



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE)  
Engenharia Aeroespacial

# **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Rotas Aéreas e Aeronaves do tipo "*Freighter*" no Transporte Aéreo de Cargas no Brasil**

Autor: Carlos Eduardo Vaz Ferreira  
Orientadora: Dra. Polliana Candida Oliveira Martins  
Coorientador: Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Brasília, DF  
2025



Carlos Eduardo Vaz Ferreira

**Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Rotas  
Aéreas e Aeronaves do tipo "*Freighter*" no Transporte  
Aéreo de Cargas no Brasil**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Aeroespacial da Universidade  
de Brasília, como requisito parcial para ob-  
tenção do Título de Bacharel em Engenharia  
Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE)

Orientador: Dra. Polliana Candida Oliveira Martins

Coorientador: Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Brasília, DF

2025

---

Carlos Eduardo Vaz Ferreira

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Rotas Aéreas e Aeronaves do tipo "*Freighter*" no Transporte Aéreo de Cargas no Brasil/ Carlos Eduardo Vaz Ferreira

. – Brasília, DF, 2025-

Orientador: Dra. Polliana Candida Oliveira Martins

Trabalho de Conclusão de Curso –

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) , 2025.

1. Transporte aéreo de cargas. 2. ANAC. I. Dra. Polliana Candida Oliveira Martins. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Rotas Aéreas e Aeronaves do tipo "*Freighter*" no Transporte Aéreo de Cargas no Brasil

CDU 02:141:005.6

---

Carlos Eduardo Vaz Ferreira

# **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de Rotas Aéreas e Aeronaves do tipo "*Freighter*" no Transporte Aéreo de Cargas no Brasil**

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.

---

**Dra. Polliana Candida Oliveira  
Martins**  
Orientadora

---

**Dr. Victor Rafael Rezende Celestino**  
Coorientador

---

**Dr. Mateus Rodrigues Miranda**  
Convidado 1

---

**Dra. Fabiana Serra de Arruda**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2025

# Resumo

Este trabalho avalia a viabilidade técnica e econômica da operação de aeronaves do tipo *freighter* no transporte aéreo de cargas no Brasil. Utilizando dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), foram analisadas métricas como Custo por Tonelada-Quilômetro Disponível (CATK), eficiência operacional e consumo de combustível. A otimização de rotas foi realizada por meio de modelagem computacional baseada em Programação Linear Inteira Mista (MILP), utilizando a biblioteca PuLP. Os resultados indicam que a implementação de uma frota cargueira exclusiva pode aumentar a eficiência logística, reduzir impactos ambientais e tornar o setor aéreo brasileiro mais competitivo. A pesquisa também sugere que a adoção de estratégias de otimização de rotas e frotas pode reduzir custos operacionais e melhorar a viabilidade econômica do transporte aéreo de cargas no país.

**Palavras-chaves:** Transporte aéreo de cargas. ANAC. Logística. Cargueiros.

# Abstract

This study evaluates the technical and economic feasibility of operating freighter aircraft for air cargo transportation in Brazil. Using data from the National Civil Aviation Agency (ANAC), key metrics such as Cost per Available Tonne-Kilometer (CATK), operational efficiency, and fuel consumption were analyzed. Route optimization was conducted through computational modeling based on Mixed-Integer Linear Programming (MILP), using the PuLP library. The results indicate that implementing a dedicated freighter fleet can enhance logistical efficiency, reduce environmental impacts, and increase the competitiveness of Brazil's air cargo sector. The research also suggests that adopting optimized route and fleet strategies can lower operational costs and improve the economic viability of air cargo transportation in the country.

**Key-words:** Air cargo transportation. ANAC. Logistics. Freighters.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Painel Informativo de Demanda e Oferta. . . . .                                     | 17 |
| Figura 2 – Fotografia do Boeing 707. . . . .                                                   | 23 |
| Figura 3 – Aeronaves por capacidade de carga. . . . .                                          | 31 |
| Figura 4 – Ranking de países por carga transportadas, em Ton-Km (Bilhões). . . .               | 43 |
| Figura 5 – Transporte aéreo, carga (milhões de toneladas-quilômetro) - Estados Unidos. . . . . | 44 |
| Figura 6 – Crescimento do mercado doméstico de carga aérea dos EUA. . . . .                    | 45 |
| Figura 7 – Previsão de crescimento do tráfego doméstico de carga aérea nos EUA. . .            | 45 |
| Figura 8 – Comparação do preço da carga aérea em relação aos containers marítimos. .           | 46 |
| Figura 9 – Receitas do mercado de carga aérea na pré-pandemia. . . . .                         | 46 |
| Figura 10 – Previsão do tráfego de carga aérea nas próximas décadas. . . . .                   | 47 |
| Figura 11 – Tráfego mundial de carga aérea (bilhões de toneladas de carga por km). .           | 47 |
| Figura 12 – Demanda estimada de carga transportada para voos domésticos. . . . .               | 48 |
| Figura 13 – Demanda estimada de carga para voos domésticos e internacionais. . .               | 49 |
| Figura 14 – Consumo específico de combustível durante a decolagem: Airbus. . . .               | 54 |
| Figura 15 – Consumo específico de combustível durante a decolagem: Boeing. . . .               | 57 |
| Figura 16 – Portal de Dados Abertos da ANAC. . . . .                                           | 65 |
| Figura 17 – Fonte de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo. . . . .                           | 66 |
| Figura 18 – Lista de Aeródromos Públicos V2. . . . .                                           | 66 |
| Figura 19 – Séries Mensais do Preço do QAV por Estado. . . . .                                 | 67 |
| Figura 20 – Distância entre dois pontos na esfera. . . . .                                     | 69 |
| Figura 21 – Fluxograma do Trabalho Desenvolvido. . . . .                                       | 76 |
| Figura 22 – Rota Estimada 1. . . . .                                                           | 77 |
| Figura 23 – Rota Estimada 2. . . . .                                                           | 79 |
| Figura 24 – Rota Estimada 3. . . . .                                                           | 81 |
| Figura 25 – Rota Estimada 4. . . . .                                                           | 82 |
| Figura 26 – Carga por região de origem. . . . .                                                | 90 |
| Figura 27 – Carga por região de destino. . . . .                                               | 90 |
| Figura 28 – Soma de carga paga por mês. . . . .                                                | 91 |
| Figura 29 – Comparativo de Carga x Passageiros totais. . . . .                                 | 91 |
| Figura 30 – Mapa da malha aérea com principais rotas. . . . .                                  | 91 |
| Figura 31 – Mapa de saídas de Cargas por UF de 2000 a 2024. . . . .                            | 92 |
| Figura 32 – Mapa de calor de saídas de cargas. . . . .                                         | 92 |
| Figura 33 – Mapa de chegada de Cargas por UF de 2000 a 2024. . . . .                           | 93 |
| Figura 34 – Mapa de calor de chegadas de cargas. . . . .                                       | 93 |

# Lista de tabelas

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Classificação de aeronaves por capacidade de carga . . . . .             | 30 |
| Tabela 2 – Características de diferentes modelos de aeronaves. . . . .              | 51 |
| Tabela 3 – Características gerais dos pesos operacionais da Família Airbus. . . . . | 52 |
| Tabela 4 – Tabela de Desempenho de Motores. . . . .                                 | 53 |
| Tabela 5 – Rotas e principais informações. . . . .                                  | 55 |
| Tabela 6 – Dados de Aeronaves Boeing. . . . .                                       | 56 |
| Tabela 7 – Características de Peso das Aeronaves da Família Boeing. . . . .         | 56 |
| Tabela 8 – Dados de Motores da Família Boeing. . . . .                              | 57 |
| Tabela 9 – Rotas Operadas por Diferentes Aeronaves da Família Boeing. . . . .       | 58 |
| Tabela 10 – Características das aeronaves da família Embraer. . . . .               | 59 |
| Tabela 11 – Características de Peso das Aeronaves da Família Embraer. . . . .       | 60 |
| Tabela 12 – Dados de motores da família Embraer. . . . .                            | 61 |
| Tabela 13 – Rotas operadas pela família Embraer. . . . .                            | 61 |
| Tabela 14 – Características do ATR 72-600F. . . . .                                 | 62 |
| Tabela 15 – Características de Peso do ATR 72-600F. . . . .                         | 63 |
| Tabela 16 – Dados do motor do ATR 72-600F. . . . .                                  | 63 |
| Tabela 17 – Rota operada pelo ATR 72-600F. . . . .                                  | 64 |
| Tabela 18 – Especificações das aeronaves analisadas. . . . .                        | 71 |
| Tabela 19 – Resumo das Restrições do Modelo. . . . .                                | 75 |
| Tabela 20 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos. . . . .                    | 78 |
| Tabela 21 – CATK por aeronave e rota para caso 1. . . . .                           | 78 |
| Tabela 22 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos. . . . .                    | 80 |
| Tabela 23 – CATK por aeronave e rota para caso 2. . . . .                           | 80 |
| Tabela 24 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos. . . . .                    | 81 |
| Tabela 25 – CATK por aeronave e rota para caso 3. . . . .                           | 81 |
| Tabela 26 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos. . . . .                    | 83 |
| Tabela 27 – CATK por aeronave e rota para caso 4. . . . .                           | 83 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|       |                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------|
| ACI   | Airports Council International                                      |
| ACMI  | Aircraft, Crew, Maintenance, and Insurance                          |
| AED   | Análise Exploratória de Dados                                       |
| ANAC  | Agência Nacional de Aviação Civil                                   |
| ANP   | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis         |
| ATK   | Available Ton Kilometer (Toneladas-Quilômetro Disponíveis)          |
| BFS   | Aeroporto Internacional de Belfast, Irlanda do Norte                |
| BHX   | Aeroporto de Birmingham, Reino Unido                                |
| BI    | Business Intelligence                                               |
| CATK  | Custo por Tonelada-Quilômetro Disponível                            |
| CBC   | Coin-or Branch and Cut                                              |
| CDG   | Aeroporto Charles de Gaulle em Paris, França                        |
| CPLEX | Software de otimização de programação linear, inteira e quadrática. |
| CSV   | Comma-Separated Values (formato de arquivo)                         |
| DAC   | Departamento de Aviação Civil                                       |
| DF    | Distrito Federal                                                    |
| DHL   | Deutsche Post DHL                                                   |
| DXB   | Aeroporto Internacional de Dubai, Emirados Árabes Unidos            |
| EUA   | Estados Unidos da América                                           |
| FGA   | Faculdade UnB Gama                                                  |
| FLN   | Aeroporto Internacional Hercílio Luz em Florianópolis, Brasil       |
| FTK   | Freight Tonne Kilometres (Toneladas-Quilômetro de Carga)            |
| GRU   | Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos                      |

|      |                                                                                |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|
| HKG  | Aeroporto Internacional de Hong Kong                                           |
| IA   | Inteligência Artificial                                                        |
| ICAO | International Civil Aviation Organization                                      |
| IoT  | Internet of Things                                                             |
| ISA  | International Standard Atmosphere                                              |
| IST  | Aeroporto de Istambul, Turquia                                                 |
| Kg   | Quilogramas                                                                    |
| Km   | Quilômetro                                                                     |
| KLM  | Koninklijke Luchtvaart Maatschappij (companhia aérea KLM Royal Dutch Airlines) |
| kN   | Quilonewton                                                                    |
| LEJ  | Aeroporto de Leipzig, Alemanha                                                 |
| LF   | Load Factor                                                                    |
| LTN  | Aeroporto de Londres em Luton, Reino Unido                                     |
| LUX  | Aeroporto de Luxemburgo                                                        |
| MAD  | Aeroporto de Madrid-Barajas Adolfo Suárez, Espanha                             |
| MEW  | Maximum Empty Weight                                                           |
| MFW  | Maximum Fuel Weight                                                            |
| MIA  | Aeroporto Internacional de Miami, Estados Unidos                               |
| MILP | Mixed Integer Linear Programming (Programação Linear Inteira Mista)            |
| MTOW | Maximum Take-Off Weight                                                        |
| MTZ  | Miller-Tucker-Zemlin                                                           |
| MZFW | Maximum Zero Fuel Weight                                                       |
| OEW  | Operating Empty Weight                                                         |
| PI   | Programação Inteira                                                            |
| PL   | Programação Linear                                                             |

|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| PO    | Pesquisa Operacional                                        |
| PDA   | Plano de Dados Abertos                                      |
| PuLP  | Programação Linear Inteira Mista                            |
| QAV   | Querosene de Aviação                                        |
| REC   | Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes                |
| RTK   | Revenue Ton-Kilometers (Toneladas-Quilômetro Transportadas) |
| SAF   | Sustainable Aviation Fuels                                  |
| SOF   | Aeroporto Internacional de Sofia, Bulgária                  |
| SSA   | Aeroporto Internacional de Salvador                         |
| STN   | Aeroporto de Londres Stansted                               |
| TSFC  | Thrust Specific Fuel Consumption                            |
| Ton   | Toneladas                                                   |
| UF    | Unidade Federativa                                          |
| UPS   | United Parcel Service                                       |
| VARIG | Viação Aérea Rio-Grandense                                  |
| VCP   | Aeroporto Internacional de Viracopos                        |

# Sumário

|            |                                                           |           |
|------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                         | <b>15</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Contextualização</b>                                   | <b>15</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Problemática</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivo Geral</b>                                     | <b>19</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivos Específicos</b>                              | <b>19</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Justificativa</b>                                      | <b>20</b> |
| <b>1.6</b> | <b>Organização do trabalho</b>                            | <b>20</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                | <b>22</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Desenvolvimento do Transporte Aéreo de Cargas</b>      | <b>22</b> |
| 2.1.1      | Pré-Primeira Guerra Mundial                               | 22        |
| 2.1.2      | Pós-Primeira Guerra Mundial                               | 23        |
| 2.1.3      | Anos 1980 e 1990: Expansão Global e Integração Logística  | 24        |
| 2.1.4      | Século XXI: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade     | 24        |
| 2.1.5      | O transporte aéreo no contexto brasileiro                 | 24        |
| <b>2.2</b> | <b>Características do serviço aéreo de carga</b>          | <b>25</b> |
| 2.2.1      | Tipos de Carga Aérea                                      | 25        |
| 2.2.2      | Vantagens do Transporte Aéreo de Carga                    | 26        |
| 2.2.3      | Desvantagens do Transporte Aéreo de Carga                 | 26        |
| 2.2.4      | Tipos de Aeronaves Utilizadas                             | 26        |
| <b>2.3</b> | <b>Empresas de Transporte Aéreo de Cargas</b>             | <b>27</b> |
| 2.3.1      | Empresas Mistas                                           | 27        |
| 2.3.2      | Empresas Exclusivamente Cargueiras                        | 27        |
| 2.3.3      | Empresas Integradoras                                     | 28        |
| <b>2.4</b> | <b>Economia e Logística do Transporte Aéreo de Cargas</b> | <b>28</b> |
| 2.4.1      | Custos                                                    | 29        |
| 2.4.2      | Receitas                                                  | 29        |
| 2.4.3      | Desafios e Competitividade                                | 30        |
| <b>2.5</b> | <b>Principais aviões cargueiros disponíveis</b>           | <b>30</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Indicadores da Econômicos de Carga</b>                 | <b>31</b> |
| 2.6.1      | Custos envolvendo uma operação de rota                    | 31        |
| 2.6.2      | Custos de combustível                                     | 31        |
| 2.6.3      | Métricas da Aeronave, ATK, RTK e CATK                     | 32        |
| 2.6.3.1    | Métricas da Aeronave                                      | 32        |
| 2.6.3.2    | Toneladas-Quilômetro Disponíveis (ATK)                    | 33        |

|            |                                                                |           |
|------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.3.3    | Toneladas-Quilômetro Transportadas (RTK) . . . . .             | 33        |
| 2.6.3.4    | Custo por Tonelada-Quilômetro Disponível (CATK) . . . . .      | 34        |
| <b>2.7</b> | <b>Análise Exploratória de Dados . . . . .</b>                 | <b>34</b> |
| 2.7.1      | Objetivos da Análise Exploratória de Dados . . . . .           | 35        |
| 2.7.2      | Técnicas Utilizadas na Análise Exploratória de Dados . . . . . | 35        |
| <b>2.8</b> | <b>Pesquisa Operacional (PO) . . . . .</b>                     | <b>35</b> |
| 2.8.1      | Programação Linear . . . . .                                   | 36        |
| 2.8.2      | Programação Inteira . . . . .                                  | 37        |
| 2.8.3      | PuLP . . . . .                                                 | 37        |
| <b>3</b>   | <b>ANÁLISE DO MODO DE TRANSPORTE AÉREO DE CARGAS . . . . .</b> | <b>38</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Modelos de Negócios de Carga Aérea . . . . .</b>            | <b>38</b> |
| 3.1.1      | Transportadoras Totalmente de Carga . . . . .                  | 38        |
| 3.1.2      | Transportadoras de Carga de Barriga . . . . .                  | 38        |
| 3.1.3      | Integradores (Porta a Porta) . . . . .                         | 39        |
| 3.1.4      | Transportadoras Combinadas . . . . .                           | 39        |
| <b>3.2</b> | <b>Demanda de Carga Aérea . . . . .</b>                        | <b>39</b> |
| 3.2.1      | Origem e Destino . . . . .                                     | 40        |
| 3.2.2      | Tipo de Mercadoria . . . . .                                   | 40        |
| 3.2.3      | Nível de Serviço Desejado . . . . .                            | 40        |
| 3.2.4      | Tamanho da Remessa . . . . .                                   | 40        |
| 3.2.5      | Fatores que Afetam a Demanda por Aeroportos . . . . .          | 40        |
| 3.2.6      | Fatores Regionais Influentes . . . . .                         | 41        |
| <b>3.3</b> | <b>Previsões de Demanda de Carga Aérea . . . . .</b>           | <b>41</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Mercado Global . . . . .</b>                                | <b>42</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Mercado Brasileiro . . . . .</b>                            | <b>48</b> |
| <b>4</b>   | <b>ANÁLISE DOS AVIÕES SELECIONADOS . . . . .</b>               | <b>50</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Família Airbus . . . . .</b>                                | <b>50</b> |
| 4.1.1      | Especificações Gerais . . . . .                                | 51        |
| 4.1.2      | Tabela de Pesos . . . . .                                      | 52        |
| 4.1.3      | Atualizações de Motores . . . . .                              | 53        |
| 4.1.4      | Rotas Utilizadas . . . . .                                     | 54        |
| <b>4.2</b> | <b>Família Boeing . . . . .</b>                                | <b>55</b> |
| 4.2.1      | Tabela de Pesos . . . . .                                      | 56        |
| 4.2.2      | Atualizações de Motores . . . . .                              | 57        |
| 4.2.3      | Rotas Utilizadas . . . . .                                     | 58        |
| <b>4.3</b> | <b>Família Embraer . . . . .</b>                               | <b>59</b> |
| 4.3.1      | Tabela de Pesos . . . . .                                      | 60        |
| 4.3.2      | Atualizações de Motores . . . . .                              | 61        |

