matriz A e os pesos normalizados pelo próprio peso normalizado. Por fim obter o autovalor máximo através da

média do autovalor calculado. Após os cálculos do autovalor, deverá ser verificada a ordem da matriz de comparação (n) para determinar o valor de CI.

Por último, com a ordem da matriz verificada, será possível obter o valor de RI pela tabela 4, para assim determinar a proporção de consistência (CR) que deverá ser menor ou igual a 0,10 para indicar consistência na comparação par a par dos critérios.

#### 4.5.2 TOPSIS para seleção de alternativas

Neste capítulo, será explorado em detalhes a aplicação do método TOPSIS no processo de tomada de decisão, destacando sua relevância e os procedimentos específicos adotados para avaliar e classificar as alternativas de acordo com os critérios que serão estabelecidos.

Após realizada as etapas de formulação de critérios, qualificação e ponderação dos critérios utilizando o método AHP, será possível finalmente realizar a análise TOPSIS. No contexto tradicional, esta análise frequentemente emprega uma escala que varia de "péssimo" a "excelente", atribuindo notas que vão de 1 a 10 às alternativas nos critérios em estudo. Ou seja, esta análise apresenta uma etapa semelhante ao que será realizado na ferramenta AHP, exemplificado pela tabela 3, em que, julgamentos subjetivos são transformados em medidas quantitativas. No entanto, devido à natureza quantitativa dos critérios considerados no presente estudo, a utilização dessa escala tradicional torna-se desnecessária e, portanto, foi dispensada.

Deste modo, dando continuidade, deverá ser elaborado duas matrizes. A primeira, chamada de matriz D, contendo as notas ( $d_{ij}$ ) das alternativas ( $A_i$ ) para cada critério ( $C_j$ ). Como falado anteriormente, os parâmetros  $d_{ij}$  serão apenas os valores quantitativos sem a necessidade de atribuir nota para as alternativas. A segunda matriz, chamada de W, deverá conter os pesos normalizados ( $w_j$ ) para cada critério, que serão adquiridos no processo AHP. As tabelas a seguir exemplificam as matrizes em questão.

Tabela 5 – Exemplo da matriz D

	C1	C2	...	$C_j$
A1	$d_{11}$	$d_{12}$	...	$d_{1j}$
A2	$d_{21}$	$d_{22}$	...	$d_{2j}$
:	:	:		:
$A_i$	$d_{i1}$	$d_{i2}$	...	$d_{ij}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Exemplo da matriz W

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_j]$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A próxima etapa representa a normalização das notas ( $d_{ij}$ ) em cada critério. Para isso utilizará a equação 7. Em seguida, será realizada a ponderação das notas normalizadas de acordo com a fórmula 8, em que, multiplicaremos as avaliações ponderadas ( $v_{ij}$ ) pelos pesos normalizados ( $w_j$ ) que serão determinados na análise AHP. Com isso, é de se esperar que este processo resulte em uma matriz Dn com os valores normalizados de cada alternativa para cada critério ponderados.

$$v_{ij} = \left( \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \right) \quad (7)$$

$$dn_{ij} = w_j \cdot v_{ij} = w_j \cdot \left( \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \right) \quad (8)$$

A matriz Dn obtida será de grande importância, visto que, é a partir dela que será calculado a Solução Ideal Positiva ( $SI^+$ ) e Solução Ideal Negativa ( $SI^-$ ). Para este cálculo, a  $SI^+$  será o valor máximo de cada alternativa para o mesmo critério. Com exceção do critério de capacidade de passageiros, no qual optará por Solução Ideal Positiva a quantidade de 5 passageiros. A Solução Ideal Negativa, por sua vez, será definida como o menor valor apresentado de cada alternativa para o mesmo critério.

Definindo as Soluções Ideais Negativas e Positivas para cada critério, deverá ser calculado as distâncias entre cada alternativa e as soluções. Sendo  $D_i^+$  a distância entre a alternativa ( $A_{ij}$ ) e a Solução Ideal Positiva para um determinado critério ( $C_j$ ).  $D_i^-$  representa a mesma coisa, porém para a distância da Solução Ideal Negativa. Para estes cálculos, serão utilizadas as equações 9 para a  $D_i^+$  e 10 para  $D_i^-$ .

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (dn_{ij} - dn_j^+)^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (dn_{ij} - dn_j^-)^2} \quad (10)$$

Por fim, após obter as distâncias, deverá ser calculado o Índice de Proximidade ( $CC_i$ ) para cada alternativa dado pela fórmula 11. Deste modo, quanto mais distante o valor de uma alternativa para um critério for da  $SI^-$  daquele critério melhor. O mesmo pensamento é aplicado para a  $SI^+$ , em que, quanto menor for a distância da alternativa para esta solução melhor. O Índice de Proximidade possibilita visualizar o quão distante uma alternativa está das soluções, com isso, quanto maior o índice melhor opção de escolha a alternativa será, com base nos critérios escolhidos.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$





ou se encontrarem condições meteorológicas adversas na rota. Deste modo, a criação de rotas para a mobilidade aérea urbana teria o suporte de 264 helipontos, caso não interditados ou impraticáveis, como aeródromos de alternativa em uma eventual situação de emergência.

De maneira geral, a análise geográfica resultou em dados promissores para a implementação da mobilidade aérea na grande São Paulo. Apresentando bons números de helipontos presentes e uma região de atuação com proporções aceitáveis, no qual, uma aeronave eVTOL deverá ter um alcance mínimo de 50 Km para conseguir cruzar a circunferência delimitada.

## 5.2 RESULTADO DA DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Como descrito no capítulo anterior, a definição do problema teve como base dois fatores cruciais. Resumidamente, o primeiro é a crescente aspiração de grandes organizações, a exemplo da Uber e Embraer, de integrar veículos eVTOL na mobilidade urbana em um futuro próximo. O segundo envolve a impressionante lista de 890 aeronaves, revelando a abundância de projetos e conceitos que estão em desenvolvimento, com muitos desses projetos expressando a ambição de ingressar nesse novo e empolgante mercado de eVTOL.

Diante desse panorama ambicioso e diversificado, surge a necessidade premente de conduzir um estudo abrangente sobre a tecnologia eVTOL, realizado durante a revisão bibliográfica, e identificar a aeronave eVTOL mais apropriada para ser integrada como taxi aéreo na malha de mobilidade urbana. Esta seleção exige uma análise criteriosa que leva em consideração uma série de critérios, abrangendo desde desempenho técnico, segurança e eficiência energética até considerações logísticas, como capacidade de transporte e infraestrutura de suporte. Portanto, o objetivo deste estudo é definir e realizar uma estrutura sólida para a escolha da aeronave eVTOL que melhor atenda às demandas e desafios do como taxi aéreo em uma mobilidade urbana no futuro.

## 5.3 RESULTADO DA FORMULAÇÃO DOS CRITÉRIOS

Para os resultados da formulação de critérios, nossa abordagem visa avaliar a seleção de alternativas considerando tanto os critérios que permitem a compensação entre diferentes características quanto aqueles que adotam uma abordagem mais rígida, na qual não se permite compensações. A combinação dessas duas abordagens oferece uma visão abrangente e aprofundada do processo de seleção. Vamos agora explorar em detalhes os resultados obtidos ao aplicar os materiais citados no capítulo anterior para a formulação desses critérios e como eles irão impactar a qualificação e escolha final em nossa análise multicritério.

### 5.3.1 Critérios não compensatórios

A lista a seguir mostra os critérios não compensatórios que foram definidos a partir do estudo da revisão bibliográfica e do diretório de aeronaves. Vale ressaltar que, durante a etapa de qualificação, foram excluídos qualquer aeronave que possua um ou mais dos critérios apresentados abaixo.

## **Design com alto grau de complexidade**

Durante nossa análise no diretório da The Electric VTOL News™ by the Vertical Flight Society, identificamos que vários projetos de eVTOLs se destacam devido ao alto grau de complexidade em relação a seus componentes e à operação em espaços aéreos controlados (The Electric VTOL News, 2016). No que diz respeito aos componentes, notamos que muitos conceitos incorporam tecnologias avançadas, como a utilização de motores de plasma de próxima geração. A integração bem-sucedida desses motores na aviação implica a superação de desafios técnicos significativos, incluindo o desenvolvimento de sistemas de propulsão altamente eficientes e confiáveis. Portanto, é razoável antecipar que a primeira fase de implementação de eVTOLs na mobilidade urbana incluirá aeronaves equipadas com sistemas de propulsão convencionais. Visto que, Vieira et al. 2019 em seu trabalho deixa claro o fato de que projetos menos complexos provavelmente voarão seus protótipos primeiro (VIEIRA; SILVA; BRAVO, 2019).

