



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Aeroespacial

**Uma proposta de estimativa de CASK de  
aeronaves do tipo eVTOL baseada em modelo  
híbrido de desempenho de aeronaves de asa  
rotativa e asa fixa**

Autora: Juliana de Oliveira Souza  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Polliana Cândida Oliveira Martins  
Coorientador: Prof. Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Brasília, DF  
2023



Juliana de Oliveira Souza

**Uma proposta de estimativa de CASK de aeronaves do tipo eVTOL baseada em modelo híbrido de desempenho de aeronaves de asa rotativa e asa fixa**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof<sup>ca</sup>. Dr<sup>a</sup>. Polliana Cândida Oliveira Martins

Coorientador: Prof. Dr. Victor Rafael Rezende Ceslestino

Brasília, DF

2023

---

Juliana de Oliveira Souza

Uma proposta de estimativa de CASK de aeronaves do tipo eVTOL baseada em modelo híbrido de desempenho de aeronaves de asa rotativa e asa fixa/ Juliana de Oliveira Souza. – Brasília, DF, 2023-

75 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Polliana Cândida Oliveira Martins

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. eVTOL. 2. Análise de custos. I. Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Polliana Cândida Oliveira Martins. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Uma proposta de estimativa de CASK de aeronaves do tipo eVTOL baseada em modelo híbrido de desempenho de aeronaves de asa rotativa e asa fixa

CDU 02:141:005.6

---

Juliana de Oliveira Souza

# **Uma proposta de estimativa de CASK de aeronaves do tipo eVTOL baseada em modelo híbrido de desempenho de aeronaves de asa rotativa e asa fixa**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de dezembro de 2023:

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Polliana Cândida Oliveira  
Martins**  
Orientadora

---

**Prof. Dr. Victor Rafael Rezende  
Ceslestino**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. William Reis Silva**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023

*Dedico este trabalho aos meus pais que sempre apoiaram meus sonhos e ao meu avô que certamente foi uma das minhas maiores inspirações na engenharia.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades que tive de chegar até aqui.

Agradeço também aos meus pais que nunca mediram esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos e por toda a paciência durante toda a graduação.

À toda minha família que sempre me deu suporte para que eu seguisse em frente.

Agradeço às minhas amigas de toda a vida, Amanda, Jéssica e Lília, por todo o apoio desde de antes do meu ingresso na Universidade, por todo o suporte que me dão até hoje e pela compreensão em minhas inúmeras ausências.

Agradeço aos amigos que fiz durante a faculdade, principalmente Júlia, Luís Henrique e Letícia por todas risadas e companheirismo durante os momentos mais difíceis da graduação.

Aos meu orientadores Polliana e Victor por todo o suporte, ensinamento e paciência diante das minhas dificuldades.

A todos os professores que estiveram nesta caminhada e à toda a equipe da Universidade de Brasília por todo o aprendizado e oportunidades que eu tive no decorrer dos últimos anos.

E finalmente agradeço à minha gatinha por todo o companheirismo nas noites de estudo, pelas risadas e distrações nos momentos mais difíceis da graduação.

*"Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções,  
que não davam certo."  
(Thomas Edison)*

# Resumo

A implementação de um ambiente de Mobilidade Aérea Urbana (*Urban Air Mobility - UAM*) apresenta um desafio substancial, englobando vários fatores, tais como a introdução de um conceito de aeronave disruptivo: eVTOLs (*electric vertical takeoff and landing*). Num cenário caracterizado pelo congestionamento das auto-estradas nos grandes centros urbanos, o conceito de um modo de transporte sustentável, fiável e financeiramente vantajoso torna-se altamente desejável. No entanto, para atingir este objetivo, é necessário compreender as características e restrições do novo sistema de transporte, de modo a desenvolver um modelo de custos que procure uma margem de lucro sustentável. Assim, este estudo tem como objetivo construir uma modelagem comparativa que considere os benefícios de custo de aeronaves de asa fixa e de asa rotativa de forma híbrida, tendo em conta os requisitos energéticos de um sistema de propulsão elétrica. Posteriormente, é proposto um modelo de custo operacional para o eVTOL, tendo em conta o comportamento híbrido apresentado. Como fontes de informação e comparação, é utilizado um modelo de helicóptero para estabelecer relações para as componentes da missão de decolagem e aterrissagem vertical, enquanto uma aeronave de asa fixa do grupo de aviação regional é utilizada para orientar o modelo durante a fase de cruzeiro. Com base nestes resultados, é possível inferir conclusões sobre os potenciais benefícios financeiros e identificar as áreas onde os esforços devem ser concentrados para estabelecer a UAM a um nível economicamente viável. Para isto, foi utilizada a metodologia *Design Science*, de modo que, fossem obtidos valores que pudessem ser aplicados de forma a gerar dados de CASK (*Cost of Available Seat Kilometer - Custo operacional por assento disponível por quilômetro*) para o helicóptero e para o avião podendo, então, calcular e comparar um valor aproximado para o CASK de um eVTOL.

**Palavras-chaves:** eVTOL. UAM. CASK. Custo Operacional. Modelo de custos.

# Abstract

The implementation of an Urban Air Mobility (UAM) environment presents a substantial challenge, encompassing several factors such as the introduction of a disruptive aircraft concept: eVTOLs (electric vertical takeoff and landing). In a scenario characterized by highway congestion in large urban centers, the concept of a sustainable, reliable and financially advantageous mode of transport becomes highly desirable. However, to achieve this goal, it is necessary to understand the characteristics and constraints of the new transportation system, in order to develop a cost model that seeks a sustainable profit margin. Thus, this study aims to build a comparative modeling that considers the cost benefits of fixed-wing and rotary-wing aircraft in a hybrid way, taking into account the energy requirements of an electric propulsion system. Subsequently, an operational cost model for eVTOL is proposed, taking into account the hybrid behavior presented. As sources of information and comparison, a helicopter model is used to establish relationships for the vertical take-off and landing mission components, while a fixed-wing aircraft from the regional aviation group is used to guide the model during the cruise phase. Based on these results, it is possible to draw some conclusions about the potential financial benefits and to identify areas where efforts should be focused to establish UAM at an economically viable level. For this, the Design Science methodology was used, so that values could be obtained that could be applied to generate CASK (Cost of Available Seat Kilometer) data for the helicopter and the airplane and then an approximate value for the CASK of an eVTOL could be calculated and compared.

**Key-words:** eVTOL. UAM. CASK. Operating cost. Cost Model.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de eVTOL proposto pela Eve. Fonte: (EVE AIR MOBILITY, 2023). . . . .	19
Figura 2 – UAM de regiões metropolitanas nos Estados Unidos. . . . .	25
Figura 3 – Arquiteturas de Propulsão de aeronaves eVTOL. Adaptado de Ugwueze et al. (2023). . . . .	28
Figura 4 – Diagrama de missão. Adaptado de Duffy et al. (2017). . . . .	31
Figura 5 – Exemplo de Detalhamento dos Custos Operacionais Diretos (COD) de um Rotorcrafte Comercial. Adaptado de Decker (2009). . . . .	33
Figura 6 – Comparação entre helicóptero e eVTOL. Adaptado de Kinjo (2018). . .	35
Figura 7 – Cessna 208 <i>Caravan</i> . Fonte: (CESSNA, 2023). . . . .	39
Figura 8 – Robinson R44. Fonte: (ROBINSON, 2023). . . . .	40
Figura 9 – Diagrama de missão do Cessna <i>Caravan</i> . . . . .	45
Figura 10 – Diagrama de missão do R44. . . . .	46
Figura 11 – Representação visual do caminho de voo do eVTOL. Fonte: (LILIUM, 2021). . . . .	48
Figura 12 – Perfil operacional projetado com base no peso máximo de decolagem. Fonte: (NATHEN et al., 2021). . . . .	53
Figura 13 – Proporcional de cada etapa para as aeronaves. . . . .	54
Figura 14 – Custos por hora devido à substituição de baterias a partir das horas voadas anualmente. . . . .	57
Figura 15 – Proporção de custos para 500 horas de voo . . . . .	58
Figura 16 – Proporção de custos para 2000 horas de voo . . . . .	59
Figura 17 – Curvas de CASK para eVTOL COD 500 h. . . . .	62
Figura 18 – Curvas de CASK para eVTOL COD 1000 h. . . . .	63
Figura 19 – Curvas de CASK para eVTOL COD 1500 h. . . . .	63
Figura 20 – Curvas de CASK para eVTOL COD 2000 h. . . . .	64

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Aplicação da metodologia ao longo do estudo. . . . .	43
Tabela 2 – Consumo de combustível por hora. . . . .	47
Tabela 3 – Custos por cada etapa de operação. . . . .	48
Tabela 4 – Potência e tempo necessários para cada uma das etapas. . . . .	52
Tabela 5 – Custos por cada etapa de operação. . . . .	53
Tabela 6 – Custos operacionais relacionados a manutenções e reserva de <i>overhaul</i> . . . . .	55
Tabela 7 – COD para o Cessna e para o R44 . . . . .	60
Tabela 8 – COD para o eVTOL com base em 500, 1000, 1500 e 2000 horas voadas anualmente. . . . .	61

# Lista de abreviaturas e siglas

ASK	<i>Available Seat-Kilometers</i> - Assentos-Quilômetros oferecidos
CASK	<i>Cost per Available Seat Kilometer</i>
VTOL	<i>Vertical Takeoff and Landing</i>
eVTOL	<i>Electric Vertical Takeoff and Landing</i>
UAM	<i>Urban Air Mobility</i> - Mobilidade Aérea Urbana
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
NPA	<i>Notice of Proposed Amendment</i>
DPE	<i>Distributed Electric Propulsion</i>
COD	Custos Operacionais Diretos
COI	Custos Operacionais Indiretos
AS	<i>Available Seats</i> - Assentos Disponíveis
CONOPS	- <i>Concept of Operations</i> /Conceito de Operações
VPCost	Custo de componentes;
DevCost	Custo total de suporte ao desenvolvimento. Envolve despesas como logística, administração, recursos humanos, salários, entre outros
QCCost	Custo de Controle de Qualidade. Envolve os custos com os técnicos e equipamentos para a fabricação da aeronave
FTCost	Custo de teste de voo. Envolve os custos do programa de testes e suas certificações
EngCost	Custos com a engenharia da aeronave
TCost	Custo com as ferramentas. Envolve os custos do projeto, manutenção dos gabaritos, moldes, entre outros
ManCost	Custos de fabricação. Envolve mão de obra e produção
MatCost	Custos de material. Envolve os custos de matérias-primas ( <a href="#">RIBEIRO, 2022</a> )

$DOC_{fuel}$	Custo de operação associado ao combustível
$F_f$	fluxo de combustível por hora
$U_c$	Custo unitário do combustível
$C$	Constante da densidade de energia do combustível em um ponto escolhido
$\eta_{cc}$	Eficiência de conversão de combustível
$P_u$	: Potência total requerida
$Custo_{tot,cess}$	Soma dos custos das etapas do Cessna dados pela tabela 5
$Custo_{tot,R44}$	Soma dos custos das etapas do R44 dados pela tabela 5
$Man_{cess}$	custo de manutenção do Cessna
$RO_{cess}$	Custo de reserva de <i>overhaul</i> do Cessna
$Man_{R44}$	Custo de manutenção do R44
$RO_{R44}$	Custo de reserva de <i>overhaul</i> do R44

# Lista de símbolos

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\in$	Pertence
Ah	Ampere-hora
V	Volts
W	Watts
ft	feet
min	minuto
s	segundo
mph	milhas por hora
l	litro
km	quilômetro
kg	quilo
h	hora
km/h	quilômetro por hora
\$	Dólar
mph	milhas por hora
fpm	pés por minuto
$P$	potência
$\eta$	eficiência
$\dot{m}$	fluxo de massa
D	arrasto

MTOM	<i>Maximum Takeoff Mass</i> - Massa máxima de decolagem
g	gravidade
\$	dólar
S	Custo da reposição de baterias
Q	Custos direto de operação (COD)
K	ASK
Ss	número de assentos disponíveis
D	distância percorrida
a	1,72891238314985
b	0,3567084790912
c:	0,404534157
C	Consumo da aeronave em determinada etapa
$C_h$	Consumo por hora da aeronave
t	Duração da etapa em horas $T_{litro}$ = Custo do combustível por litro
Man	Custo estimado para a manutenção do eVTOL
$Man_{R44}$	Custo de manutenção do R44
$Man_{Cessna}$	Custo de manutenção do Cessna
RO	Custo estimado para a reserva de <i>overhaul</i> do eVTOL
$RO_{R44}$	Custo de reserva de <i>overhaul</i> do R44
$RO_{Cessna}$	Custo de reserva de <i>overhaul</i> do R44
t	Tempo de duração do eVTOL se comportando de forma semelhante ao R44
R	Capacidade total da bateria em kWh
$T_{bateria}$	Custo da substituição das baterias
$T_{kWh}$	Custo do kWh em baterias de ion de lítio
Z	Capacidade da bateria em kWh

J	Valor do kWh
$T_{anual}$	Custo da substituição de bateria por ano de uso
Vu	Tempo médio de vida útil da bateria

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Contextualização e Motivação	18
1.2	Justificativa	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Organização	21
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	Mobilidade Aérea Urbana - UAM	23
2.2	Electrical Vertical Take-off and Landing (eVTOL)	27
2.3	Desempenho	29
2.3.1	Desempenho de motorização	30
2.4	Custos de operação	32
2.5	Custos de Operação Indiretos - COI	33
2.6	Custos de Operação Diretos - COD	34
2.6.1	Asas rotativas	34
2.6.2	Asas fixas	37
2.7	Modelos comparativos	39
2.7.1	Cessna Caravan	39
2.7.2	Robinson R44	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
3.1	<i>Design Science</i>	41
3.1.1	<i>Design Science Research</i>	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
4.1	Perfis de missão	45
4.2	Custos por etapas para as aeronaves Cessna e R44	46
4.3	Modelagem de potência do eVTOL	48
4.4	Custos de manutenção e reserva de <i>overhaul</i>	54
4.5	Cálculo do CASK	59
4.5.1	Cessna <i>Caravan</i> e R44	59
4.5.2	Aeronave do tipo eVTOL	60
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>

## APÊNDICES

71

### APÊNDICE A – CÓDIGO PARA A GERAÇÃO DE CURVAS DE CASK . . . . . 72

A.1	Código de 500 horas de voo anual para o eVTOL . . . . .	72
A.2	Código de 1000 horas de voo anual para o eVTOL . . . . .	73
A.3	Código de 1500 horas de voo anual para o eVTOL . . . . .	74
A.4	Código de 2000 horas de voo anual para o eVTOL . . . . .	74

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização e Motivação

O conceito de Mobilidade Urbana – UAM *Urban Air Mobility* tem raízes que remontam muitas décadas atrás, mas precisamente 1953, quando helicópteros se tornaram elementos presentes no cenário novaiorquino, proporcionando um meio promissor no transporte de passageiros. Contudo, devido a questões que envolviam preocupações com a segurança, essa prática foi, por certo tempo, deixada de lado, pois, a ocorrência de incidentes deixou os usuários um tanto incertos sobre seu uso, retrata [Rothfeld et al. \(2020\)](#).

O renascimento da UAM teve destaque em diversas outras metrópoles, não apenas estando reclusa à cidade de Nova Iorque, sendo instalada em São Paulo, Cidade do México e tantas outras, agora, impulsionada pela tecnologia que se tornou uma grande aliada junto aos aplicativos móveis que permitem que os helicópteros operem sob demanda. A chegada de novos veículos de decolagem e pouso vertical (VTOL), o conceito de UAM se revitaliza, prometendo não apenas praticidade, mas também a melhoria em questões de conforto, segurança e viabilidade econômica, como ainda é destacado por [Rothfeld et al. \(2020\)](#).

A visão futurista dos carros voadores, que foi muito tempo deixada apenas para o mundo da ficção e imaginação dos entusiastas em tecnologias aeronáuticas, está sendo substituída por iniciativas reais e significativas para tornar esta visão, até então tão distante da vida real, uma realidade possível. Diversas empresas globais líderes no segmento como, por exemplo, Eve Air Mobility (Brasil), Lilium (Alemanha) e Airbus (França), seguem à frente nestes projetos tão inovadores que envolvem as aeronaves elétricas, como é mostrado por [Andrade \(2019\)](#).

Segundo [Duffy et al. \(2017\)](#), os veículos elétricos de decolagem e aterrissagem vertical (eVTOL) surgiram como uma solução interessante para diminuir os problemas relacionados aos congestionamentos em áreas urbanas, ao mesmo tempo em que são uma boa alternativa em soluções para os problemas ambientais, já que produzem baixa ou nula emissão de gases tóxicos, bem como a diminuição da poluição sonora, sendo estes veículos que operam com sistemas de diminuição de ruído. Adicionalmente, [Moore e Fredericks \(2014\)](#) destaca a possibilidade de que a implementação elétrica nas aeronaves VTOL apresentaria melhoras significativas nos custos operacionais, já que seus custos com energia equivaleriam a apenas 30% do custo dos combustíveis convencionais de aviação.

Embora ainda existam discussões sobre a escolha entre baterias e turbina, em vista que existem tantos céticos com relação a nova tecnologia, [Moore e Fredericks \(2014\)](#) re-

força que diversos estudos realmente indicam estas melhorias e os custos totais de operação poderiam ser de quatro a oito vezes menores com o sistema elétrico.

Ainda assim, o futuro deste novo sistema ainda é incerto, visto que, por não estarem em operação, não é tão trivial elaborar um modelo de custos devido às diferenças que existem entre as condições de operação na decolagem, cruzeiro e pouso, como diz [Fredericks et al. \(2013\)](#), podendo a aeronave se comportar ora como uma modelo de asas rotativas, ora como um modelo de asas fixas. Tais diferenças impactam diretamente os custos operacionais, já que as fases com menos duração são as que mais exigem energia, sendo necessário realizar um equilíbrio cauteloso.

De acordo com [Holden e Goel \(2016\)](#), se for considerada uma viagem de aproximadamente 50 milhas, o pouso e a decolagem podem consumir 50% a mais de energia do que a totalidade do voo de cruzeiro, o que colocaria o eVTOL em desvantagem se comparado a helicópteros de grandes rotores. Até então, estes gastos mais elevados são justificados pelo investimento em sistemas de baixa emissão de ruído e alta eficiência de cruzeiro, como em uma compensação.



Figura 1 – Modelo de eVTOL proposto pela Eve. Fonte: ([EVE AIR MOBILITY, 2023](#)).