|            |                                                                             |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.3      | Rotas Utilizadas . . . . .                                                  | 61        |
| <b>4.4</b> | <b>Avião ATR 72-600F . . . . .</b>                                          | <b>62</b> |
| 4.4.1      | Tabela de Pesos . . . . .                                                   | 63        |
| 4.4.2      | Atualizações de Motores . . . . .                                           | 63        |
| 4.4.3      | Rotas Utilizadas . . . . .                                                  | 64        |
| <b>5</b>   | <b>METODOLOGIA . . . . .</b>                                                | <b>65</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Coleta de Dados . . . . .</b>                                            | <b>65</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Tratamento de Dados . . . . .</b>                                        | <b>67</b> |
| 5.2.1      | Limpeza e Filtragem de Colunas . . . . .                                    | 67        |
| 5.2.1.1    | CSV Lista de Aeródromos Públicos V2 . . . . .                               | 67        |
| 5.2.1.2    | CSV Séries Mensais do Preço do QAV por Estado . . . . .                     | 68        |
| 5.2.1.3    | CSV Dados Estatísticos ANAC . . . . .                                       | 68        |
| 5.2.2      | Distância entre aeroportos: Fórmula de Haversine . . . . .                  | 69        |
| 5.2.2.1    | Definição Matemática . . . . .                                              | 69        |
| 5.2.3      | Adicionando Valores do QAV . . . . .                                        | 70        |
| 5.2.4      | Calculando o CATK . . . . .                                                 | 70        |
| 5.2.4.1    | Cálculo do CATK . . . . .                                                   | 71        |
| 5.2.4.2    | Geração de Arquivos CSV . . . . .                                           | 72        |
| <b>5.3</b> | <b>Análise Exploratória de Dados . . . . .</b>                              | <b>72</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Cálculo de Rotas Ótimas . . . . .</b>                                    | <b>72</b> |
| 5.4.1      | Função Objetivo . . . . .                                                   | 73        |
| 5.4.2      | Restrições do Modelo . . . . .                                              | 73        |
| 5.4.2.1    | Restrição de Conservação de Fluxo . . . . .                                 | 73        |
| 5.4.2.2    | Restrição do Número Mínimo e Máximo de Aeroportos Intermediários . . . . .  | 74        |
| 5.4.2.3    | Restrição de Participação de Aeroportos Intermediários . . . . .            | 74        |
| 5.4.2.4    | Restrição de Partida e Retorno ao Aeroporto Principal . . . . .             | 74        |
| 5.4.2.5    | Restrição de Eliminação de Subciclos (MTZ - Miller-Tucker-Zemlin) . . . . . | 75        |
| 5.4.3      | Resumo das Restrições . . . . .                                             | 75        |
| 5.4.4      | Fluxograma de Trabalho . . . . .                                            | 76        |
| <b>5.5</b> | <b>Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos . . . . .</b>                | <b>76</b> |
| <b>6</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>                                     | <b>77</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Caso 1 . . . . .</b>                                                     | <b>77</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Caso 2 . . . . .</b>                                                     | <b>79</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Caso 3 . . . . .</b>                                                     | <b>80</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Caso 4 . . . . .</b>                                                     | <b>82</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>                                       | <b>84</b> |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .                                                        | <b>86</b>  |
| <b>APÊNDICES</b>                                                                    | <b>89</b>  |
| <b>APÊNDICE A – RESULTADOS DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 1</b> . . . . .        | <b>90</b>  |
| <b>APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON PARA TRATAMENTO DE DADOS E CÁLCULO CATK</b> . . . . . | <b>94</b>  |
| <b>APÊNDICE C – CÓDIGO PYTHON PARA ROTAS AÉREAS POR PULP</b> . . . . .              | <b>104</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O transporte aéreo de cargas teve sua origem antes mesmo do desenvolvimento da aviação convencional, tal como a conhecemos hoje. Correspondências (cartas e malotes) e pequenos pacotes já eram transportados por aeróstatos — como balões e dirigíveis, veículos mais leves que o ar — muito antes do surgimento dos primeiros aeródinos, ou seja, os aviões, classificados como mais pesados que o ar.

O primeiro voo registrado de transporte de carga ocorreu em 1910, quando aproximadamente 90 kg de seda foram transportados entre as cidades de Dayton e Columbus, nos Estados Unidos por meio do *Wright Model B*, desenvolvido pelos irmãos Wright. Esse evento é considerado o primeiro voo de carga do mundo e demonstrou o potencial da aviação para a logística e o comércio. A ideia consolidou-se rapidamente, resultando na criação do primeiro serviço aéreo regular em 1914 ([ACI, 2019](#)).

O transporte aéreo de cargas utilizando aeródinos teve um avanço significativo no início do século XX, impulsionado por inovações tecnológicas que transformaram a aviação. Os irmãos Wright e Santos Dumont, considerados pioneiros da aviação, deram início a essa jornada com os primeiros voos motorizados, em 1903 e 1906, respectivamente ([DIAS, 2004](#)). Entretanto, foi durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) que o transporte aéreo passou por um desenvolvimento acelerado. A necessidade de movimentar suprimentos, armamentos e correspondências entre as frentes de batalha impulsionou a evolução tecnológica das aeronaves. Esse período foi crucial para o aprimoramento da logística aérea e para a criação de rotas destinadas ao transporte de materiais estratégicos. Entretanto, somente após o fim da guerra, com o excedente de aeronaves militares disponíveis, o setor começou a adaptar essas aeronaves para uso civil, dando início aos primeiros serviços de transporte aéreo comercial de cargas e passageiros ([ALLAZ, 2005](#)).

Na década de 1920, a empresa britânica Handley Page Transport Ltd. iniciou operações de voos comerciais entre Londres e Paris, sendo uma das primeiras empresas registradas a incorporar o transporte de correspondências e pequenos volumes de carga. Para esses serviços, utilizava aeronaves Handley Page Type O/400, originalmente projetadas como bombardeiros, mas posteriormente adaptadas para uso civil ([Handley Page Ltd., s.d.](#)).

No Brasil, o transporte aéreo de cargas teve seu marco inicial em 1927 com a criação da Viação Aérea Rio-Grandense (VARIG). Embora inicialmente voltada para o transporte de passageiros, a VARIG foi pioneira no país a operar voos que incluíam mercadorias em

suas rotas comerciais. Os voos aconteciam entre as cidades de Porto Alegre, Pelotas e Rio Grande e carregavam remédios, alimentos e peças mecânicas ([VARIG, s.d.](#)).

A expansão do transporte aéreo de carga se iniciou após a Segunda Guerra Mundial com os avanços tecnológicos na aviação e à necessidade crescente de um sistema logístico global mais eficiente. A criação de grandes aviões cargueiros, como o Boeing 747 em 1970, revolucionou a indústria ao permitir o transporte de grandes volumes de mercadorias a custos mais baixos e com maior rapidez. Na década de 1980, empresas especializadas, como a FedEx e a UPS, consolidaram-se como líderes globais, oferecendo serviços de transporte expresso e redes logísticas avançadas que conectam o mundo inteiro por meio do frete aéreo. Atualmente, o transporte aéreo de carga é essencial para o comércio internacional, suportando a economia global ao facilitar a movimentação rápida de bens essenciais, incluindo produtos perecíveis, eletrônicos e fármacos ([ALLAZ, 2005](#)).

Com o desenvolvimento tecnológico, aeronaves cada vez maiores e mais sofisticadas foram sendo desenvolvidas a fim de atender à necessidade de transporte rápido e eficaz. Com isso, foi necessário a criação de órgãos fiscalizadores que trabalham para manter a lisura e segurança no manuseio dessas aeronaves. A principal organização internacional responsável pela regulamentação da aviação civil, incluindo o transporte de carga aérea, é a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO). A ICAO é agência especializada em regulamentação aérea das Nações Unidas que coordena os princípios e técnicas de navegação aérea internacional, e promove o planejamento e desenvolvimento do transporte aéreo internacional, sendo a principal agência que estabelece padrões e práticas recomendadas globalmente ([ICAO, 2024](#)). No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) foi criada em 2005, sucedendo o Departamento de Aviação Civil (DAC), e é responsável pela regulamentação e fiscalização do transporte aéreo de cargas e passageiros em território brasileiro ([ANAC, 2024b](#)), seguindo as normas estabelecidas pela ICAO.

A era da informação digital trouxe a necessidade de maior transparência e acessibilidade aos dados. No setor da aviação, onde a segurança das operações é primordial, a ANAC vem fazendo um trabalho na divulgação de dados abertos.

O governo brasileiro, por meio da Portaria nº 4.306, de 22 de fevereiro de 2021, instituiu o Plano de Dados Abertos (PDA). Esta portaria fornece orientações estratégicas e operacionais para a implementação da abertura de dados, com o objetivo de aumentar a transparência e promover a reutilização dos dados públicos pela sociedade civil. Em conformidade com este plano, a ANAC criou o Portal de Dados Abertos, uma plataforma que centraliza e disponibiliza à sociedade os dados sob responsabilidade da agência ([gov.br, 2023](#)).

A ANAC disponibiliza dados gerais sobre o setor, contribuindo para a transparência e o acesso às informações. No entanto, apesar do esforço da agência, observa-se que o nível de aprofundamento dos estudos e do tratamento desses dados é mais avançado

para o segmento de passageiros do que para o de cargas aéreas. Isso reflete uma tendência mais ampla no Brasil, onde as pesquisas e análises no setor de aviação comercial são, em sua maioria, voltadas para o transporte de passageiros. Como é possível ver na figura 1, a própria ANAC disponibiliza análises e tratamento de dados relacionados ao setor. No entanto, esses dados não fornecem uma visão detalhada sobre a dinâmica do mercado brasileiro de transporte de cargas aéreas, sendo este um segmento que recebe menos aprofundamento em comparação ao transporte de passageiros.

Vale destacar que, de acordo com as demonstrações contábeis das companhias aéreas brasileiras, a principal fonte de receita do setor advém da venda de passagens, representando mais de 90% do faturamento dessas empresas (ANAC, 2025). Apesar disso, as companhias também comercializam espaços para cargas, inclusive para empresas de *courier*, especializadas no transporte expresso de mercadorias.

De acordo com a ANAC (ANAC, 2022), no Brasil, estima-se que 7% do faturamento por voo das companhias aéreas seja proveniente de cargas aéreas (aumento de 12% em relação ao ano anterior). Esse percentual reflete o crescimento do transporte de cargas, mas ainda demonstra que a maior parte do faturamento das companhias aéreas é oriunda da venda de passagens, que corresponde a cerca de 82,9% da receita total. Em contrapartida, nos Estados Unidos, essa proporção chega a 28% da receita total da indústria aérea. Embora esses números possam parecer baixos, a receita proveniente do transporte de cargas pode ser crucial para a viabilidade financeira das empresas, representando a diferença entre o lucro e a falência (The STAT Trade Times, 2022).

Figura 1 – Painel Informativo de Demanda e Oferta.



Fonte: (ANAC, 2024b).

O transporte aéreo de cargas no Brasil apresenta desafios e oportunidades que demandam uma análise detalhada sobre a viabilidade técnica e econômica da operação de aeronaves do tipo *freighter* (cargueiro). Este trabalho tem como objetivo avaliar a simulação de cenários dessas aeronaves ao mercado brasileiro por meio de modelagem computacional baseada em dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). A análise será focada em fatores técnicos, como capacidade de carga, consumo de combustível e eficiência operacional, considerando diferentes modelos de aeronaves cargueiras. Para isso,

serão aplicadas técnicas de Programação Linear Inteira Mista (PuLP) a fim de definir e otimizar as melhores rotas dentro do território nacional, possibilitando um estudo preciso da viabilidade operacional dessas aeronaves.

Além da viabilidade técnica, será realizada uma análise econômica baseada no CATK (*Cost per Available Tonne-Kilometer*, ou Custo por Toneladas-Quilômetro Disponíveis), métrica amplamente utilizada para mensurar a eficiência do transporte aéreo de cargas. A modelagem computacional permitirá simular cenários operacionais distintos, comparando diferentes configurações de rotas e estratégias de operação. O estudo também fará um comparativo com mercados internacionais para identificar potenciais melhorias e otimizações para o setor no Brasil. Com essa abordagem, busca-se fornecer uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas na aviação cargueira, contribuindo para o aumento da eficiência e competitividade do modo de transporte aéreo no país.

Outro aspecto importante é a sustentabilidade. A otimização das rotas e do uso da capacidade de carga pode contribuir para a redução do consumo de combustível e das emissões de carbono, contribuindo para a redução de impacto ambiental, pauta essa que está em alta devido as altas emissões advindas dos aviões comerciais.

A implementação dessas técnicas visa tornar o setor de transporte aéreo de cargas mais eficiente e autossustentável, considerando que este é um mercado que ainda enfrenta muitas incertezas no Brasil. Este trabalho, ao explorar e demonstrar essas capacidades, visa abrir novas possibilidades para a aviação comercial brasileira, promovendo uma gestão mais eficaz do transporte de cargas aéreas.

## 1.2 Problemática

A forma como os dados disponibilizados pela ANAC são tratados pode dificultar uma compreensão mais detalhada do mercado de cargas aéreas no Brasil, o que representa um desafio para a tomada de decisões estratégicas e o desenvolvimento do setor. Além disso, a estrutura oligopolista da aviação brasileira direciona grande parte dos investimentos e operações para o transporte de passageiros, deixando o segmento de carga com menor atenção e infraestrutura insuficiente. Como demonstrado por (FERREIRA, 2024), essa realidade contribui para uma malha aérea economicamente insustentável, na qual a distribuição de cargas não é suficientemente eficiente para cobrir todas as regiões do país de maneira viável. Soma-se a isso o fato de que as empresas que operam no Brasil possuem poucas ou nenhuma aeronave dedicada exclusivamente ao transporte de cargas, forçando a utilização de porões de aviões de passageiros, o que restringe a capacidade e a flexibilidade logística.

Diante dessas problemáticas, seria possível desenvolver um estudo de mercado que viabilize e impulse o setor de transporte aéreo de cargas no Brasil por meio de modela-

gem computacional e um estudo detalhado da viabilidade técnica de aeronaves *freighter*? Considerando que o Brasil possui dimensões continentais e uma malha logística altamente dependente do transporte rodoviário, não seria mais vantajoso investir em aeronaves próprias para o transporte de cargas, permitindo maior flexibilidade, eficiência e alcance a regiões remotas? A ausência de uma frota dedicada impacta diretamente a competitividade do setor, tornando-o menos eficiente em comparação a outros modais. Assim, seria possível, através de uma análise aprofundada, identificar as melhores estratégias para otimizar operações, reduzir custos e tornar o transporte aéreo de cargas uma alternativa mais viável e atrativa no cenário logístico brasileiro?

## 1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica da operação de aeronaves do tipo *freighter* no Brasil, utilizando modelagem computacional baseada nos dados disponibilizados pela ANAC. Para isso, busca-se identificar as principais rotas cargueiras no país e analisar a adequação dessas aeronaves ao mercado nacional, considerando métricas de desempenho operacional e custo por tonelada-quilômetro disponível (CATK).

## 1.4 Objetivos Específicos

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivos específicos:

- Analisar os dados disponibilizados pela ANAC para identificar padrões operacionais e as principais rotas utilizadas no transporte aéreo de cargas no Brasil;
- Discutir os fatores econômicos que influenciam o setor de transporte aéreo de cargas no Brasil, com base na literatura.
- Modelar e simular diferentes cenários operacionais, utilizando técnicas de programação linear inteira mista (PuLP), para avaliar a viabilidade técnica da operação de aeronaves cargueiras em território nacional;
- Estimar a viabilidade econômica do uso de aeronaves *freighter* no país, com base no cálculo do CATK, visando determinar o impacto financeiro da implementação dessas aeronaves no mercado brasileiro;
- Avaliar as vantagens e/ou desvantagens no uso dessas aeronaves em rotas regulares.

## 1.5 Justificativa

O transporte aéreo de cargas desempenha um papel fundamental no comércio, oferecendo rapidez e eficiência na movimentação de bens de consumo e itens essenciais. No entanto, no Brasil, este setor ainda é subutilizado e enfrenta desafios como custos elevados e limitações de capacidade, que restringem seu potencial ([LINGOPASS, 2024](#)). Apesar dos esforços da ANAC em divulgar dados, a falta de tratamento adequado desses dados dificulta uma compreensão precisa do mercado de cargas aéreas. Além disso, o foco predominante no transporte de passageiros resulta em uma menor atenção ao desenvolvimento do segmento de carga. Analisar e otimizar este mercado é essencial para impulsionar o crescimento econômico e a competitividade do país no cenário internacional.

As técnicas de análise de dados têm o potencial de transformar a forma como as informações do setor são tratadas e utilizadas. A aplicação dessas técnicas pode revelar padrões ocultos, detectar erros e gerar insights sobre a logística do mercado aéreo de cargas, contribuindo para aumentar a eficiência operacional e reduzir custos ([MELLO et al., 2003](#)). Além disso, essas análises podem embasar a viabilidade da introdução de aeronaves *freighter* dedicadas ao transporte de cargas no Brasil, reduzindo a dependência do espaço limitado nos porões de aeronaves de passageiros. Essa mudança poderia aumentar a flexibilidade das operações, otimizar o uso da malha aérea e tornar o setor mais competitivo em relação a outros modais logísticos.

## 1.6 Organização do trabalho

O Capítulo 1 - Introdução apresenta o contexto do transporte aéreo de cargas no Brasil, destacando a problemática do setor, a motivação para o estudo e a definição dos objetivos gerais e específicos, além da justificativa e estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 - Referencial Teórico discute conceitos fundamentais do modo de transporte aéreo de cargas, abordando sua evolução, modelos de operação, desafios logísticos e econômicos, além dos principais indicadores de desempenho.

O Capítulo 3 - Análise do Modo de Transporte Aéreo de Cargas examina o cenário atual do setor no Brasil e no mundo.

No Capítulo 4 - Análise dos Aviões Seleccionados, são investigadas as características técnicas e operacionais das aeronaves cargueiras, incluindo capacidade de carga, consumo de combustível e desempenho operacional, utilizando métricas como o CATK.

O Capítulo 5 - Metodologia descreve os métodos utilizados no estudo, abrangendo a coleta e tratamento de dados, análise exploratória e modelagem matemática aplicada à otimização de rotas e avaliação da viabilidade econômica das operações, com uso da biblioteca PuLP.