Em relação aos espaços aéreos controlados, alguns conceitos apresentam uma fusão entre veículos VTOL e automóveis, efetivamente criando carros voadores. Porém, nas pesquisas realizadas, para garantir o funcionamento eficiente e a contribuição das aeronaves eVTOL à mobilidade urbana, é imperativo que sua integração à infraestrutura de transporte da cidade seja cuidadosamente planejada e executada através dos *skyports* (GRANDL et al., 2018). Visto que, os *skyports* estão propensos a seguirem as mesmas regras que um aeródromo, assim como as aeronaves deverão seguir os regulamentos de tráfego aéreo estabelecidos em cada país. Portanto, podemos afirmar que é necessário estabelecer padrões para os vertiports e aeronaves, visando aprimorar a segurança e otimizar as experiências de viagem (AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I, 2020). Assim, a fiscalização de carros voadores que apresentam a possibilidade de decolar e operar fora dos pontos designados para veículos VTOL se tornaria um empecilho para o controle do espaço aéreo.

## **Aeronaves autônomas que não apresentam um piloto**

Embora a ideia de aeronaves autônomas seja amplamente almejada por grandes empresas, uma preocupação significativa se destaca. Edwards e Price (2020), em seu trabalho, destacam que a hesitação dos passageiros em voar em aeronaves sem a presença de pilotos humanos é uma questão de extrema relevância. Isso se deve ao fato de que a confiança dos viajantes muitas vezes está intrinsecamente ligada à presença de pilotos humanos e à associação com marcas renomadas. Adicionalmente, é importante notar que o processo de certificação de tecnologias para a operação de aeronaves autônomas no transporte de passageiros tem enfrentado desafios e atrasos (EDWARDS; PRICE, 2020). Podendo assim, prejudicar a implementação dos eVTOLs a curto prazo.

## **Aeronave deve ser voltada para táxi e transporte de passageiros com pelo menos duas pessoas a bordo contando com o piloto**

No diretório, observou-se que algumas aeronaves têm como finalidade servir como ambulâncias aéreas ou para o transporte de carga (The Electric VTOL News, 2016). Contudo, dado que a principal meta dos veículos eVTOL é aprimorar a mobilidade urbana por meio do transporte de

passageiros, torna-se essencial que essas aeronaves sejam voltadas para o transporte de pessoas e tenham a capacidade de transportar, no mínimo, um passageiro e um piloto.

### **Utilização de apenas motores híbrido-elétricos**

Durante a análise do diretório, observamos que muitos conceitos de aeronaves eVTOL estão adotando exclusivamente motores híbrido-elétricos (The Electric VTOL News, 2016). Uma das possibilidades para este cenário pode ser as limitações da tecnologia atual de motores elétricos e baterias (MARTINS, 2021). Estas limitações não atendem às demandas energéticas de projetos que buscam aeronaves de maiores dimensões com peso elevado ou eVTOLs que almejam um desempenho aprimorado em termos de alcance e velocidade, situação na qual as baterias atuais não têm capacidade suficiente para prover uma performance satisfatória (MARTINS, 2021).

Adicionalmente, considerando que um dos principais objetivos dos eVTOLs é fornecer um meio de transporte ambientalmente sustentável, alinhado com a matriz energética brasileira baseada em fontes renováveis, a adoção de motores híbrido-elétricos ainda pode resultar em emissões de poluentes. No entanto, é importante ressaltar que algumas aeronaves apresentam configurações híbrido-elétricas com a possibilidade de operar com fontes de energia 100% elétricas, o que as torna uma exceção a esse critério.

### **Falta de dados disponíveis no diretório, assim como projetos declarados extintos**

Dentro do diretório, notou-se que nem todas as aeronaves fornecem dados adequados, e algumas não oferecem informações relevantes para enriquecer nossa análise na fase de seleção final. Além disso, identificamos projetos declarados como extintos no diretório, o que sinaliza que as respectivas organizações não têm a intenção de prosseguir com essas propostas (The Electric VTOL News, 2016).

### **Aeronaves da categoria *Hover Bikes/Personal Flying Device***

As aeronaves pertencentes à categoria *Hover Bikes/Personal Flying Device*, conforme detalhado na revisão bibliográfica, são projetadas para acomodar apenas uma pessoa, operando de forma semelhante a uma motocicleta voadora (BACCHINI; CESTINO, 2019). Nesse contexto, essas aeronaves não têm como finalidade principal o transporte de passageiros.

## **5.3.2 Critérios compensatórios**

A seguir serão apresentados os critérios compensatórios que resultaram do estudo bibliográfico realizado no presente trabalho. Destaca-se que, os julgamentos apresentados abaixo serviram para análise da escolha final, deste modo, buscou-se a maximização desses parâmetros nas aeronaves selecionadas após a qualificação.

### **Alcance estimado**

Para a efetiva implementação da tecnologia eVTOL na mobilidade urbana, é imperativo que as aeronaves possuam um alcance adequado para cobrir a extensa área delimitada na análise geográfica, a qual servirá de base para o desenvolvimento das futuras rotas da UAM. Além

disso, a capacidade de uma aeronave em voar longas distâncias sem a necessidade de recarga é crucial para otimizar a eficiência do transporte, permitindo a realização de múltiplas viagens ininterruptas (RIBEIRO, 2022). Embora o conceito de autonomia seja fundamental neste cenário, devido à carência de dados precisos, utilizou-se o alcance estimado como uma aproximação viável para análise.

### **Velocidade de cruzeiro**

A seleção do critério de velocidade de cruzeiro foi baseada em sua capacidade de fornecer estimativas de tempo de voo, essenciais para estudos posteriores, e, ao mesmo tempo, proporcionar uma visão abrangente do desempenho do eVTOL dentro da área de operação. Em outras palavras, uma aeronave com alta velocidade de cruzeiro completará as rotas em um período mais curto, permitindo um maior número de viagens e facilitando o atendimento dos horários de pico (RIBEIRO, 2022). Isso não apenas aprimora a eficiência do sistema, mas também se torna um fator atrativo para os passageiros, que chegarão a seus destinos de forma rápida e eficaz.

Contudo, é importante observar que, apesar de uma alta velocidade de cruzeiro reduzir o tempo de voo, todos os eVTOLs que foram qualificados apresentam velocidades de cruzeiro notavelmente superiores às vias de automóveis de São Paulo, já indicando assim uma rapidez no trajeto em relação aos carros e ônibus.

### **Capacidade de passageiros**

A capacidade de passageiros está intrinsecamente ligada ao fluxo de indivíduos transportados pela mobilidade aérea urbana. Portanto, quanto mais passageiros utilizarem a mesma aeronave para o transporte, maior será o deslocamento de pessoas por meio de veículos não poluentes, reduzindo, conseqüentemente, a dependência das infraestruturas projetadas para automóveis e mitigando o risco de congestionamentos. Além disso, uma sólida capacidade de passageiros garante que o modelo selecionado seja capaz de acomodar variações no volume de tráfego das aeronaves, adaptando-se tanto aos horários de pico quanto às horas de menor fluxo de passageiros (RIBEIRO, 2022).

### **Características de segurança**

No que diz respeito a este critério, a segurança está intimamente relacionada ao número de hélices e motores elétricos presentes na aeronave. É importante destacar que as aeronaves eVTOL ainda não possuem certificações para operações civis, especialmente no contexto da mobilidade urbana aérea. Nesse cenário, o conceito de segurança é predominantemente baseado na Propulsão Elétrica Distribuída (DEP). A DEP acrescenta uma camada adicional de segurança por meio da redundância, envolvendo a presença de múltiplas hélices e motores na aeronave. Isso significa que, se um ou mais motores ou hélices apresentarem falhas, os outros em pleno funcionamento têm a capacidade de realizar um pouso seguro (The Electric VTOL News, 2016). Em algumas categorias de eVTOL, como aquelas com asas, é possível planejar o voo planado no caso do desligamento das hélices elétricas. Contudo, a característica de segurança que abrange todas as categorias de aeronaves estudadas é a Propulsão Elétrica Distribuída.