A implementação definitiva do eVTOL como uma alternativa para a UAM enfrenta um ponto delicado que é a limitação nas tecnologias de baterias, pois, são necessárias baterias de alta densidade, o que pode elevar os custos e reduzir a carga útil, visto que, até o momento, para aumentar a capacidade energética de uma bateria para eVTOL seria necessário aumentar suas dimensões e massa, assim como é esclarecido por [Pavel \(2021\)](#), que reforça o fato de que para que as baterias atuais necessárias sejam realmente potentes precisariam ser grandes, pesadas e ocupariam muito espaço útil. Resolver esta questão exigiria investimentos altos para remodelar as baterias de forma que se tornassem mais

densas e mais compactas, o que aumentaria o custo total do projeto, elevando também os custos operacionais.

Os dados para o trabalho de análise de custos foram obtidos a partir da metodologia *Design Science Research*, onde foram considerados diversos parâmetros de três aeronaves, como velocidade, peso, altitude, tempo de voo, etc, a partir da comparação entre uma aeronave de asas fixas – Cessna 208 – e de asas rotativas – R44. A partir de então, foi possível calcular um valor satisfatório para o CASK (Custo por Assento por Quilômetro) de ambas as aeronaves, levando em conta por hora: manutenção, reserva de *overhaul* e custo de combustível.

Uma vez encontrados valores realistas para os dois modelos, o mesmo procedimento foi realizado para obter um modelo de CASK para o eVTOL, onde também foi levado em conta os impactos que as trocas de bateria causariam nos custos operacionais. Tal abordagem possibilita a comparação e análise da viabilidade de utilização do eVTOL como um substituto para os meios de UAM já existentes.

## 1.2 Justificativa

A crescente demanda por iniciativas que solucionem os problemas com relação à mobilidade urbana (UAM) tem sido impulso para a busca de aeronaves inovadoras, como os eVTOL (veículos elétricos de decolagem e pouso vertical), já que as vias terrestres estão super lotadas e em muitas grandes cidades não há mais espaço para a ampliação de pistas ou criação de novas faixas. Neste cenário, a presente proposta visa não apenas o cálculo de um CASK, mas também as análises de custos em cada uma das fases, podendo se tornar útil em pesquisas futuras sobre a otimização energética total e por etapa, por exemplo.

A escolha dos modelos Robinson R44 e do Cessna 208 *Caravan* como pontos de comparação foi dada de forma estratégica, considerando suas características e tipos de operação a quais estão vinculados, como por exemplo, alcance, tipos de operação, quantidade de passageiros.

A análise do CASK ao longo de diferentes trechos do voo não apenas demonstra a eficiência econômica de cada aeronave, o que serviria de exemplo de otimização para os modelos futuros de eVTOL, mas também permite a localização dos pontos críticos em cada uma das aeronaves.

Para esta pesquisa, nem todos os custos foram levados em conta, como por exemplo, custos de tripulação, taxas aeroportuárias, seguro, etc, pois, são valores variáveis e que dependem de fatores imprevisíveis. Levando em consideração que, os custos com manutenções, reserva de *overhaul* e combustíveis são os maiores contribuidores para os custos operacionais diretos e que representam aproximadamente 80% do valor total das asas fi-

xas e rotativas, esta análise também auxiliará a entender como cada parcela influencia no custo operacional final aproximado de um eVTOL.

## 1.3 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver um modelo de custos operacionais para as aeronaves do tipo eVTOL, visando analisar sua viabilidade em questões de economia para operações de mobilidade urbana, combinando características de asas fixas (de pequeno porte) e rotativas, pois o eVTOL visa ser inserido no mercado como alternativa econômica às demais aeronaves para tais operações. Para alcançar este objetivo geral, serão propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a necessidade de integrar as aeronaves eVTOL no contexto atual de mobilidade urbana, entendendo e discutindo suas propostas e limitações;
- Realizar uma comparação seletiva entre aeronaves concorrentes de asas fixas e rotativas;
- Desenvolver um modelo simplificado de CASK para os eVTOL comparado ao CASK de asas fixas e rotativas, levando em consideração fatores como manutenções, reservas de *overhaul*, custos de energia (bateria/combustível) e, apenas para o eVTOL, substituição periódica de baterias por se tratar de um veículo elétrico;
- Propor curvas de CASK comparativas entre as três aeronaves de forma a entender seu comportamento ao longo do alcance.

### 1.3.1 Organização

O trabalho foi estruturado de forma a apresentar cinco partes distintas, sendo a primeira dela a introdução, onde o problema é apresentado, justificado e os objetivos são traçados de forma a conduzir a pesquisa.

A segunda etapa apresenta o referencial teórico que aborda os principais temas a serem tratados. Neste contexto, serão trazidos conceitos de mobilidade urbana (UAM), sua relevância e características nas grandes cidades. O eVTOL será introduzido de forma a ser compreendido como aeronave e suas vantagens em comparação com as demais aeronaves citadas ao longo do trabalho. Serão mostradas suas características, alguns dos modelos disponíveis, bem como uma breve explicação sobre seu desempenho. Também serão abordados os custos, tanto diretos quanto indiretos, de forma a serem devidamente diferenciados e compreendidos, bem como metodologias comuns de elaboração de tais custos para aeronaves de asas fixas e rotativas.

---

A terceira etapa é onde as metodologias adotadas são *esclarecidas, neste caso, Design Science e Design Science Research*, com explicações abrangentes sobre suas características e relevância em projetos de engenharia em comparação a outros métodos de pesquisa.

Na seção dos resultados e discussões será apresentada as comparações dos dados obtidos e da forma como foram alcançados, bem como os custos operacionais devidamente calculados e discutidos ao longo do desenvolvimento para as três aeronaves.

Por fim, as considerações finais avaliarão os objetivos quanto à realização de cada um, além disso, serão discutidas as limitações encontradas no desenvolver do projeto, bem como as possibilidades de pesquisas futuras a partir dos resultados obtidos.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Mobilidade Aérea Urbana - UAM

O conceito de transporte aéreo urbano, iniciado em meados de 1947 com a inserção de helicópteros na rota entre Los Angeles e Nova Iorque, focava principalmente na conexão entre pontos urbanos estratégicos e aeroportos. Segundo as observações de [Cizreliogullari, Barut e Imanov \(2022\)](#), no que se diz respeito aos dias atuais, a perspectiva evoluiu consideravelmente, tendo como base o desenvolvimento de aeronaves elétricas de pouso e decolagem vertical (eVTOL) para realizar o transporte de carga e de passageiros, impulsionando a utilização da UAM como um meio seguro e sustentável.

Ainda de acordo com [Cizreliogullari, Barut e Imanov \(2022\)](#), o advento do eVTOL representa uma abordagem significativa no transporte urbano, pois vai além da eficiência, trazendo também questões que envolvem celeridade, desenvolvimento tecnológico, segurança e benefícios ao meio ambiente. Ao fazer uso das novas tecnologias, a UAM emerge com respostas inovadoras aos desafios enfrentados pelo sistema de transporte urbano atual, viabilizando a conexão entre pontos estratégicos não mais como uma perspectiva futurista, onde grandes metrópoles podem se ver menos reféns dos grandes congestionamentos, oferecendo uma oportunidade de superar os obstáculos impostos pelo crescimento populacional e aumento desenfreado de automóveis terrestres.

Conforme observado por [Teodorovic e JANIC \(2017\)](#), o crescimento populacional e o aumento de veículos associado, especialmente os de uso particular, têm contribuído de forma significativa para os problemas de trânsito hoje em dia nas grandes cidades que, diariamente, enfrentam longas filas de automóveis, sua emissão de poluentes e ruídos. Tais fatos acrescentam complexidades também nos custos associados à manutenção de rodovias, controle do trânsito e inúmeras medidas de proteção ambiental, destacando a importância da necessidade de soluções inovadoras, já que simplesmente adaptar os veículos a sistemas elétricos não resolveria, ainda assim, as questões de congestionamento.

Para [Cizreliogullari, Barut e Imanov \(2022\)](#), o desenvolvimento de aeronaves do tipo eVTOL, ao serem integrados à vida urbana, não apenas solucionaria tais incômodos, como seriam o pontapé para ainda mais desenvolvimento tecnológico, não apenas na área aeronáutica, mas também em áreas ligadas à eficiência energética e sistemas elétricos que certamente serão soluções de diversas outras questões futuramente.

Nas palavras da [NASA \(2022\)](#), a UAM é conceituada como sendo um sistema de transporte aéreo que tem como pontos de destaque sua segurança, eficiência e uma gama de funcionalidades, não se resumindo a apenas transporte de passageiros de ponto a ponto,

mas também para o transporte de carga e uso hospitalar, como por exemplo, helicópteros e pequenos aviões. Deste modo, a UAM representa uma solução versátil e adaptável para diversas necessidades.

A possibilidade de implementar um sistema de mobilidade aérea em grandes centros urbanos, combinada com avanços significativos de automação e sistemas de armazenamento de energia elétrica, desempenhou papel crucial na concretização da UAM, conforme discutido por [Bauranov e Rakas \(2021\)](#). Tal motivação estimulou que houvesse uma corrida global na área de desenvolvimento de protótipos que envolveu empresas em parceria com fornecedores de componentes aeroespaciais. No entanto, tal entusiasmo encontra uma grande barreira no que diz respeito à adaptação urgente que os municípios necessitam para ajustar suas regulamentações quando se dispõe a operar uma nova classe de transporte aéreo. Tal bloqueio demanda cooperação entre entidades do governo, junto ao setor privado e demais envolvidos garantindo uma transição segura e gradativa para a aceitação da população ao estilo da UAM.

Este cenário reforça a ideia de que o progresso na UAM não é apenas no que tange processos e desenvolvimento tecnológico, mas requer também uma abordagem colaborativa e adaptativa para garantir sua eficácia a longo prazo.

Segundo [Wang, Li e Qu \(2023\)](#), a estrutura inicial de uma rede de UAM pode ser vista como um sistema *hub-and-spoke*, onde o papel do eVTOL, inicialmente, consistiria na conexão entre *hubs*, não para diminuir os custos, mas para promover o aumento do tráfego das aeronaves e, conseqüentemente, sua aceitação pelos usuários, que, conseqüentemente, veriam os eVTOL com mais frequência os associando a veículos confiáveis.

O tempo de voo de veículos dentro da UAM é relativamente baixo, não superior a poucos minutos, mesmo em deslocamentos com alcances consideráveis, que podem variar de 3 a 100 quilômetros, como reforça [Wang et al. \(2023\)](#). Esse benefício temporal é um dos argumentos utilizados pelos defensores da mobilidade urbana como solução, visto que economizam tempo com se comparados a veículos terrestres, além disso, os eVTOL operam em altitudes que variam de super baixas (100 m) a altitudes baixas (de 100 a 1000 m), o que reduz o esforço de subida e descida que são as fases mais exigidas das aeronaves em questão de desempenho e consumo de energia.

Ao introduzir uma nova tecnologia, ainda mais se tratando de algo tão moderno, é natural que uma série de prós e contras surjam ao longo dos primeiros anos de desenvolvimento. Conforme analisado por [Wang, Li e Qu \(2023\)](#), em decorrência do esvaziamento das rodovias dentro dos centros urbanos, conseqüentemente um fluxo maior de veículos se concentrará em trechos de “primeira e última milha” do tráfego dos eVTOL, que nada mais é que o transporte de usuários de suas localidades até os vertiportos.

Tal suposição destaca um grande desafio a ser solucionado posteriormente pela

UAM: o aumento da necessidade de transporte terrestre próximo aos pontos de acesso. De primeira, pode-se pensar em soluções como o aumento de transportes coletivos que supram a necessidade dos passageiros, reforçando os benefícios da integração entre os veículos de mobilidade urbana, sejam eles terrestres ou aéreos.

A Figura 2, mencionada por Wang, Li e Qu (2023), ilustra uma suposição de como se relaciona a implementação da UAM e a migração de maior fluxo terrestres para regiões mais periféricas, desobstruindo grandes rodovias dentro das cidades.

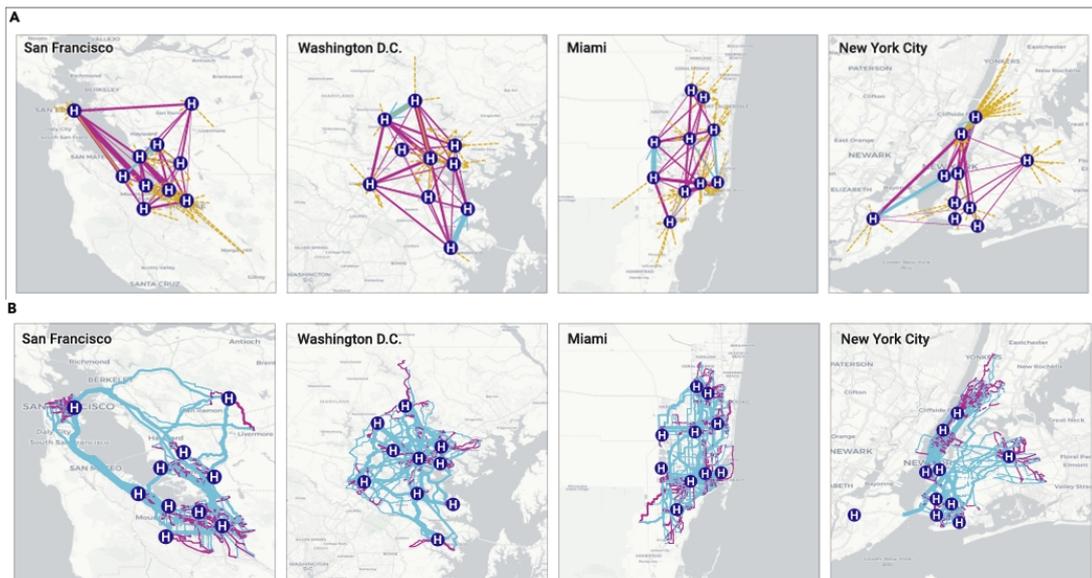


Figura 2 – UAM de regiões metropolitanas nos Estados Unidos. (A) Os pontos "H" representam os locais onde são construídos os vertiportos, as linhas roxas representam os voos entre os vertiportos, as linhas azuis representam as viagens de reposicionamento para alocar veículos vazios devido ao desequilíbrio da demanda de voos entre os vertiportos, e as linhas amarelas mostram as primeiras milhas e as últimas milhas nas viagens de transporte terrestre. (B) As mudanças no tráfego após a implementação da UAM, onde as linhas azuis representam as rodovias onde o trânsito decai, as roxas onde o trânsito aumenta, sendo que a espessura da linha representa a intensidade de queda e aumento. Adaptado de Wang, Li e Qu (2023).

Para a FAA (2022) (Federal Aviation Administration), vertiporto pode ser conceituado como uma infraestrutura responsável por oferecer suporte das operações de decolagem e pouso verticais, além de abastecimento, reabastecimento e manutenção das aeronaves, sejam elas híbridas, elétricas ou movidas a hidrogênio, ou seja, todo o contexto de VTOL.

Essencialmente, funciona como um hub central para as frotas das aeronaves, bem como pontos das operações de logística, como embarque e desembarque de passageiros e carga. De forma a facilitar tais operações, o autor ainda cita a criação de *vertistop*, que é um local de funcionalidades reduzidas, servindo apenas para o embarque e desembarque

dos passageiros e carga, ou seja, apenas um ponto para as interações diretas entre aeronave e passageiros ou mercadorias. Em resumo, o vertiporto funciona como um hangar completo, além da relação com o que for transportado, enquanto o *vertistop* funcionaria como um heliporto.

Conforme destacado por [Song \(2022\)](#), no que se diz respeito à legislação para a implementação da UAM, as informações disponíveis ainda são bastante limitadas, já que as operações ainda sequer começaram e pouco se sabe como será conduzida em cada localidade. No entanto, Estados Unidos e Europa surgem como pioneiros na regulamentação do serviço de operação da UAM.

Um marco neste contexto vem a ser o memorando publicado pela FAA, denominado “*Engineering Brief No. 105, Vertiport Design*” que fornece normas e orientações específicas sobre como deve ser o design dos vertiportos, abordando aspectos como a infraestrutura necessária que as operações sejam feitas em segurança e padronizadas.

Além disso, o NPA 2022-06, também mencionado por [Song \(2022\)](#), também regulamentava especificações sobre a construção e operação das estruturas, além de certificações específicas da UAM. Estes esforços demonstram a resposta otimista das autoridades com relação às melhorias buscadas pela mobilidade aérea.

O foco inicial destes países pioneiros em termos de prerrogativas legais é atribuído à segurança e eficiência tanto das novas aeronaves quanto da integração com outros meios de transporte. Outras nações também já demonstram interesse em regulamentar o novo sistema, como é o caso da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o que mostra grandes avanços no futuro com relação à normatização das aeronaves e suas operações em caráter global.

Outro conceito de gerenciamento para o avanço da UAM é o Conceito de Operações (CONOPS), como traz a [NASA \(2020\)](#). O documento descreve todo o processo de gestão das operações, desde a implementação até o funcionamento de fato das operações com o eVTOL, visando tornar as viagens seguras, econômicas, eficientes e bem planejadas.

Neste contexto, o documento busca auxiliar as metrópoles com a inserção do novo meio de transporte sem afetar de forma negativa os meios já existentes, abordando questões como a altura de operação, localização estratégica dos vertiportos e *vertistops*, padrões de segurança, entre outros aspectos.

A CONOPS “Mobilidade Aérea Urbana Sustentável no Rio de Janeiro”, é a pioneira no Brasil e foi publicada pela [Eve \(2022\)](#) para orientar as atividades envolvendo os eVTOL, especificamente no que tange às futuras operações de pouso e decolagem. O documento, de pouco mais de oitenta páginas, estabelece definições específicas para a cidade do Rio de Janeiro. Dentro os assuntos desta CONOPS, estão questões relativas ao ruído emitido pelas aeronaves, especificações para os vertiportos e o funcionamento dos

sistemas de recarga, normas de manutenção, além das jornadas tanto da aeronave quanto do usuário.

De acordo com a [Eve \(2022\)](#), ainda que o eVTOL esteja em fase inicial, a compreensão e o desenvolvimento de um protótipo para o sistema operacional é parte crucial desta etapa, já que permite que os órgãos competentes compreendam os pontos críticos e as limitações que requerem atenção e modificações, facilitando a tomada de decisões, de forma que, alterações sejam realizadas antes mesmo de o funcionamento de fato promovendo maior segurança nos assuntos que tangem a implementação do eVTOL como uma aeronave efetivo dentro da UAM.

## 2.2 Electrical Vertical Take-off and Landing (eVTOL)

De acordo com a [NASA \(2021\)](#), um eVTOL - *electric-Vertical Take off and Landing* - é definido como uma aeronave de elevação vertical impulsionado por potência elétrica capaz de transportar passageiros . Estas aeronaves se encontram em fase emergente no mercado aeronáutico visando eficiência, segurança e acessibilidade ([VELAZ-ACERA; ALVAREZ-GARCIA; BORGE-DIEZ, 2023](#)).