---

O Capítulo 6 - Resultados e Discussão apresenta as análises obtidas, incluindo mapas das melhores rotas otimizadas pelo PuLP e mapas das aeronaves avaliadas, permitindo a avaliação da viabilidade técnica e econômica das operações.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Desenvolvimento do Transporte Aéreo de Cargas

O transporte aéreo de cargas é uma parte vital do sistema logístico global, permitindo a movimentação rápida e eficiente de mercadorias ao redor do mundo. Esse modo de transporte é particularmente importante para itens de alto valor e tempo sensível, como eletrônicos, medicamentos e produtos perecíveis. A evolução do transporte aéreo de cargas pode ser dividida em várias fases marcadas por avanços tecnológicos e mudanças nas necessidades do mercado.

#### 2.1.1 Pré-Primeira Guerra Mundial

A história do transporte aéreo de carga antes da Primeira Guerra Mundial está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento da aviação e à necessidade de transportar correspondências e pequenos pacotes de maneira mais rápida e eficiente. Segundo o livro *Intermodal Transportation: Moving Freight in a Global Economy* (HOEL et al., 2010), antes da invenção do avião, dirigíveis e balões já eram utilizados para o transporte de pequenas cargas, especialmente correspondências, destacando o desejo de explorar o meio aéreo como alternativa logística.

Como citado anteriormente, o primeiro voo de carga reconhecido ocorreu em 1910, quando aproximadamente 90 kg de seda foram transportados entre Dayton e Columbus, nos Estados Unidos, onde posteriormente iniciou-se o primeiro serviço aéreo regular de carga. Além disso, os primeiros anos da aviação foram impulsionados principalmente pelo transporte de correspondências. Em 1918, os Estados Unidos estabeleceram as primeiras rotas aéreas postais, um marco importante na consolidação da carga aérea como um serviço viável. Esse setor cresceu rapidamente devido à necessidade de envio rápido de documentos e pequenos pacotes, especialmente para regiões que não eram bem atendidas por outros modais de transporte (HOEL et al., 2010).

A Primeira Guerra Mundial (1914-1918) acelerou o desenvolvimento tecnológico da aviação, embora o foco principal ainda fosse o uso militar das aeronaves. No entanto, essa evolução contribuiu significativamente para a modernização do setor e, conseqüentemente, para a expansão do transporte aéreo de cargas no período pós-guerra. A melhoria na performance das aeronaves e o aumento da confiança na aviação abriram caminho para o crescimento da carga aérea comercial nas décadas seguintes (HOEL et al., 2010).

### 2.1.2 Pós-Primeira Guerra Mundial

Na década de 1920, o transporte aéreo começou a se consolidar como uma alternativa eficiente para longas distâncias. Em 1924, foi estabelecida a primeira rota aérea ligando Nova York a São Francisco, reduzindo significativamente o tempo de viagem em comparação com as ferrovias, completando o trajeto em aproximadamente um terço do tempo. Além disso, o transporte postal aéreo teve um crescimento expressivo no período, especialmente entre 1918 e 1927, quando o volume de correspondências transportadas aumentou mais de 30.000 vezes. Esse crescimento reforçou a importância da aviação para a logística, e, até 1931, cerca de 85% do lucro das companhias aéreas era proveniente do transporte de correspondências, demonstrando a relevância desse serviço para a sustentabilidade econômica da aviação comercial da época (HOEL et al., 2010).

O transporte aéreo de cargas começou a ganhar relevância após a Primeira Guerra Mundial, quando os avanços tecnológicos permitiram a construção de aeronaves maiores e mais confiáveis. Inicialmente, as aeronaves eram utilizadas principalmente para o transporte de correio e pequenas encomendas, devido às suas limitações de capacidade e alcance. No entanto, à medida que a infraestrutura aeroportuária se expandiu e a tecnologia das aeronaves evoluiu, o transporte aéreo começou a se tornar uma alternativa viável e competitiva em relação aos métodos tradicionais, como o transporte marítimo e ferroviário.

Nos anos 1950 e 1960, o desenvolvimento de aeronaves a jato revolucionou o setor de transporte aéreo de cargas. A introdução de aviões a jato reduziu drasticamente o tempo de viagem e aumentou a capacidade de carga. Aeronaves como o Boeing 707 e o Douglas DC-8 estabeleceram novos padrões de velocidade e eficiência, tornando o transporte aéreo de cargas mais atraente para uma gama mais ampla de mercadorias (ACI, 2019).

Figura 2 – Fotografia do Boeing 707.



Fotografia por: icholakov/Fotolia.

A introdução de aviões cargueiros dedicados, como o Boeing 747 *Freighter*, foi

um marco importante. Esses aviões foram projetados especificamente para transportar grandes volumes de carga, oferecendo uma capacidade significativamente maior do que os aviões de passageiros convertidos para transporte de carga. Isso permitiu uma maior flexibilidade na movimentação de mercadorias, atendendo à crescente demanda global por transporte rápido e confiável ([ACI, 2019](#)).

### 2.1.3 Anos 1980 e 1990: Expansão Global e Integração Logística

Durante as décadas de 1980 e 1990, o transporte aéreo de cargas experimentou uma expansão global significativa. O crescimento do comércio internacional, impulsionado pela globalização e pela liberalização do comércio, aumentou a demanda por transporte aéreo de cargas. As companhias aéreas expandiram suas redes de rotas e estabeleceram parcerias estratégicas com operadores logísticos para oferecer serviços integrados de ponta a ponta.

Além disso, a automação e a informatização dos processos logísticos melhoraram a eficiência e a rastreabilidade das operações de transporte aéreo de cargas. Sistemas de gerenciamento de carga e tecnologias de rastreamento em tempo real permitiram maior visibilidade e controle sobre a cadeia de suprimentos, aumentando a confiança dos clientes nos serviços de transporte aéreo ([ACI, 2019](#)).

### 2.1.4 Século XXI: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade

No século XXI, o transporte aéreo de cargas continua a evoluir com o advento de novas tecnologias e um foco crescente em sustentabilidade. A digitalização e a automação avançadas estão transformando as operações logísticas, permitindo maior eficiência e precisão. Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial estão sendo usadas para otimizar rotas, prever demanda e melhorar a gestão de inventários.

A sustentabilidade tornou-se uma prioridade para a indústria do transporte aéreo de cargas. Companhias aéreas estão investindo em aeronaves mais eficientes em termos de consumo de combustível e em práticas operacionais que minimizam o impacto ambiental. De acordo com a ([EASA, 2020](#)), a introdução de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF) e o desenvolvimento de tecnologias de propulsão alternativa estão entre as iniciativas adotadas para reduzir as emissões de carbono.

### 2.1.5 O transporte aéreo no contexto brasileiro

De acordo com os relatórios do ([LABTRANS/UFSC, 2023](#)), o transporte aéreo no Brasil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do país. A infraestrutura aeroportuária, composta por uma vasta rede de aeroportos internacionais, regionais e locais, facilita a conexão entre diversas regiões, promovendo a integração nacional e o acesso a mercados globais. Nos últimos anos, o setor aéreo brasileiro tem

apresentado um crescimento significativo, impulsionado pela expansão das rotas e pela modernização da frota aérea, refletindo investimentos públicos e privados em infraestrutura e políticas governamentais de liberalização do mercado.

Apesar dos avanços, o setor enfrenta desafios importantes, como a necessidade de melhorias na infraestrutura aeroportuária, modernização dos sistemas de controle de tráfego aéreo e redução de custos operacionais. No entanto, o mercado brasileiro também apresenta oportunidades, especialmente no segmento de cargas aéreas, devido à crescente demanda por produtos perecíveis e bens de alto valor agregado. A localização geográfica estratégica do Brasil favorece a expansão das operações de carga, contribuindo para o desenvolvimento de novos serviços e rotas (LABTRANS/UFSC, 2023).

## 2.2 Características do serviço aéreo de carga

O serviço aéreo de carga desempenha um papel crucial no cenário logístico global, caracterizando-se pela sua capacidade de transportar mercadorias de alto valor agregado com rapidez e segurança. De acordo com a (ANAC, 2013), este tipo de serviço pode ser oferecido em duas modalidades principais: mista e exclusiva. Na modalidade mista, tanto passageiros quanto cargas são transportados na mesma aeronave, sendo a carga acomodada no *deck* principal ou no porão. Na modalidade exclusiva, as aeronaves são dedicadas exclusivamente ao transporte de carga.

A logística da carga aérea envolve uma série de procedimentos e trocas de informações para garantir que as mercadorias sejam transportadas de forma segura e eficiente. O processo logístico geralmente começa com o envio do produto do local de fabricação, seguido pelo transporte até o aeroporto de origem, onde é separado e embarcado na aeronave. No destino, a carga é retirada e transportada ao cliente final pelo agente de carga. A cadeia de fornecimento pode envolver vários atores, como a Receita Federal, despachantes, agentes de carga e companhias aéreas (LABTRANS/UFSC, 2023).

### 2.2.1 Tipos de Carga Aérea

A carga aérea é bastante diversificada e pode ser classificada de várias formas para facilitar seu manuseio e transporte. Segundo (ASHFORD et al., 2015), as principais categorias de carga aérea incluem:

- **Normais:** Mercadorias onde a segurança e confiabilidade são prioritárias, com a velocidade de entrega sendo menos crucial.
- **Perecíveis:** Produtos com vida útil limitada que necessitam de entrega rápida.

- **De Emergência:** Inclui itens vitais como medicamentos, onde a rápida entrega é essencial.
- **De Alto Valor:** Mercadorias de alto valor que requerem medidas adicionais de segurança.
- **Perigosas:** Produtos que apresentam riscos à saúde e segurança, necessitando de cuidados especiais durante o transporte.
- **Restritas:** Itens sujeitos a rigorosas regulamentações governamentais, como armas e explosivos.
- **Animais Vivos:** Exigem cuidados específicos durante o transporte, como alimentação e hidratação.

### 2.2.2 Vantagens do Transporte Aéreo de Carga

De acordo com (CHAGAS, 2022), as vantagens associadas ao transporte aéreo de carga são diversas, destacando-se pela rapidez, especialmente em trajetos longos e intercontinentais, e pela segurança, com baixo risco de perda ou danificação das mercadorias. Estas características tornam o transporte aéreo particularmente atrativo para o envio de produtos perecíveis, medicamentos, bens de luxo e componentes eletrônicos, que requerem uma entrega rápida e confiável. Além disso, a alta segurança no transporte aéreo contribui para a baixa taxa de sinistralidade, influenciando positivamente no valor percebido pelos usuários em comparação com outros modais de transporte como o terrestre, marítimo e ferroviário.

### 2.2.3 Desvantagens do Transporte Aéreo de Carga

O transporte aéreo apresenta algumas desvantagens significativas, como o alto custo por tonelada transportada e as limitações quanto ao tamanho e peso das mercadorias. Isso resulta em um perfil específico de carga aérea, tipicamente composta por produtos menores e de maior valor agregado. A capacidade limitada das aeronaves e os altos custos operacionais tornam o transporte aéreo menos viável para mercadorias volumosas ou de baixo valor.

### 2.2.4 Tipos de Aeronaves Utilizadas

De acordo com as especificações do (LABTRANS/UFSC, 2023) carga aérea pode ser transportada em diferentes tipos de aeronaves:

- **Aeronaves Cargueiras:** Exclusivamente dedicadas ao transporte de carga, com capacidade para carga unitizada no deque superior e carga unitizada ou a granel no porão.
- **Aeronaves de Passageiros ou *Full Pax*:** Utilizam a capacidade ociosa no porão para transportar carga, sendo uma opção flexível devido à frequência e variedade de destinos de voos comerciais, sendo as mais comuns no Brasil.
- **Aeronaves Combinadas:** Podem transportar passageiros e carga simultaneamente, sendo menos comuns no Brasil.

## 2.3 Empresas de Transporte Aéreo de Cargas

No setor de transporte aéreo de cargas, as operações podem ser conduzidas por dois tipos principais de empresas: as mistas e as exclusivamente cargueiras. As empresas mistas combinam o transporte de passageiros e cargas, utilizando o espaço disponível nos porões das aeronaves comerciais para gerar receita adicional. Já as empresas exclusivamente cargueiras dedicam-se integralmente ao transporte de mercadorias, utilizando aeronaves projetadas especificamente para esse fim (ANAC, 2013).

### 2.3.1 Empresas Mistas

As empresas mistas aproveitam a capacidade ociosa no porão das aeronaves de passageiros para transportar cargas. Esse modelo proporciona uma fonte complementar de receita, maximizando a utilização dos voos programados para passageiros. Um dos principais desafios enfrentados por essas empresas é a incerteza quanto à quantidade de bagagem despachada pelos passageiros, o que dificulta a previsão da capacidade disponível para carga. Além disso, existem restrições sobre os tipos de itens que podem ser transportados juntamente com passageiros, como artigos perigosos, que só são aceitos em pequenas quantidades ou são totalmente proibidos devido ao alto risco.

### 2.3.2 Empresas Exclusivamente Cargueiras

As empresas exclusivamente cargueiras operam aeronaves dedicadas ao transporte de mercadorias, oferecendo serviços de aeroporto a aeroporto, como a Cargolux e Atlas Air. Essas empresas não possuem um departamento de logística integrado, focando-se exclusivamente no transporte aéreo. Elas costumam operar em rotas regulares, muitas vezes internacionais, onde a competição é limitada, permitindo a redução de custos operacionais. Além disso, essas empresas frequentemente vendem sua capacidade de transporte por meio de contratos ACMI (*Aircraft, Crew, Maintenance and Insurance*), fornecendo aeronave, tripulação, manutenção e seguros para outras companhias ou voos charter.

Um problema recorrente para essas transportadoras é o desequilíbrio de fluxos (desbalanceamento), onde a demanda por transporte em um sentido da rota é significativamente maior do que no sentido oposto. Para mitigar esse problema, essas empresas geralmente operam em diversos *hubs* e adotam rotas definidas como “grandes círculos”, o que ajuda a otimizar a utilização das aeronaves e a minimizar voos vazios.

### 2.3.3 Empresas Integradoras

As empresas integradoras, ou de entregas expressas, oferecem um serviço completo de logística porta a porta, utilizando múltiplos modais de transporte (aéreo, terrestre e marítimo). Estas empresas, como a FedEx e a UPS, destacam-se por sua capacidade de planejar e executar operações logísticas complexas, garantindo a entrega rápida e eficiente das mercadorias. Elas possuem frotas próprias para todos os modais e infraestrutura para gerenciar toda a cadeia de suprimentos, desde o ponto de origem até o destino final.

Essas empresas também são conhecidas pela capacidade de rastreamento de pacotes em tempo real e pela garantia de entrega, fatores críticos para atender às exigências do comércio eletrônico e das estratégias de produção *just-in-time*. A FedEx, por exemplo, lidera o mercado mundial de transporte aéreo de carga, com um volume de 1,85 milhão de toneladas de carga internacional em 2011, seguida pela Emirates SkyCargo e pela UPS.

## 2.4 Economia e Logística do Transporte Aéreo de Cargas

O transporte aéreo de cargas é um elemento essencial na cadeia logística global, proporcionando rapidez e segurança no transporte de mercadorias de alto valor agregado e perecíveis. No entanto, essa modalidade enfrenta desafios significativos em termos de custo e infraestrutura. Esta seção explora a economia e a logística do transporte aéreo de cargas, com ênfase nos custos, receitas e nas particularidades operacionais desse setor. Apesar disso, o setor gera receitas significativas para as companhias aéreas. Em 2011, as receitas de frete aéreo atingiram cerca de 70 bilhões de dólares, representando aproximadamente 35% do valor do comércio mundial (ANAC, 2013). A carga aérea é crucial para o transporte de produtos de alto valor agregado e perecíveis, incluindo:

- Documentos técnicos e amostras de produção.
- Produtos perecíveis, como flores cortadas, frutas frescas, vegetais e frutos do mar.
- Bens eletrônicos de consumo e produtos farmacêuticos.
- Peças de vestuário de moda e produtos de luxo, como joias e obras de arte.
- Transporte emergencial de peças de reposição.

### 2.4.1 Custos

O transporte aéreo de cargas é significativamente mais caro em comparação com outros modos de transporte. Segundo o Banco Mundial, o custo do transporte aéreo pode ser de quatro a cinco vezes maior que o transporte terrestre e de doze a dezesseis vezes maior que o transporte marítimo. Esta diferença de custos é um fator determinante na escolha do modal para o transporte de mercadorias, especialmente considerando a concorrência crescente do transporte marítimo, que viu um crescimento anual médio de 8,9% entre 1980 e 2011, em comparação com 5,6% para o transporte aéreo de carga (ANAC, 2013).

Os principais custos associados ao transporte aéreo de carga incluem:

- **Custo de Capital das Aeronaves:** Depreciação e amortização da compra de aeronaves, além de alugueis por leasing.
- **Custos Diretos de Operação:** Combustível, manutenção, tripulação e seguros.
- **Taxas de Navegação e Aeroporto:** Taxas de pouso, permanência e navegação, baseadas no peso da aeronave e na extensão do sobrevoo.
- **Taxas de Capatazia:** Custos associados à movimentação e manuseio da carga nos terminais.
- **Custos de Administração:** Despesas administrativas gerais da empresa aérea.

De acordo com o Anuário do Transporte Aéreo de 2022, o custo do combustível é um dos maiores componentes dos custos operacionais (ANAC, 2022). No entanto, a comparação entre os custos operacionais das empresas cargueiras é complicada devido às diferentes formas de operação (combinadas, dedicadas e integradas) e ao nível de agregação dos relatórios financeiros. Por exemplo, a FedEx, uma empresa integradora, reporta 12,5% de seus custos operacionais como despesas com combustível, enquanto a British Airways, uma empresa mista, reporta 34,3%.

As frotas de aeronaves cargueiras tendem a ser mais antigas do que as frotas de passageiros, com uma idade média entre 14 e 28 anos, comparada a uma média global de 11 anos para todas as aeronaves. Essa diferença de idade resulta em menores custos de capital para as empresas cargueiras.

### 2.4.2 Receitas

As receitas de frete aéreo variam conforme a região. A Ásia é responsável pela maior parte das receitas globais, com 13,8 bilhões de dólares em 2011. Empresas mistas e exclusivamente cargueiras operam de maneira distinta, com companhias aéreas criando

divisões dedicadas para maximizar a utilização da capacidade de carga. A receita de carga para empresas mistas varia significativamente, com empresas asiáticas liderando em termos de participação de receita (ANAC, 2013).

### 2.4.3 Desafios e Competitividade

Conforme apontado por (ANAC, 2013), apesar das vantagens do transporte aéreo de carga, a operação de aeroportos exclusivamente dedicados à carga não é viável economicamente. Os principais *hubs* cargueiros, como os aeroportos de Manaus e Viracopos, também processam grandes volumes de passageiros. A competição entre aeroportos pela receita de carga é intensa, com os demandantes desses serviços sendo altamente sensíveis a custos e eficiência.