#### 5.4 RESULTADO DO PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO

Na fase de qualificação da análise multicritério para os eVTOLs, aplicou-se critérios não compensatórios às 890 aeronaves listadas no diretório, sendo que, aeronaves que apresentaram um ou mais dos critérios foram excluídas. Esse processo resultou em tabelas abrangendo as diversas categorias de eVTOLs, revelando as aeronaves que avançaram para a etapa de seleção final. Contendo, 23 aeronaves *Vectored Thrust*, 14 *Lift + Cruise*, 6 *Wingless* e 11 aeronaves *Electric Rotorcraft*.

As tabelas de cada categoria permitem uma visão clara dos candidatos que melhor se adequa para a integração na mobilidade urbana. Esse método de qualificação nos permitirá avançar para a próxima fase da análise, onde os eVTOLs mais promissores serão submetidos a critérios compensatórios e avaliações mais aprofundadas. Essa abordagem se traduzirá em uma seleção cuidadosa das aeronaves que têm maior potencial para aprimorar a mobilidade urbana.

A seguir estão as tabelas com os candidatos à próxima fase de análise, já com a inclusão dos parâmetros compensatórios que foram utilizados na escolha final. Vale ressaltar que, os dados introduzidos nas tabelas foram retirados de (The Electric VTOL News, 2016)

Tabela 7 – Tabela Comparativa da Categoria *Electric Rotorcraft*

TABELA COMPARATIVA - Electric Rotorcraft	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
ARC Aerosystems Linx P3	2	150	110	2	2
eJet Aerospace GJet AEon	2	185	308	2	1
eJet Aerospace GJet Koan	4	250	562	2	1
Fraundorfer Aeronautics Tensor	5	213	600	6	-
Horizon AutoCopters Auto-Copter	2-8	175-200	600-1000	2	-
Jaunt Air Mobility Journey	4	282	129	5	5
Pennsylvania State University MG-76 Catacopter	4	172	-	2	6
Rotor X eTransporter	6	225	322	4	4
Skyworks Aeronautics eGyro	2-4	161-241	161	-	2
University of Maryland - Blitzen	4	241	161	2	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Tabela Comparativa da Categoria *Vectored Thrust*

TABELA COMPARATIVA - Vectored Thrust	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
MOBi-One V3	4	241	105	9	9
AMSL Aero Vertia	5	300	250	8	8
Eversor	4-8	161	204	6	6
LimoConnect	6	322	241	8	8
Baaz B5	4	-	200	9	9
Archer Aviation Midnight	4	241	32-80	12	12
Joby Aviation S4	4	322	161	6	6
Overair Butterfly	5	322	161	4	4
Bell Nexus 6HX	4	-	241	6	6
TCab Tech E20	4	260	200	8	6
Lilium Jet (7-seater)	6	250	250	36	36
Starling (concept design)	4	278	175	4	12
Vertical Aerospace VX4	4	241	161	8	8
Ship to Shore Air Limo (SSAL)	5	166	-	8	8
Supernal (Hyundai Motor Company) S-A1	4	290	97	8	8
Uber Elevate eCRM-001	4	241	96	10	-
Uber Elevate eCRM-004	4	241	96	10	-
Turkey Demirkanat Helicop- ter Team	4	171	-	8	8
Textron eAviation Nexus	3	120	185	6	6
Bell Nexus 4EX	4	241	97	4	4
KARI OPPAV	4-5	200	50	8	8
Delft University of Techno- logy Aether (concept design)	4	176	160	6	6
Skynet Project Genesys X-2	7-8	250	400	8	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Tabela Comparativa da Categoria *Lift and Cruise*

TABELA COMPARATIVA - Lift and Cruise	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Aerofugia Technology TF-2	4	-	500	9	9
Beta Technologies ALIA-250	4	-	500	5	5
Airbus CityAirbus NextGen	3	120	80	8	16
Eve Air Mobility Eve (military model)	4	-	100	10	10
Volant Aerotech VE25 X1	4	200	200	8	10
Eve Air Mobility Eve V3	4	241	96	9-10	-
Terrafugia TF-2A	2	180	100	9	-
Georgia Institute of Technology - Balto	4	194	252	10	10
TechXGeek Marie	4	160	150	9	9
Korea Aerospace Industries (KAI) Unnamed	4	-	400	6	6
Uber Elevate eCRM-003	4	241–322	96	5	-
Uber Elevate eCRM-002	4	241	96	8	-
Pipistrel 801 eVTOL	4	-	97	9	-
Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	4	278	-	18	36

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Tabela Comparativa da Categoria *Wingless*

TABELA COMPARATIVA - Wingless	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Moller International Firefly	3	128	161	8	8
Star 8 Green EMAV-4 Flying Taxi	3	-	-	14	14
SkyDrive SD-05	1	100	5 - 10	12	12
SKYDRIVE	2	100	15	12	12
Volocopter 2X	1	102	27	18	18
Volocopter VoloCity	1	90	35-65	18	18

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.5 RESULTADO DA ESCOLHA FINAL

Como citado anteriormente, a escolha final será composta por duas fases envolvendo dois tipos diferentes de análises. Empregou-se os métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) e o TOPSIS. Esses métodos, amplamente reconhecidos na literatura, foram aplicados para avaliar e classificar as alternativas disponíveis no contexto do presente estudo.

Os resultados obtidos por meio do método AHP demonstraram-se altamente satisfatórios. Eles serviram como uma base sólida para a tomada de decisão, oferecendo uma estrutura analítica que permitiu uma compreensão mais profunda da importância de cada critério compensatório considerado. Os detalhes dos resultados do AHP serão apresentados na subseção a seguir, fornecendo *insights* sobre as classificações dos critérios.

Para o método TOPSIS, os resultados refletiram consistentemente o nível de importância estabelecido durante a análise AHP. Estes resultados conduziram à seleção final de uma aeronave eVTOL para cada categoria, bem como à identificação de um eVTOL que se destacou entre os vencedores de cada categoria. Este último se posiciona como o candidato mais promissor para a integração na mobilidade aérea de São Paulo, alinhando-se com os critérios considerados cruciais para essa implementação. Na subseção a seguir serão apresentadas as tabelas com os resultados detalhados da análise TOPSIS.

### 5.5.1 Resultado da análise AHP

Após a definição e detalhamento dos critérios compensatórios, foi possível dar início a análise AHP. A avaliação par-a-par entre os critérios resultou em na tabela 11 onde é possível ver as relações entre os quesitos de acordo com a tabela 2. Além disso, calculou-se os pesos de cada critério utilizando a equação 1, e com a fórmula 2 obteve-se os seus pesos normalizados. Que também foram incluídos na forma de porcentagem para melhor visualização.

Tabela 11 – Tabela Comparativa par-a-par dos critérios

	Alcance estimado	Velocidade de cruzeiro	Capacidade de passageiros	Características de segurança	Pesos	Pesos normalizados	Porcentagem
Alcance estimado	1	4	2	2/5	7,40	0,290	29,04%
Velocidade de cruzeiro	1/4	1	1/4	1/4	1,75	0,069	6,87%
Capacidade de passageiros	1/2	4	1	1/3	5,83	0,229	22,89%
Características de segurança	2 1/2	4	3	1	10,50	0,412	41,20%
Somatória	-	-	-	-	25,48	1,000	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação do Método AHP para atribuição de pesos aos critérios a serem aplicados na seleção de eVTOLs se mostrou eficaz. Nessa etapa, foram avaliados critérios essenciais, como alcance estimado, velocidade de cruzeiro, capacidade de passageiros e características de segurança, a fim de determinar quais deles desempenhariam um papel mais relevante na seleção final. Os resultados obtidos com o método AHP forneceram uma base sólida para a escolha dos eVTOLs que melhor atendem aos requisitos de mobilidade urbana. Conforme demonstrado pelos resultados da análise, a característica de segurança se destacou como um dos critérios mais significativos. Segundo estudos e pesquisas, a população que utilizará os serviços de táxis aéreos por eVTOL prioriza, acima de tudo, a segurança. Esse destaque enfatiza a importância de eVTOLs confiáveis e seguros, capazes de operar de forma consistente e resistente a falhas. A confiança dos passageiros é crucial para a adoção bem-sucedida dessas aeronaves na mobilidade urbana.