Mais de 500 conceitos diferentes de eVTOL surgiram no mundo até o segundo trimestre de 2022, entretanto, apenas 30% destes tiveram a oportunidade de realizar o primeiro voo, isso devido a forma como foram idealizados e conduzidos durante o planejamento. Conforme a perspectiva de [Ugwueze et al. \(2023\)](#), estes veículos são propulsionados por sistemas inicialmente híbridos, com o objetivo que se tornem completamente elétricos no futuro, projetados para carregar dez passageiros, no máximo, a depender do modelo, e a ideia é que tenha uma massa de decolagem inferior a 3.175 kg.

Um dos fatores que proporcionou maior flexibilidade para o desenvolvimento dos eVTOL foi o sistema DEP (Distributed Electric Propulsion) que permitiu a configuração de novos modelos de aeronaves. De acordo com [Doo et al. \(2021\)](#), com este sistema, é possível de melhorar a tolerância a falhas e segurança, assim como, a melhoria do desempenho ainda em solo, atenuando a dissipação de ruídos, de calor e emissões de poluentes tóxicos, além da possibilidade de ligar e desligar as hélices antes e depois do embarque e desembarque dos passageiros.

Para [Doo et al. \(2021\)](#), é importante ressaltar o fato de que o eVTOL não tem o intuito de competir ou substituir outros tipos de aeronaves, como os helicópteros, mas sim, fornecer um meio alternativo, econômico, rápido, seguro e sustentável de transporte, tendo menor alcance e que as missões sirvam como um auxílio à aviação convencional, oferecendo uma forma mais prática de aproximar os passageiros de seus destinos em trechos que não são viáveis para aeronaves maiores ou helicópteros.

Como já citado, são muitos os modelos de eVTOL idealizados desde que o tema passou a ganhar mais atenção do mercado aeronáutico indicando a possibilidade de aprimorar a mobilidade urbana. Entretanto, grande parte dos modelos pode ser classificada dentro das duas categorias abaixo e ilustrados na figura 3.

- **eVTOL de propulsão elevada** - Embora todos os eVTOL decolem e aterrissem verticalmente, apenas os de propulsão elevada possuem asas, com isso, podem alcançar velocidades próximas às aeronaves de asas fixas e em altitudes significativamente mais elevadas que os modelos sem asas e helicópteros. Entretanto, são mais trabalhosos e custosos tanto pela a adição das asas quanto por todos os sistemas responsáveis pela sustentação a ela atribuídos. Além do que, seus sistemas de empuxo vetorizado tendem a ser os mais trabalhosos, visto que necessitam de sistemas específicos para o movimento vertical e para frente (UGWUEZE et al., 2023).
- **eVTOL sem asas** - Estes modelos se tornam mais simples, pois dependem apenas do impulso para ambos os movimentos: vertical e para frente. Seu comportamento se aproxima mais dos helicópteros do que das asas fixas, ao contrário da propulsão elevada. (UGWUEZE et al., 2023).

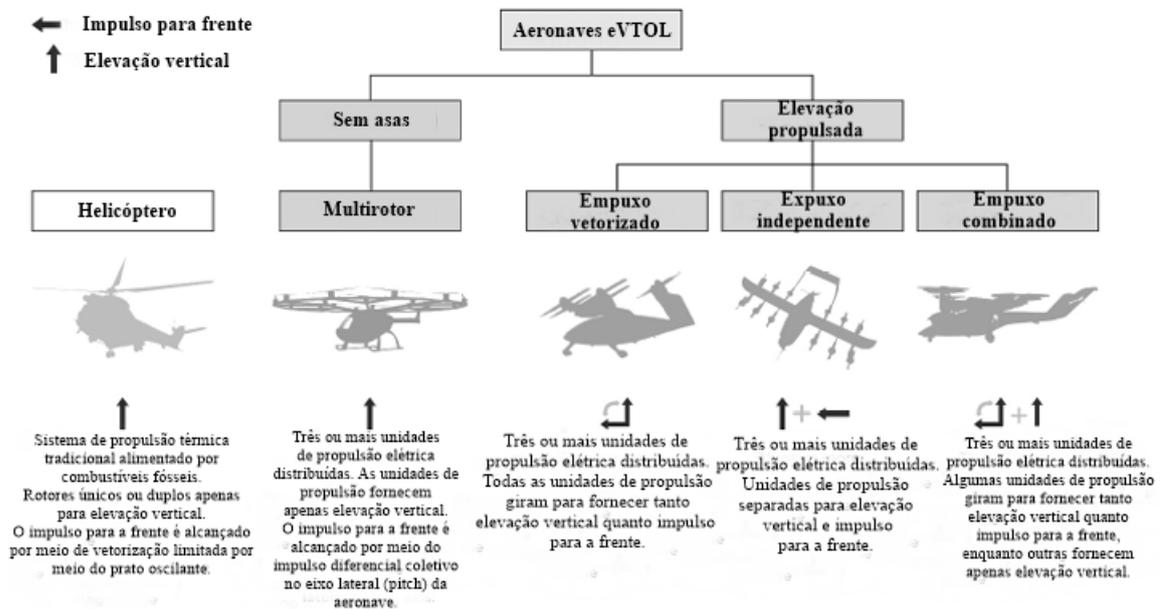


Figura 3 – Arquiteturas de Propulsão de aeronaves eVTOL. Adaptado de Ugwueze et al. (2023).

## 2.3 Desempenho

De acordo com [CAA \(2020\)](#), para realizar os cálculos precisos sobre desempenho, é crucial determinar com precisão o peso bruto das aeronaves antes de realizar um voo, com isso, entende-se que, toda a carga tem que ser incluída, como tripulação, passageiros, combustível e o que mais for transportado.

Entre os fatores que prejudicam o desempenho de uma aeronave está a densidade do ar - que pode danificar os sistemas à medida que diminui -, temperatura, pressão, umidade, altitude, entre outros.

Por exemplo, o desempenho do helicóptero está diretamente ligado à densidade, já que esta afeta diretamente a potência do motor e a eficiência do rotor. Segundo [CAA \(2020\)](#), a altitude densa, que é um efeito combinado entre altitude de pressão e temperatura, em altos valores pode causar redução na potência de subida da aeronave, assim como limitar as escolhas de locais de pouso e decolagem, já que a função de pairar é diretamente afetada.

Ainda segundo [CAA \(2020\)](#), em determinadas situações, um helicóptero pode encontrar problemas na decolagem, pois, a depender do peso e dos valores de altitude densa, maior é a potência requerida para a subida. Uma vez seu desempenho reduzido, a potência disponível para o voo pairado pode ser muito baixa, fato que reforça a necessidade de que os cálculos de potência sejam bem feitos previamente à decolagem.

Assim como na decolagem, a depender dos valores de altitude densa, o voo pairado necessário antes de pouso também pode ser bastante prejudicado, devendo muitas vezes ser realizado com velocidade zero, entretanto, de acordo com [CAA \(2020\)](#), esta condição pode não ser sempre possível, o que reduz drasticamente a segurança do voo.

Na palavras de [Gonçalves \(2023\)](#), para o caso das aeronaves de asas rotativas de pequeno porte, as maiores ocorrências de incidentes de performance também estão relacionadas com a etapa do pouso, da decolagem e do cruzeiro, sendo a última o momento de menores registros.

Ainda segundo o autor, assim como para as asas rotativas, o peso também influencia diretamente o desempenho das asas fixas, afetando pouso e decolagem. Para esta análise é necessário levar em conta o peso total e o centro de gravidade, que deve ser mantida dentro dos limites da faixa operacional.

Uma vez o centro de gravidade deslocado em demasia para frente ou para trás, os efeitos na performance podem ser catastróficos, já que abalam ações como manobrabilidade, estabilidade, reduzem a velocidade máxima, podendo até mesmo aumentar o consumo de combustível, o que conseqüentemente diz respeito aos custos de operação ([GONÇALVES, 2023](#)).

Para [Gonçalves \(2023\)](#), diferente das aeronaves de asas rotativas, as aeronaves de asas fixas necessitam de pistas com distâncias suficientes para pouso e decolagem seguros que são diferentes para dimensões distintas, sendo necessário, para uma boa performance, que haja uma margem de segurança sobre o valor requerido para o caso de imprevistos.

### 2.3.1 Desempenho de motorização

A tecnologia de Decolagem e Pouso Vertical Elétrico (eVTOL) faz referência a um tipo de aeronave que utiliza da propulsão elétrica para pairar, pousar e decolar verticalmente ([JEON, 2022](#)).

Um eVTOL de múltiplos rotores especializado em serviços de mobilidade urbana apresenta vantagens quando está em modo de *hover* (voo pairado), resistência a rajadas de vento e baixa emissão de ruído. Entretanto, no ponto de vista de [Kim, Lim e Yee \(2023\)](#), é importante ressaltar que a presença de mais de um rotor ocasiona consequências ao desempenho da aeronave, sendo a distância entre eles o fator de maior relevância.

Um dos principais obstáculos enfrentados pelo mercado do eVTOL para inserir de forma efetiva o transporte no sistema de mobilidade urbana é a baixa densidade das baterias utilizadas, já que são de lítio e apresentam menor quantidade de energia produzida se comparado aos combustíveis à base de hidrocarbonetos, o que limitaria o tempo de operação dos veículos elétricos. Normalmente, um eVTOL de propulsão elétrica pode apresentar uma eficiência de 75% quando as perdas nos motores e controladores são levadas em conta, fato que o deixa distante atualmente de uma aeronave movida a combustível. Todavia, para [Doo et al. \(2021\)](#), a tecnologia está avançando rapidamente do que diz respeito a sistemas elétricos, principalmente em baterias e motores.

A tecnologia por trás das baterias do eVTOL é fator crucial para o sistema de propulsão elétrica da aeronave, já que esta deve contar com alto desempenho das baterias que devem garantir alcance, carga útil e segurança, para evitar, por exemplo, incêndios ou qualquer tipo de falha. Além disso, o custo das baterias é um fator importante, pois, afeta diretamente os custos operacionais, como evidencia ([AMPRIUS, 2023](#)).

Ainda segundo [Amprius \(2023\)](#), a densidade de carga de uma bateria é q que dita seu alcance, pois se trata da quantidade de energia que ela pode armazenar e, para o caso dos eVTOL que vêm como uma proposta de substituir, por exemplo, os helicópteros na mobilidade urbana aérea, é necessário que suas baterias tenham alta capacidade de carga. A ideia de uma boa bateria para esta finalidade é aquela que forneça mais alcance sem que haja necessidade de tantas paradas para recarga.

Uma das características do eVTOL é a maior taxa de carga e descarga das baterias durante pouso e decolagem, pois são os momentos em que os motores são mais exigidos. A diferença de consumo entre as fases pode ocasionar danos à saúde das baterias que

é averiguada a partir de três pontos principais: carga, descarga e temperatura, sendo a descarga o fator crucial para entender as condições em que a bateria se encontra. No entendimento de [Mitici et al. \(2023\)](#), devido ao custo e à baixa taxa de auto descarga as baterias de íon-lítio são as majoritariamente consideradas para a operação.

O diagrama mostrado na figura 4 representa de forma simplificada as etapas de voo de um eVTOL para fins de simulação, contendo as fases de voo pairado, decolagem e pouso verticais, cruzeiro e um período de "espera" que auxilia na manutenção da bateria.

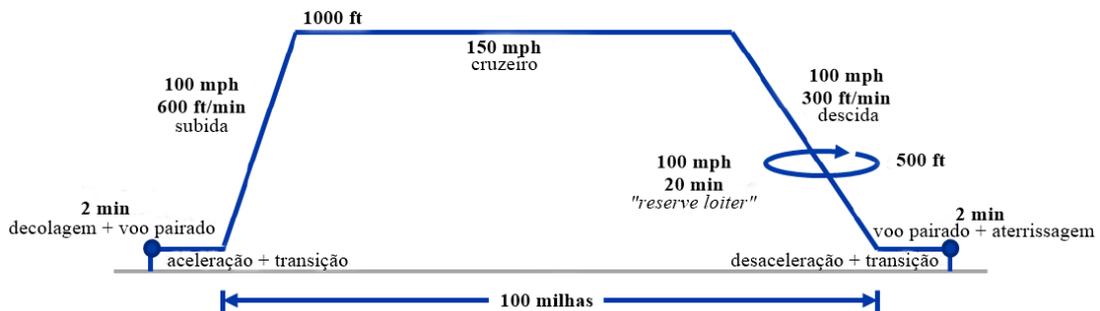


Figura 4 – Diagrama de missão. Adaptado de [Duffy et al. \(2017\)](#).

As aeronaves que desempenham decolagem e pouso verticais são aquelas que não necessitam de grandes espaços, como pistas, para iniciar suas operações, diz [Intwala e Parikh \(2015\)](#). A princípio, os testes realizados com eVTOL se mostraram falhos, sempre enfatizando a necessidade de um espaço para que qualquer aeronave conseguisse se desprender do chão, entretanto, o aperfeiçoamento dos sistemas ao longo dos anos permitiu que se concretizasse.

Motores elétricos oferecem flexibilidade no que se diz respeito à manobrabilidade fazendo o uso de propulsão elétrica distribuída, entretanto, um dos desafios é fazer com que a aeronave voe com estabilidade e precisão. Enquanto o eVTOL era tratado como um sistema de escala reduzida, utilizado, por exemplo, para vigilância ou até mesmo para a entrega de encomendas, o motor elétrico simplesmente podia ser desacoplado do rotor em termos de desempenho, cargas ou estudos de vibrações. Entretanto, quando se diz respeito a múltiplos rotores em funções como o transporte de pessoas, os efeitos entre o rotor e o motor elétrico já não podem mais ser negligenciados, reforça [Pavel \(2021\)](#).

O controle de uma aeronave multirotor pode ser alcançado levando em consideração:

- hélices de passo fixo, onde o controle de todo o sistema é alcançado por meio de variação das rpm;
- hélices de passo variável, onde as pás podem ter seu passo alterado.

Para Pavel (2021), a potência que é produzida por este motor elétrico está diretamente ligada às exigências como a velocidade em que a aeronave vai operar e o torque em cada fase da operação. As curvas geradas pelo desempenho do motor afetam o armazenamento de energia na bateria e sua distribuição, o que causa efeitos diretos no desempenho do eVTOL.

## 2.4 Custos de operação

Ainda que o eVTOL seja visto como a solução mais próxima para os problemas de mobilidade urbana tornando principalmente um transporte econômico e acessível, pouco se diz sobre sua análise de custos operacionais e quanto os usuários terão que desembolsar para o benefício de fugir dos congestionamentos, assim como a margem de lucro para as empresas que operarão na área.

Embora o sistema UAM seja possível de ser introduzido em diversos locais devido às aeronaves menores necessitarem de menos espaços nos vertiportos, podendo também ser implementado em áreas rurais ou de difícil acesso, a escolha por grandes metrópoles também diz respeito à redução de custos operacionais que, conseqüentemente, atrai mais usuários. Segundo Wang, Li e Qu (2023), isso se dá ao fato de que a UAM é voltada para distâncias consideráveis, enquanto em regiões mais remotas o trajeto mais curto poderia ser feito "porta-a-porta" com a utilização de transporte terrestre.

Os custos de operação são divididos em dois tipos: Custos Operacionais Diretos (COD) e Custos Operacionais Indiretos (COI). De modo simplificado, O COD está ligado ao voo da aeronave, o que é de real relevância para este trabalho, e o COI está associado a todo o resto dos gastos, porém, não podem ser classificados como custos fixos ou variáveis, já que ambos possuem os dois tipos. Para melhor classificar se uma operação é tida como COD ou COI basta analisar se aquele custo está ou não ligado à execução do voo, como os combustíveis e gastos energéticos das baterias (GIANSIRACUSA, 2010).

- **Custos fixos:** Custos fixos são aqueles que, independente da natureza da operação, permanecem iguais. Por exemplo, o salário pago a um piloto se manterá o mesmo independente da quantidade de horas voadas. Dentre outros exemplos de custos fixos estão: aluguel do hangar, armazenamento, escritório e alguns tipos de manutenção periódica que ocorrem periodicamente independente da aeronave ter voado ou não (RATH et al., 2010).
- **Custos variáveis:** Diferente de um custo fixo, os custos variáveis aumentam à medida em que as atividades da aeronave também aumentam, ou seja, a ausência de voo ocasiona em nenhum gasto variável. Um exemplo de custo variável é o próprio

combustível que cresce ou decresce de acordo com a quantidade de horas voadas (RATH et al., 2010).

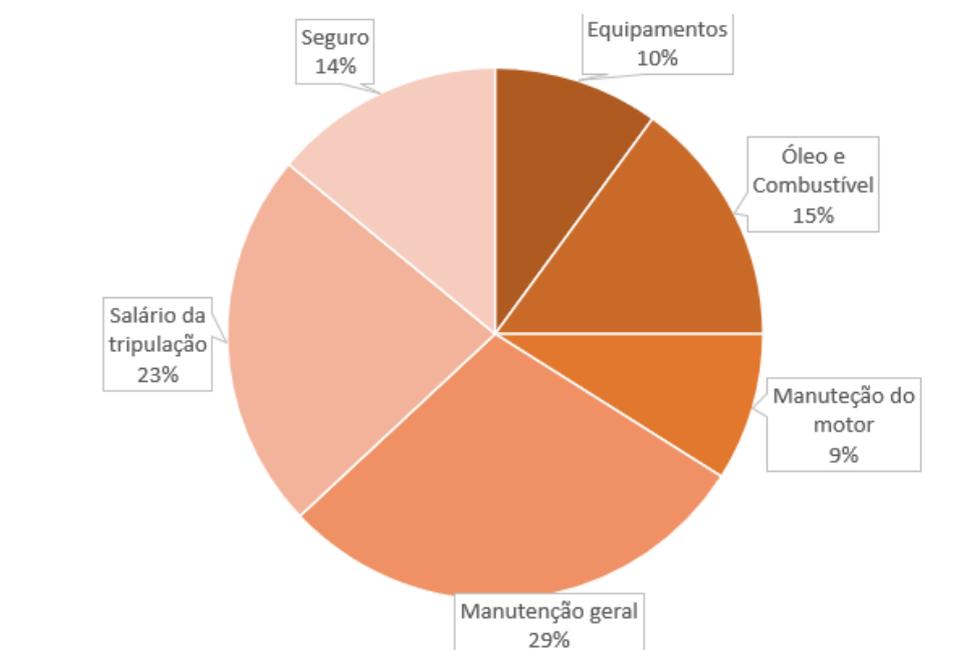


Figura 5 – Exemplo de Detalhamento dos Custos Operacionais Diretos (COD) de um Rotorcrafter Comercial. Adaptado de Decker (2009).