## 2.5 Principais aviões cargueiros disponíveis

De acordo com o relatório da "*World Air Cargo Forecast 2022-2041*" (BOEING, 2022), as aeronaves cargueiras são classificadas em três categorias principais: Corpo Padrão, Corpo Médio e Corpo Grande. A categoria de Corpo Padrão é composta por aeronaves que possuem capacidade de carga de até 45 toneladas e, geralmente, apresentam um corredor único. A maioria dessas aeronaves é obtida por meio da conversão de aviões originalmente projetados para o transporte de passageiros.

A categoria de Corpo Médio, que transporta entre 40 e 80 toneladas, e a de Corpo Grande, com capacidade superior a 80 toneladas, possuem fuselagens de corredor duplo. Essas aeronaves podem ser obtidas tanto por conversão de aviões de passageiros quanto por fabricação direta, dependendo das necessidades operacionais das companhias aéreas e da disponibilidade de recursos.

A tabela a seguir apresenta as principais aeronaves cargueiras em operação e suas respectivas categorias:

Tabela 1 – Classificação de aeronaves por capacidade de carga

| Corpo Padrão (<45 ton) | Corpo Médio (40-80 ton) | Corpo Grande (>80 ton) |
|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Boeing 727             | Boeing 767              | Boeing 747             |
| Boeing 737             | Boeing DC-10            | Boeing 777             |
| Boeing 757             | Airbus A300/A310        | Boeing MD-11           |
| Boeing MD-80           | Airbus A330             | Airbus A350            |
| Boeing DC-9            | Ilyushin Il-76TD        | Antonov An-124         |
| Airbus A320 Series     |                         | Ilyushin Il-96T        |

Figura 3 – Aeronaves por capacidade de carga.



Fonte: (AIRBUS, 2024).

## 2.6 Indicadores da Econômicos de Carga

### 2.6.1 Custos envolvendo uma operação de rota

A operação de uma aeronave em uma determinada rota envolve uma série de custos que devem ser analisados para garantir a viabilidade econômica da operação. Para compreender os fatores que impactam essa análise, este trabalho baseia-se em dados disponibilizados pelo Portal de Dados Abertos da (ANAC, 2024a), que publica mensalmente informações detalhadas sobre o desempenho operacional das companhias aéreas no Brasil. Além disso, os preços do Querosene de Aviação (QAV) serão obtidos através da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A avaliação econômica das operações aéreas será realizada com base em métricas essenciais para a análise do setor, incluindo o *Payload*, que representa a carga útil transportada pela aeronave; o ATK (*Available Ton Kilometer*, ou Toneladas-Quilômetro Disponíveis), que mede a capacidade total de carga disponível multiplicada pela distância voada; o RTK (*Revenue Ton-Kilometers*, ou Toneladas-Quilômetro Transportadas), que indica a quantidade de carga efetivamente transportada multiplicada pela distância percorrida; e o CATK (*Cost per Available Tonne-Kilometer*, ou Custo por Toneladas-Quilômetro Disponíveis), utilizado para medir a eficiência econômica da operação. Além disso, a distância entre aeroportos será outro fator essencial para a estimativa de consumo de combustível e custos operacionais.

A partir dessas métricas, será possível avaliar a viabilidade de diferentes aeronaves e configurações de frota para o transporte de cargas no Brasil.

### 2.6.2 Custos de combustível

Para simplificar a análise dos custos operacionais no transporte aéreo de cargas, este estudo focará no CATK Fuel, ou seja, considerará apenas o custo do combustível na métrica de *Cost per Available Tonne-Kilometer*. Outros custos operacionais, como tarifas

aeroportuárias, salários e despesas adicionais, serão desconsiderados nesta abordagem devido à sua variabilidade e complexidade. As tarifas aeroportuárias, por exemplo, podem variar significativamente dependendo do tamanho, tipo e tempo de permanência da carga no aeroporto, tornando-as subjetivas e difíceis de padronizar. Além disso, operações de carga aérea tendem a ser mais simples em termos de logística de pessoal, permitindo a exclusão de salários e outros gastos operacionais nesta análise.

Os dados referentes aos preços do QAV serão obtidos a partir da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que disponibiliza mensalmente informações detalhadas sobre os preços de distribuição de combustíveis em seu portal oficial. A ANP publica resoluções e tabelas que fornecem transparência e acesso público a esses dados, permitindo uma análise atualizada e precisa dos custos de combustível. O acesso aos dados pode ser feito diretamente pelo site da ANP, onde são divulgadas médias mensais, variações de preços e tendências do mercado de combustíveis no Brasil.

É importante destacar que o combustível representa uma parcela significativa dos custos operacionais das companhias aéreas. De acordo com o Anuário do Transporte Aéreo de 2022, divulgado pela (ANAC, 2024b), os gastos com combustível corresponderam a aproximadamente 41% das despesas totais das companhias aéreas em 2022. Esse percentual reforça a relevância de focar no CATK Fuel para avaliar a viabilidade econômica das operações de transporte aéreo de cargas, visto que qualquer oscilação no preço do combustível impacta diretamente os custos operacionais e a competitividade do modo de transporte aéreo.

### 2.6.3 Métricas da Aeronave, ATK, RTK e CATK

Para compreender a viabilidade técnica e econômica das operações aéreas de carga, é essencial analisar uma série de métricas fundamentais no setor da aviação. Entre essas métricas, destacam-se os parâmetros específicos das aeronaves, como carga útil máxima, consumo de combustível, alcance máximo, autonomia e taxa de consumo, além das métricas operacionais ATK, RTK e CATK. A combinação desses indicadores permite avaliar a eficiência operacional e econômica de cada modelo de aeronave utilizado no transporte aéreo de cargas.

#### 2.6.3.1 Métricas da Aeronave

Os principais fatores técnicos que influenciam o desempenho de uma aeronave cargueira incluem:

- **Carga Útil Máxima (KG):** Representa o peso máximo de carga que a aeronave pode transportar em condições ideais de operação.

- **Capacidade de Combustível (L):** Volume máximo de combustível que pode ser armazenado nos tanques da aeronave.
- **Alcance Máximo (KM):** Distância máxima que a aeronave pode percorrer com a carga útil máxima e o combustível disponível.
- **Autonomia Máxima (H):** Tempo total de voo que a aeronave consegue realizar antes de esgotar seu combustível.
- **Taxa de Consumo (L/H):** Quantidade de combustível consumida por hora de voo, sendo um fator essencial para calcular os custos operacionais.

### 2.6.3.2 Toneladas-Quilômetro Disponíveis (ATK)

O ATK é uma métrica que reflete a capacidade total de carga disponível multiplicada pela distância percorrida pela aeronave, dividido por 1000. Ele indica o potencial de oferta de transporte de cargas de uma companhia aérea (ANAC, 2025).

$$ATK = \frac{Payload_{max} \times \text{Distância Percorrida (km)}}{1000} \quad (2.1)$$

Onde:

- **$Payload_{max}$**  = Carga útil máxima da aeronave (em toneladas);
- **Distância Percorrida** = Quilômetros voados na operação.

### 2.6.3.3 Toneladas-Quilômetro Transportadas (RTK)

O RTK mede a quantidade de carga efetivamente transportada e paga pelo cliente, multiplicada pela distância percorrida. Ele representa a demanda real pelos serviços de transporte de carga aérea (ANAC, 2025).

$$RTK = \frac{Payload_{real} \times \text{Distância Percorrida (km)}}{1000} \quad (2.2)$$

Onde:

- **$Payload_{real}$**  = Peso real da carga transportada (em toneladas), que pode ser inferior ao Payload Máximo devido a restrições operacionais ou comerciais;
- **Distância Percorrida** = Quilômetros voados na operação.

Quando comparado ao ATK, o RTK indica o percentual de aproveitamento da capacidade disponível, O *Load Factor* (LF) é um indicador importante que mede essa eficiência:

$$LF = \frac{RTK}{ATK} \times 100\% \quad (2.3)$$

#### 2.6.3.4 Custo por Tonelada-Quilômetro Disponível (CATK)

O CATK mede o custo operacional de cada tonelada de carga disponível transportada por quilômetro. Essa métrica é fundamental para avaliar a competitividade do transporte aéreo de cargas, pois permite comparar os custos entre diferentes aeronaves, rotas e modelos de operação (ANAC, 2025).

$$CATK = \frac{\text{Custo Total da Operação}}{ATK} \quad (2.4)$$

Para simplificação, este estudo considerará o  $CATK_{Fuel}$ , focando apenas nos custos de combustível:

$$CATK_{Fuel} = \frac{\text{Custo do Combustível Total}}{ATK} \quad (2.5)$$

Onde:

- Custo do Combustível Total é dado por:

$$\text{Custo do Combustível} = QAV_{consumido} \times \text{Preço por Litro de QAV} \quad (2.6)$$

- $QAV_{consumido}$ : Quantidade total de combustível utilizado no voo;
- Preço por Litro de QAV: Valor médio do querosene de aviação, obtido através da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

## 2.7 Análise Exploratória de Dados

A Análise Exploratória de Dados (AED) é uma abordagem inicial utilizada para resumir as principais características de um conjunto de dados, frequentemente empregando métodos visuais e estatísticos. Introduzido por John Tukey em 1977, o conceito de AED se baseia na ideia de que, antes de aplicar técnicas estatísticas formais e inferenciais, é essencial explorar os dados para identificar padrões, detectar anomalias e formular hipóteses (TUKEY, 1977).

A AED desempenha um papel fundamental no processo de análise de dados, pois permite aos analistas obter uma compreensão inicial dos dados, avaliar sua estrutura, verificar suposições e decidir quais técnicas ou modelos são apropriados para a análise posterior. As principais ferramentas da AED incluem gráficos, tabelas de frequência, histogramas, diagramas de dispersão, entre outros.

### 2.7.1 Objetivos da Análise Exploratória de Dados

O principal objetivo da Análise Exploratória de Dados é entender as propriedades e a estrutura dos dados antes de avançar para análises mais complexas. Isso inclui:

- **Identificar padrões:** Descobrir tendências ou relações entre as variáveis.
- **Detectar erros:** Encontrar valores atípicos ou dados inconsistentes.
- **Obter hipóteses:** Desenvolver perguntas ou suposições que podem ser testadas em análises subsequentes.
- **Verificar premissas:** Avaliar se os dados seguem as premissas necessárias para aplicar determinados modelos estatísticos.

### 2.7.2 Técnicas Utilizadas na Análise Exploratória de Dados

A Análise Exploratória de Dados envolve uma série de técnicas, tanto gráficas quanto numéricas, que permitem uma exploração eficiente do conjunto de dados. Algumas das técnicas que serão utilizadas são:

- **Gráficos de Barras:** Adequados para dados categóricos, eles mostram a frequência de diferentes categorias de forma simples e visualmente eficaz.
- **Mapas de Calor (*Heatmaps*):** Utilizados para visualizar relações entre variáveis em grandes conjuntos de dados, representando valores por meio de cores.
- **Mapas de Malha:** Utilizados para visualizações de ponto inicial e ponto final em mapas.

## 2.8 Pesquisa Operacional (PO)

A Pesquisa Operacional (PO) é uma área da matemática aplicada que utiliza modelos matemáticos, estatísticos e computacionais para auxiliar na tomada de decisões e na otimização de processos complexos. Seu principal objetivo é maximizar ou minimizar uma função de interesse, como custos, tempo ou lucro, sujeita a um conjunto de restrições. De acordo com (HILLIER; LIEBERMAN, 2021), a PO segue um ciclo estruturado que envolve as seguintes etapas:

1. **Definição do Problema:** Identificação do objetivo a ser otimizado e as restrições que limitam as possíveis soluções.
2. **Formulação Matemática:** Construção de um modelo que represente o problema real por meio de variáveis de decisão, funções objetivo e restrições matemáticas.

3. **Solução do Modelo:** Aplicação de métodos de otimização matemática.
4. **Análise e Implementação:** Interpretação dos resultados obtidos e sua aplicação prática na tomada de decisões.

O (WINSTON, 2003), em seu livro "*Operations Research: Applications and Algorithms*", destaca que a PO é essencial para a tomada de decisões estratégicas e operacionais, sendo amplamente aplicada em diversas áreas, como logística (roteirização de meios de transporte), manufatura (planejamento de produção) e finanças (gestão de investimentos).

### 2.8.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) é uma técnica da Pesquisa Operacional voltada para a otimização de problemas nos quais a função objetivo e as restrições são expressas por equações e inequações lineares. Essa abordagem é amplamente utilizada na modelagem de problemas de alocação de recursos, planejamento de produção, logística e finanças. Segundo (WINSTON, 2003), um problema de PL pode ser formalmente definido como:

$$\min \text{ ou } \max f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.7)$$

Sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (2.8)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (2.9)$$

$$\vdots \quad (2.10)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (2.11)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

Em que  $x_j$  são as variáveis de decisão,  $c_j$  os coeficientes da função objetivo,  $a_{ij}$  os coeficientes das restrições e  $b_i$  os limites impostos.

A resolução de problemas de PL pode ser feita por métodos analíticos, como o Método Simplex, desenvolvido por George Dantzig, ou por métodos baseados em pontos interiores (MANSILHA et al., 2017).

O (WINSTON, 2003) destaca que a Programação Linear é uma ferramenta fundamental na otimização de redes de transporte, gestão de estoque e balanceamento de produção, sendo amplamente utilizada em sistemas logísticos e operacionais para reduzir custos e aumentar eficiência.

### 2.8.2 Programação Inteira

A Programação Inteira (PI) é uma extensão da Programação Linear, na qual algumas ou todas as variáveis de decisão são restritas a valores inteiros. De acordo com (WINSTON, 2003), um problema de Programação Inteira pode ser definido como:

$$\min \text{ ou } \max f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.13)$$

Sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (2.14)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

A principal dificuldade da PI em relação à PL é que, enquanto a Programação Linear pode ser resolvida eficientemente por métodos como o Simplex, a inclusão de variáveis inteiras torna o problema difícil, exigindo abordagens específicas, como ramificação e delimitação (*branch-and-bound*), planos de corte (*cutting planes*) e métodos híbridos.

Quando um problema contém tanto variáveis contínuas quanto inteiras, ele se classifica como Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed Integer Linear Programming*). Essa técnica é utilizada em otimização de malhas logísticas e problemas de roteirização, pois permite modelar decisões binárias (ativar ou não uma rota, selecionar ou não um aeroporto) juntamente com decisões contínuas, como a quantidade de carga transportada. Os autores (HILLIER; LIEBERMAN, 2021) ressaltam que a MILP é amplamente empregada em problemas complexos, como redes de transporte aéreo, planejamento de cadeias de suprimentos e alocação de recursos em sistemas produtivos.

### 2.8.3 PuLP

O PuLP é uma biblioteca de otimização matemática em Python utilizada para modelagem e resolução de problemas de Programação Linear e Programação Linear Inteira Mista. Desenvolvido para ser de fácil utilização, ele permite que problemas de otimização sejam formulados de maneira intuitiva e resolvidos por meio de diversos *solvers*, como CBC, CPLEX e Gurobi. Apesar de algumas limitações, como desempenho inferior em comparação com *solvers* comerciais, o CBC (*Coin-or Branch and Cut*) foi utilizado neste trabalho por ser uma solução gratuita e de código aberto.

De acordo com (COIN-OR Foundation, 2024), organização dedicada ao desenvolvimento de ferramentas de código aberto para Pesquisa Operacional e Otimização Matemática, a modelagem de um problema no PuLP envolve a definição de uma função objetivo, variáveis de decisão e restrições, seguindo a estrutura clássica da Pesquisa Operacional. O código em Python segue a lógica matemática do problema, permitindo a análise de soluções de forma eficiente.

## 3 Análise do Modo de Transporte Aéreo de Cargas

A análise do modo de transporte aéreo de cargas é uma parte importante deste trabalho, pois permite ter uma compreensão do funcionamento do mercado de transporte aéreo de cargas. Este capítulo visa explorar as características e desafios enfrentados pelo setor, com base em dados e informações extraídas de fontes relevantes.

Para isso, será realizada uma análise detalhada do transporte aéreo de cargas, com base nas informações apresentadas no livro "*Air Cargo Guide*", publicado pela *Airports Council International* (ACI, 2019). Este material oferece uma visão abrangente sobre o setor, fornecendo informações importantes para a avaliação do mercado global e sua aplicação no contexto brasileiro.

### 3.1 Modelos de Negócios de Carga Aérea

A indústria de carga aérea utiliza diversos modelos de negócios para atender às demandas do mercado global. Entre os modelos predominantes estão os transportadores totalmente de carga, os integradores, os transportadores de carga de barriga e os transportadores mistos.

Informações obtidas a partir do livro "*Air Cargo Guide*" (ACI, 2019), indicam que o frete aéreo é responsável por cerca de 1% do frete total por peso transportado no mundo todo, mas cerca de 35 % do valor total do frete. A partir dessa estatística, pode-se influir que grande parte das cargas são *commodities* de alto valor a serem transportadas por via aérea.

#### 3.1.1 Transportadoras Totalmente de Carga

Transportadoras totalmente de carga operam aeronaves dedicadas exclusivamente ao transporte de mercadorias. Exemplos incluem Cargolux e Atlas Air. Elas trabalham principalmente com despachantes, que consolidam pequenas remessas de diversos clientes em cargas maiores. Essa abordagem permite economias de escala e contratos de longo prazo, proporcionando estabilidade na demanda e proteção contra flutuações de preços.

#### 3.1.2 Transportadoras de Carga de Barriga

Transportadoras de carga de barriga são companhias aéreas de passageiros que utilizam o espaço nos porões das aeronaves para transportar mercadorias. Aproximada-

mente 40 a 50% do frete aéreo global é movimentado dessa forma. A capacidade de carga depende da demanda de passageiros, o que pode dificultar o equilíbrio entre oferta e demanda de carga. No entanto, os custos são baixos e podem aumentar a rentabilidade dos voos.

### 3.1.3 Integradores (Porta a Porta)

Integradores, ou transportadoras expressas, como UPS, FedEx e DHL, oferecem serviços de entrega porta a porta. Com o crescimento do comércio eletrônico, empresas como Alibaba e Amazon aumentaram a demanda por esses serviços. A projeção é que essa demanda cresça 20 % nos próximos cinco anos (ACI, 2019). Essas empresas controlam toda a rede de transporte, desde aeronaves e veículos de entrega até *hubs* de distribuição, garantindo entregas rápidas e confiáveis, mas a um custo mais elevado.