O critério de alcance estimado ficou em segundo lugar em importância. Este critério assume um papel fundamental, uma vez que, de certa forma, substitui o conceito tradicional de autonomia. A capacidade de um eVTOL em cobrir uma extensa área antes de requerer recarga é crucial. Além disso, um maior alcance implica que a aeronave pode servir uma área mais ampla, tornando-se uma opção mais versátil para a mobilidade urbana.

A capacidade de passageiros, apesar de significativa, ocupou a terceira posição em termos de importância. Embora seja desejável que um eVTOL transporte um grande número de passageiros, os critérios de segurança e alcance estimado apresentam maior relevância. Isso se deve ao fato de que, mesmo que um eVTOL tenha uma alta capacidade, é crucial que ele seja seguro e capaz de atender a uma ampla área de operação.

Finalmente, o critério de velocidade de cruzeiro ocupou o último grau de importância. A velocidade de cruzeiro, embora possa proporcionar viagens rápidas e eficientes em horários de pico, não possui a mesma prioridade devido à variabilidade da demanda por velocidade em diferentes viagens. Ou seja, não há como garantir que todas as viagens vão exigir altas velocidades, podendo ter viagens curtas onde uma alta velocidade influencia pouco. Além disso, uma alta velocidade de cruzeiro pode ser uma característica agradável aos passageiros que chegarão ao destino rapidamente, contudo, o conforto dos passageiros, embora desejável, não é um fator de alta prioridade na introdução dos eVTOLs na mobilidade urbana. Por fim, é possível observar pelas tabelas comparativas que a grande maioria dos modelos de eVTOLs já apresentam velocidade de cruzeiro muito acima das velocidades permitidas a automóveis na maioria das regiões de São Paulo.

Por fim, o cálculo da proporção de consistência, última etapa da análise AHP, foi realizada para garantir a coerência das comparações par-a-par apresentadas na tabela 11. Com isso, é possível garantir uma análise com algumas pequenas inconsistências nas decisões de até 10 %. Os resultados a seguir demonstram o processo desta análise.

$$\frac{A \cdot P_{norm}}{P_{norm}} = \frac{\begin{bmatrix} 1,188 \\ 0,301 \\ 0,785 \\ 2,1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,29 \\ 0,069 \\ 0,229 \\ 0,412 \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} 4,099 \\ 4,373 \\ 3,432 \\ 5,097 \end{bmatrix} = \lambda \quad (12)$$

$$\lambda_{max} = média[\lambda] = 4,250 \quad (13)$$

Deste modo, foi possível calcular o Índice de Consistência (CI) e já dividi-lo pelo Índice de consistência aleatória (RI) para a matriz de comparação de ordem 4. Resultando assim na proporção de consistência.

$$CR = \frac{4,250 - 4}{(4 - 1) \cdot 0,89} = 0,093 \Rightarrow CR \leq 0,1 \quad (14)$$

Como é possível observar, o valor do CR está dentro da faixa proposta por Saaty, indicando assim que a análise AHP realizada está coerente. Apresentando apenas 9,3 % de inconsistências nas decisões.

### 5.5.2 Resultado da análise TOPSIS

Realizado os cálculos dos pesos para a formação de importância dos critérios compensatórios na metodologia AHP, foi possível dar início a técnica TOPSIS. Para iniciar a técnica, foi necessário realizar a normalização dos valores de cada critério compensatório, presentes nas tabelas comparativas da seção de qualificação, utilizando a equação 7. Em seguida, realizou-se a ponderação destes parâmetros normalizados de acordo com a fórmula 8 resultando nas matrizes Dn para cada categoria de eVTOL. Contudo, como é possível observar nos resultados da qualificação, algumas alternativas apresentam uma faixa de valores para alguns critérios. Deste modo, optou-se pela escolha do valor médio desta faixa para ser utilizado nos cálculos descritos acima.

Vale ressaltar que, como mencionado anteriormente, a característica de segurança adotada depende diretamente do número de hélices e motores elétricos. Desta forma, os pesos normalizados, previamente estabelecidos pelo método AHP para este critério, foram divididos para acomodar tanto as hélices quanto os motores. Em outras palavras, na análise TOPSIS, a característica de segurança que representa 41,20% da importância total dos critérios foi dividida em 20,6% para o número de hélices e 20,6% para o número de motores elétricos presentes nos eVTOLs analisados.

Assim, as tabelas a seguir representam a matriz Dn obtida para cada categoria de eVTOL, indicando os valores de cada alternativa normalizados e ponderados. Além disso, as tabelas comportam também os valores dos pesos normalizados de cada critério que foram utilizados na formação das matrizes Dn. Por fim, a última informação apresentada pelas tabelas são os resultados de cada valor ideal e não ideal de cada critério.

Tabela 12 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria Wingless

	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Moller International Firefly	0,17400	0,03770	0,21491	0,04765	0,04765
Star 8 Green EMAV-4 Flying Taxi	0,17400	0,00000	0,00000	0,08339	0,08339
SkyDrive SD-05	0,05800	0,02945	0,01001	0,07148	0,07148
SKYDRIVE	0,11600	0,02945	0,02002	0,07148	0,07148
Volocopter 2X	0,05800	0,03004	0,03604	0,10722	0,10722
Volocopter VoloCity	0,05800	0,02651	0,06674	0,10722	0,10722
Pesos Normalizados Utilizados	0,29	0,069	0,229	0,206	0,206
Valor ideal	0,17400	0,03770	0,21491	0,10722	0,10722
Valor não ideal	0,05800	0,00000	0,00000	0,04765	0,04765

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria Vectored Thrust

	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
MOBi-One V3	0,0502	0,0147	0,0279	0,0363	0,0370
AMSL Aero Vertia	0,0628	0,0184	0,0663	0,0323	0,0329
Eversor	0,1005	0,0099	0,0541	0,0242	0,0247
LimoConnect	0,0754	0,0197	0,0639	0,0323	0,0329
Baaz B5	0,0502	0,0000	0,0531	0,0363	0,0370
Archer Aviation Midnight	0,0502	0,0147	0,0149	0,0484	0,0494
Joby Aviation S4	0,0502	0,0197	0,0427	0,0242	0,0247
Overair Butterfly	0,0628	0,0197	0,0427	0,0161	0,0165
Bell Nexus 6HX	0,0502	0,0000	0,0639	0,0242	0,0247
TCab Tech E20	0,0502	0,0159	0,0531	0,0323	0,0247
Lilium Jet (7-seater)	0,0754	0,0153	0,0663	0,1453	0,1481
Starling (concept design)	0,0502	0,0170	0,0464	0,0161	0,0494
Vertical Aerospace VX4	0,0502	0,0147	0,0427	0,0323	0,0329
Ship to Shore Air Limo (SSAL)	0,0628	0,0102	0,0000	0,0323	0,0329
Supernal (Hyundai Motor Company) S-A1	0,0502	0,0177	0,0257	0,0323	0,0329
Uber Elevate eCRM-001	0,0502	0,0147	0,0255	0,0404	0,0000
Uber Elevate eCRM-004	0,0502	0,0147	0,0255	0,0404	0,0000
Turkey Demirkanat Helicopter Team	0,0502	0,0105	0,0000	0,0323	0,0329
Textron eAviation Nexus	0,0377	0,0073	0,0491	0,0242	0,0247
Bell Nexus 4EX	0,0502	0,0147	0,0257	0,0161	0,0165
KARI OPPAV	0,0628	0,0122	0,0133	0,0323	0,0329
Delft University of Technology Aether (concept design)	0,0502	0,0108	0,0425	0,0242	0,0247
Skynet Project Genesys X-2	0,1005	0,0153	0,1061	0,0323	0,0329
Pesos Normalizados Utilizados	0,29	0,069	0,229	0,206	0,206
Valor ideal	0,0628	0,0197	0,1061	0,1453	0,1481
Valor não ideal	0,0377	0,0000	0,0000	0,0161	0,0000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria Lift and Cruise