A figura 5 exemplifica os maiores gastos inseridos no DOC, entretanto, é possível notar a grande influência das manutenções e dos combustíveis, fato que, estará presente no desenvolver do trabalho, visto que serão os dois fatores utilizados para o cálculo médio do CASK. O salário da tripulação, por se tratar de um valor fixo, com menor margem para alterações e individual de cada empresa, não será levado em conta.

## 2.5 Custos de Operação Indiretos - COI

Os custos indiretos são aqueles que não estão necessariamente vinculados à operação da própria aeronave, mas sim àqueles que fornecem serviços operacionais. O modelo proposto por Mihara et al. (2021) para os custos dos componentes é calculado de acordo com a Equação 2.1.

$$VPCost = DevCost + QCCost + FTCost + EngCost + TCost + ManCost + MatCost \quad (2.1)$$

Onde:

- VPCost: Custo de componentes;

- DevCost: Custo total de suporte ao desenvolvimento. Envolve despesas como logística, administração, recursos humanos, salários, entre outros;
- QCCost: Custo de Controle de Qualidade. Envolve os custos com os técnicos e equipamentos para a fabricação da aeronave;
- FTCost: Custo de teste de voo. Envolve os custos do programa de testes e suas certificações;
- EngCost: Custos com a engenharia da aeronave;
- TCost: Custo com as ferramentas. Envolve os custos do projeto, manutenção dos gabaritos, moldes, entre outros;
- ManCost: Custos de fabricação. Envolve mão de obra e produção;
- MatCost: Custos de material. Envolve os custos de matérias-primas (RIBEIRO, 2022).

Para Ribeiro (2022), essas estimativas de custo são importantes porque fornecem uma boa previsão dos recursos necessários para as futuras atividades da aeronave, tornando-a competitiva no mercado.

Ainda segundo a autora, uma vez que os custos são estimados, é possível mensurar o valor de aquisição da aeronave a partir de variáveis de entrada, como velocidade máxima, peso vazio e volume de produção. No caso de eVTOL (Veículos Elétricos de Decolagem e Pouso Vertical), espera-se que os custos operacionais por assento/quilômetro reduzam em até 26% em comparação com um helicóptero.

## 2.6 Custos de Operação Diretos - COD

### 2.6.1 Asas rotativas

Devido a barreiras existentes por questões de segurança das empresas, informações sobre a modelagem dos custos de operação não são divulgadas, portanto, os modelos apresentados são de fontes de pesquisa e simulações que mais se aproximam.

Embora haja distinções de velocidade e alcance de um helicóptero e um eVTOL, faz mais sentido a comparação de custos de operação entre eles do que aeronaves de asas fixas, embora um modelo de cálculo de custos híbrido seja o mais indicado. Isso se deve ao fato de que ambos têm decolagem e pouso vertical, capacidade de realizar voo pairado, mais proximidade nos sistemas de propulsão e distribuição de pontos de parada em diversas localidades, diferentes de uma aeronave que necessita de uma pista, diz Rajendran e Pagel (2020).

A Figura 6 ilustra as principais diferenças entre um modelo de helicóptero e um eVTOL, lembrando que, se tratam de modelos simplificados, pois ambas as aeronaves possuem diversos modelos com características diferentes.

	Helicóptero	eVTOL
Esquemático da aeronave	 <p>Rotor principal Rotor de cauda</p>	 <p>Rotôres</p>
Rotor	- Um rotor principal; - Um rotor de cauda	Múltiplos rotôres pequenos
Fonte de energia para acionar o(s) rotor(es)	Motor (Engine)	Motor
Fonte de energia	- Combustível; - Baterias.	- Baterias apenas; - Combinação de baterias e gerador de turbina a gás
Alcance de cruzeiro (Varia para diferentes modelos)	Aproximadamente 600-800 km	Aproximadamente algumas dezenas de km - 300 km
Passageiros (Varia para diferentes modelos)	Até 15	Aproximadamente 5
Dimensão da área de decolagem e pouso	Maior do que o comprimento total e a largura total da aeronave em pouso (no caso de locais no nível do solo).	--

Figura 6 – Comparação entre helicóptero e eVTOL. Adaptado de Kinjo (2018).

Segundo Kinjo (2018), observando a Figura 6 é possível notar a diferença na quantidade de rotôres de cada aeronave, fator que impacta diretamente parte dos custos, pois o sistema dos helicópteros é mais complexo e, junto ao sistema de combustível quando há, torna os valores elevados, chegando a custar 60% dos custos totais de manutenção, enquanto o sistema de rotôres do eVTOL, mesmo apresentando múltiplos mecanismos, custa apenas 20% do valor total. Além do que, o helicóptero está mais suscetível às falhas humanas e, como apresenta apenas um rotor, em caso de falha, o voo se torna difícil, enquanto o eVTOL pode operar caso algum dos mecanismos venha a falhar.

Os custos de operação de ambos os sistemas podem ser divididos em manutenção e gastos com energia. A respeito dos helicópteros, diversos são os fatores que afetam seus custos operacionais, por exemplo, os ciclos voados a cada hora, o número de horas voadas, o ambiente da missão, etc (RATH et al., 2010).

Ainda segundo Rath et al. (2010), os gastos de helicópteros com combustíveis depende de dois fatores: a quantidade consumida por cada modelo e para cada viagem; o custo do combustível. A quantidade gasta depende de inúmeros fatores as quais os operadores devem estar cientes e mesmo que o fabricante forneça um valor, este é apenas uma estimativa que na prática pode ter alterações significativas. Estes fatores podem ser:

1. **Tipo de missão:** Os helicópteros estão sujeitos a diversos tipos de função, entre elas, transporte de carga, de ponto a ponto, serviços hospitalares, utilidades agrí-

colas. Tais fatores afetam diretamente o desempenho exigido do motor, a carga, as oscilações de velocidade, entre outros que afetam o aumento ou diminuição no consumo de combustível.

2. **Desempenho do motor:** Ao longo da vida útil do helicóptero, com o aumento de horas voadas e desgaste dos componentes, ele certamente se tornará menos eficiente, o que pode aumentar ainda mais o consumo de combustível.
3. **Custo do combustível:** Mesmo sendo um fator que parece ser óbvio, as alterações no valor ocasionam grandes mudanças no custo da operação. a depender da precedência do produto, sua volatilidade pode ser um fator relevante nas considerações de custos.

Para os autores, um dos fatores de custos mais significantes são os ciclos, pois a depender da missão a ser executada os ciclos podem ser tornar um fator limitante para um helicóptero. Estes ciclos podem ser expressos em fatores de carga, torque e temperatura, deste modo, expressar os custos de operação por horas de voo, como é geralmente feito em asas rotativas, pode se tornar um grave engano. Ou seja, para calcular os valores de uma operação, a expressão deve ir muito além do tempo de voo, mas também da carga, temperatura e qualquer outro fator que seja especificado pelo fabricante.

Por motivos como este, é difícil definir um modelo fechado de custos para asas rotativas, pois as missões apresentam diferentes finalidades e destinos em maior parte das vezes, o que faz com que cada empresa apresente modelos de forma personalizada, a depender da oferta de serviços de cada uma, analisa [Rath et al. \(2010\)](#).

Custos associados ao combustível podem ser considerados um dos mais importantes custos quando a análise é feita a partir da física, pois, o desempenho das aeronaves é dependente do seu consumo de energia e, a partir da física, se faz possível explicar a transferência de potência para os sistemas que compõe o helicóptero, assim como a eficiência dos componentes ([GIANSIRACUSA, 2010](#)).

Mesmo sendo complexo entender a aerodinâmica de um helicóptero que utiliza de um mesmo mecanismo para realizar todos seus movimentos, existem maneiras simples de estimar a potência requerida por ele, potência esta que está diretamente ligada ao consumo de combustível e, conseqüentemente, ao custo da operação. A capacidade de conversão de um rotor transformar potência em empuxo afeta o cálculo do COD e pode ser calculado de maneira simples pela equação 2.2.

$$DOC_{fuel} = F_f \cdot U_c \quad (2.2)$$

Onde:

- $DOC_{fuel}$ : Custo de operação associado ao combustível;
- $F_f$ : fluxo de combustível por hora;
- $U_c$ : Custo unitário do combustível.

Já para relacionar a taxa de fluxo de combustível com a potência exigida pelo motor segue a equação 2.3.

$$F_f = C \cdot \eta_{cc} \cdot P_{tt} \quad (2.3)$$

Onde:

- $C$ : Constante da densidade de energia do combustível em um ponto escolhido;
- $\eta_{cc}$ : Eficiência de conversão de combustível;
- $P_u$ : Potência total requerida

### 2.6.2 Asas fixas

As aeronaves de asas fixas possibilitam que haja certa margem de padronização no que diz respeito aos custos de operação, podendo ser exemplificado pelo cálculo do CASK. Porém, segundo Melo (2023), assim como visto no tópico de asas rotativas, o desempenho de uma aeronave em voo e, conseqüentemente seu custo, está diretamente ligado à carga transportada. O modelo varia a depender do objetivo da empresa, se ela visa aeronaves especializadas em uma rota determinada ou usará um mesmo tipo para diferentes rotas, a escolha varia a depender do que é mais lucrativo (ACKERT, 2013).

Diferente do que é esperado no eVTOL, que requer o máximo de potência tanto na decolagem quanto na aterrissagem, as aeronaves de asas fixas tem sua maior exigência apenas durante a decolagem, que é quando o empuxo é muito maior do que o voo de cruzeiro e a descida e, conseqüentemente, consome mais combustível. Entretanto, quando colocadas em operações comerciais, as aeronaves de asas fixas precisam de um pouco mais que apenas sua análise de carga e quantidade de combustível consumida, sendo necessário levar em conta também a viabilidade econômica de cada modelo para cada tipo de rota (MELO, 2023).

Segundo a ICAO (2017), para estes tipos de aeronaves, os COD são responsáveis por até 50% dos valores.

Ainda segundo Melo (2023), a forma mais difundida no custo de rotas comerciais, independente do modelo da aeronave é o CASK, que nada mais é do que dividir todas as despesas da operação por assento-quilômetro disponíveis, como mostrado na equação 2.4.

$$CASK = \frac{Q}{K} \quad (2.4)$$

Onde:

- Q: Custos direto de operação (COD);
- K: ASK.

ASK nada mais é que o número de assentos disponíveis por quilômetro. Para obtê-lo, basta realizar a multiplicação entre o número de assentos disponíveis pelas milhas percorridas. Por exemplo, se uma empresa tem 100 assentos disponíveis e percorre 100 milhas, seu ASK será de 10.000 ASK, como mostrado na equação 2.5. Este valor mensura a capacidade disponível de determinada companhia aérea, afirma o MIT (2011).

$$ASK = A.d \quad (2.5)$$

Onde A:

- AS: Assentos disponíveis; e
- d: Quilômetros percorridos.

A título de curiosidade, as companhias aéreas também mantêm sigilo acerca dos valores de custos e ASK, tendo sido desenvolvido por Pereira (2021) um modelo de ajuste de curva que agrupa informações sobre diferentes tipos de aeronaves e seus desempenhos ao longo de diferentes trajetos que pode ser analisado na Equação 2.6, porém, para o presente estudo será utilizado o método tradicional apresentado na equação 2.4.

$$CASK = e^{(a-(b.\ln(Ss))-(c.\ln(D)))} \quad (2.6)$$

Onde,

- Ss: número de assentos disponíveis;
- D: distância percorrida;
- a: 1,72891238314985;
- b: 0,35670847909125;
- c: 0,404534157.

## 2.7 Modelos comparativos

### 2.7.1 Cessna Caravan

A princípio, parecia uma má ideia substituir as já conhecidas e aprovadas aeronaves bimotor turboélice por um modelo monomotor, as questões de segurança eram bastante levadas em conta. Segundo [Horne \(2015\)](#), o projeto silencioso da Cessna, que não visava tanta elegância como seus concorrentes, trazia como ideia central a criação uma aeronave que fosse capaz que transportar mais que seis passageiros, o que era a realidade, e maior quantidade de carga, o que fez com que logo se popularizasse e provasse a estabilidade e confiabilidade de seus motores.



Figura 7 – Cessna 208 *Caravan*. Fonte: ([CESSNA, 2023](#)).

Ainda de acordo com [Horne \(2015\)](#), uma grande vantagem do Cessna é seu bom desempenho de decolagem a curtas distâncias, a subida, nestes casos, pode acontecer a até 1000 fpm que cai para 800 fpm à medida que o nariz do avião diminui sua inclinação para a posição de cruzeiro e que a velocidade aumenta e tem um valor médio de 334 km/h. Já no que se diz respeito à descida, utilizando a velocidade de planeio equivalente a 176 km/h garante uma boa razão de planeio de 1:14, mais que um *Skyhawk*, que tem razão de 1:9.

Para [Bedell \(2016\)](#), ainda que possa trafegar em altitudes mais baixas, a aeronave consome muito mais combustível do que em altitudes mais elevadas, sendo seu consumo médio em altitudes favoráveis de 50 gph e velocidade entre 296 e 314 km/h. Este fato favorece a implementação do eVTOL, que voará em altitudes onde o Cessna é mais dispendioso, realizando viagens de menor alcance, mais próximas ao solo e levando menos peso do que a aeronave que pode até mesmo acoplar mais espaço para carregamentos.

### 2.7.2 Robinson R44

O R44 foi planejado para ser um helicóptero de modelo simples, de apenas 4 assentos, e de baixo custo com relação a outras aeronaves de características similares (BWIFLY, 2016).



Figura 8 – Robinson R44. Fonte: (ROBINSON, 2023).

Por ser um dos modelos mais econômicos tanto para operar quanto para manter, fato que faz com que seja bastante utilizado em questão de mobilidade urbana, este modelo foi escolhido para ser o comparativo nesta análise.

De acordo com a fabricante, Robinson (2023), a fuselagem aerodinâmica e sua estrutura de tubos de aço permitem que a aeronave seja leve, resistente e consuma menos combustível, já que seu formato otimiza a velocidade do ar. Além disso, seu motor permite o transporte de maior carga e a velocidade da ponta do rotor de carga ser mais baixa auxilia na diminuição do ruído.

## 3 Metodologia

### 3.1 *Design Science*

O modo atual como as pesquisas vêm sendo conduzidas tem como resultados fatores que visam explicar, descrever, explorar ou prever, entretanto, este processo tem pontos de limitação que poderiam ser superados caso o conhecimento fosse construído a partir da interação entre o pesquisador e o objeto de interesse, ou seja, a ciência do projeto, a *design science*, diz [Dresch, Lacerda e al \(2015\)](#).

Em sua obra, *The Science of The Artificial*, [Simon \(1996\)](#) traz a diferença entre o que é natural do que é artificial, sendo artificial tudo aquilo que é feito ou modificado pelo homem, chamado por ele de artefato. O cumprimento de um propósito envolve uma relação de três fatores:

- Propósito ou objetivo;
- Caráter do artefato;
- Ambiente de atuação do artefato.

Ou seja, um artefato é a conexão entre o ambiente interno e externo de um sistema, são desenvolvidos de forma que interajam com algum contexto de forma a melhorá-lo, define [Wieringa \(2014\)](#).

O *design science* pode ser dividido nas seguintes etapas de produção:

1. Motivação da pesquisa;
2. Objetivos da pesquisa;
3. Métodos científicos;
4. Método de pesquisa;
5. Método de trabalho;
6. Técnicas para a obtenção e tratamento de dados;
7. Resultados.

Ainda de acordo com [Dresch, Lacerda e al \(2015\)](#), enquanto nas pesquisas tradicionais os estudiosos trazem a ideia de afirmação do que pode ser o problema, o *design*

*science* trabalham com base em sugestões, forma conhecida como método científico abduutivo. O método abduutivo nada mais é que, diante de um fato, propor hipóteses sobre sua ocorrência e, posteriormente, colocá-las à prova.

Para os autores, o uso do *design science* não impede que o pesquisador utilize outras metodologias, pelo contrário, diferentes abordagens são utilizadas a depender da fase em que o projeto se encontra ou o resultado esperado. Entretanto, em pesquisas onde os estudiosos têm margem para serem criativos e necessitam da formulação de hipóteses e raciocínio criativo, o método abduutivo certamente é o adequado.

Caso o artefato seja existente, mesmo as abordagens mais tradicionais podem ser adaptadas ao *design science*, desde que produza resultados relevantes. Ou seja, não é necessário apenas um projeto conduzido de forma rígida, rigorosa e que seja aceito pela comunidade acadêmica, mas ele também deve ser útil para que profissionais o apliquem em modelos práticos.

### 3.1.1 Design Science Research

De acordo com [Dresch, Lacerda e al \(2015\)](#), o ponto fundamental do *Design Science Research* está em sua orientação à solução de questões específicas, com isso, os resultados esperados não precisam ser necessariamente ótimos, mas sim relevantes, satisfatórios, de forma que, os resultados possam ser readaptados assim que conveniente por outros pesquisadores para outros tipos de pesquisa dentro de uma mesma classe de problematização.

O método de trabalho traz praticidade pois é formulado de forma a construir resultados por etapas, como são descritas abaixo. Define a sequência de passos lógicos que o pesquisador deve seguir para alcançar seus objetivos.

- Definir o método de trabalho traz praticidade, pois é formulado de forma a construir resultados por etapas, definindo a sequência de passos lógicos que o pesquisador deve seguir para alcançar seus objetivos.
- A obtenção de dados, ou revisão literária, consistem em um levantamento de autores, especialistas e material que venha a agregar no andamento da pesquisa. Dentro deste contexto estão a seleção das fontes de informação, palavras-chave, definição dos índices de busca, amplitude temporal, buscas nas fontes de informação, análise dos títulos, análise dos resumos e análise das publicações ([WIERINGA, 2014](#)).
- A análise dos dados auxilia a encontrar os locais com mais informações sobre o tema de interesse, além de ter a noção do quanto o assunto tem sido debatido e buscado por outros pesquisadores. A análise também auxilia na categorização dos conteúdos, fazendo com que o pesquisadores compreenda em quais etapas o material será de maior utilidade e quando deve ser inserido no trabalho ([LACERDA, 2009](#)).

- A identificação dos artefatos é a fase em que a literatura é analisada visando encontrar conteúdo já existente sobre aquele tema, com o objetivo de gerar aperfeiçoamento, observando as falhas e lacunas a serem preenchidas ou simplesmente melhoria cabíveis (RIBEIRO, 2022).

Para Lacerda (2009), visto que, o *design science reserach* visa a criatividade durante a construção das informações, existem várias formas de coletar dados, não apenas por meio de busca científica. São exemplos de fontes: entrevistas, observação direta, questionários, grupo focal, entre outros, desde que o resultado seja válido e relevante.