### 3.1.4 Transportadoras Combinadas

Transportadoras combinadas operam tanto aeronaves de passageiros quanto cargueiros dedicados. Companhias aéreas como Lufthansa, KLM/Air France, Cathay Pacific Airways e Korean Air são exemplos desse modelo. Elas trabalham com despachantes para oferecer serviços de coleta e entrega, podendo obter até metade de suas receitas de carga em algumas rotas. Esse modelo permite flexibilidade e otimização da capacidade de transporte.

## 3.2 Demanda de Carga Aérea

O setor de carga aérea está sendo impactado pelo crescimento do comércio eletrônico. Essa tendência em evolução tem colocado pressão nos canais de vendas para entregas mais rápidas e serviços ideais de cadeia de suprimentos.

É evidente o crescimento e especialização de serviços porta a porta oferecidos pelas transportadoras expressas de carga e maior atenção e serviços oferecidos aos clientes de carga aérea pelas companhias aéreas de transporte de passageiros, à medida que aeronaves de passageiros maiores e com maior capacidade de carga entram no mercado de aviação.

À medida que a perspectiva de mercados globais se torna cada vez mais uma realidade, a demanda por movimentos de carga aérea continuará a crescer como parte de um sistema de logística em expansão que enfatizará maiores velocidades de processamento, maior eficiência, serviços ao cliente mais especializados, entrega com tempo definido e custos reduzidos.

A demanda por serviços de carga aérea é variada, contendo vários fatores que influenciam tanto o processo logístico dos operadores quanto os prazos e os custos para o

cliente final.

### 3.2.1 Origem e Destino

A maioria dos envios aéreos começa e termina fora dos aeroportos, sendo influenciada por padrões industriais e demográficos. A localização de origem e destino de uma remessa afeta diretamente as opções de fretamentos e os custos associados.

### 3.2.2 Tipo de Mercadoria

O tipo de mercadoria é crucial para determinar os requisitos do serviço aéreo. Fatores como perecibilidade, valor, peso e dimensões físicas influenciam a necessidade e a conveniência do transporte aéreo. Cada mercadoria possui características específicas que impactam sua logística.

### 3.2.3 Nível de Serviço Desejado

Encontrar o equilíbrio entre custo e qualidade do serviço é fundamental. Considerações como tempo de trânsito, confiabilidade e segurança (especialmente para mercadorias perecíveis) são essenciais na escolha do transporte aéreo em comparação com outras opções.

### 3.2.4 Tamanho da Remessa

A maioria das remessas aéreas é pequena e precisa ser consolidada em paletes ou contêineres. Remessas maiores podem exigir manuseio especial ou aeronaves específicas, mas também podem ser transportadas para outros modais de transporte devido a custos ou eficiência.

### 3.2.5 Fatores que Afetam a Demanda por Aeroportos

A demanda por carga em um aeroporto é influenciada pela localização e volume de produção, consumo e distribuição de mercadorias na sua área de influência. Outros fatores importantes incluem a presença e competitividade de aeroportos ou modos de transporte alternativos.

Aeroportos relativamente livres de congestionamento e localizados perto de consumidores que exigem a rapidez e a conveniência do comércio eletrônico são considerados qualificados para tal finalidade.

### 3.2.6 Fatores Regionais Influentes

Ao considerar a área de influência de um aeroporto, os fatores de demanda mais importantes que afetariam as previsões de carga são tendências econômicas gerais, bem como tendências demográficas e industriais regionais específicas, como:

- **Demografia Regional:** Os níveis de população e renda em uma região afetam a demanda por remessas aéreas de entrada.
- **Emprego e Produção Regional:** A produção regional de bens influencia a demanda por serviços aéreos de saída e a necessidade de componentes importados para apoiar essa produção.
- **Padrões de Localização Industrial:** Decisões de localização e expansão industrial, baseadas em fatores de custo e eficiência, impactam o crescimento dos movimentos de carga aérea.
- **Mudanças na Demanda por Commodities:** Fatores econômicos e demográficos que afetam os mercados de destino também influenciam o crescimento da carga aérea.
- **Práticas e Padrões de Distribuição:** A logística na fabricação e distribuição impulsiona a demanda por transporte aéreo. O desenvolvimento de centros de distribuição regionais pode gerar novas demandas de carga aérea, baseadas na eficiência de transferência para outras regiões.

## 3.3 Previsões de Demanda de Carga Aérea

As previsões de demanda de carga aérea fornecem informações para o gerenciamento e planejamento do aeroporto, devendo considerar as forças de mercado subjacentes com base em avaliações de mercado e teoria econômica, bem como as capacidades físicas e restrições de um aeroporto. Cada aeroporto tem suas particularidades e, embora cada operação de carga tenha alguns elementos comuns, as práticas para as métricas de planejamento exige uma revisão cuidadosa das atividades atuais e passadas.

Embora a previsão seja uma tarefa complexa, é possível melhorar a confiabilidade das previsões de tráfego seguindo um conjunto de princípios que têm se mostrado eficazes. Esses princípios incluem:

- Utilizar os dados mais confiáveis e atualizados disponíveis. Uma base sólida e precisa de dados de tráfego é indispensável; caso não esteja disponível, é necessário consultar diferentes fontes de dados para obter as melhores estimativas possíveis.

- Compreender os problemas e eventos que influenciam as previsões é fundamental, assim como é importante comunicar claramente aos usuários a natureza e as limitações dessas previsões.
- A escolha da metodologia e técnica de previsão mais adequadas é importante. Diferentes aspectos das previsões de tráfego exigem técnicas distintas, dependendo da disponibilidade e qualidade dos dados, assim como dos requisitos de detalhamento da previsão. É importante aplicar suposições consistentes tanto nas variáveis de entrada quanto nos ajustes das previsões para garantir a coerência interna e externa.

Prever a demanda futura no setor de transporte aéreo de cargas é um processo que envolve a análise de diversos fatores. Primeiramente, é necessário examinar as tendências econômicas globais e regionais, uma vez que elas afetam diretamente o volume de comércio e, conseqüentemente, a demanda por transporte. Em épocas de crescimento econômico, há um aumento na movimentação de mercadorias, enquanto em períodos de recessão, a demanda por serviços logísticos tende a diminuir. Além disso, é importante considerar as características específicas das mercadorias transportadas, como peso, volume, perecibilidade e valor agregado, pois cada tipo de carga possui requisitos logísticos distintos, impactando na escolha do modal de transporte mais adequado.

Essa abordagem analítica oferece uma visão que abrange os fatores que influenciam a demanda por serviços de carga aérea. Ao identificar esses fatores e entender como eles interagem, as empresas do setor podem realizar um planejamento estratégico mais assertivo, ajustando suas operações de acordo com as necessidades do mercado. Além disso, essa análise permite otimizar a gestão operacional, garantindo uma distribuição mais eficiente de recursos, tanto em termos de capacidade de carga quanto de pessoal e infraestrutura.

## 3.4 Mercado Global

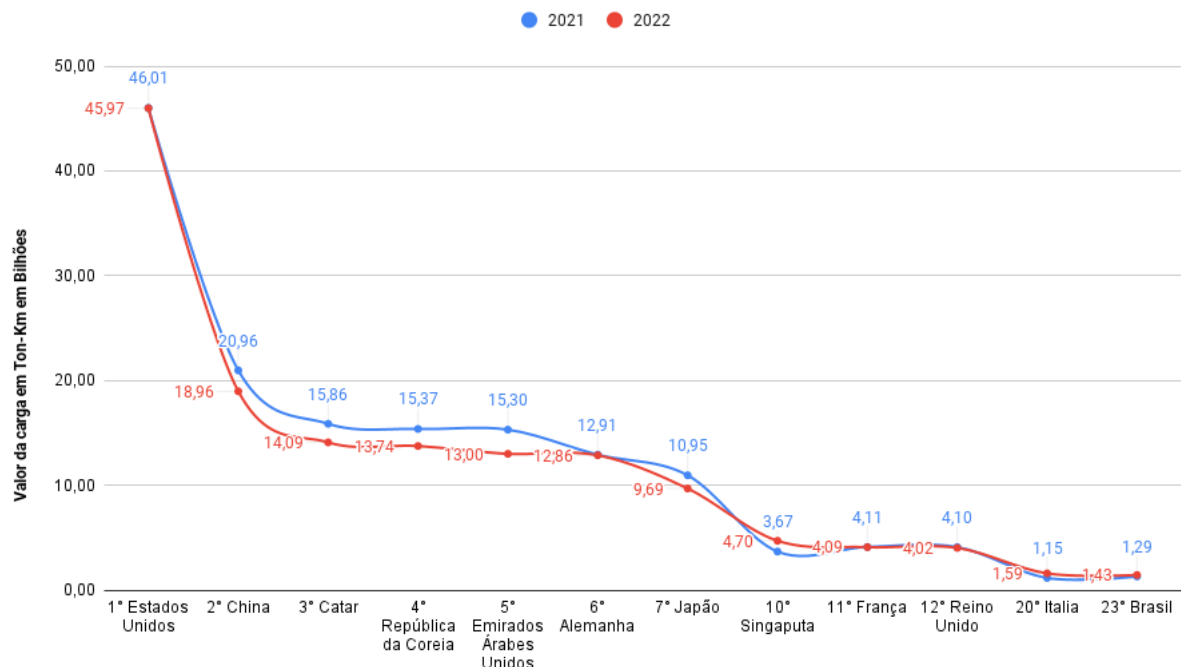
O mercado global de transporte aéreo de cargas desempenha um papel fundamental na economia mundial, com destaque para países que possuem uma infraestrutura bem desenvolvida e estão fortemente integrados às cadeias globais de suprimentos. Nas imagens a seguir, é possível ver algumas análises que ilustram o panorama do setor aéreo de cargas, focando principalmente no mercado dos Estados Unidos.

A figura 4 apresenta um gráfico de elaboração própria, com dados retirados da "Apresentação dos Resultados Estatísticos do Transporte Aéreo de 2022", da (ICAO, 2022), que demonstra um *ranking* global dos países que mais realizam transporte aéreo de cargas, medido em toneladas-quilômetro (Ton-Km). Os Estados Unidos aparecem como o líder desse *ranking*, seguidos por China e Qatar. O domínio dos EUA nesse setor é

resultado de uma infraestrutura bem estabelecida e de grandes *hubs* de carga, que servem como pontos de distribuição para empresas como FedEx e UPS. A China, por sua vez, tem se destacado pelo aumento de exportações, impulsionadas por sua industrialização e o crescimento do comércio eletrônico. O Brasil aparece apenas na 23ª posição, mostrando um leve crescimento quando comparado os anos de 2021 e 2022, mas com valores tímidos comparado com a dimensão do nosso país.

Figura 4 – Ranking de países por carga transportadas, em Ton-Km (Bilhões).

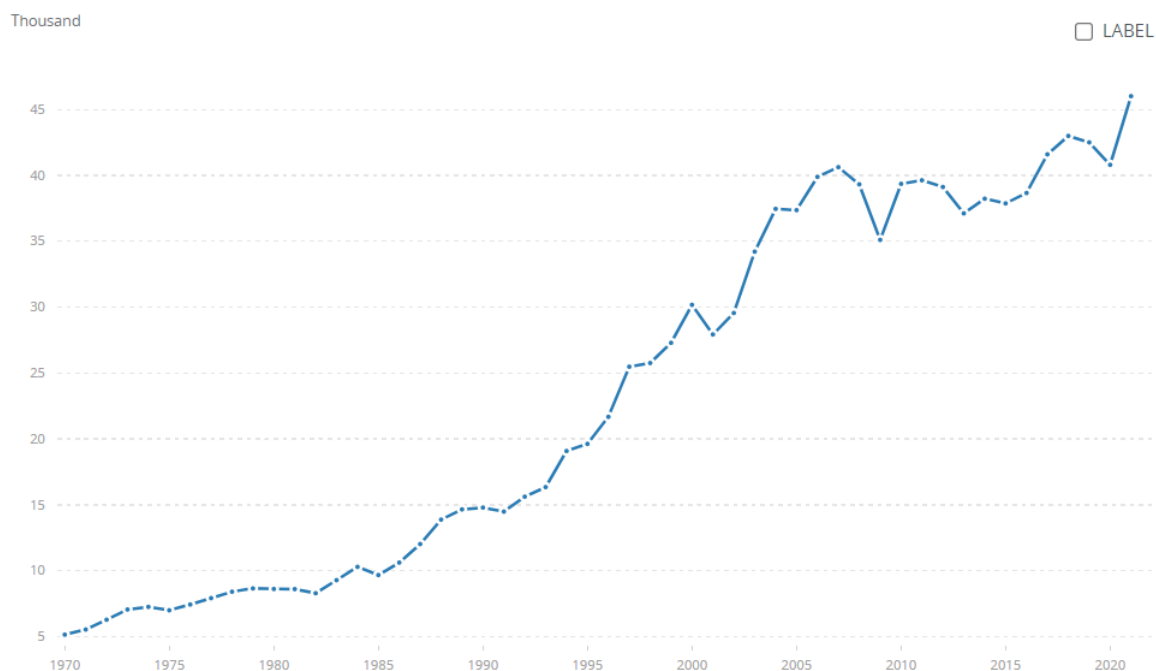
**Ranking de países de carga realizadas em serviços regulares, em Ton-Km (Bilhões)**



Fonte: (ICAO, 2022).

Conforme apresentado pelo (World Bank, 2024), a figura 5 o volume de transporte aéreo de cargas realizado nos Estados Unidos, medido em milhões de toneladas-quilômetro. O gráfico mostra uma tendência de crescimento constante no transporte de mercadorias dentro do mercado americano, reforçando a importância do modo de transporte aéreo para atender às demandas logísticas. De acordo com o relatório da Boeing (2022), esse aumento está fortemente relacionado ao crescimento do comércio eletrônico, à integração de cadeias de suprimentos globais e à demografia favorável dos Estados Unidos.

Figura 5 – Transporte aéreo, carga (milhões de toneladas-quilômetro) - Estados Unidos.

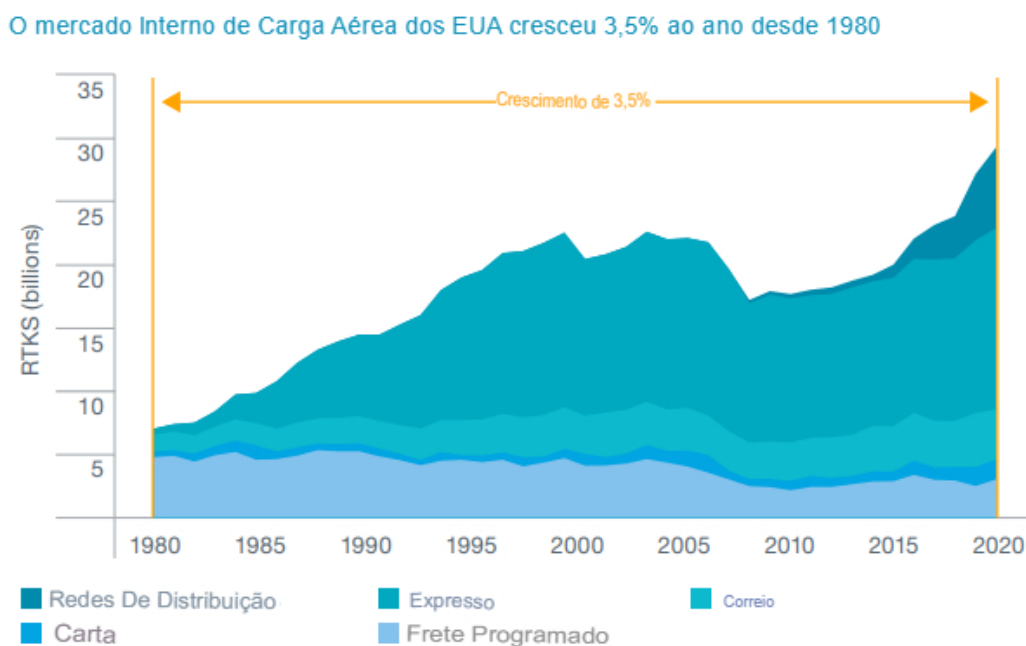


Fonte: (World Bank, 2024).

A Boeing, por meio do seu relatório "World Air Cargo Forecast 2022-2041" (BOEING, 2022), elaborou gráficos demonstrando a performance da carga aérea mundial, além de desenvolver algumas previsões. As figuras 6 e 7 ilustram o estado atual do mercado americano. A figura 6 representa o crescimento efetivo do mercado doméstico de carga aérea nos Estados Unidos, de 3,5% ao ano. Observa-se um crescimento estável nos últimos anos, com picos que coincidem com o aumento das atividades de comércio eletrônico, especialmente durante a pandemia de COVID-19. Durante esse período, a demanda por transporte aéreo de carga foi essencial para o envio de mercadorias urgentes, incluindo equipamentos médicos e insumos. O crescimento no setor de comércio eletrônico impulsionou, em 2020, o tráfego de carga aérea em 14% em comparação com 2019. (BOEING, 2022)

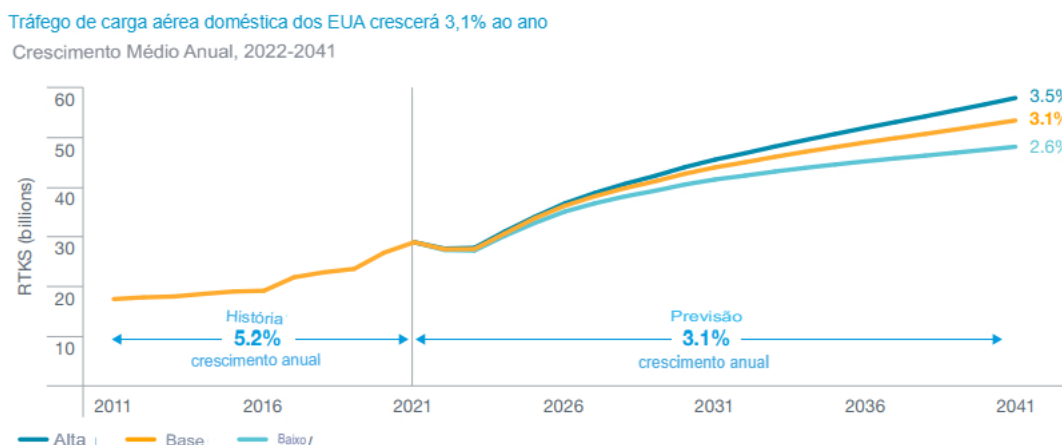
A figura 7 traz uma projeção do crescimento do tráfego doméstico de carga aérea nos Estados Unidos para as próximas décadas. O gráfico mostra uma expectativa de crescimento anual do RTKs (Revenue Ton-Kilometers ou Toneladas-Quilômetro Transportadas) de 4,3% nos próximos 10 anos e 3,1% nos próximos 20 anos (2022-2041) impulsionado principalmente pela digitalização do comércio e pela demanda por entregas rápidas, particularmente no setor de comércio eletrônico. Esse aumento no tráfego de cargas aéreas no mercado doméstico americano reflete o fortalecimento das operações de logística porta a porta, com empresas como Amazon e Alibaba expandindo suas operações de *e-commerce* no país.