	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Aerofugia Technology TF-2	0,0810	0,0000	0,1242	0,0534	0,0407
Beta Technologies ALIA-250	0,0810	0,0000	0,1242	0,0296	0,0226
Airbus CityAirbus NextGen	0,0608	0,0127	0,0199	0,0474	0,0724
Eve Air Mobility Eve (military model)	0,0810	0,0000	0,0248	0,0593	0,0452
Volant Aerotech VE25 X1	0,0810	0,0212	0,0497	0,0474	0,0452
Eve Air Mobility Eve V3	0,0810	0,0256	0,0239	0,0534	0,0000
Terrafugia TF-2A	0,0405	0,0191	0,0248	0,0534	0,0000
Georgia Institute of Technology - Balto	0,0810	0,0206	0,0626	0,0593	0,0452
TechXGeek Marie	0,0810	0,0170	0,0373	0,0534	0,0407
Korea Aerospace Industries (KAI) Unnamed	0,0810	0,0000	0,0994	0,0356	0,0271
Uber Elevate eCRM-003	0,0810	0,0298	0,0239	0,0296	0,0000
Uber Elevate eCRM-002	0,0810	0,0256	0,0239	0,0474	0,0000
Pipistrel 801 eVTOL	0,0810	0,0000	0,0241	0,0534	0,0000
Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	0,0810	0,0295	0,0000	0,1067	0,1628
Pesos Normalizados Utilizados	0,29	0,069	0,229	0,206	0,206
Valor ideal	0,0810	0,0298	0,1242	0,1067	0,1628
Valor não ideal	0,0405	0,0000	0,0000	0,0296	0,0000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Tabela Representativa da Matriz Dn para a Categoria Electric Rotorcraft

	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
ARC Aerosystems Linx P3	0,03974	0,01529	0,01995	0,04100	0,03013
eJet Aerospace GJet AEon	0,03974	0,01886	0,05585	0,04100	0,01506
eJet Aerospace GJet Koan	0,07948	0,02549	0,10190	0,04100	0,01506
Fraundorfer Aeronautics Tensor	0,09935	0,02172	0,10880	0,12299	0,00000
Horizon AutoCopters Auto-Copter	0,15896	0,01912	0,14506	0,04100	0,00000
Jaunt Air Mobility Journey	0,07948	0,02875	0,02339	0,10249	0,07532
Pennsylvania State University MG-76 Catacopter	0,07948	0,01754	0,00000	0,04100	0,09039
Rotor X eTransporter	0,11922	0,02294	0,05839	0,08199	0,06026
Skyworks Aeronautics eGyro	0,07948	0,02049	0,02919	0,00000	0,03013
University of Maryland - Blitzen	0,07948	0,02457	0,02919	0,04100	0,15064
Pesos Normalizados Utilizados	0,29	0,069	0,229	0,206	0,206
Valor ideal	0,09935	0,02875	0,14506	0,12299	0,15064
Valor não ideal	0,03974	0,01529	0,00000	0,00000	0,00000

Fonte: Elaborado pelo autor.

As soluções para os valores não ideais foram obtidas de acordo com a escolha dos menores resultados de cada alternativa normalizadas e ponderadas para cada critério. Isso significa que a alternativa ideal deve se distanciar ao máximo desses valores não ideais.

Para os valores ideais, obteve-se como solução os maiores resultados de cada alternativa normalizadas e ponderadas para os critérios de velocidade de cruzeiro, alcance estimado, hélices e motores elétricos.

Já para o critério de capacidade, o valor ideal seria o resultado da normalização e ponderação de uma alternativa que apresentasse uma capacidade de 5 passageiros. Visto que, para que uma aeronave tenha uma capacidade maior de passageiros, o seu custo de operação aumenta com base na expectativa de que mais assentos sejam preenchidos, idealmente com passageiros pagantes, em cada voo. Em outras palavras, seria inviável uma aeronave que comporta um grande número de passageiros levando poucas pessoas. Sendo assim, 5 passageiros é um valor ideal para a introdução do eVTOL como táxi aéreo, dado que, este valor se assemelha muito a capacidade de um táxi convencional, possibilitando que uma família de até 3 filhos realizem a viagem em conjunto.

Em vista disso, para as categorias Vectored Thrust e Electric Rotorcraft que contém aeronaves com capacidade de 5 passageiros, o valor ideal deste critério compensatório foi escolhido como o resultado da normalização e ponderação da alternativa com 5 passageiros. Já para as demais categorias, por não apresentar alternativas que comportam mais de 4 passageiros, adotou-se o resultado máximo como valor ideal.

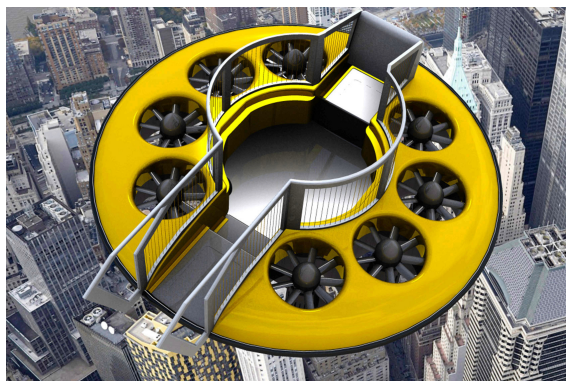
Com os valores ideais e não ideais definidos, foram calculados as distâncias  $D_i^+$  e  $D_i^-$  para cada alternativa de acordo com as equações 9 e 10, juntamente com os Índices de Proximidade ( $CC_i$ ) calculados pela fórmula 11. Esse distanciamento é uma forma de medir o desempenho relativo das alternativas em relação aos valores não ideais e ajuda na classificação das alternativas com base na proximidade com a solução ideal. Quanto mais distante uma alternativa estiver dos valores não ideais e mais próxima dos valores ideais, maior será sua classificação e sua adequação em relação aos critérios avaliados. As tabelas a seguir estão dispostas em ordem decrescente com base nos Índices de Proximidade. Nesse contexto, a alternativa que detém o índice mais elevado é considerada a solução ideal para a categoria de eVTOL em questão.

Tabela 16 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria *Wingless*

	D+	D-	Índice de proximidade
Moller International Firefly	0,08424	0,24711	0,746
Volocopter VoloCity	0,18851	0,1107	0,37
Star 8 Green EMAV-4 Flying Taxi	0,22078	0,12653	0,364
Volocopter 2X	0,21333	0,09642	0,311
SKYDRIVE	0,20969	0,07595	0,266
SkyDrive SD-05	0,24096	0,04586	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo *Wingless Moller International Firefly (concept design)*



Fonte: (The Electric VTOL News, 2016)

Tabela 17 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria *Vectored Thrust*

	$D^+$	$D^-$	Índice de proximidade
Lilium Jet (7-seater)	0,0420	0,21136	0,834
Skynet Project Genesys X-2	0,1658	0,12956	0,439
LimoConnect	0,1673	0,08510	0,337
AMSL Aero Vertiia	0,1662	0,08193	0,330
Eversor	0,1847	0,08744	0,321
Baaz B5	0,1661	0,06894	0,293
Starling (concept design)	0,1737	0,07100	0,290
Bell Nexus 6HX	0,1795	0,07015	0,281
Archer Aviation Midnight	0,1663	0,06385	0,277
TCab Tech E20	0,1761	0,06401	0,267
Vertical Aerospace VX4	0,1739	0,05953	0,255
MOBi-One V3	0,1747	0,05413	0,237
Textron eAviation Nexus	0,1842	0,05602	0,233
Joby Aviation S4	0,1846	0,05519	0,230
Overair Butterfly	0,1950	0,05581	0,223
Delft University of Technology Aether (concept design)	0,1849	0,05245	0,221
Supernal (Hyundai Motor Company) S-A1	0,1807	0,04979	0,216
KARI OPPAV	0,1863	0,04797	0,205
Ship to Shore Air Limo (SSAL)	0,1934	0,04559	0,191
Turkey Demirkanat Helicopter Team	0,1938	0,04014	0,172
Uber Elevate eCRM-001	0,1991	0,04013	0,168
Uber Elevate eCRM-004	0,1991	0,04013	0,168
Bell Nexus 4EX	0,2016	0,03617	0,152

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo *Vectored Thrust Lilium Jet (7-seater)*



Fonte: (The Electric VTOL News, 2016)

Tabela 18 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria *Lift and Cruise*

	$D^+$	$D^-$	Índice de proximidade
Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	0,1242	0,187	0,601
Aerofugia Technology TF-2	0,1366	0,1389	0,504
Beta Technologies ALIA-250	0,1627	0,1326	0,449
Korea Aerospace Industries (KAI) Unnamed	0,158	0,1109	0,412
Georgia Institute of Technology - Balto	0,1413	0,0944	0,401
Volant Aerotech VE25 X1	0,1516	0,0832	0,354
Airbus CityAirbus NextGen	0,1526	0,0807	0,346
TechXGeek Marie	0,1596	0,0744	0,318
Eve Air Mobility Eve (military model)	0,1638	0,072	0,305
Eve Air Mobility Eve V3	0,1986	0,0585	0,228
Uber Elevate eCRM-002	0,2003	0,0564	0,22
Uber Elevate eCRM-003	0,2062	0,0557	0,213
Pipistrel 801 eVTOL	0,2007	0,0528	0,208
Terrafugia TF-2A	0,2024	0,0393	0,163