O presente trabalho foi dividido da forma como apresentado pela Tabela 1.

Tabela 1 – Aplicação da metodologia ao longo do estudo.

<b>Etapas</b>	<b>Ações</b>
1. Motivação da pesquisa	O desafio na implementação de um novo meio de transporte no âmbito da mobilidade aérea urbana, analisando seus pontos principais relacionados aos custos operacionais e, de forma ampla, sua viabilidade e pontos críticos com relação às demais aeronaves analisadas.
2. Objetivos da pesquisa	Analisar a necessidade das aeronaves do tipo eVTOL no cenário de mobilidade urbana atual, bem como suas limitações; compará-las de forma seletiva à aeronaves de asas fixas e rotativas; desenvolver um modelo simplificado de CASK para as três concorrentes (R44, Cessna e eVTOL) a partir de seus custos de operação mais relevantes; ao final, ser capaz de propor curvas de CASK através do alcance das aeronaves.
3. Métodos científicos	Design Science como metodologia orientadora em busca do resultado.
4. Método de pesquisa	Estruturação do trabalho, criação de tópicos relevantes para o resultado e de importância para o entendimento geral, análise de literatura e fontes relevantes de informação.

<b>Etapas</b>	<b>Ações</b>
5. Método de trabalho	Desenvolvimento de uma análise comparativa entre as três aeronaves tratadas ao longo do estudo, utilização de softwares para o tratamento dos dados. Feedbacks frequentes sobre os avanços realizados.
6. Técnicas para a obtenção e tratamento de dados	Adotar fontes de informação, como artigos científicos atualizados ou portais de confiança sobre o universo aeronáutico. A partir de então, a análise dos dados mais relevantes e utilização de ferramentas como MATLAB e Excel para o tratamento dos dados e geração dos resultados.
7. Resultados	Apresentação de valores numéricos para os custos de cada etapa, bem como de suas variáveis de custos, para que com a obtenção da relação entre as etapas em que o eVTOL se comporte como asas fixas ou rotativas seja possível propor suas curvas de CASK e analisar seus pontos de viabilidade e seus pontos críticos.

## 4 Resultados

### 4.1 Perfis de missão

Determinar um modelo de perfil de missão para o desempenho de aeronaves, ainda que simplificado, é importante, pois fornece insights fundamentais que permite a compreensão das demandas requeridas em cada etapa, seja em questões mecânicas, custo, alcance ou consumo de combustível. Cada missão possui diferentes características e exige diferentes contribuições por partes dos sistemas das aeronaves, principalmente no que diz respeito ao seu desempenho de voo. O perfil de missão também auxilia no projeto de otimização do projeto, já que é possível compreender os pontos que necessitam de ajustes ou modificações.

As três aeronaves abordadas neste estudo foram comparadas de forma análoga sendo assim possível avaliar a possibilidade de substituí-las pelo eVTOL em missões atualmente realizadas pelas demais. Com isso, foram considerados alcances aproximados, mesmo que o R44 consiga cobrir uma distância duas vezes maior, e o *Caravan*, ainda mais.

De forma a simplificar a definição dos perfis de missão das aeronaves, foram considerados os fatores principais para a análise de custos, sendo eles a Taxa de subida (Taxsub), que determina a forma como a aeronave ganha altitude, distâncias percorridas, tanto vertical (h) quanto horizontalmente (h), e a duração de cada etapa da missão, pois compreender o consumo de energia está diretamente ligado ao tempo, bem como a quantidade e tipo de manutenções as serem realizadas, como esclarece [LibertyJet \(2023\)](#). Os perfis abaixo ainda não englobam o eVTOL que será tratado logo mais à frente.

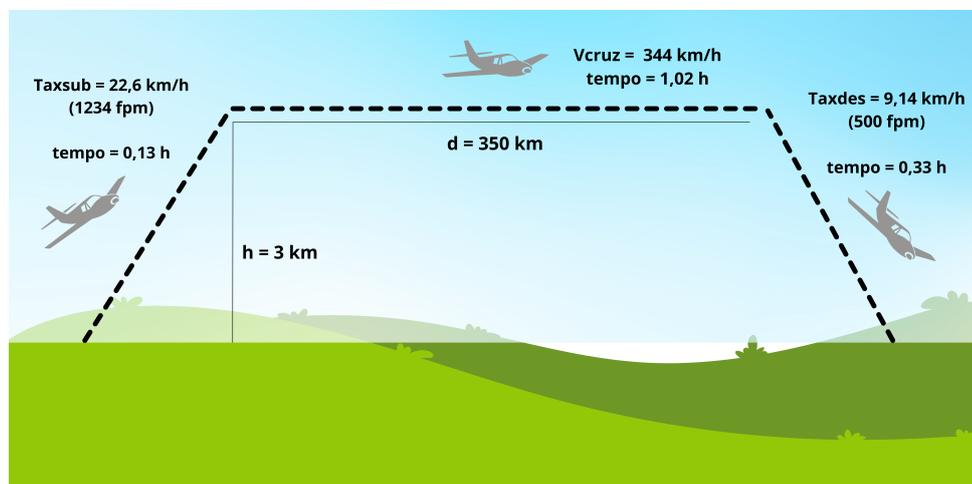


Figura 9 – Diagrama de missão do Cessna *Caravan*.

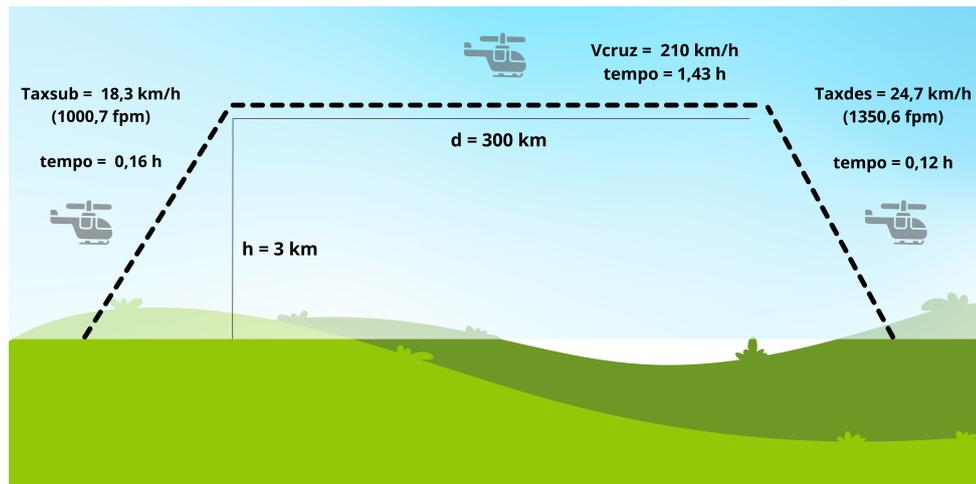


Figura 10 – Diagrama de missão do R44.

No caso das Figuras 9 e 10, os diagramas representam visualmente, de forma abrangente, o tempo de operação de cada uma das etapas, sem considerar as variações que podem ocorrer durante uma missão real, como por exemplo, efeitos da temperatura, umidade ou variações de altitude.

O tempo de duração de cada fase será posteriormente utilizado para os cálculos de consumo e, conseqüentemente, para a obtenção dos custos associados a elas, sendo possível, ao fim, alcançar uma noção mais realista da comparação entre as missões realizadas pelo eVTOL, Cessna e R44.

A título de informação, todos os valores utilizados e custos obtidos no presente trabalho são dados em dólar com o intuito de padronizar os resultados alcançados.

## 4.2 Custos por etapas para as aeronaves Cessna e R44

Ao levar em consideração os valores de consumo por hora em voo de cruzeiro já previamente definidos para as duas aeronaves em dados da Robinson (2020) e da GuardianJet (Acesso em outubro de 2023) para o R44 e para o Caravan, respectivamente, se torna uma tarefa simples definir o consumo em cada uma das etapas a levar em conta a duração em que as aeronaves percorrem os alcances definidos em suas missões. Já para as etapas de subida e descidas do Cessna (2008), as informações foram tomadas de seu manual de instruções.

No caso do R44, por se tratar de um helicóptero destinado a missões diversas, se torna mais difícil um valor médio para ambas as etapas, portanto, o consumo de cruzeiro por hora (54 L) também será levado em consideração para as fases de subida e descida, sendo este multiplicado pela duração de cada uma delas visando obter um valor aproximado.

Para o custo por litro, as informações foram obtidas através do portal da [AviationWeek \(2023\)](#), onde estão os valores médios por litro levando em consideração seus valores em dólar (\$) referente ao mês de junho de 2023 nos Estados Unidos, como pode ser visto na tabela 2, bem como seus consumos por fase.

Tabela 2 – Consumo de combustível por hora.

<b>Aeronave</b> (Combustível)	<b>L/h</b> (subida)	<b>L/h</b> (cruzeiro)	<b>L/h</b> (descida)	<b>\$/L</b>
Cessna <i>Caravan</i>				
(Jet A)	34,96	226	26,77	1,46
R44				
(AVGas)	8,64	54	6,48	1,59

Pra calcular o consumo por fase, basta checar as figuras 9 e 10, onde estão as durações de cada fase das etapas feitas pelas duas aeronaves, e calcular o produto entre o consumo por hora, encontrado na tabela 2 e o tempo correspondente, como mostra a equação 4.1.

$$C = C_h.t \quad (4.1)$$

Onde:

- C: Consumo da aeronave em determinada etapa;
- $C_h$ : Consumo por hora da aeronave;
- t: Duração da etapa em horas.

A partir do consumo obtido em cada etapa, é finalmente possível calcular o custo de cada uma delas, pois é conhecido o valor de cada litro, tabela 2. Para isto, utiliza-se a equação 4.2 para cada uma das fases.

$$Custo = C.T_{litro} \quad (4.2)$$

Onde,

- $T_{litro}$ : Custo do combustível por litro.

Os valores obtidos em cada uma das fases pelas duas aeronaves podem ser consultados na tabela 3.

Tabela 3 – Custos por cada etapa de operação.

Aeronave	Subida	Cruzeiro	Descida
Cessna <i>Caravan</i>	\$ 51,04	\$ 329,96	\$ 39,08
R44	\$ 13,74	\$ 85,86	\$ 10,30

### 4.3 Modelagem de potência do eVTOL

A partir dos valores encontrados para a potência mecânica, é possível obter uma compreensão abrangente do desempenho do eVTOL em termos de consumo em cada fase da missão. Tal abordagem se diferencia das demais aeronaves citadas, pois, leva em consideração um sistema completamente elétrico, ou seja, ao invés de litros serão considerados kWh. Para que os custos sejam obtidos da forma mais universal possível, o custo do kWh é dado em dólares considerando valores de média global, proporcionando uma métrica comparável e coerente para as fases.

Segundo uma das principais fabricantes, a [Lilium \(2021\)](#), uma das características comuns a todas as aeronaves eVTOL vem do fato de que elas precisam simular o comportamento de helicópteros com o voo pairado em uma porção de seu desempenho - fases inicial e final -, e em outros momentos se comportar como aeronaves comerciais, para otimizar a duração da porção mais duradoura do percurso, o voo de cruzeiro.

Como pode ser visualizado na Figura 11, estão graficamente representadas as fases comuns ao voo dos eVTOL, sendo elas: voo pairado (*hover*), transição, subida, cruzeiro, descida e retransição, junto às suas respectivas durações.

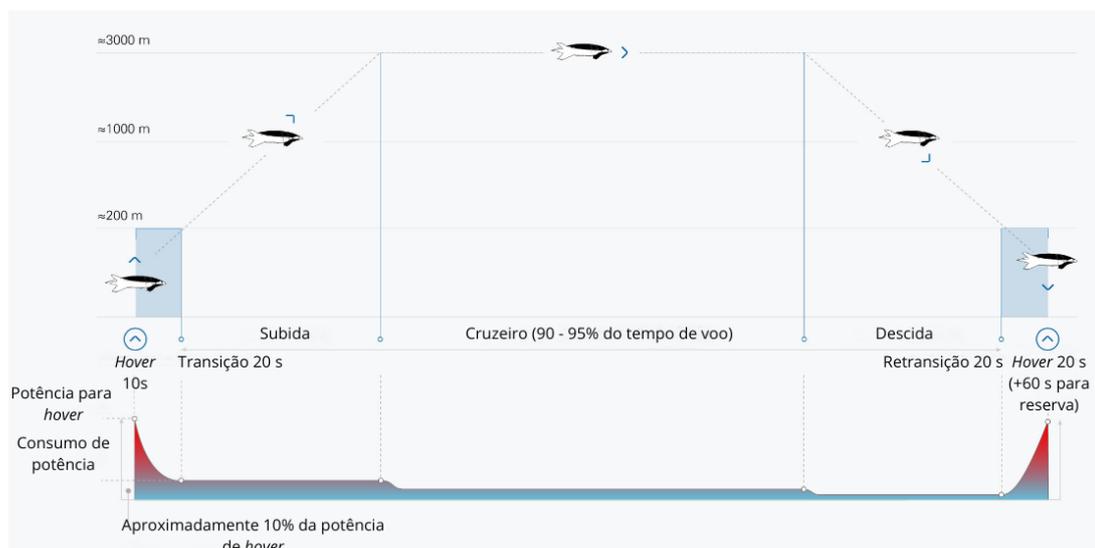


Figura 11 – Representação visual do caminho de voo do eVTOL. Fonte: ([LILIUM, 2021](#)).

Durante a decolagem e a aterrissagem, a aeronave permanece em voo pairado por um curto período, de 10 a 25 segundos durante a fase inicial e em média 20 segundos na

fase final do percurso, onde também é levado em consideração um tempo adicional de 60 segundos para reserva. Mesmo que represente uma etapa tão curta, levando menos de um minuto, o *hover* ainda assim é responsável por cerca de 5% do orçamento de energia de toda a missão, o que se deve à brevidade sua duração, já que por exigir tanta energia, não deve se estender por longos períodos.

A fase de transição é quando a aeronave acelera para a frente. Isso ocorre para que o aumento da sustentação em suas asas, que acontece à medida que a velocidade também aumenta, otimizem a eficiência do voo. As fases de transição não levam mais que 20 segundos, tanto após a decolagem quanto antes da aterrissagem. Somada às fases do *hover* e da reserva, que acontece no trecho final, é previsto que o consumo de energia deva permanecer em torno de 20% de toda a missão.

Observando a Figura 11, nota-se que as fases de subida, cruzeiro e descida são as predominantes, e tais eficiências podem ser dez vezes superior que o momento do *hover*. Isso se deve ao comportamento semelhante a grandes aeronaves comerciais, como, por exemplo, O Boeing 777 ou o Airbus A380 durante essas fases.

Ainda que o *hover* tenha um alto consumo, o que poderia inviabilizar o uso do eVTOL como uma alternativa à mobilidade urbana, a eficiência durante o cruzeiro devido ao seu comportamento de asas fixas equilibra os custos, já que representa cerca de 95% de todo o tempo de trajeto.

Em termos matemáticos, segundo um estudo feito por [Nathen et al. \(2021\)](#), que analisa cada fase do eVTOL em termos de potência a partir de dados como altitude, coeficiente de arrasto, massa total de decolagem, eficiência das baterias, dentre outros fatores que afetam o desempenho, as potências para cada uma das fases do eVTOL são calculadas de forma distintas, como pode ser visto a seguir.

Para o *hover*, tanto no início quanto no fim da operação, fase onde a potência,  $P_h$ , é constante, e pode ser calculada utilizando a eficiência global dos sistema de propulsão.

$$\eta_{0,h} = \frac{0,5 \cdot \dot{m}_h \cdot \nu_{j,h}^2}{P_h} \quad (4.3)$$

Onde:

- $\eta_{0,h}$ : eficiência total da aeronave durante o *hover*;
- $\dot{m}_h$ : fluxo de massa através do duto durante o *hover*;
- $\nu_{j,h}^2$ : velocidade de saída do bocal durante o *hover*;
- $P_h$ : Potência necessária para o *hover*.

Para todas as fases, aos resultados de potência será somada uma nova parcela,  $P_{board}$ , que nada mais é que um termo adicionado para o consumo do ar-condicionado e dos sistemas aviônicos durante o voo. Neste estudo realizado por [Nathen et al. \(2021\)](#),  $P_{board} = 8$  kW.

Ainda segundo o autor, a potência que é extraída da bateria durante as fases de transição e retransição diminuem quadraticamente com o tempo, de acordo com que a fonte geradora de sustentação da aeronave passa a não ser mais proveniente dos ventiladores, mas sim das asas. Se no início da transição a potência é igual a da fase do *hover*, no fim desta etapa, ela diminui a um fator de  $\frac{1}{10}$ . De forma simplificada, foi considerada uma média entre o momento inicial e o momento final da etapa.

$$P_{tr,méd} = \frac{(P_h + P_{tr,fin})}{2} \quad (4.4)$$

Onde:

- $P_{tr,méd}$ : Potência de transição e retransição;
- $P_{tr,fin}$ : Potência do fim da transição, ou seja, com o fator de diminuição de  $\frac{1}{10}$ .

Já para a potência de cruzeiro, é utilizada a eficiência do sistema de propulsão durante o voo de cruzeiro.

$$\eta_{0,cr} = \frac{D_{cr} \cdot \nu_{cr}}{P_{cr}} \quad (4.5)$$

Onde:

- $\eta_{0,cr}$ : eficiência total da aeronave durante o voo de cruzeiro;
- $D_{cr}$ : Arrasto total durante o voo de cruzeiro;
- $\nu_{cr}$ : Velocidade de cruzeiro;
- $P_{cr}$ : Potência de cruzeiro.

Realizadas as devidas manipulações, ([NATHEN et al., 2021](#)), a potência de cruzeiro ganha a seguinte forma:

$$P_{cr} = \frac{\sum_i D_{i,cr} \cdot \nu_{cr}}{\eta_{P,cr} \cdot \eta_{D,cr} \cdot \eta_{F,cr} \cdot \eta_{PE,cr} \cdot \eta_{M,cr} \cdot \eta_{B,cr}} \quad (4.6)$$

Onde:

- $P_{cr}$ : Potência necessária para o cruzeiro;
- $D_{i,cr}$ : Arrasto induzido no cruzeiro;
- $\nu_{cl}$ : Velocidade média de cruzeiro;
- $\eta_{P,cl}$ : Eficiência propulsiva da aeronave durante o cruzeiro;
- $\eta_{D,cl}$ : Eficiência do duto durante o cruzeiro;
- $\eta_{F,cl}$ : Eficiência do ventilador durante o cruzeiro;
- $\eta_{PE,cl}$ : Eficência da eletrônica de potência durante o cruzeiro;
- $\eta_{M,cl}$ : Eficiência do motor durante o cruzeiro;
- $\eta_{B,cl}$ : Eficiência da bateria durante o cruzeiro.