Figura 6 – Crescimento do mercado doméstico de carga aérea dos EUA.



Fonte: (BOEING, 2022).

Figura 7 – Previsão de crescimento do tráfego doméstico de carga aérea nos EUA.

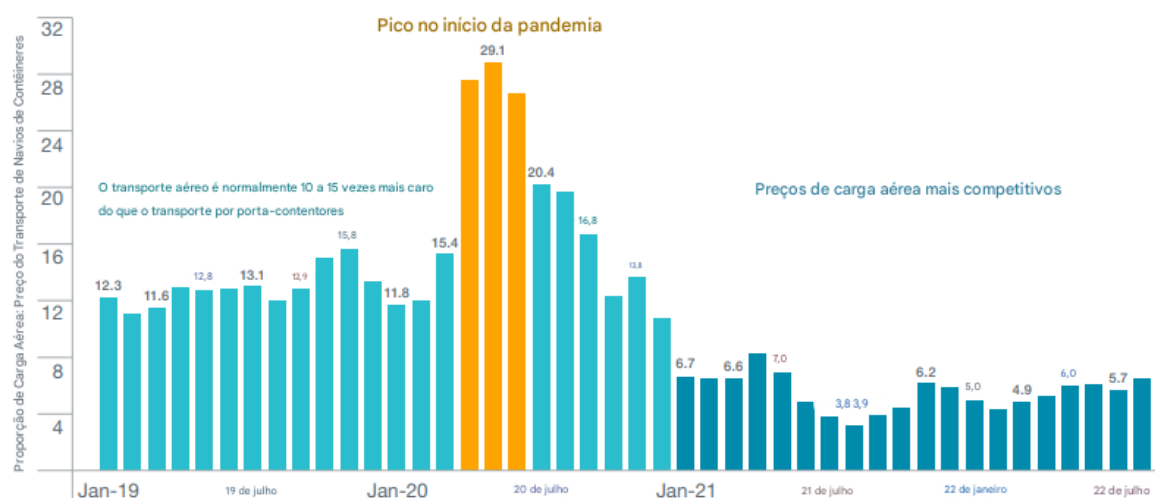


Fonte: (BOEING, 2022).

A figura 8 compara os custos do transporte aéreo com os containers marítimos, mostrando a diferença significativa de preço entre esses dois modais. O transporte aéreo, embora mais caro, oferece vantagens em termos de rapidez e confiabilidade, especialmente para mercadorias que necessitam de transporte rápido, como eletrônicos e produtos perecíveis. Mas o que vale destacar é como o transporte aéreo de cargas ficou mais competitivo durante e após a pandemia. Antes da pandemia de COVID-19, o serviço de carga aérea custava de 10 a 15 vezes mais do que o marítimo, entretanto, desde o início da pandemia esse número caiu para 4 a 8 vezes mais caro.

Figura 8 – Comparação do preço da carga aérea em relação aos containers marítimos.

Serviço de carga aérea: mais competitivo do que nunca

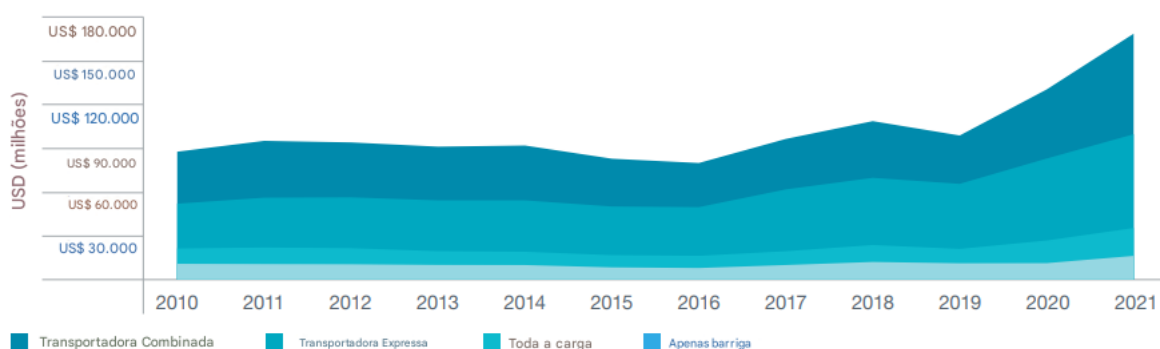


Fonte: (BOEING, 2022).

Outro ponto positivo a se destacar, é que mesmo o preço do mercado aéreo de cargas estarem consideravelmente mais baratos, a receita adquirida nesse mesmo período pelas empresas de cargas foram maiores que na pré-pandemia. Na figura 9 mostra que em 2021, as receitas de carga aérea atingiram 170 mil milhões de dólares, acima dos 100 mil milhões de dólares em 2019, sendo a maior da história, de acordo com a (BOEING, 2022).

Figura 9 – Receitas do mercado de carga aérea na pré-pandemia.

Receitas de carga aérea excedem níveis pré-pandemia

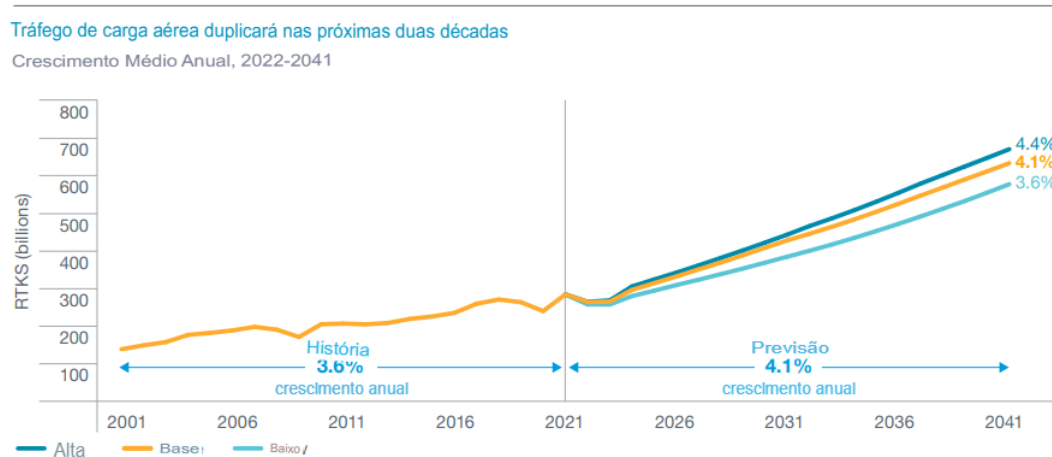


Fonte: (BOEING, 2022).

Como é possível ver, o comércio e a produção industrial serão os principais impulsionadores do crescimento da carga aérea. A (BOEING, 2022) preve que o comércio e a produção industrial crescerá 2,8%, e 2,2%, respectivamente, nas próximas duas décadas. Acompanhando esse crescimento, o tráfego aéreo de carga, medido em receitas

por tonelada-quilômetro, crescerá em média 4,1% anualmente entre 2022 e 2041, como mostrado no gráfico abaixo.

Figura 10 – Previsão do tráfego de carga aérea nas próximas décadas.

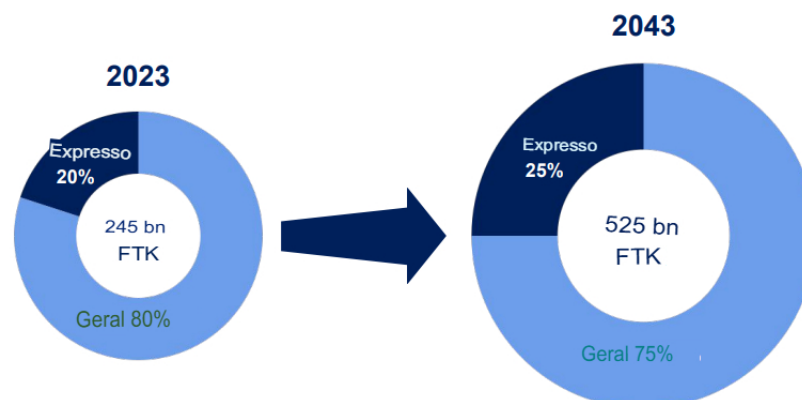


Fonte: (BOEING, 2022).

Olhando agora para o relatório "*Global Market Forecast 2024*", feito anualmente pela (AIRBUS, 2024), há uma projeção interessante para o setor de cargas aéreas. O documento indica que, nos próximos 20 anos, o crescimento do FTK (*Freight Tonne Kilometres*, ou Toneladas-Quilômetro de Carga) mais que dobrará em relação ao ano de 2023, evidenciando uma significativa expansão no volume de cargas transportadas em um curto período de tempo. Além disso, o mesmo relatório aponta um aumento de 51% na frota global de aeronaves Airbus dedicadas exclusivamente ao transporte de cargas, reforçando a crescente demanda por capacidade de frete aéreo no cenário mundial.

Figura 11 – Tráfego mundial de carga aérea (bilhões de toneladas de carga por km).

Tráfego mundial de carga aérea (mil milhões de toneladas-quilômetro)



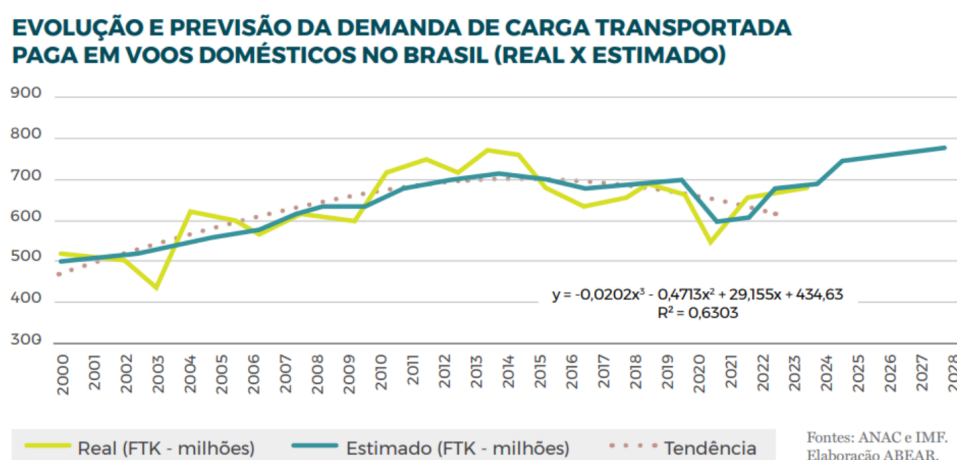
Fonte: (AIRBUS, 2024).

## 3.5 Mercado Brasileiro

O mercado brasileiro de transporte aéreo de cargas tem apresentado uma trajetória de crescimento significativo, impulsionado pelo aumento da demanda e pela modernização das operações logísticas. De acordo com as projeções da (ABEAR, 2022), tanto os voos domésticos quanto os internacionais demonstram uma tendência ascendente na quantidade de carga transportada paga (*Freight Tonne Kilometers* – FTK), indicando um setor em evolução.

A figura 13, focada no transporte doméstico de carga, evidencia um crescimento moderado ao longo dos anos, apesar de algumas flutuações. O volume transportado apresenta oscilações entre 2000 e 2020, com um impacto significativo durante o período da pandemia de COVID-19, refletido por uma queda acentuada em 2020. No entanto, a recuperação subsequente sugere um mercado resiliente, com uma tendência de crescimento projetada para os próximos anos. A curva estimada mostra que, até 2028, o volume de carga doméstica deve continuar crescendo, superando os 800 milhões de FTK.

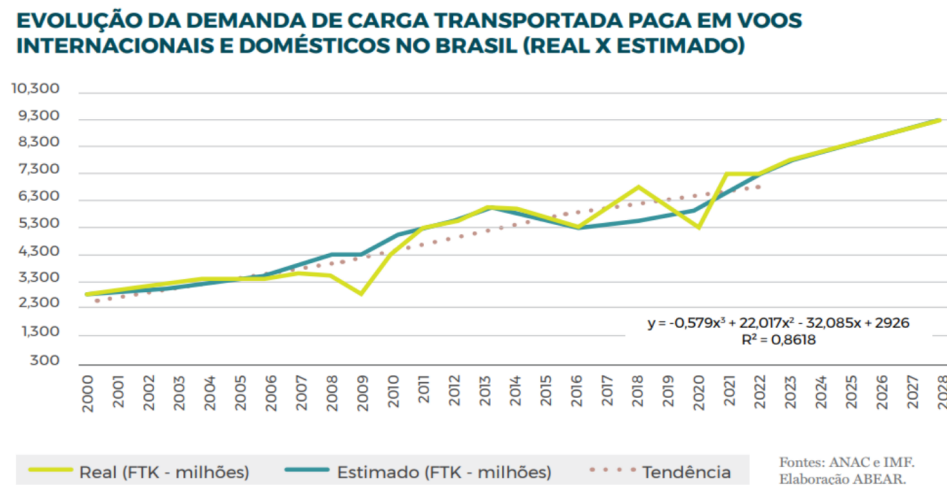
Figura 12 – Demanda estimada de carga transportada para voos domésticos.



Fonte: (ABEAR, 2022).

Já o mercado brasileiro de cargas aéreas considerando tanto voos domésticos quanto internacionais exibe um comportamento ainda mais robusto. A análise revela um crescimento constante desde o início dos anos 2000, com um aumento expressivo no volume de carga transportada após 2010. Assim como no mercado doméstico, houve uma queda durante a pandemia, seguida de uma rápida recuperação. A projeção sugere que, até 2028, o transporte aéreo de carga no Brasil poderá atingir aproximadamente 9,3 bilhões de FTK, consolidando o país como um ator importante no cenário global.

Figura 13 – Demanda estimada de carga para voos domésticos e internacionais.



Fonte: ([ABEAR, 2022](#)).

A modelagem matemática utilizada nas previsões indica que a tendência de crescimento é sustentada por fatores como o aumento da digitalização logística, maior integração entre empresas de transporte e a expansão da infraestrutura aeroportuária. Além disso, a demanda crescente por e-commerce e transporte expresso de mercadorias tem impulsionado a necessidade de soluções ágeis e eficientes no setor aéreo.

## 4 Análise dos Aviões Selecionados

Neste capítulo, será realizada uma análise detalhada das aeronaves selecionadas, considerando suas características técnicas e operacionais, e seu potencial de adequação às necessidades do mercado brasileiro.

As aeronaves escolhidas para estudo compreendem diferentes famílias de fabricantes renomados, como Airbus, Boeing, Embraer e ATR, cada uma oferecendo capacidades distintas em termos de carga, eficiência de combustível e alcance. Este estudo considera modelos amplamente utilizados no setor, como o A330-200F, 737-800 BCF, e o ATR 72-600F, além de variantes convertidas para transporte de carga, como o A321 P2F, todos os modelos de aeronaves citados anteriormente na tabela 18.

A análise incluirá, além de uma análise dos modelos, uma avaliação de métricas das especificações gerais, pesos e motores, proporcionando *insights* sobre a viabilidade técnica e econômica de cada modelo. Finalizando com uma análise de dados das rotas realizadas.

Adicionalmente, será considerado o impacto ambiental e a flexibilidade operacional dessas aeronaves, fatores críticos para um setor que busca equilibrar eficiência e sustentabilidade. Dessa forma, este capítulo pretende oferecer uma visão abrangente sobre as vantagens e limitações das aeronaves cargueiras no contexto do mercado brasileiro, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas na seleção de frota e planejamento de operações.

### 4.1 Família Airbus

A Airbus é conhecida por sua engenharia inovadora e sua capacidade de atender às demandas do mercado global de carga aérea com modelos altamente eficientes. O A330-200F, projetado exclusivamente para transporte de carga, é uma aeronave de fuselagem larga que se destaca por sua alta capacidade de carga útil e alcance intercontinental. Já o A330-300 P2F e o A321 P2F são conversões de aeronaves de passageiros para cargueiros (*Passenger-to-Freighter*), oferecendo maior flexibilidade para operadores que buscam aproveitar aeronaves já existentes e, assim, reduzir custos de aquisição.

Esses modelos são amplamente utilizados em redes logísticas que exigem alta frequência de voos e capacidade para transportar tanto cargas regulares quanto mercadorias de alto valor, como eletrônicos e medicamentos. A Airbus tem investido em melhorias contínuas, como a otimização de peso estrutural e atualizações nos motores, garantindo menor consumo de combustível e, também, emissões reduzidas.

4.1.1 Especificações Gerais

A tabela a seguir apresenta uma comparação de algumas das especificações mais relevantes para as aeronaves analisadas, incluindo informações como: comprimento da fuselagem, envergadura, tipo de motor, alcance máximo, quantidade de tanques de combustível, e a capacidade de assentos antes da conversão para cargueiro (quando aplicável).

Esses dados foram obtidos a partir de manuais técnicos das aeronaves, Airbus: *Aircraft Characteristics for Airport Planning*, publicados pela própria fabricante, Airbus, no site ([Airbus, 2025](#)).

Essa análise comparativa permite entender as capacidades e as características operacionais de cada modelo, auxiliando na avaliação de sua aplicação para diferentes rotas e cenários logísticos.

Tabela 2 – Características de diferentes modelos de aeronaves.

| Modelo       | Comprimento (m) | Envergadura (m) | Motor                 | Alcance Máximo (km) | Tanques Máximos | Assentos Máximos |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| A330-200F    | 58,8            | 60,3            | Rolls-Royce Trent 700 | 7.400               | 5               | 246              |
| A330-300 P2F | 63,7            | 60,3            | Rolls-Royce Trent 700 | 6.500               | 5               | 277              |
| A321 P2F     | 44,5            | 35,8            | CFM56-5B              | 4.200               | 3               | 244              |

A tabela 2, apresentada acima, resume algumas das principais características técnicas das aeronaves escolhidas para análise, que são utilizadas para transporte de carga. Esses modelos foram projetados ou adaptados para atender às necessidades de diferentes operações logísticas, com variações em termos de tamanho, alcance e capacidade.

O A330-200F e o A330-300 P2F possuem dimensões maiores (comprimento e envergadura) em comparação ao A321 P2F, o que reflete a capacidade superior de carga e alcance desses modelos. Essas dimensões maiores também tornam esses aviões mais adequados para operações intercontinentais e de longo alcance.