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo *Lift and Cruise Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper (concept design)*



Fonte: (The Electric VTOL News, 2016)

Tabela 19 – Distância Entre as Soluções e o Índice de Proximidade para a Categoria *Electric Rotorcraft*

	D+	D-	Índice de proximidade
University of Maryland - Blitzen	0,1434	0,164	0,534
Fraundorfer Aeronautics Tensor	0,1551	0,1748	0,53
Rotor X eTransporter	0,1334	0,1419	0,515
Horizon AutoCopters Auto-Copter	0,1818	0,1922	0,514
Jaunt Air Mobility Journey	0,1459	0,136	0,482
eJet Aerospace GJet Koan	0,1654	0,1182	0,417
Pennsylvania State University MG-76 Catacopter	0,1787	0,1069	0,374
Skyworks Aeronautics eGyro	0,2087	0,058	0,218

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Aeronave eVTOL com o maior índice de proximidade do modelo *Electric Rotorcraft University of Maryland - Blitzen (concept design)*



Fonte: (The Electric VTOL News, 2016)

Como foi possível observar, cada categoria possui a sua escolha final. Optou-se pela análise inicial por categoria pelo fato de que cada classe possui suas próprias peculiaridades e características distintas. Por exemplo, algumas categorias contam com a presença de asas, o que contribui para o voo planado, resultando em um aumento na segurança quando comparadas a outras categorias que não possuem essa característica. Deste modo, julgou-se necessário obter uma escolha final por categoria. A tabela a seguir dispõe cada eVTOL resultante da escolha final, juntamente com os seus valores para cada critério compensatório.

Tabela 20 – Resultados da Escolha Final para Cada Categoria de Evtol

Categoria de Evtol	Alternativa da escolha final	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Vectored Thrust	Lilium Jet (7-seater)	6	250	250	36	36
Lift and Cruise	Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	4	278	-	18	36
Wingless	Moller International Fi-refly	3	128	161	8	8
Electric Rotorcraft	University of Maryland - Blitzen	4	241	161	2	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, vale destacar que, embora as peculiaridades de cada categoria sejam relevantes, a abordagem adotada no presente trabalho concentrou na avaliação quantitativa dos critérios predefinidos não influenciados pelas características de cada classe de eVTOL. Com isso, julgou-se também necessário obter uma escolha final entre as melhores alternativas de cada classe.

Seguindo a mesma abordagem e pesos utilizados nas análises em cada categoria para escolha final, aplicou-se o método TOPSIS para os valores presentes na tabela 20. Buscando como valor não ideal os menores resultados dos parâmetros normalizados e ponderados de cada alternativa e valor ideal os maiores resultados, exceto para o critério de capacidade onde o valor ideal foi escolhido referente a uma alternativa com capacidade de 5 passageiros. A tabela 21 a seguir mostra os resultados da normalização e ponderação dos parâmetros de cada alternativa, assim como, os valores ideais e não ideais adotados. A tabela 22 por sua vez, mostra as distâncias de cada alternativa com os seus respectivos índices de aproximação.

Tabela 21 – Tabela Representativa da Matriz Dn da Escolha Final de Cada Categoria

	Capacidade	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Alcance estimado (km)	Hélices	Motores elétricos
Lilium Jet (7-seater)	0,19829	0,03727	0,16931	0,18050	0,14126
Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	0,13219	0,04144	0,00000	0,09025	0,14126
Moller International Firefly	0,09915	0,01908	0,10903	0,04011	0,03139
Infinity Motions Electri-Copter 650 Impulse	0,13219	0,03593	0,10903	0,01003	0,03924
Valor ideal	0,145	0,04144	0,16931	0,18050	0,14126
Valor não ideal	0,09915	0,01908	0,00000	0,01003	0,03139

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Resultado da Escolha Final Entre as Melhores Opções de Cada Categoria

	D+	D-	Índice de proximidade
Lilium Jet (7-seater)	0,05345	0,28277	0,841
Rensselaer Polytechnic Institute Oliwhoper	0,19229	0,14177	0,424
Moller International Firefly	0,19498	0,11311	0,367
Infinity Motions Electri-Copter 650 Impulse	0,20808	0,11544	0,357

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por conseguinte, a escolha final entre os ganhadores de cada categoria resultou na aeronave Lilium Jet (7-seater). Sendo este, um resultado satisfatório dado os critérios compensatórios. O Lilium Jet apresenta capacidade de 6 passageiros bem próximo do valor ideal de 5, uma velocidade de cruzeiro muito acima do que é permitido se locomover em qualquer via de automóveis em São Paulo, um alcance estimado satisfatórios que consegue percorrer 5 vezes o diâmetro da área de atuação do eVTOL definido pelo estudo geográfico e, por fim, uma incrível quantidade de 36 ventiladores canalizados, equivalentes as hélices em outros projetos, e 36 motores elétricos fornecendo uma ultra redundância, sendo esse o critério compensatório mais importante.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma pesquisa nos principais tópicos para uma melhor compreensão da tecnologia eVTOL e da sua implementação na mobilidade urbana. Além disso, realizou também uma análise multicritério para decidir o melhor modelo de aeronave para ser operado no taxi aéreo da grande São Paulo.

Por possuir caráter pesquisativo, este trabalho se deparou com diversos desafios e estudos futuros. Deste modo, esta seção de conclusão será dividida em 3 subtópicos para melhor compreensão.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

Neste trabalho foi realizada uma profunda e abrangente revisão bibliográfica sobre o tema dos eVTOLs. A pesquisa demonstrou ser uma ferramenta valiosa na exploração dos tópicos essenciais para a compreensão desta tecnologia e sua potencial integração na mobilidade aérea urbana. O estudo aborda com rigor os seguintes pontos-chave: desde o conceito de eVTOL e características do seu funcionamento, destacando suas distinções fundamentais em relação às aeronaves de combustão interna e com capacidade de decolagem e pouso vertical, até a análise das diversas categorias de eVTOLs e suas respectivas vantagens e desvantagens. Explorou-se o contexto da mobilidade urbana, identificando os desafios que a afligem e a possibilidade da mobilidade aérea urbana (UAM) como uma possível solução. Além disso, investigou-se os requisitos de infraestrutura necessários para acomodar essas aeronaves em operações de táxi aéreo na esfera urbana. Um estudo populacional que evidencia os fatores mais importantes para a aceitação de passageiros em realizar um voo com um eVTOL. Por fim, detalhou-se como seria realizada a operação destas aeronaves no contexto de táxi aéreo, abordando suas fases de voo, possíveis rotas iniciais e as medidas necessárias para garantir a segurança operacional.

Deste modo, graças à grande diversidade de artigos, trabalhos e publicações sobre o tema eVTOL, foi possível realizar uma revisão bibliográfica de qualidade com informações detalhadas acerca dos tópicos importantes para implementação deste novo conceito na mobilidade urbana. O estudo destes tópicos serviu como base para para que fosse possível atingir os demais objetivos deste presente trabalho.

Um dos objetivos atingidos foi o estudo geográfico da grande São Paulo, no qual uma área de atuação foi delimitada com base nas informações provenientes da revisão bibliográfica. Este estudo resultou na identificação de uma região de dimensões adequadas, coerentes com os alcances estimados dos eVTOLs. Adicionalmente, foi possível mapear os helipontos localizados nessa área, revelando um notável número de infraestruturas aeroportuárias destinadas a helicópteros, sendo um número mais que suficiente para a implantação das primeiras rotas do serviço de táxi aéreo operado por eVTOLs.

Outro objetivo atingido foi a escolha do melhor eVTOL para cada categoria, assim como o melhor entre cada um dos ganhadores para ser utilizado na mobilidade urbana aérea. Esse processo decisório foi enriquecido pela análise multicritério, que contou com o apoio da revisão bibliográfica e dos dados do estudo geográfico. Isso permitiu uma análise mais aprofundada dos eVTOLs, uma vez que a formulação dos critérios para seleção de aeronaves enfatizou aspectos cruciais, definindo as

características essenciais que um eVTOL deve possuir e os parâmetros nos quais as aeronaves devem apresentar um desempenho sólido para garantir o sucesso de sua implementação na mobilidade urbana.