De forma análoga, na fase de subida, o cálculo de potência é similar ao voo de cruzeiro, a diferença é que nesta etapa a aeronave precisa superar tanto o arrasto quanto a influência de seu peso na direção do voo.

$$P_{cl} = \frac{(\sum_i D_{i,climb} + MTOM \cdot |g| \cdot \sin(\Phi)) \cdot \nu_{cl}}{\eta_{P,cl} \cdot \eta_{D,cl} \cdot \eta_{F,cl} \cdot \eta_{PE,cl} \cdot \eta_{M,cl} \cdot \eta_{B,cl}} \quad (4.7)$$

Onde:

- $P_{cl}$ : Potência necessária para a subida;
- $D_{i,climb}$ : Arrasto induzido na subida;
- $MTOM$ : Massa máxima de decolagem (*Maximum Take-off Mass*);
- $|g|$ : Gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);
- $\Phi$ : Ângulo de subida (5°);
- $\nu_{cl}$ : Velocidade média de subida;
- $\eta_{P,cl}$ : Eficiência propulsiva da aeronave durante a subida;
- $\eta_{D,cl}$ : Eficiência do duto durante a subida;
- $\eta_{F,cl}$ : Eficiência do ventilador durante a subida;
- $\eta_{PE,cl}$ : Eficiência da eletrônica de potência durante a subida;
- $\eta_{M,cl}$ : Eficiência do motor durante a subida;

- $\eta_{B,cl}$ : Eficiência da bateria durante a subida.

Durante a subida até a altitude de operação, 3000 m, a velocidade aumenta para alcançar a velocidade de cruzeiro, ou seja,  $P_{cl}$  varia e o peso da aeronave pode ser cerca de duas vezes maior que o arrasto, a depender do ângulo de inclinação da subida, dado esse que forma uma relação aproximada de  $P_{cl} \approx 2,25 \cdot P_{cr}$ .

Ainda na perspectiva de [Nathen et al. \(2021\)](#), na fase da descida, a componente do peso altera sua direção, fato que faz com que a exigência de potência da aeronave seja diminuída. O autor fixa a potência do motor como sendo o equivalente a 20% da potência do voo de cruzeiro, lembrando que, são valores assumidos e que este valor pode ser menor. Com isso, tem-se que:

$$P_{des} = 0,2 \cdot P_{cr} \quad (4.8)$$

Onde:

- $P_{des}$ : Potência de descida.

Os valores calculados no estudo mencionado, utilizam a altitude de cruzeiro como sendo 1500 m, entretanto, os próprios autores afirmam que tal valor foi utilizado para simplificação e melhor arredondamento dos resultados, mas que os valores para o voo a 3000 m não sofrerão mudanças grandemente significativas.

Por fim, [Nathen et al. \(2021\)](#) demonstra alcançar os resultados de potência e de tempo apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Potência e tempo necessários para cada uma das etapas.

	(kW)	(s)
<i>Hover</i> (inicial)	2570	15
Transição	1421	21,2
Subida	511	451
Cruzeiro	250	3132
Descida	52,88	451
Retransição	1421	21,2
<i>Hover</i> (final)	2570	45

Para fins de simplificação na análise de custos, as informações da tabela 4 serão reunidas de forma que: *hover* (inicial), transição e subida serão considerados todos apenas como subida, bem como, descida, retransição e *hover* (final) serão considerados também como uma única etapa, descida.

Com isso, visto que os custos do eVTOL são tomados por kWh, a Figura 12 representa um perfil de missão em função da potência exigida em cada uma das três etapas.



Figura 12 – Perfil operacional projetado com base no peso máximo de decolagem. Fonte: (NATHEN et al., 2021).

Como já mencionado, com o objetivo de os valores obtidos não fossem condicionados a apenas um local, foi tomado o valor de \$ 0,19 para o kWh, segundo o portal (Statista, 2023), que nada mais é que uma média global do custo de energia. Para graus de comparação entre todas as aeronaves, os valores são apresentados na tabela 5.

De forma análoga às demais concorrentes, onde a quantidade de combustível consumida foi multiplicada por seu custo, Equação 4.2, o custo por etapa nada mais é que o produto entre energia consumida e o valor unitário do kWh.

Tabela 5 – Custos por cada etapa de operação.

Aeronave	Subida	Cruzeiro	Descida	Total
Cessna <i>Caravan</i>	\$ 51,04	\$ 329,96	\$ 39,08	420,08
R44	\$ 13,74	\$ 85,86	\$ 10,30	109,90
eVTOL	\$ 15,80	\$ 41,33	\$ 8,95	66,18

A Figura 13 representa a proporção do custo de energia de cada etapa. Como era de se esperar, a fase de subida do eVTOL tem bastante peso dentre as três etapas, visto que, durante esta fase a aeronave está construindo sustentação para que possa iniciar o voo de cruzeiro, o que exige mais gasto de energia do que a descida, que consegue se desenvolver de forma mais controlada sem tanta exigência dos motores.

Enquanto o R44 e o Cessna mantém certo padrão no consumo de combustível, sendo o voo de cruzeiro responsável por mais de 78% do custo, o eVTOL diminui bastante este valor devido ao alto valor de potência exigida em suas fases inicial e final, sendo, como já dito anteriormente, o tempo o fator de equilíbrio, já que as fases que mais consomem energia são também as mais curtas.

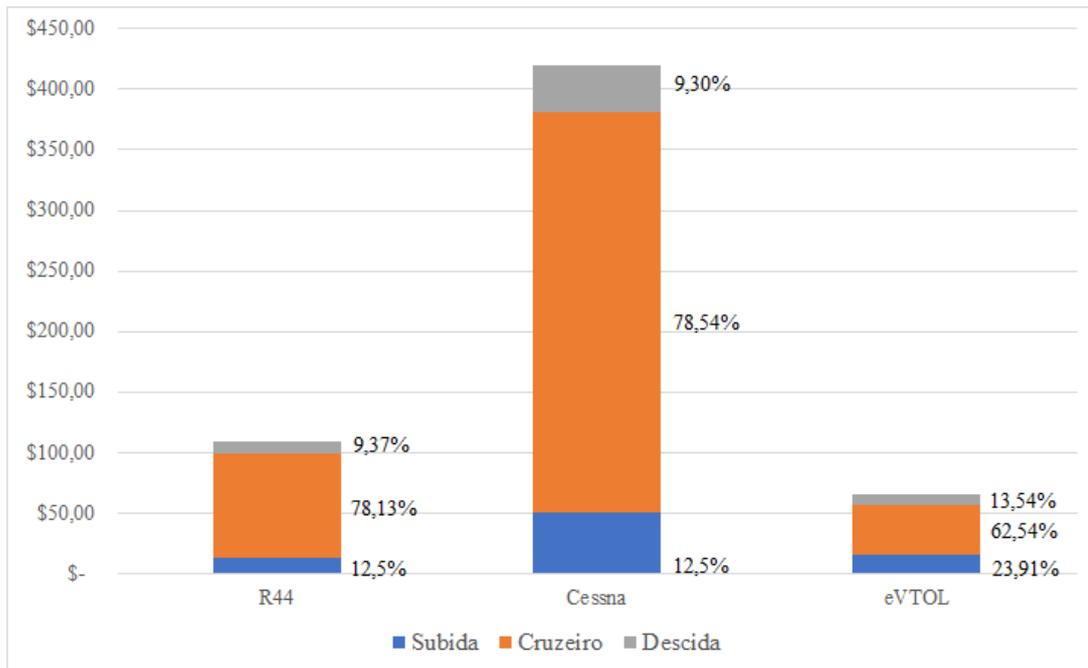


Figura 13 – Proporcional de cada etapa para as aeronaves.

Ainda que o eVTOL siga o modelo de sustentação de aeronaves de asas fixas, buscando assim otimizar custos, já que desta forma diminui a necessidade de um desempenho muito alto do motor, não significa que a aplicação de uma aeronave deste tipo seja eficiente para percorrer distâncias tão curtas como as alcançadas pelo eVTOL. Isso se dá devido aos altos custos do combustível de aviação e de seus altos consumos, a exemplo do Cessna. Ou seja, seria muito mais viável que ele percorresse distâncias maiores para que houvesse vantagem econômica, evidenciando tal vantagem dos sistemas elétricos.

#### 4.4 Custos de manutenção e reserva de *overhaul*

As manutenções de aeronaves geralmente são feitas após alguns ciclos ou horas voadas, a depender do que for mais vantajoso para a empresa, de forma que, os benefícios econômicos jamais interfiram na segurança do voo. Tais gastos de manutenção levam em conta os motores, dispositivos e sistemas em geral, podendo ser realizadas após o decorrer de determinado período, por horas voadas ou mesmo serviços isolados de determinado componente. Entretanto, para o presente trabalho, a manutenção será levada em conta de maneira mais generalista, visto que, se compara às demais aeronaves e por serem poucas as informações a este respeito sobre o eVTOL.

Como para o eVTOL os dados ainda são incertos e a manutenção é parcela tão importante, já que representa uma grande porcentagem dos gastos de uma aeronave, será realizado um cálculo híbrido, levando em consideração a etapa e o grau de semelhança seja com asas fixas ou rotativas.

Como já mencionado, as fases iniciais e finais do eVTOL são mais semelhantes ao helicóptero, porém, têm durações bastante curtas, sendo desnecessária a realização de manutenções completas a cada ciclo cumprido, já que os valores levados em conta são cálculos por hora de voo e tais etapas levam poucos segundos. Por isso, para estes trechos, que juntos levam aproximadamente 130 segundos ou 0,04 horas, como pode ser visto na Figura 11, a proporcionalidade foi realizada de acordo com a Equação 4.9.

As fases de subida, cruzeiro e descida são os momentos em que o comportamento do eVTOL se assemelha ao comportamento de uma aeronave de asas fixas. Por se tratar do trecho com a maior duração do percurso, totalizando em média 1,13 hora, o custo de manutenção e de reserva de *overhaul* foram mantido como os valores do *Caravan*.

Para este caso, os custos de *overhaul* são relacionados às horas de voo, onde as companhias estipulam um valor a partir da hora voada e acumulam para a revisão geral quando cumprido determinado tempo de operação da aeronave.

$$Man = (Man_{R44} \cdot t) + Man_{Cess} \quad (4.9)$$

O mesmo foi realizado para a reserva de *overhaul*, como mostra a equação 4.10.

$$RO = (RO_{R44} \cdot t) + RO_{Cess} \quad (4.10)$$

Onde:

- Man: Custo estimado para a manutenção do eVTOL;
- $Man_{R44}$ : Custo de manutenção do R44;
- $Man_{Cess}$ : Custo de manutenção do Cessna;
- RO: Custo estimado para a reserva de *overhaul* do eVTOL;
- $RO_{R44}$ : Custo de reserva de *overhaul* do R44;
- $RO_{Cess}$ : Custo de reserva de *overhaul* do R44;
- t: Tempo de duração do eVTOL se comportando de forma semelhante ao R44.

Tabela 6 – Custos operacionais relacionados a manutenções e reserva de *overhaul*.

Aeronave	Manutenção (por hora)	Reserva de <i>Overhaul</i> (por hora)
Cessna <i>Caravan</i>	\$ 117,00	\$ 121,00
R44	\$ 35,61	\$ 129,92
eVTOL	\$ 118,43	\$ 126,20

Entretanto, existe um fator que pode ser o maior responsável pelo aumento de custos de operação do eVTOL, a substituição das baterias. Sabe-se que o modelo utilizado por todas as aeronaves que buscam se colocar no mercado como completamente elétricas é a bateria de íon de lítio, já que atualmente se trata do dispositivo com maior densidade de energia, ou seja, capaz de realizar o maior alcance com uma única carga.

Porém, tais baterias tem valor elevado e seu custo por hora pode ser um fator desanimador na implementação do eVTOL como alternativa acessível para a UAM.

Porém, segundo o portal [SRD \(2023\)](#), os custos de baterias do tipo têm diminuído consideravelmente. Embora a densidade da bateria ainda seja uma limitação e precise de melhorias, os problemas relacionados a custos aparentam estar no caminho de tornar veículos elétricos mais econômicos. Ainda segundo a fonte, para o ano de 2023, o valor para o kWh de uma bateria do tipo custa em média \$ 152,00. Para uma média dos eVTOL produzidos atualmente, tem-se uma média de baterias capazes de armazenar até 3500 kWh e ter um vida útil de em média cinco anos.

Levando em consideração tais valores, uma relação de preço médio da valor de substituição de bateria para um eVTOL pode ser encontrada na equação [4.11](#).

$$T_{bateria} = R \cdot T_{kWh} \quad (4.11)$$

Onde:

- R: Capacidade total da bateria em kWh;
- $T_{bateria}$ : Custo da substituição das baterias;
- $T_{kWh}$ : Custo do kWh em baterias de íon de lítio.

Onde:

- Z: Capacidade da bateria em kWh;
- J: Valor do kWh.

Com isso, chega-se ao valor de US\$ 532 000,00 para a substituição total das baterias.

Uma vez encontrado o valor de custo da bateria, basta dividi-lo pela vida útil do dispositivo, que para fins de simplificação e, por estar em coerência com a duração média apresentada pelas baterias atuais, o tempo será de 5 anos. Com isso, será obtido o valor anual, como pode ser visto na Equação [4.12](#).

$$T_{\text{anual}} = \frac{T_{\text{bateria}}}{Vu} \quad (4.12)$$

Onde:

- $T_{\text{anual}}$ : Custo da substituição de bateria por ano de uso;
- $Vu$ : Tempo médio de vida útil da bateria.

Chegando, assim, ao valor de US\$ 106 000,00 ao ano.

A partir destes dados, para encontrar o custo por hora que a substituição de baterias irá causar sobre o custo operacional, é necessário ter em mente quantas horas serão operadas pelo eVTOL.

Sabe-se que para o uso privativo, aviões de pequeno porte e helicópteros costumam realizar cerca de 400 horas de voo por ano, porém, é de se esperar que um eVTOL em plena operação venha a realizar muito mais. A nível de comparação, operações da Azul Conecta, que utilizam o Cessna *Caravan* para suas operações de curto alcance, realizam aproximadamente 3000 horas de voo por ano (VEROTTI, 2022).

Como pode ser notado na figura 14, quanto mais horas voadas, mais o custo das baterias é reduzido. Isso acontece, pois os custos são melhor distribuídos em viagens, ou seja, para que o eVTOL realmente tenha um custo viável, é necessário que realize um número significativo de operações, não apenas pelo valor do custo operacional, mas também pelo fato de que a inatividade da bateria também contribui para a diminuição da sua vida útil.

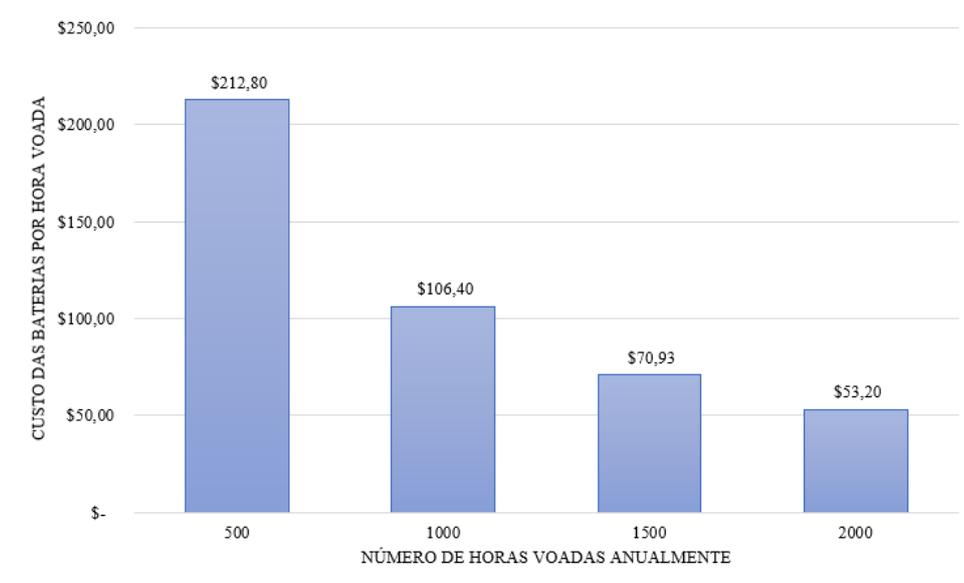


Figura 14 – Custos por hora devido à substituição de baterias a partir das horas voadas anualmente.

Considerando que, o eVTOL realize em média 2000 horas de voo anuais, o que daria pouco mais de cinco horas e meia por dia, os gastos com a substituição de baterias teria uma margem aceitável e não inflacionaria o custo final de cada viagem.

Como pode ser observado nas figuras 15 e 16, é bastante significativa a mudança no cenário de custos com o aumento das horas voadas. Caso o eVTOL opere quantidade de horas semelhante aos meios de UAM já existentes, aproximadamente 500 h, como para a prestação de serviços privados, não seria um meio viável de transporte e, ainda que a quantidade de horas voadas seja quase tão grande quanto operações como a Azul Conecta, ainda será necessária a otimização dos custos e melhorias dos dispositivos energéticos com certa urgência, para que o eVTOL se coloque em grau de comparação com suas concorrentes.

Para o melhor cenário, onde 2000 horas por ano são voadas, 16, o custo de bateria afetaria cerca de 15% do custo total de operação a considerar apenas estes fatores de manutenção, reserva de overhaul, energia e substituição de bateria, que são tratados neste trabalho como 80% do custo total. Entretanto, este valor sobe para mais de 40%, figura 15, quando as operações se assemelham aos helicópteros, por exemplo, o que o tiraria por completo da disputa por economicidade.