Os três modelos utilizam motores modernos e confiáveis que combinam desempenho e eficiência. O Rolls-Royce Trent 700, presente nos modelos da família A330, é amplamente reconhecido por sua capacidade de suportar operações de longo alcance, enquanto o CFM56-5B do A321 P2F oferece economia de combustível para rotas de médio curso.

O A330-200F lidera em termos de alcance máximo, com 7.400 km, tornando-o ideal para operações intercontinentais. O A330-300 P2F apresenta alcance um pouco inferior (6.500 km), mas ainda adequado para rotas de alta densidade. O A321 P2F, com alcance de 4.200 km, é mais adequado para rotas regionais ou de curto a médio alcance.

Os modelos A330 apresentam maior capacidade de combustível, permitindo maior autonomia em relação ao A321. Em termos de capacidade de passageiros (na configuração original), o A330-300 P2F lidera com 277 assentos, seguido pelo A330-200F e o A321 P2F.

Ao analisar os dados, é possível notar a versatilidade da família Airbus, com aeronaves capazes de operar tanto em rotas de alta demanda e longa distância quanto em rotas regionais. Essa flexibilidade faz com que os modelos sejam amplamente utilizados em operações de carga aérea global.

A escolha entre os modelos dependerá das necessidades específicas de cada operação. Para rotas intercontinentais e transporte de grandes volumes de carga, os modelos da família A330 são as melhores opções. Já o A321 XLR é uma escolha eficiente e econômica para rotas regionais e serviços de carga expressa, onde o tempo de resposta é crucial.

#### 4.1.2 Tabela de Pesos

Tabela 3 – Características gerais dos pesos operacionais da Família Airbus.

| Modelo       | MTOW (ton) | MZFW (ton) | OEW (ton) | MFW (ton) | Carga Máxima (ton) |
|--------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------------|
| A330-200F    | 233        | 177        | 118       | 110       | 70                 |
| A330-300 P2F | 229        | 175        | 122       | 107       | 63                 |
| A321 XLR     | 93         | 79         | 48        | 23        | 27                 |

Os dados apresentados na tabela 3 descrevem os principais limites de peso para diferentes modelos da Família Airbus.

O primeiro, MTOW (*Maximum Take-Off Weight*), é o peso máximo que a aeronave pode atingir no momento da decolagem, incluindo a fuselagem, combustível, carga e tripulação; esses valores garantem a segurança estrutural e operacional durante a decolagem. Enquanto MZFW (*Maximum Zero Fuel Weight*) refere-se ao peso total da aeronave (incluindo carga paga), desconsiderando o peso do combustível; esse parâmetro é importante para balancear o peso e garantir estabilidade no voo. Já na terceira coluna, há o OEW (*Operating Empty Weight*), que indica o peso da aeronave vazia, incluindo sistemas operacionais e tripulação, mas sem considerar combustível ou carga paga. MFW (*Maximum Fuel Weight*) é o peso máximo de combustível que a aeronave pode transportar, diretamente ligado à autonomia do voo. Enquanto o valor de Carga Máxima é o peso máximo de carga paga que pode ser transportada dentro dos limites operacionais definidos pelo fabricante.

Ao analisar a tabela 3, é possível ver que o A330-200F apresenta a maior capacidade de decolagem (233 toneladas), demonstrando sua adequação para operações de longo alcance e grande volume de carga, como já tinha sido concluído nas especificações gerais. Enquanto isso, o A330-300 P2F é ligeiramente menor em MTOW (229 toneladas), mas ainda oferece alta capacidade.

Ao observar a coluna OEW, vê-se que A330-200F tem um peso operacional vazio menor do que o A330-300 P2F, o que indica uma configuração mais otimizada para

carga. O A321 P2F, sendo uma aeronave menor, apresenta o menor OEW (48 toneladas), refletindo sua vocação para operações regionais e rotas de curto alcance.

A partir da coluna MFW, é possível ver que o A330-200F e o A330-300 P2F possuem capacidades de combustível semelhantes (110 e 107 toneladas, respectivamente), garantindo alcance intercontinental, enquanto o A321 P2F, com apenas 23 toneladas de combustível, é mais adequado para distâncias curtas a médias.

Sobre a capacidade de Carga Máxima, conclui-se que o A330-200F lidera com 70 toneladas, tornando-o ideal para transporte de grandes volumes. Em contrapartida, o A321 P2F transporta até 27 toneladas, o que é adequado para rotas regionais ou cargas expressas.

Os dados destacam como os diferentes modelos da família Airbus atendem a diversas demandas operacionais, desde rotas de curto alcance com o A321 P2F, até operações de grande capacidade e longo alcance com o A330-200F e o A330-300 P2F. O que confirma a análise precedente feita nas especificações gerais.

### 4.1.3 Atualizações de Motores

| Modelo do Motor       | Aeronave     | Rated Thrust (kN) | Fluxo de Combustível na Decolagem (kg/s) | TSFC (kg/s)/kN |
|-----------------------|--------------|-------------------|------------------------------------------|----------------|
| Rolls-Royce Trent 700 | A330-200F    | 316               | 1.13                                     | 0.0036         |
| Rolls-Royce Trent 700 | A330-300 P2F | 316               | 1.13                                     | 0.0036         |
| CFM56-5B              | A321 P2F     | 142               | 0.65                                     | 0.0046         |

Tabela 4 – Tabela de Desempenho de Motores.

A tabela 4 apresenta os dados técnicos de desempenho dos motores utilizados pelas aeronaves da família Airbus. Cada coluna contém informações importantes relacionadas à eficiência e ao consumo de combustível.

*Rated Thrust* representa a força de empuxo máxima produzida pelo motor, medida em quilonewtons (kN); força essencial para determinar a capacidade de decolagem e desempenho em voo. Já o fluxo de combustível na decolagem indica a taxa de consumo de combustível por segundo durante a decolagem, quando o motor opera próximo à sua potência máxima. E, por fim, o TSFC (*Thrust Specific Fuel Consumption*) refere-se ao consumo específico de combustível em relação ao empuxo produzido; uma medida de eficiência, onde valores menores indicam motores mais econômicos.

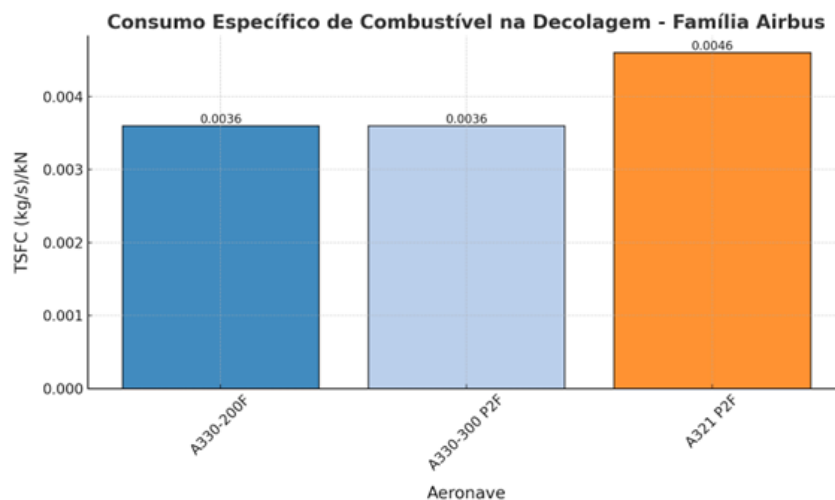
Esses motores foram projetados para oferecer alta confiabilidade e desempenho em operações específicas (longo ou médio alcance).

Ao analisar a *Rated Thrust*, pode-se ver que os motores Rolls-Royce Trent 700 dos modelos A330-200F e A330-300 P2F fornecem o maior empuxo (316 kN), comprovando sua capacidade de suportar grandes cargas em rotas de longo alcance. O CFM56-5B, utilizado

no A321 P2F, oferece menor empuxo (142 kN), adequado para o tamanho e as necessidades operacionais de uma aeronave menor e projetada para rotas regionais.

O Trent 700 consome 1,13 kg/s de combustível durante a decolagem, refletindo o consumo esperado para um motor de grande porte utilizado em aeronaves maiores. Enquanto o CFM56-5B tem um consumo significativamente menor (0,65 kg/s), adequado para o menor empuxo e o perfil operacional do A321 P2F.

Figura 14 – Consumo específico de combustível durante a decolagem: Airbus.



Fonte: Autor Próprio.

O gráfico apresentado na figura 15 mostra o consumo específico de combustível (TSFC) durante a decolagem para as aeronaves da família Airbus analisadas. Eles destacam as diferenças de eficiência dos motores em função da força de empuxo fornecida, sendo uma ferramenta útil para comparações operacionais. A partir da tabela e do gráfico, observa-se que o Trent 700 apresenta um TSFC de 0,0036 kg/s/kN, demonstrando alta eficiência para motores de grande porte, já o CFM56-5B possui um TSFC de 0,0046 kg/s/kN, indicando uma eficiência ligeiramente inferior. Isso é esperado em motores de menor porte, otimizados para voos de curta duração e menor carga.

A análise destaca e confirma que os motores Rolls-Royce Trent 700 são ideais para operações de longo alcance e transporte de grandes volumes de carga, enquanto o CFM56-5B é uma solução eficiente e econômica para aeronaves de menor porte e rotas regionais. A escolha do motor está diretamente ligada às especificações operacionais da aeronave e às demandas das rotas a serem atendidas.

#### 4.1.4 Rotas Utilizadas

A tabela 5 a seguir fornece uma visão geral de rotas operadas por diferentes aeronaves da família Airbus, incluindo informações sobre operador, origem e destino, distância,

tempo médio de voo e a configuração de assentos antes da conversão para cargueiro.

Tabela 5 – Rotas e principais informações.

| Operador      | Origem         | Destino         | Distância (km) | Tempo Médio de Voo | Assentos       |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|
| Turkish Cargo | Istanbul (IST) | Dubai (DXB)     | 3.000          | 4h 15min           | 246 (A330-200) |
| DHL Aviation  | Leipzig (LEJ)  | Hong Kong (HKG) | 8.700          | 11h 30min          | 277 (A330-300) |
| Titan Airways | Londres (STN)  | Belfast (BFS)   | 540            | 1h 20min           | 244 (A321)     |

As rotas refletem a versatilidade das aeronaves Airbus, abrangendo distâncias curtas, médias e longas. A rota operada pela Titan Airways entre Londres (STN) e Belfast (BFS), com 540 km e duração de apenas 1h 20min, destaca o uso eficiente do A321 para rotas regionais. A rota da Turkish Cargo entre Istambul (IST) e Dubai (DXB), cobrindo 3.000 km em 4h 15min, demonstra a capacidade do A330-200F para conectar mercados próximos com alto volume de carga. A rota da DHL *Aviation* entre Leipzig (LEJ) e Hong Kong (HKG), com 8.700 km e duração de 11h 30min, evidencia a capacidade do A330-300 P2F em transportar carga intercontinentalmente.

A tabela também destaca a configuração de assentos nas versões de passageiros antes da conversão para cargueiro. Aeronaves como o A321 P2F e o A330-300 P2F eram originalmente projetadas para transportar grandes volumes de passageiros. Suas fuselagens permitem excelente adaptação para carga, mantendo um ótimo equilíbrio entre capacidade e alcance. Isso mostra a flexibilidade dos modelos Airbus para atender às demandas de transporte aéreo em diferentes mercados.

## 4.2 Família Boeing

A Boeing domina amplamente o mercado global de cargueiros, oferecendo soluções adaptadas a diferentes necessidades. O 737-800 BCF é o modelo mais utilizado para transporte regional, destacando-se por sua versatilidade em operações de curto e médio alcance. O 767-300 BCF é amplamente reconhecido por sua capacidade intermediária, sendo uma escolha frequente para rotas transcontinentais. Por sua vez, o 747-8F, com sua enorme capacidade de carga, é uma das maiores aeronaves cargueiras do mundo, ideal para operações de alto volume em rotas globais.

Esses modelos são preferidos pelas companhias aéreas devido à confiabilidade mecânica e ao suporte técnico global, além de oferecerem custo operacional competitivo e eficiência no consumo de combustível. Vale ressaltar que todas as informações para construção dessa seção foram obtidas do site ([The Boeing Company, 2025](#)).

A tabela 6 fornece uma visão abrangente das características técnicas das aeronaves cargueiras da família Boeing.

Tabela 6 – Dados de Aeronaves Boeing.

| Modelo      | Comprimento (m) | Envergadura (m) | Motor     | Alcance Máximo (km) | Tanques Máximos | Assentos Máximos |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------|-----------------|------------------|
| 737-300 SF  | 33,4            | 28,9            | CFM56-3   | 4.200               | 3               | 149              |
| 737-800 BCF | 39,5            | 35,8            | CFM56-7B  | 4.500               | 3               | 189              |
| 767-300 BCF | 54,9            | 47,6            | PW4062    | 6.000               | 7               | 269              |
| 747-8F      | 76,3            | 68,4            | GENx-2B67 | 8.000               | 8               | 467              |

O 747-8F é a maior aeronave, além de liderar em alcance máximo, sendo ideal para rotas intercontinentais de alto volume de carga. O 767-300 BCF também apresenta dimensões consideráveis, além de um bom alcance, tornando-o uma escolha intermediária para transporte de carga em rotas longas, sendo amplamente utilizado para rotas transatlânticas e outras operações intercontinentais. Os modelos 737-300 SF e 737-800 BCF, menores em comprimento e envergadura, são ideais para rotas regionais e de médio alcance.

Ao observar a capacidade de assentos, vê-se que a aeronave 747-8F suporta até 467 assentos na configuração de passageiros, evidenciando sua fuselagem de grande porte, isso reflete na capacidade de conversão para grandes volumes de carga. Enquanto o 767-300 BCF, com 269 assentos, é uma aeronave eficiente em rotas que demandam menos volume de carga. Para finalizar, os modelos 737-300 SF e 737-800 BCF têm menor capacidade (149 e 189 assentos, respectivamente), indicando sua vocação para transporte regional. A quantidade de tanques está ligada diretamente à maior ou menor autonomia para transportar volumes de carga por determinadas distâncias sem reabastecimento.

Os diferentes modelos da família Boeing apresentam uma ampla gama de capacidades e aplicações operacionais, atendendo a diferentes necessidades do mercado de carga aérea. Essa análise demonstra como a Boeing projetou suas aeronaves para atender às diversas demandas do mercado, desde operações regionais até transporte global de carga.

#### 4.2.1 Tabela de Pesos

Tabela 7 – Características de Peso das Aeronaves da Família Boeing.

| Modelo      | MTOW (ton) | MZFW (ton) | OEW (ton) | MFW (ton) | Carga Máxima (ton) |
|-------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------------|
| 737-300 SF  | 65         | 58         | 35        | 20        | 20                 |
| 737-800 BCF | 79         | 66         | 42        | 26        | 23                 |
| 767-300 BCF | 187        | 140        | 94        | 60        | 54                 |
| 747-8F      | 447        | 330        | 213       | 190       | 140                |

A tabela 7 apresenta as características de peso das aeronaves da família Boeing, destacando parâmetros como o peso máximo de decolagem (MTOW), o peso máximo sem combustível (MZFW), o peso operacional vazio (OEW), a capacidade máxima de combustível (MFW) e a carga máxima transportável. Esses dados revelam as diferenças operacionais e capacidades entre os modelos analisados, variando desde aeronaves regionais até cargueiros de grande porte para rotas intercontinentais.

Como mostrado anteriormente, o 737-300 SF e o 737-800 BCF são modelos menores, projetados principalmente para rotas regionais ou de médio alcance. Seus valores de MTOW (65 e 79 toneladas, respectivamente) e cargas máximas (20 e 23 toneladas) refletem sua capacidade limitada, mas eficiente, para mercados locais. O menor OEW (35 e 42 toneladas) e menor capacidade de combustível (20 e 26 toneladas) evidenciam sua adequação para operações econômicas de curta distância, com rápida rotação entre voos.

Por outro lado, o 767-300 BCF e o 747-8F são projetados para operações de médio e longo alcance, com altas capacidades de carga e autonomia. O 767-300 BCF, com MTOW de 187 toneladas e carga máxima de 54 toneladas, é ideal para rotas transcontinentais. Já o 747-8F, com valores impressionantes de MTOW (447 toneladas), MFW (190 toneladas) e carga máxima (140 toneladas), destaca-se como o cargueiro líder em operações globais, conectando mercados intercontinentais com alto volume de carga. Esses modelos demonstram a versatilidade da Boeing em atender diferentes demandas logísticas, desde transporte regional rápido até operações globais de alto impacto.

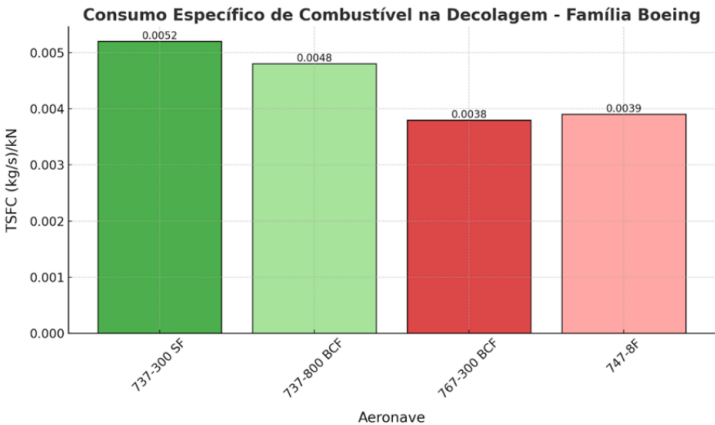
4.2.2 Atualizações de Motores

Tabela 8 – Dados de Motores da Família Boeing.

| Modelo do Motor        | Aeronave    | Rated Thrust (kN) | Fluxo de Combustível na Decolagem (kg/s) | TSFC (kg/s)/kN |
|------------------------|-------------|-------------------|------------------------------------------|----------------|
| CFM56-3                | 737-300 SF  | 89                | 0,46                                     | 0,0052         |
| CFM56-7B               | 737-800 BCF | 121               | 0,58                                     | 0,0048         |
| PW4062                 | 767-300 BCF | 282               | 1,08                                     | 0,0038         |
| GE <sub>nx</sub> -2B67 | 747-8F      | 296               | 1,15                                     | 0,0039         |

A tabela 8 apresenta informações sobre o desempenho dos motores utilizados nas aeronaves cargueiras da família Boeing, destacando parâmetros como empuxo máximo (*Rated Thrust*), fluxo de combustível durante a decolagem e o consumo específico de combustível por quilonewton de empuxo (TSFC). Esses dados permitem analisar a eficiência operacional de cada motor em diferentes modelos de aeronaves.

Figura 15 – Consumo específico de combustível durante a decolagem: Boeing.



Fonte: Autor Próprio.