É relevante destacar que, para atingir com êxito o objetivo mencionado no parágrafo anterior, recorreremos a duas metodologias de análise multicritérios, o AHP e o TOPSIS. Essas abordagens proporcionaram uma análise adequada que relaciona julgamentos qualitativos e quantitativos, resultando em uma decisão que atende aos critérios predefinidos de maneira satisfatória. A aeronave selecionada demonstrou total aderência a esses critérios, destacando-se por suas qualidades superiores em relação à segurança, alcance estimado, capacidade de transporte de passageiros e velocidade de cruzeiro. Com isso, podemos afirmar que a análise multicritério se revelou um passo de sucesso no processo de tomada de decisão.

## 6.2 LIMITAÇÕES E DESAFIOS DO ESTUDO

Em meio à elaboração deste trabalho, é importante reconhecer que o estudo não esteve isento de limitações, que, apesar de desafiadoras, fornecem importantes lições para investigações futuras.

Em primeiro lugar, vale ressaltar que há dificuldades significativas na obtenção de informações concretas sobre os custos de operação e produção dos eVTOLs. Informações a respeito do custo de produção e operação das aeronaves muitas vezes são consideradas confidenciais pelas empresas envolvidas na pesquisa. Os poucos dados encontrados durante a análise bibliográfica a respeito deste tópico se apresentaram como estimativas de preço de viagens e poucos valores relacionados ao custo das aeronaves, com escassez de informações em relação ao processo de obtenção destes valores. Ademais, deve-se considerar o fato do processo de certificação da tecnologia eVTOL estar em fase de desenvolvimento e estudo. A certificação de novos tipos de aeronaves é um processo complexo que requer tempo e recursos consideráveis, deste modo, podem ocorrer mudanças significativas nas aeronaves para que elas possam ser homologadas, podendo distanciar ainda mais as estimativas encontradas de uma possível realidade.

Outra limitação do estudo diz respeito à falta de dados de aeronaves eVTOLs. Visto que, muitos modelos se apresentam como um projeto conceitual, não possuindo necessariamente um protótipo consolidado, necessitando assim de mais estudos, simulações e análises para o desenvolvimento da aeronave. Este fato pode ser observado durante a análise multicritério realizada, em que partindo de um diretório com 890 aeronaves, muitas foram desconsideradas por falta de dados. Além do mais, alguns eVTOLs que foram qualificados para a análise não forneciam dados para todos os critérios escolhidos.

Por fim, outra limitação relevante se encontra na dificuldade de acesso a especialistas e profissionais diretamente envolvidos com eVTOLs para a coleta de opiniões e perspectivas especializadas. Isto pode ser justificado pelo fato da tecnologia eVTOL ser um conceito relativamente novo no campo da aeronáutica. Com o primeiro conceito encontrado durante a pesquisa bibliográfica datando de 2009 idealizado por um engenheiro aeroespacial da NASA.

### 6.3 OPORTUNIDADE DE ESTUDOS FUTUROS

Há uma série de oportunidades de estudos futuros que podem enriquecer a compreensão sobre os eVTOLs e sua integração na mobilidade aérea urbana. A seguir, o presente trabalho propõe as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

Primeiramente, devido a problemática discutida no subtópico anterior em relação ao custo de operação e fabricação das aeronaves, realizar um estudo detalhado nesta área seria uma boa opção para aprimorar o presente trabalho. Levando em conta fatores como consumo de energia, manutenção, pessoal necessário para operação, custo de abastecimento dos eVTOLs, que envolve a análise de diferentes fontes de energia, como eletricidade ou hidrogênio, e suas implicações financeiras. Outra análise relevante seria investigar os custos associados à construção de Vertiports e relacionar como esses custos impactam a economia geral do serviço de táxi aéreo.

Em segundo lugar, a aceitação e implementação dos eVTOLs como táxi aéreo na perspectiva da população é um tópico rico em oportunidades de estudo. Um estudo tendo como base a opinião da população de diversas metrópoles brasileiras com o auxílio de opinião e participação de especialistas e profissionais diretamente envolvidos com eVTOLs pode fornecer insights valiosos sobre as atitudes, percepções e preocupações das pessoas em relação a essa tecnologia.

Em terceiro lugar, realizar estudos em relação a certificação de eVTOLs. Sendo esta uma área crucial e complexa, que compreende investigar as diretrizes regulatórias, bem como as considerações de segurança específicas para eVTOLs. Compreender as etapas do processo de certificação e as dificuldades envolvidas pode contribuir para o desenvolvimento de políticas e regulamentações mais eficazes.

Em quarto lugar, estudos que buscam compreender melhor as características de segurança das aeronaves eVTOL. Visto que, a segurança destacou-se como um critério fundamental e embora a redundância proporcionada por múltiplos rotores e motores elétricos tenha sido um elemento central na avaliação, identificou-se a necessidade de considerar outros fatores de segurança distintos. Estudos futuros poderiam explorar características adicionais, como a presença de asas que permitem o planeio em situações emergenciais, sistemas de paraquedas balísticos ou outras especificidades de cada modelo. Visando também analisar quais seriam as mudanças necessárias no modelo de análise multicritério para incluir essas características, além da redundância de motores e rotores.

Finalmente, em quinto e último lugar, realizar uma aplicação de outras técnicas multicritério para o presente problema. Como por exemplo, os métodos de comparações pareadas PROMETHEE e o ELECTRE que podem substituir a função da ferramenta AHP na hierarquização dos critérios. Para a classificação das alternativas, técnicas como o TODIM e o VIKOR são capazes de substituir o TOPSIS. Deste modo, seria interessante a comparação dos resultados de cada técnica para o mesmo problema, refinando ainda mais a escolha do melhor eVTOL para ser utilizado na mobilidade aérea urbana. Para o caso de um estudo futuro utilizar opiniões e auxílio de especialistas no tema eVTOL para a reformulação ou elaboração de novos critérios, técnicas como o FUZZY podem ser aplicadas para lidar da melhor forma com as subjetividades.

## REFERÊNCIAS

- ABRAPHE. **Estudo da Associação Brasileira de Pilotos de Helicóptero confirma São Paulo como capital mundial do helicóptero**. 2013. Disponível em: <<https://abraphe.org.br/estudo-da-abraphe-confirma-sao-paulo-como-capital-mundial-do-helicoptero/>>.
- AIRSERVICES A. & EMBRAER C.B.I. Urban air traffic management concept of operations version 1. **Airservices and EmbraerX, Australia**, 2020.
- BACCHINI, A.; CESTINO, E. Electric vtol configurations comparison. **Aerospace**, MDPI, v. 6, n. 3, p. 26, 2019.
- BLUME, B. A. **Mobilidade urbana e trânsito: desafios e soluções**. 2020. Disponível em: <[www.politize.com.br/mobilidade-urbana-transito-problemas/](http://www.politize.com.br/mobilidade-urbana-transito-problemas/)>.
- BOER, L. D.; LABRO, E.; MORLACCHI, P. A review of methods supporting supplier selection. **European journal of purchasing & supply management**, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 75–89, 2001.
- BROWN, A.; HARRIS, W. A vehicle design and optimization model for on-demand aviation. In: **2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 0105.
- CALDEIRA, T. P. **City of walls: crime, segregation, and citizenship in São Paulo**. [S.l.]: Univ of California Press, 2000.
- CAMARA, J. P. D. et al. Obstáculos no desenvolvimento da mobilidade aérea urbana. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2022.
- ÇELIKBILEK, Y.; TÜYSÜZ, F. An in-depth review of theory of the topsis method: An experimental analysis. **Journal of Management Analytics**, Taylor & Francis, v. 7, n. 2, p. 281–300, 2020.
- CICELINI, G. et al. Numerical and experimental analysis of the flow over an evtol concept. Universidade Federal de Uberlândia, 2022.
- CİZRELİOĞULLARI, M. N.; BARUT, P.; IMANOV, T. Future air transportation ramification: Urban air mobility (uam) concept: Urban air mobility. **Prizren Social Science Journal**, v. 6, n. 2, p. 24–31, 2022.
- CWERNER, S. B. Vertical flight and urban mobilities: The promise and reality of helicopter travel. **Mobilities**, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 191–215, 2006.
- DAO, A.-Q. V. et al. Evaluation of a recommender system for single pilot operations. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 3, p. 3070–3077, 2015.
- Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). **Conheça o Portal GEOAISWEB**. 2023.
- DHARA, A. et al. An efficient decision support system for selecting very light business jet using critic-topsis method. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, Emerald Publishing Limited, v. 94, n. 3, p. 458–472, 2022.
- EDWARDS, T.; PRICE, G. **eVTOL passenger acceptance**. [S.l.], 2020.
- EMBRAER, X. **Flight Plan 2030: An Air Traffic Management Concept for Urban Air Mobility**. 2019.

- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. 2017. Disponível em: <[www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica](http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica)>.
- Federal Aviation Administration (FAA). **Urban Air Mobility and Advanced Air Mobility**. 2022. Disponível em: <[www.faa.gov/uas/advanced\\_operations/urban\\_air\\_mobility](http://www.faa.gov/uas/advanced_operations/urban_air_mobility)>.
- FERNANDO, W. Maximum total range of evtol under consideration of realistic operational scenarios. **2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies & Applied Sciences**, Bangkok, Thailand, 2018.
- GRAHAM, S.; MARVIN, S. **Splintering urbanism: networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition**. [S.l.]: Routledge, 2002.
- GRANDL, G. et al. The future of vertical mobility sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035. **Porsche Consulting**. <https://fedotov.co/wp-content/uploads/2018/03/Future-of-Vertical-Mobility.pdf>, 2018.
- GUITARRARA, P. **Poluição do ar ou atmosférica**. 2023. Disponível em: <[brasilescola.uol.com.br/biologia/poluicao-atmosferica.htm](http://brasilescola.uol.com.br/biologia/poluicao-atmosferica.htm)>.
- HERNANDES, S. B. R. Aplicação dos métodos fuzzy-ahp e fuzzy-topsis no apoio à seleção de fornecedores: um estudo de caso em uma empresa de catering offshore. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé**, 2022.
- HOLDEN, J.; GOEL, N. Uber elevate: Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. **uber technologies. Inc., San Francisco, CA**, 2016.
- ICAO. Helicopter noise reduction technology. 2015.
- INCA. **Poluição do ar**. 2022. Disponível em: <[www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/poluicao-do-ar](http://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/poluicao-do-ar)>.
- JOHNSTON, T.; RIEDEL, R.; SAHDEV, S. To take off, flying vehicles first need places to land. **McKinsey Center for Future Mobility**, p. 2–8, 2020.
- JUNIOR, F. R. L.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. A fuzzy inference and categorization approach for supplier selection using compensatory and non-compensatory decision rules. **Applied Soft Computing**, Elsevier, v. 13, n. 10, p. 4133–4147, 2013.
- JUNIOR, F. R. L.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 20, p. 781–801, 2013.
- KARTIKA, A.; HANANI, A. D. Analytic hierarchy process (ahp) approach to aircraft type selection on high-frequency domestic routes. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 8, p. 697–704, 2019.
- KOHAGURA, T. Lógica fuzzy e suas aplicações. **Departamento de Computação**, 2007.
- LEITE, J. P.; ANDRADE, G. C. C. de. Implementação do método ahp em uma linha de aeronaves modelo a em uma indústria aeronáutica brasileira. **Revista Científic@ Universitas**, v. 3, n. 2, 2015.
- LINHARES, C. G.; GUSSEN, C. T. G.; RIBAS, J. R. O método fuzzy ahp aplicado à análise de riscos de usinas hidrelétricas em fase de construção. In: SOBRAPO RIO DE JANEIRO. **Congresso Latino-Iberoamericano de Investigação Operacional**. [S.l.], 2012. p. 591–603.

- LIU, J. et al. Cognitive pilot-aircraft interface for single-pilot operations. **Knowledge-based systems**, Elsevier, v. 112, p. 37–53, 2016.
- LOUREIRO, A. F. Requisitos de infraestrutura para operação de eVTOL no Brasil. **Tese de Conclusão de Curso, Faculdade de Ciências Aeronáuticas, Universidade do Sul de Santa Catarina**, 2021.
- LU, Z.; DEBIASI, M.; KHOO, B. C. Acoustic characteristics of a multi-rotor MAV and its noise reduction technology. In: INSTITUTE OF NOISE CONTROL ENGINEERING. **INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings**. [S.l.], 2016. v. 253, n. 8, p. 393–403.
- MARTINS, G. A viabilidade da utilização de motores elétricos em aviões comerciais. 2021.
- NATHEN, P. et al. Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept. **Lilium GmbH, Claude-Dornier Straesse, Weßling, Germany, Tech. Rep**, 2021.
- PAUL, S.; LORENZO, M. de; CORDIOLI, J. Considerações iniciais sobre a regulamentação de ruído para aeronaves eVTOL. **Acústica e Vibrações**, v. 35, n. 52, p. 101–127, 2020.
- POSTORINO, M. N.; SARNÉ, G. M. Reinventing mobility paradigms: Flying car scenarios and challenges for urban mobility. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 9, p. 3581, 2020.
- PRADEEP, P.; WEI, P. Energy-efficient arrival with RTA constraint for multirotor eVTOL in urban air mobility. **Journal of Aerospace Information Systems**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 16, n. 7, p. 263–277, 2019.
- RAJENDRAN, S.; SRINIVAS, S. Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. **Transportation research part E: logistics and transportation review**, Elsevier, v. 143, p. 102090, 2020.
- REED, J. **Shareholders Invest \$23 Million in Skyports for Vertiports and Drone Services**. 2022. Disponível em: <[www.aviationtoday.com/2022/03/24/shareholders-invest-23-million-skyports-vertiports-drone-services/](http://www.aviationtoday.com/2022/03/24/shareholders-invest-23-million-skyports-vertiports-drone-services/)>.
- RIBEIRO, J. K. **Dimensionamento de Volume de Tráfego para Mobilidade Aérea Urbana no Acesso Aeroportuário**. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022.
- RIBEIRO, M. C. d. C. R.; ALVES, A. da S. Aplicação do método analytic hierarchy process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. **Sistemas & Gestão**, v. 11, n. 3, p. 270–281, 2016.
- ROY, S. et al. User base estimation methodology for an eVTOL business airport shuttle air taxi service. In: **AIAA Aviation 2020 Forum**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 3259.
- SAATY, T. **The Analytic Hierarchy Process**. tradução e revisão por Wainer da Silveira e Silva. [S.l.]: McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP, Brasil, 1991.
- SACONI, A. **Helicóptero que caiu em SP custa R\$ 3 milhões; 1h de voo sai por R\$ 1.500**. 2023. Disponível em: <[economia.uol.com.br/colunas/todos-a-bordo/2023/03/17/acidente-r-44-helicoptero-sao-paulo-barra-funda-marte.htm?cmpid=copiaecola](http://economia.uol.com.br/colunas/todos-a-bordo/2023/03/17/acidente-r-44-helicoptero-sao-paulo-barra-funda-marte.htm?cmpid=copiaecola)>.
- SILVA, J. C. L. **O Processo de Urbanização**. 2016. Disponível em: <[brasilescola.uol.com.br/geografia/urbanizacao-mundo.htm](http://brasilescola.uol.com.br/geografia/urbanizacao-mundo.htm)>.
- The Electric VTOL News. **eVTOL Aircraft Directory**. 2016. Disponível em: <[evtol.news/aircraft](http://evtol.news/aircraft)>.

The Electric VTOL News. **eVTOL Classifications**. 2018. Disponível em: <evtol.news/classifications>.

United Nations. World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights. department of economic and social affairs. **Population Division, United Nations**, v. 32, 2014.

VIEIRA, D. R.; SILVA, D. The contribution of evtol to sustainable urban air transportation. In: **Prof. Dr. T. Hikmet Karakoc Symposium Founding Chair**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 57.

VIEIRA, D. R.; SILVA, D.; BRAVO, A. Electric vtol aircraft: the future of urban air mobility (background, advantages and challenges). **International Journal of Sustainable Aviation**, Inderscience Publishers (IEL), v. 5, n. 2, p. 101–118, 2019.

VIEIRA, G. H. Análise e comparação dos métodos de decisão multicritério ahp clássico e multiplicativo. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)–Instituto Tecnológico de Aeronáutica**, 2006.

WANG, T.-C.; CHANG, T.-H. Application of topsis in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. **Expert systems with applications**, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 870–880, 2007.