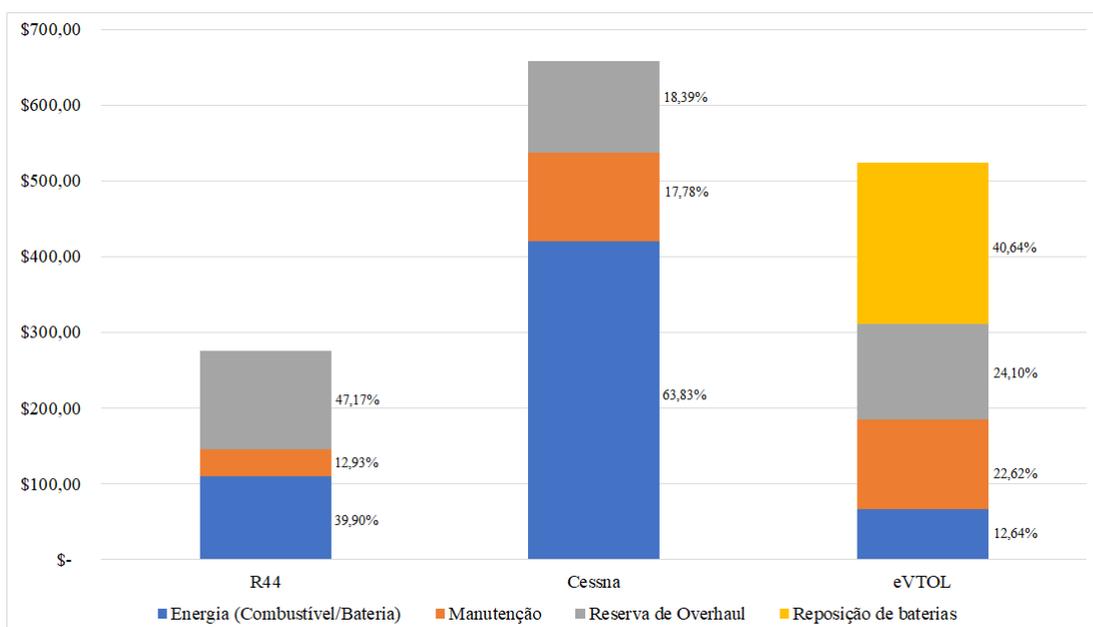


Figura 15 – Proporção de custos para 500 horas de voo

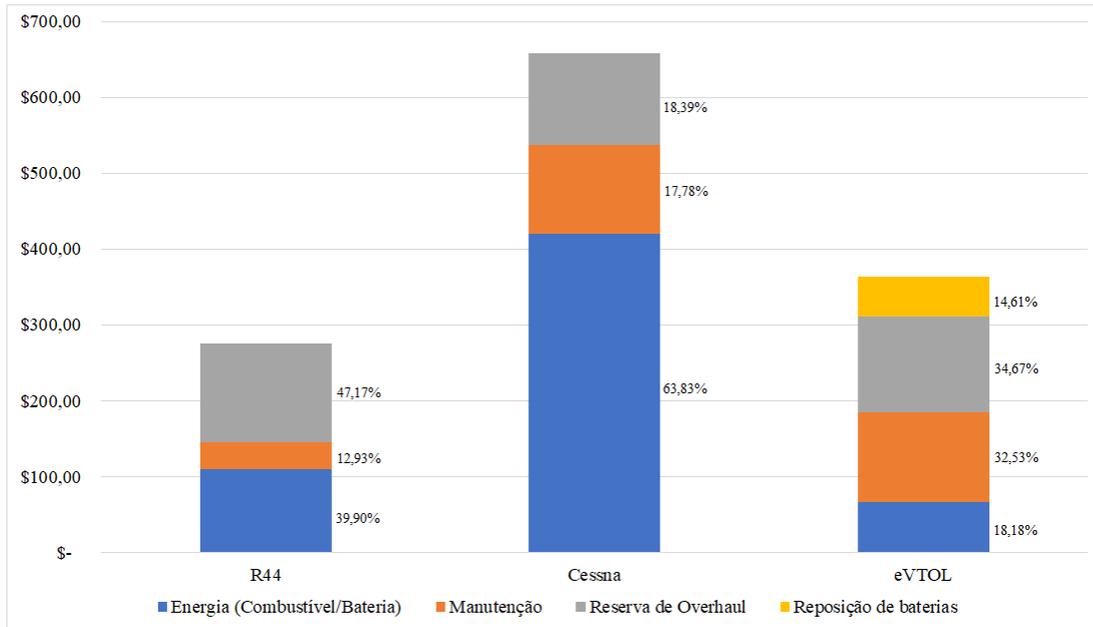


Figura 16 – Proporção de custos para 2000 horas de voo

## 4.5 Cálculo do CASK

O CASK representa o custo por assento disponível por quilômetro e pode ser obtido pela equação 2.4. Embora este modelo seja mais utilizado para aeronaves de asas fixas em vista da complexidade de se traçar um modelo padrão para as asas rotativas, todas as aeronaves serão analisadas de forma análoga seguindo o mesmo cálculo de CASK para uma aproximação de seu custo e comparação justa.

### 4.5.1 Cessna *Caravan* e R44

Visto que, os custos de bateria não sejam tão significantes para os dois modelos de aeronave, já que utilizam combustível para o voo, seus custos operacionais diretos serão calculados separadamente de acordo com os dados da tabela 5.

Para o Cessna, o COD será dado pela equação 4.13.

$$COD_{cess} = Custo_{tot,cess} + Man_{cess} + RO_{cess} \quad (4.13)$$

Enquanto que, para o R44 o cálculo é dado de forma análoga.

$$COD_{R44} = Custo_{tot,r44} + Man_{R44} + RO_{R44} \quad (4.14)$$

Onde:

- $Custo_{tot,cess}$ : Soma dos custos das etapas do Cessna dados pela tabela 5;

- $Custo_{tot,R44}$ : Soma dos custos das etapas do R44 dados pela tabela 5;
- $Man_{cess}$ : custo de manutenção do Cessna;
- $RO_{cess}$ : Custo de reserva de *overhaul* do Cessna;
- $Man_{R44}$ : Custo de manutenção do R44;
- $RO_{R44}$ : Custo de reserva de *overhaul* do R44.

Tabela 7 – COD para o Cessna e para o R44

Aeronave	COD	Distância (km)	Assentos
Cessna <i>Caravan</i>	\$ 658,08	300	9
R44	\$ 275,43	300	3

Como pode ser visto na Equação de CASK 4.15 e 2.4, para distâncias próximas a 300 km, a viabilidade econômica do Cessna é bastante superior ao R44, fator que se deve principalmente aos custos de reserva de *overhaul* das asas rotativas serem superiores às asas fixas, já que as operações tendem a ser mais distintas e em condições que dependem de cada missão, além de o design dos motores dos helicópteros serem mais complexos.

$$CASK_{Cessna} = \$ 0,24 \quad (4.15)$$

$$CASK_{R44} = \$ 0,31 \quad (4.16)$$

#### 4.5.2 Aeronave do tipo eVTOL

Durante este estudo, algumas aproximações foram realizadas para propor um cálculo de CASK que pudesse se aproximar de valores reais, inclusive considerando etapas híbridas, como foi o caso da manutenção e, de certa forma, a reserva de *overhaul* que precisou ter o custo de reposição de baterias incluso, fato este que faz com que este resultado apresente quatro cenários, desde o mais pessimista até o ponto onde o eVTOL realize cerca de 2000 horas de voo.

Para o eVTOL foi considerado o alcance máximo a partir da capacidade energética, além de uma média de 6 assentos disponíveis.

A representação do COD do eVTOL, assim como de seus concorrentes, é dada pela soma de seus fatores, como mostra a equação 4.17.

$$COD_{eVTOL} = Custo_{etapas} + Man_{eVTOL} + RO_{eVTOL} + S \quad (4.17)$$

Onde:

- S: Custo de substituição de baterias.

Portanto, o COD total do eVTOL é dado pela equação 4.18.

$$COD_{eVTOL} = Custo_{etapas} + ((Man_{R44} \cdot t) + Man_{Cess}) + ((RO_{R44} \cdot t) + RO_{Cess}) + S \quad (4.18)$$

Tabela 8 – COD para o eVTOL com base em 500, 1000, 1500 e 2000 horas voadas anualmente.

Aeronave	$COD_{500}$	$COD_{1000}$	$COD_{1500}$	$COD_{2000}$	Distância (km)	Assentos
eVTOL	\$ 523,61	\$ 417,21	\$ 381,74	\$ 364,01	250	6

A partir dos valores obtidos, o custo aproximado do CASK para cada COD levando e consideração as horas de voo seria como demonstrado na Equação 2.4.

$$CASK_{500h} = \$ 0,35 \quad (4.19)$$

$$CASK_{1000h} = \$ 0,28 \quad (4.20)$$

$$CASK_{1500h} = \$ 0,25 \quad (4.21)$$

$$CASK_{2000h} = \$ 0,24 \quad (4.22)$$

Observando os resultados, nota-se o quão impactante é o valor da substituição das baterias nos custos operacionais do eVTOL, sendo seu principal limitante em questões de economia. Ainda que seu custo a partir do consumo energético seja vantajoso com relação às aeronaves que utilizam combustível, a reposição dos dispositivos de energia acabam por diminuir tal benefício. Além do que, a distância percorrida, devido à limitação das baterias, o oferece um alcance inferior com relação ao Cessna e ao R44, fato que se torna ainda mais crítico caso a aeronave precise realizar mais de um ciclo de operação com uma só recarga, pois a quantidade de subidas e descidas são aumentadas.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 trazem as curvas de CASK com uma aproximação nos primeiros cinquenta quilômetros de alcance, pois se trata da parcela onde a diferença realmente é notada. A partir de então, a variação de custos pouco se altera de uma aeronave para a outra seguindo um padrão muito semelhante até o quilômetro final. As quatro curvas foram traçadas para apresentar a diferença de custos a partir das horas voadas pelo eVTOL.

No primeiro cenário, 500 horas de voo, nota-se uma relativa vantagem do eVTOL em relação ao R44, porém, essa distância diminui com o passar do tempo. Nota-se que durante o início da operação o Cessna se mostra mais econômico, isso devido a esta ser a fase mais custosa para as aeronaves de decolagem vertical devido ao grande esforço de seus motores.

Para o segundo caso, o eVTOL finalmente se mostra o mais vantajoso entre os três, entretanto, ainda não o suficiente para ser colocado como o melhor entre eles, já que sua distância do Cessna é bastante pequena e seu alcance total menor que as aeronaves consideradas.

Os dois últimos casos são os que definitivamente comprovam a necessidade de o eVTOL voar uma quantidade de horas consideráveis para se colocar na disputa com seus concorrentes, neste estudo, o valor seria de pelo menos 2000 horas mensais. Tendo o alcance bastante menor, o eVTOL apenas se mostra realmente efetivo se for utilizado em, pelo menos, cinco horas e meia de operações diárias e se coloca não indicado para voos privados, como é o caso das demais aeronaves na maioria de suas operações atualmente.

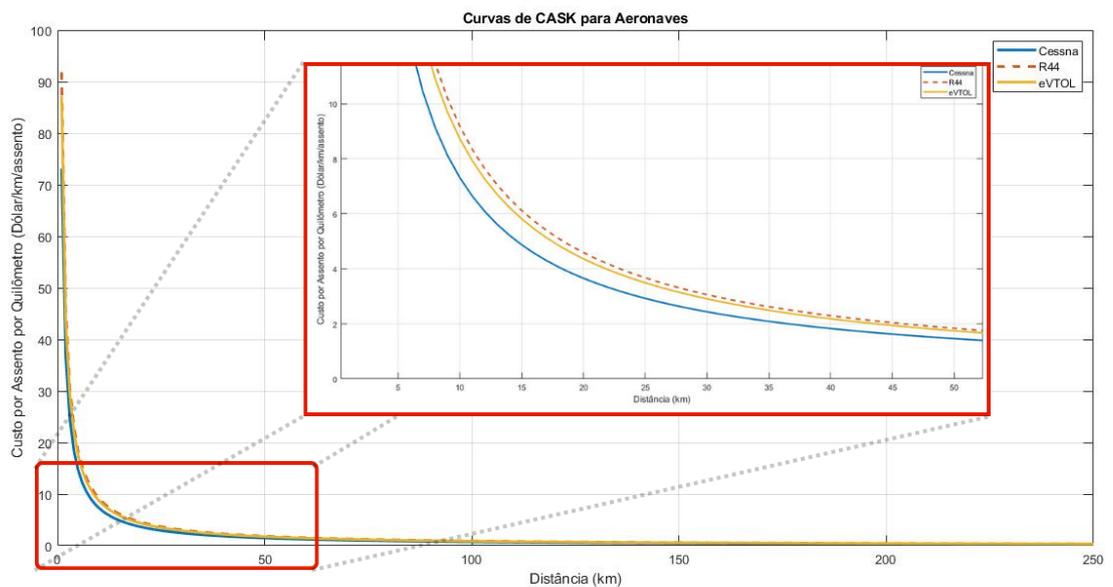


Figura 17 – Curvas de CASK para eVTOL COD 500 h.

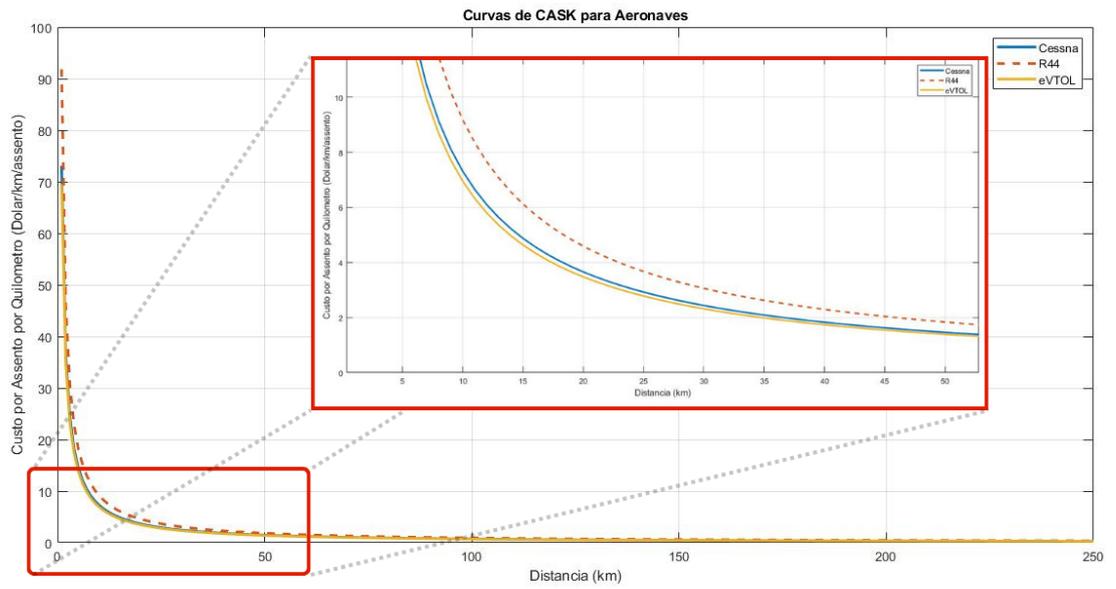


Figura 18 – Curvas de CASK para eVTOL COD 1000 h.

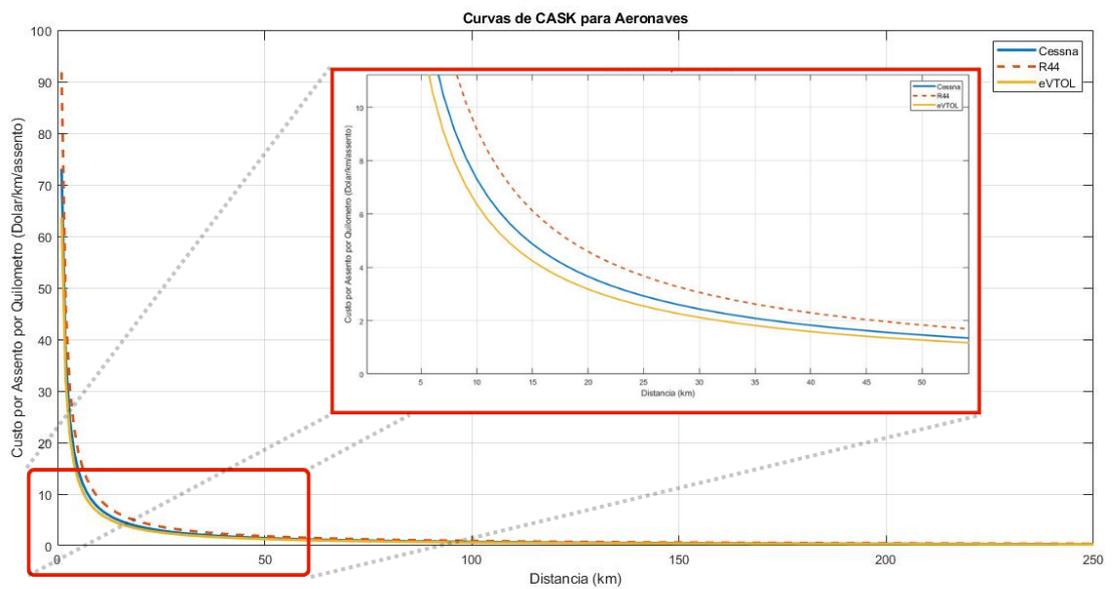


Figura 19 – Curvas de CASK para eVTOL COD 1500 h.

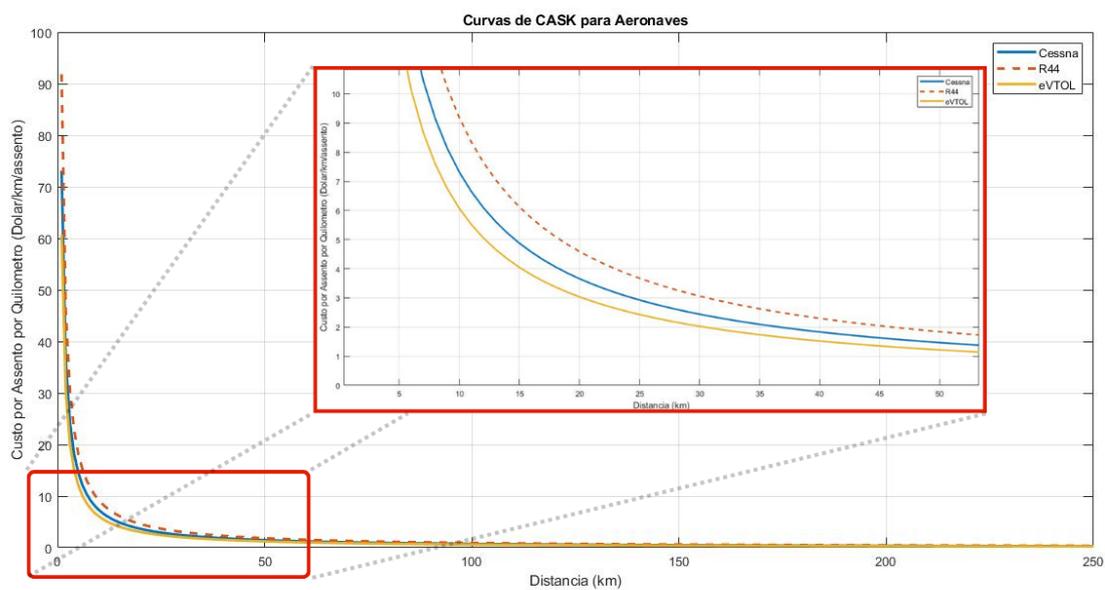


Figura 20 – Curvas de CASK para eVTOL COD 2000 h.

## 5 Considerações finais

O trabalho teve como objetivo geral traçar um modelo de custos para o eVTOL de forma que demonstrasse sua viabilidade para atuar dentro do que é esperado no sistema UAM em comparação aos custos de outros modelos de aeronaves, o que foi realizado a partir de pesquisas de diversos modelos até que fossem encontrados os que mais se aproximassem das características físicas e de desempenho do eVTOL, chegando ao Robinson R44 e ao Cessna *Caravan*. A partir de então foram encontradas as informações para as análises comparativas entre modelos de asas fixas e rotativas.

O primeiro objetivo específico consistia em analisar a necessidade de integrar as aeronaves eVTOL no contexto atual de mobilidade urbana, entendendo e discutindo suas propostas e limitações. Para isso, foram realizadas pesquisas acerca da situação atual do tráfego nas grandes cidades e a necessidade de um transporte de baixa ou nenhuma emissão de gases poluentes, seguro e de custo acessível para substituir os atuais helicópteros e aviões de atuação regional.

Já para o segundo objetivo específico era esperada a realização de uma comparação seletiva entre aeronaves concorrentes de asas fixas e rotativas, o que foi realizado a partir de pesquisas de desempenho de cada uma das aeronaves obtendo valores de velocidade, altitude, alcance, etc. Nota-se que, ainda que os custos sejam mais elevados para o Cessna, a quantidade de passageiros transportada e alcance da aeronave faz com que seu valor de CASK seja inferior ao eVTOL, se poucas horas voadas por ele, e em todos os cenários superior ao R44, o que se justifica pelos altos custos dos helicópteros com relação às reservas de *overhaul*, fator que faz com que as fabricantes de eVTOL tentem ao máximo aproximar o desempenho de cruzeiro às asas fixas, uma vez que exigem menos de seus motores e sistemas em geral.

O terceiro objetivo específico consistia em desenvolver um modelo simplificado de CASK para os eVTOL comparado ao CASK de asas fixas e rotativas, levando em consideração fatores como manutenções, reservas de *overhaul*, custos de energia (bateria/combustível) e, apenas para o eVTOL, substituição periódica de baterias por se tratar de um veículo elétrico. Foi mostrado que, este fator adicional de substituição de baterias se torna um ponto sensível com relação à implementação de aeronaves do tipo, já que elevam o custo de forma a depender completamente de um elevado número de horas voadas para compensar o alto valor. Porém, assim como a utilização em excesso das baterias, bem como a pouca utilização, são fatores que diminuem sua vida útil, tornando-as um ponto delicado, já que as empresas precisam operar com equilíbrio.

O último objetivo específico foi propor curvas de CASK comparativas entre as três

---

aeronaves de forma a entender seu comportamento ao longo do alcance, o que foi feito para quatro cenários diferentes, já que, no decorrer do estudo, a substituição de baterias se mostrou um ponto delicado. Com as curvas definidas, foi visto que, para que um eVTOL seja realmente viável, é importante que operem ao menos 2000 horas por ano, o que levaria a aproximadamente cinco horas e meia diárias, o que pode ser uma questão complicada, principalmente no início das operações, visto que, a ideia do eVTOL precisa agradar aos usuários e, assim, aumentar a demanda de passageiros interessados.

O maior desafio do projeto foi lidar com as limitações de informações disponíveis para as aeronaves do tipo eVTOL, já que são conceitos novos e que ainda não estão de fato em operação, além, da contradição entre fontes que apresentam formulações distintas para cálculos de potência, alcance e altitude de operação, por exemplo.

Diante da escassez de dados, algumas manipulações foram necessárias, como ocorreu, por exemplo, nos custos de manutenção e reserva de *overhaul*, onde um híbrido entre o R44 e o Cessna se fez necessário levando em consideração o tempo total de voo do Lillium Jet. Levando em consideração tais fatores, foi possível entender os pontos críticos do eVTOL para cenários gerais e compreender em quais posições ele se coloca em maior viabilidade se tratando de UAM.

Para estudos futuros, é de suma importância compreender as necessidades de potência do eVTOL, já que se trata de uma aeronave que deseja se colocar como completamente elétrica, e o desenvolvimento de uma tecnologia de baterias mais vantajosa e menos custosa, de forma que, aumente sua densidade e ofereça maior alcance sem necessariamente elevar suas dimensões ou massa, evitando ocupar espaço útil na aeronave, ou seja, é de muita utilidade os estudos que visem otimizar o desempenho das baterias. Dentre as outras áreas que devem ser aprimoradas sobre a aeronave estão: estrutura e design, de forma a otimizar as etapas e contribuir para menor consumo, fontes de energia que possam ser mais eficientes e menos custosas levando em conta os impactos ambientais, avaliação dos riscos envolvendo os eVTOLs, já que um dos primeiros passos da operação é obter a confiança dos passageiros, infraestrutura das localidades que receberão as operações, além de todos os aspectos ambientais envolvidos.

# Referências

- ACKERT, S. Aircraft payload-range analysis for financiers. *Aircraft Monitor*, 2013. Citado na página 37.
- AMPRIUS. Guide to electric vertical take-off and landing (evtol) aircraft. <https://amprius.com/evtol/>, 2023. Citado na página 30.
- ANDRADE, R. d. O. A chegada dos carros voadores. *Engenharia Aeronáutica*, 2019. Citado na página 18.
- AVIATIONWEEK. U.s. jet-a fuel prices decline in june 2023, research shows. 2023. Citado na página 47.
- BAURANOV, A.; RAKAS, J. Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches. *ELSEVIER*, 2021. Citado na página 24.
- BEDELL, P. A. Quick look: Cessna 208 caravan. *AOPA*, 2016. Citado na página 39.
- BWIFLY. Robinson r44 helicopter. *BWIFLY*, 2016. Citado na página 40.
- CAA, C. A. A. o. N. Z. Helicopter performance. 2020. Citado na página 29.
- CESSNA. Information manual grand caravan. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://caravannation.com/208BG1000POH.pdf, 2008. Citado na página 46.
- CESSNA. Cessna caravan. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 39.
- CIZRELIOGULLARI, M. N.; BARUT, P.; IMANOV, T. Future air transportation ramification: Urban air mobility (uam) concept. *The Boeing Company. AIAA.*, 2022. Citado na página 23.
- DECKER, A. I. Conklin & de. Sample breakdown of commercial rotorcraft doc. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 33.
- DOO, J. T. et al. Nasa electric vertical takeoff and landing (evtol) aircraft technology for public services – a white paper. *NASA*, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; AL et. Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. *Editora Bookman*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- DUFFY, M. J. et al. A study in reducing the cost of vertical flight with electric propulsion. *The Boeing Company. AIAA.*, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 9, 18 e 31.
- EVE. Concept of operations for sustainable urban air mobility in rio de janeiro. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- EVE AIR MOBILITY. Eve air mobility collaborates with flexjet to advance urban air mobility through innovative software simulation. <https://eveairmobility.com/eve-air-mobility-collaborates-with-flexjet-to-advance-urban-air-mobility-through-innovative-software-simulation/>, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 19.

- FAA. *ENGINEERING BRIEF 105 - Vertiport Design*. 2022. Disponível em: <[https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering\\_briefs/engineering\\_brief\\_105\\_vertiport\\_design](https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/engineering_brief_105_vertiport_design)>. Citado na página 25.
- FREDERICKS, W. J. et al. Benefits of hybrid-electric propulsion to achieve 4x increase in cruise efficiency for a vtol aircraft. *AIAA Aviation*, 2013. Citado na página 19.
- GIANSIRACUSA, M. P. Preliminary design capability enhancement via development of rotorcraft operating economics model. *MIT*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.
- GONÇALVES, G. P. Performance de decolagem e pouso na aviação de pequeno porte: Como a falta da análise da performance afeta segurança de voo. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- GUARDIANJET. Caravan 208B. <https://www.guardianjet.com/jet-aircraft-online-tools/aircraft-brochure.cfm?m=Cessna/Textron-Caravan-208B-64>, Acesso em outubro de 2023. Citado na página 46.
- HOLDEN, J.; GOEL, N. Uber elevate: Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. 2016. Citado na página 19.
- HORNE, T. A. Cessna's caravan has staying power. *AOPA*, 2015. Citado na página 39.
- ICAO. Airline operating costs and productivity. 2017. Citado na página 37.
- INTWALA, A.; PARIKH, Y. A review on vertical take off and landing (vtol) vehicles. *IJIRAE*, 2015. Citado na página 31.
- JEON, N. L. Aerodynamic performance and the future of electric vertical takeoff and landing (evtol) technology. 2022. Citado na página 30.
- KIM, H.; LIM, D.; YEE, K. Flight performance with respect to rotor rotation directions of multicopter aircraft. *ARC*, 2023. Citado na página 30.
- KINJO, H. Development trends and prospects for evtol: A new mode of air mobility. *Mitsui Co. Global Strategic Studies Institute*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 35.
- LACERDA, P. D. A gestão estratégica em universidades privadas confessionais: Compreendendo se e como as intenções transformam-se em ações estratégicas. *UFRJ*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- LIBERTYJET. 208B grand caravan operating costs. 2023. Disponível em: <[https://www.libertyjet.com/blog\\_details/Cessna%20208%20Caravan#:~:text=This%20engine%20is%20fuel%20efficient,climbing%20up%20to%2025%2C000%20feet.Acessoemoutubrode2023](https://www.libertyjet.com/blog_details/Cessna%20208%20Caravan#:~:text=This%20engine%20is%20fuel%20efficient,climbing%20up%20to%2025%2C000%20feet.Acessoemoutubrode2023)>. Citado na página 45.
- LILIUM. Technology behind the lilium jet. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 48.
- MELO, D. S. d. Estudo da viabilidade técnica e econômica de aeronaves do tipo narrowbody para missões de longo alcance. *UnB*, 2023. Citado na página 37.
- MIHARA, Y. et al. Cost analysis of evtol configuration design for an air ambulance system in japan. 2021. Citado na página 33.
- MIT. Airline data project - glossary. 2011. Citado na página 38.

- MITICI, M. et al. Prognostics for lithium-ion batteries for electric vertical take-off and landing aircraft using data-driven machine learning. *ELSEVIER*, 2023. Citado na página 31.
- MOORE, M. D.; FREDERICKS, B. Misconceptions of electric propulsion aircraft and their emergent aviation markets. *AIAA SciTech*, 2014. Citado na página 18.
- NASA. Uam vision concept of operations (conops) uam maturity level (uml) 4. 2020. Citado na página 26.
- NASA. Pem fuel cell model for conceptual design of hydrogen evtol aircraft. 2021. Citado na página 27.
- NASA. *UAM overview*. 2022. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/uam-overview/>>. Citado na página 23.
- NATHEN, D. 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*, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 9, 49, 50, 52 e 53.
- PAVEL, M. D. Understanding the control characteristics of electric vertical take-off and landing (evtol) aircraft for urban air mobility. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 19, 31 e 32.
- PEREIRA, G. H. d. S. Estudo de metodologia de otimização para o problema de alocação de frota na aviação regional. *UnB*, 2021. Citado na página 38.
- RAJENDRAN, S.; PAGEL, E. Recommendations for emerging air taxi network operations based on online review analysis of helicopter services. *Heliyon*, 2020. Citado na página 34.
- RATH, D. et al. Guide for the presentation of helicopter operating cost estimates. *Helicopter Association International*, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 35 e 36.
- RIBEIRO, B. L. J. Abordagem técnico-econômica na otimização multidisciplinar de aeronaves do tipo evtol. *UnB*, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 11, 34 e 43.
- ROBINSON. R44 raven ii r44 clipper ii. estimated operating costs. 2020. Citado na página 46.
- ROBINSON. R44raven ii clipper ii. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 40.
- ROTHFELD, R. et al. Urban air mobility. *ELSEVIER*, 2020. Citado na página 18.
- SIMON, H. A. The sciences of the artificial. *MIT Press*, 1996. Citado na página 41.
- SONG, K. Optimal vertiport airspace and approach control strategy for urban air mobility (uam). Dezembro, 2022. Citado na página 26.
- SRD. Lithium-ion battery price worldwide from 2013 to 2022, with a forecast for 2023. *Statista Research Department*, <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>, 2023. Citado na página 56.

- Statista. Electricity prices worldwide - statistics facts. <https://www.statista.com/topics/10726/global-electricity-prices/topicOverview>, 2023. Citado na página 53.
- TEODOROVIC, D.; JANIC, M. Transportation engineering. theory, practice and modeling. p. 719–858, 2017. Citado na página 23.
- UGWUEZE, O. et al. Trends in evtol aircraft development: The concepts, enablers and challenges. *ELSEVIER*, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 9, 27 e 28.
- VELAZ-ACERA, N.; ALVAREZ-GARCIA, J.; BORGE-DIEZ, D. Economic and emission reduction benefits of the implementation of evtol aircraft with bi-directional flow as storage systems in islands and case study for canary islands. *ELSEVIER*, 2023. Citado na página 27.
- VEROTTI, A. Azul investe na conexão. *IstoÉ Dinheiro*, <https://istoedinheiro.com.br/azul-investe-na-conexao/>, 2022. Citado na página 57.
- WANG, K.; LI, A.; QU, X. Urban aerial mobility: Network structure, transportation benefits, and sino-us comparison. *School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, China*, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 32.
- WANG, L. et al. A review of urban air mobility-enabled intelligent transportation systems: Mechanisms, applications and challenges. 2023. Citado na página 24.
- WIERINGA, R. J. Design science methodology. *Springer*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Código para a geração de curvas de CASK

## A.1 Código de 500 horas de voo anual para o eVTOL

Listing A.1 – Seu código MATLAB

```

% Parametros
COD_Cessna = 658.08;
COD_R44 = 275.43;
COD_eVTOL = 523.61; % Para 500 h de voo anuais

alcance_Cessna = 300; % km
alcance_R44 = 300; % km
alcance_eVTOL = 250; % km

assentos_Cessna = 9; % assentos disponiveis
assentos_R44 = 3; % assentos disponiveis
assentos_eVTOL = 6; % assentos disponiveis

distancias = 0:1:250; % alcance a ser considerado alcance do evtol

% Calculo de CASK
CASK_Cessna = COD_Cessna ./ (assentos_Cessna * distancias);
CASK_R44 = COD_R44 ./ (assentos_R44 * distancias);
CASK_eVTOL = COD_eVTOL ./ (assentos_eVTOL * distancias);

% Gera o do grafico
figure;
plot(distancias, CASK_Cessna, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Cessna');
hold on;
plot(distancias, CASK_R44, '—', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'R44');
plot(distancias, CASK_eVTOL, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'eVTOL');

title('Curvas de CASK para Aeronaves');
xlabel('Distancia (km)');
ylabel('Custo por Assento por Quilometro (Dolar/km/assento)');

```

```

legend( 'show' );
grid on;

```

## A.2 Código de 1000 horas de voo anual para o eVTOL

Listing A.2 – Seu código MATLAB

```

% Parametros
COD_Cessna = 658.08;
COD_R44 = 275.43;
COD_eVTOL = 417.21; % Para 1000 h de voo anuais

alcance_Cessna = 300; % km
alcance_R44 = 300; % km
alcance_eVTOL = 250; % km

assentos_Cessna = 9; % assentos disponiveis
assentos_R44 = 3; % assentos disponiveis
assentos_eVTOL = 6; % assentos disponiveis

distancias = 0:1:250; % alcance a ser considerado alcance do evtol

% Calculo de CASK
CASK_Cessna = COD_Cessna ./ (assentos_Cessna * distancias);
CASK_R44 = COD_R44 ./ (assentos_R44 * distancias);
CASK_eVTOL = COD_eVTOL ./ (assentos_eVTOL * distancias);

% Gera o do grafico
figure;
plot(distancias, CASK_Cessna, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Cessna');
hold on;
plot(distancias, CASK_R44, '—', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'R44');
plot(distancias, CASK_eVTOL, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'eVTOL');

title( 'Curvas de CASK para Aeronaves' );
xlabel( 'Distancia (km)' );
ylabel( 'Custo por Assento por Quilometro (Dolar/km/assento)' );
legend( 'show' );
grid on;

```

## A.3 Código de 1500 horas de voo anual para o eVTOL

Listing A.3 – Seu código MATLAB

```

% Parametros
COD_Cessna = 658.08;
COD_R44 = 275.43;
COD_eVTOL = 381.74; % Para 1500 h de voo anuais

alcance_Cessna = 300; % km
alcance_R44 = 300; % km
alcance_eVTOL = 250; % km

assentos_Cessna = 9; % assentos disponiveis
assentos_R44 = 3; % assentos disponiveis
assentos_eVTOL = 6; % assentos disponiveis

distancias = 0:1:250; % alcance a ser considerado alcance do evtol

% Calculo de CASK
CASK_Cessna = COD_Cessna ./ (assentos_Cessna * distancias);
CASK_R44 = COD_R44 ./ (assentos_R44 * distancias);
CASK_eVTOL = COD_eVTOL ./ (assentos_eVTOL * distancias);

% Gera o do grafico
figure;
plot(distancias, CASK_Cessna, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Cessna');
hold on;
plot(distancias, CASK_R44, '—', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'R44');
plot(distancias, CASK_eVTOL, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'eVTOL');

title('Curvas de CASK para Aeronaves');
xlabel('Distancia (km)');
ylabel('Custo por Assento por Quilometro (Dolar/km/assento)');
legend('show');
grid on;

```

## A.4 Código de 2000 horas de voo anual para o eVTOL

## Listing A.4 – Seu código MATLAB

```
% Parametros
COD_Cessna = 658.08;
COD_R44 = 275.43;
COD_eVTOL = 364.01; % Para 2000 h de voo anuais

alcance_Cessna = 300; % km
alcance_R44 = 300; % km
alcance_eVTOL = 250; % km

assentos_Cessna = 9; % assentos disponiveis
assentos_R44 = 3; % assentos disponiveis
assentos_eVTOL = 6; % assentos disponiveis

distancias = 0:1:250; % alcance a ser considerado alcance do evtol

% Calculo de CASK
CASK_Cessna = COD_Cessna ./ (assentos_Cessna * distancias);
CASK_R44 = COD_R44 ./ (assentos_R44 * distancias);
CASK_eVTOL = COD_eVTOL ./ (assentos_eVTOL * distancias);

% Gera o do grafico
figure;
plot(distancias, CASK_Cessna, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Cessna');
hold on;
plot(distancias, CASK_R44, '—', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'R44');
plot(distancias, CASK_eVTOL, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'eVTOL');

title('Curvas de CASK para Aeronaves');
xlabel('Distancia (km)');
ylabel('Custo por Assento por Quilometro (Dolar/km/assento)');
legend('show');
grid on;
```