Os motores CFM56-3 e CFM56-7B, utilizados nos modelos 737-300 SF e 737-800 BCF, respectivamente, oferecem empuxos menores (89 kN e 121 kN) e baixos fluxos de combustível (0,46 kg/s e 0,58 kg/s). Esses valores refletem a eficiência dessas aeronaves para rotas regionais e de curto a médio alcance, onde o consumo de combustível reduzido é essencial para manter baixos custos operacionais. O TSFC também é maior nesses motores (0,0052 e 0,0048), o que é esperado em motores menores otimizados para transporte leve.

Por outro lado, os motores PW4062 e GEnx-2B67, utilizados nos modelos de maior porte 767-300 BCF e 747-8F, fornecem empuxos significativamente mais altos (282 kN e 296 kN) e consomem mais combustível durante a decolagem (1,08 kg/s e 1,15 kg/s). Esses motores são projetados para operações de longo alcance, com maior volume de carga, e apresentam melhor eficiência em termos de TSFC (0,0038 e 0,0039), evidenciando sua capacidade de manter um consumo proporcional ao empuxo gerado.

Os dados destacam que os motores maiores, como o GEnx-2B67, são otimizados para rotas intercontinentais com alta demanda de carga, enquanto os motores menores, como o CFM56-3, atendem operações regionais com eficiência e baixo custo. Essa diversidade reflete a estratégia da Boeing em atender diferentes mercados, proporcionando soluções eficientes e adaptadas às necessidades específicas de cada segmento de transporte aéreo.

Em resumo, a análise do desempenho dos motores evidencia a flexibilidade da Família Boeing para atender desde operações regionais até rotas intercontinentais, otimizando o consumo de combustível e o desempenho operacional para diferentes tamanhos de aeronaves e demandas logísticas.

### 4.2.3 Rotas Utilizadas

Tabela 9 – Rotas Operadas por Diferentes Aeronaves da Família Boeing.

| Operador      | Origem           | Destino             | Distância (km) | Tempo Médio de Voo | Assentos       |
|---------------|------------------|---------------------|----------------|--------------------|----------------|
| Cargo Air     | Leipzig (LEJ)    | Sofia (SOF)         | 1.300          | 2h 10min           | 149 (B737-300) |
| West Atlantic | Madrid (MAD)     | Londres (LTN)       | 1.250          | 2h 15min           | 189 (B737-800) |
| LATAM Cargo   | Miami (MIA)      | Florianópolis (FLN) | 6.600          | 8h 30min           | 269 (B767-300) |
| Cargolux      | Luxemburgo (LUX) | São Paulo (GRU)     | 9.500          | 11h 45min          | 467 (B747-8)   |

A tabela 9 apresenta rotas operadas por aeronaves da família Boeing, destacando a origem, o destino, a distância percorrida, o tempo médio de voo e a capacidade de assentos na configuração original de passageiros. Esses dados revelam a versatilidade das aeronaves Boeing para atender a diferentes demandas logísticas, desde operações regionais até voos intercontinentais.

As aeronaves B737-300 e B737-800, operadas pela *Cargo Air* e *West Atlantic*, são ideais para rotas regionais e de curto alcance. Com distâncias de 1.300 km e 1.250 km e tempos de voo de cerca de 2 horas, essas aeronaves oferecem soluções eficientes

para transporte rápido de carga em mercados locais. Suas capacidades de assentos (149 e 189) refletem suas origens como aeronaves comerciais otimizadas para transporte de passageiros.

Por outro lado, as aeronaves maiores, como o B767-300 e o B747-8, destacam-se nas rotas de longo alcance, como as operadas pela LATAM Cargo e Cargolux. O B767-300 conecta Miami a Florianópolis em 8h 30min, enquanto o B747-8 opera na rota Luxemburgo-São Paulo, percorrendo 9.500 km em 11h 45min. Essas aeronaves foram projetadas para transportar grandes volumes de carga, evidenciado por suas capacidades superiores de assentos (269 e 467) na configuração original.

Em resumo, a análise destaca a capacidade da Boeing de atender a diferentes necessidades do mercado, com aeronaves projetadas para rotas regionais rápidas e de curto alcance, bem como para operações intercontinentais de alto volume. Essa flexibilidade permite que os operadores ajustem suas frotas às demandas específicas de cada rota, maximizando eficiência e economia.

4.3 Família Embraer

Os cargueiros da Embraer representam uma solução eficiente para transporte em rotas regionais e inter-regionais, sendo ideais para mercados emergentes e operações em áreas de difícil acesso. Os modelos E190F e E195F oferecem excelente flexibilidade operacional, combinada com custos competitivos e alta confiabilidade, o que os torna atrativos para redes de carga menores e focadas na última milha (Embraer, 2025).

Tabela 10 – Características das aeronaves da família Embraer.

| Modelo | Comprimento (m) | Envergadura (m) | Motor       | Alcance Máximo (km) | Tanques Máximos | Assentos Máximos |
|--------|-----------------|-----------------|-------------|---------------------|-----------------|------------------|
| E190F  | 36,2            | 28,7            | GE CF34-10E | 3.500               | 2               | 114              |
| E195F  | 38,7            | 28,7            | GE CF34-10E | 3.700               | 2               | 124              |

A tabela 10 apresenta as principais características das aeronaves E190F e E195F da família Embraer, destacando dimensões, motor, alcance, capacidade máxima de tanques e assentos na versão de passageiros. Esses dados mostram como as aeronaves são otimizadas para operações regionais e de médio alcance, com eficiência operacional e versatilidade.

O E190F, com um comprimento de 36,2 metros e alcance de 3.500 km, é adequado para rotas regionais de curta a média distância. Ele é equipado com o motor GE CF34-10E, conhecido por sua confiabilidade e economia de combustível. Com capacidade de até 114 assentos em sua configuração de passageiros, o modelo atende eficientemente a mercados com demanda moderada.

Por outro lado, o E195F oferece maior capacidade, com um comprimento de 38,7 metros e alcance de 3.700 km. Ele compartilha o mesmo motor do E190F, garantindo uma

operação econômica e simplificando a manutenção para operadores com frotas mistas. Sua capacidade de 124 assentos na configuração de passageiros o torna ideal para mercados que exigem maior capacidade de transporte sem sacrificar eficiência.

Em resumo, a família Embraer combina eficiência, confiabilidade e alcance adequado para atender operações regionais e de médio porte. Os dados ressaltam a flexibilidade das aeronaves para diversos cenários logísticos, tornando-as populares entre operadores em mercados competitivos.

### 4.3.1 Tabela de Pesos

Tabela 11 – Características de Peso das Aeronaves da Família Embraer.

| Modelo | MTOW (ton) | MZFW (ton) | OEW (ton) | MFW (ton) | Carga Máxima (ton) |
|--------|------------|------------|-----------|-----------|--------------------|
| E190F  | 56         | 47         | 32        | 18        | 13                 |
| E195F  | 60         | 50         | 33        | 20        | 14                 |

A tabela 11 apresenta os principais parâmetros de peso das aeronaves E190F e E195F, modelos cargueiros da família Embraer, projetados para rotas regionais e de curta a média distância. Esses dados destacam a eficiência e a adequação dessas aeronaves para mercados que demandam operações rápidas, frequentes e com menor volume de carga.

O E190F possui um MTOW de 56 toneladas e uma capacidade máxima de carga de 13 toneladas, sendo uma escolha eficiente para rotas regionais, especialmente em regiões com aeroportos menores ou com alta frequência de voos curtos. Sua OEW de 32 toneladas e MFW de 18 toneladas refletem sua configuração otimizada para operações econômicas, garantindo boa autonomia com baixo consumo de combustível.

O E195F, com MTOW de 60 toneladas e capacidade de carga de 14 toneladas, oferece uma leve vantagem em termos de capacidade e alcance, graças ao seu MFW de 20 toneladas. Essa aeronave é ideal para atender a mercados um pouco mais exigentes, onde é necessário transportar maior volume de carga em rotas semelhantes às do E190F. Sua maior capacidade de carga e autonomia o tornam mais versátil, especialmente em operações logísticas mais robustas.

Em resumo, os dois modelos da Embraer oferecem soluções complementares e econômicas para o transporte de carga em rotas regionais. Eles são ideais para operadores que buscam atender mercados locais e regionais com eficiência, mantendo custos operacionais baixos e alta frequência de operações.

### 4.3.2 Atualizações de Motores

Tabela 12 – Dados de motores da família Embraer.

| Modelo do Motor | Aeronave | Rated Thrust (kN) | Fluxo de Combustível na Decolagem (kg/s) | TSFC (kg/s)/kN |
|-----------------|----------|-------------------|------------------------------------------|----------------|
| GE CF34-10E     | E190F    | 82                | 0,40                                     | 0,0049         |
| GE CF34-10E     | E195F    | 82                | 0,40                                     | 0,0049         |

A tabela 12 apresenta informações sobre o motor GE CF34-10E, que equipa os modelos E190F e E195F da família Embraer. Esses motores foram projetados para aeronaves regionais, oferecendo alta eficiência e desempenho para operações de curto a médio alcance.

O *Rated Thrust* de 82 kN demonstra que o motor tem capacidade adequada para suportar as operações de transporte de carga dos modelos Embraer, que são conhecidos por suas fuselagens leves e econômicas. O empuxo relativamente moderado reflete o foco desses motores em eficiência, permitindo atender mercados locais com menor consumo de combustível em comparação a aeronaves maiores.

O fluxo de combustível durante a decolagem de 0,40 kg/s e o TSFC de 0,0049 (kg/s)/kN evidenciam o desempenho eficiente do motor. Esse consumo específico é compatível com operações em rotas regionais, onde a economia de combustível é um fator crucial para reduzir custos operacionais. A uniformidade nos dados entre os modelos E190F e E195F reforça a versatilidade do motor GE CF34-10E, adaptável a ambas as aeronaves sem comprometer o desempenho.

Em resumo, o motor GE CF34-10E se destaca como uma solução confiável e econômica para as aeronaves cargueiras regionais da Embraer. Sua eficiência de combustível e capacidade de empuxo o tornam ideal para operadores que buscam atender a demandas logísticas locais, mantendo custos reduzidos e alta frequência de operações. A padronização do motor entre os dois modelos facilita a manutenção e reduz os custos associados ao gerenciamento da frota.

### 4.3.3 Rotas Utilizadas

Tabela 13 – Rotas operadas pela família Embraer.

| Operador   | Origem         | Destino        | Distância (km) | Tempo Médio de Voo | Assentos (versão passageiro) |
|------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|------------------------------|
| Azul Cargo | Campinas (VCP) | Recife (REC)   | 2.150          | 3h 0min            | 114 (E190)                   |
| Azul Cargo | Campinas (VCP) | Salvador (SSA) | 1.450          | 2h 10min           | 124 (E195)                   |

A tabela 13 apresenta rotas operadas pela Embraer na frota da Azul Cargo, demonstrando o desempenho de aeronaves como o E190 e o E195 em operações regionais de curta a média distância no Brasil. Esses modelos são utilizados principalmente para

transporte de cargas leves, conectando importantes *hubs* logísticos a destinos no Nordeste do país.

A rota Campinas (VCP)–Recife (REC), operada pelo E190, cobre uma distância de 2.150 km em 3 horas, evidenciando a eficiência dessa aeronave em trajetos mais longos dentro do país. Já a rota Campinas (VCP)–Salvador (SSA), realizada pelo E195, percorre 1.450 km em 2 horas e 10 minutos, demonstrando que o modelo maior oferece maior capacidade de carga (124 assentos na versão passageiro) e desempenho semelhante em termos de tempo e eficiência.

Esses dados refletem a versatilidade das aeronaves da Família Embraer para atender às demandas logísticas regionais. Sua combinação de economia operacional e alcance adequado as tornam ideais para conectar centros de distribuição em regiões estratégicas, com custos reduzidos e alta frequência de voos. Isso reforça o papel da Azul Cargo como líder em logística aérea no Brasil, aproveitando aeronaves eficientes para atender ao mercado interno.

## 4.4 Avião ATR 72-600F

O ATR 72-600F é uma solução eficiente para transporte de cargas em rotas regionais curtas, especialmente em mercados com infraestrutura aeroportuária limitada. Sua capacidade de operar em pistas curtas e seu baixo consumo de combustível o tornam ideal para distribuição local e regional ([ATR Aircraft, 2025](#)).

Tabela 14 – Características do ATR 72-600F.

| Modelo      | Comprimento (m) | Envergadura (m) | Motor                 | Alcance Máximo (km) | Tanques Máximos | Assentos Máximos |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| ATR 72-600F | 27,2            | 27,1            | Pratt & Whitney PW127 | 1.500               | 2               | 74               |

O ATR 72-600F é um modelo cargueiro regional, otimizado para operações de curta distância. Com um comprimento de 27,2 metros e envergadura de 27,1 metros, ele possui dimensões compactas que facilitam sua operação em aeroportos regionais. Equipado com o motor Pratt & Whitney PW127, o ATR 72-600F alcança uma autonomia de 1.500 km, tornando-o ideal para rotas curtas e frequentes.

Além disso, sua capacidade de 74 assentos na versão de passageiros destaca sua versatilidade para diferentes tipos de operações. Com eficiência de combustível e baixo custo operacional, o ATR 72-600F é uma escolha confiável para operadores que desejam atender mercados regionais com alta frequência e eficiência logística.

#### 4.4.1 Tabela de Pesos

Tabela 15 – Características de Peso do ATR 72-600F.

| Modelo      | MTOW (ton) | MZFW (ton) | OEW (ton) | MFW (ton) | Carga Máxima (ton) |
|-------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------------|
| ATR 72-600F | 23         | 21         | 13        | 8         | 8                  |

O ATR 72-600F é um modelo cargueiro regional com características otimizadas para transporte de carga leve e de curta distância. Seu MTOW de 23 toneladas e carga máxima de 8 toneladas tornam-no ideal para operações logísticas regionais, especialmente em mercados com infraestrutura limitada ou em rotas que demandam alta frequência de voos.

Com um OEW de 13 toneladas e MFW de 8 toneladas, o ATR 72-600F demonstra excelente eficiência de combustível e operação econômica. Essas características o posicionam como uma solução flexível e confiável para operadores que precisam atender rapidamente a demandas locais, como transporte de mercadorias entre cidades próximas ou regiões isoladas. Sua versatilidade operacional e baixo custo o tornam um dos modelos mais populares na categoria de cargueiros regionais.

#### 4.4.2 Atualizações de Motores

Tabela 16 – Dados do motor do ATR 72-600F.

| Modelo do Motor       | Aeronave    | Rated Thrust (kN) | Fluxo de Combustível na Decolagem (kg/s) | TSFC (kg/s)/kN |
|-----------------------|-------------|-------------------|------------------------------------------|----------------|
| Pratt & Whitney PW127 | ATR 72-600F | 27                | 0,12                                     | 0,0044         |

A tabela 16 apresenta os dados técnicos do motor Pratt & Whitney PW127, que equipa o ATR 72-600F, uma aeronave cargueira regional. Com um empuxo máximo de 27 kN, o motor está alinhado às necessidades operacionais dessa aeronave, que é projetada para transportar cargas leves em rotas curtas. Seu fluxo de combustível na decolagem, de apenas 0,12 kg/s, demonstra alta eficiência, refletindo o foco do ATR 72-600F em economia de combustível e redução de custos operacionais.

O consumo específico de combustível (TSFC) de 0,0044 (kg/s)/kN posiciona o motor como uma escolha extremamente eficiente para sua classe. Esse valor destaca a capacidade do ATR 72-600F de oferecer operações econômicas, especialmente em mercados regionais com alta demanda por transporte de carga frequente e de menor volume. A combinação de baixo consumo de combustível e desempenho confiável faz com que o PW127 seja ideal para atender às necessidades logísticas locais, com um impacto ambiental reduzido.

### 4.4.3 Rotas Utilizadas

Tabela 17 – Rota operada pelo ATR 72-600F.

| Operador      | Origem      | Destino          | Distância (km) | Tempo Médio de Voo | Assentos (versão passageiro) |
|---------------|-------------|------------------|----------------|--------------------|------------------------------|
| FedEx Express | Paris (CDG) | Birmingham (BHX) | 500            | 1h 20min           | 74 (ATR 72)                  |

A tabela 17 apresenta a rota operada pela aeronave ATR 72-600F, utilizada pela FedEx *Express* para conectar Paris (CDG) a Birmingham (BHX). Essa rota regional cobre uma distância de 500 km com um tempo médio de voo de 1 hora e 20 minutos, evidenciando a eficiência do ATR 72-600F para operações de curta distância.

Com capacidade de 74 assentos na versão de passageiros, o ATR 72-600F destaca-se como uma aeronave ideal para transporte de cargas leves em mercados regionais. Sua economia operacional e baixo consumo de combustível permitem que operadores como a FedEx otimizem custos e mantenham alta frequência de voos em rotas de curta duração, conectando importantes *hubs* logísticos. Essa flexibilidade reforça o papel do ATR 72-600F como uma solução confiável e eficiente para atender demandas locais com eficiência.

## 5 Metodologia

A metodologia deste trabalho será feita por meio de uma análise exploratória de dados, estruturada nas seguintes etapas: coleta de dados, tratamento de dados, análise exploratória de dados, cálculo de rotas ótimas, interpretação dos resultados e conclusão. Cada uma dessas etapas é detalhada a seguir para proporcionar uma visão do processo adotado na análise do modo de transporte aéreo de cargas no Brasil.

### 5.1 Coleta de Dados

A coleta de dados deste estudo foi realizada a partir de fontes públicas disponibilizadas pelo Portal de Dados Abertos da ANAC, o qual oferece um repositório abrangente de dados sobre voos e operações aéreas, acessível através do link ([ANAC, 2024a](#)). Neste portal, estão disponíveis diversas informações estatísticas que serão utilizadas para a análise do transporte aéreo de cargas no Brasil.

Figura 16 – Portal de Dados Abertos da ANAC.



Fonte: ([ANAC, 2024a](#)).

Os dados específicos utilizados neste trabalho foram extraídos do conjunto de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo. Este conjunto de dados inclui informações detalhadas sobre o volume de cargas transportadas, *payload* (carga útil), ATK (*Available Ton Kilometer*, ou Toneladas-Quilômetro Disponíveis), RTK (*Revenue Ton-Kilometers*, ou Toneladas-Quilômetro Transportadas), consumo de combustível, além de detalhes sobre a origem e destino das cargas.

Figura 17 – Fonte de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo.

Index of /dadosabertos/Voos e operações aéreas/Dados Estatísticos do Transporte Aéreo/

|                                                     |                   |           |
|-----------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| ../                                                 |                   |           |
| <a href="#">Dados_Estatisticos.csv</a>              | 30-Jun-2024 01:07 | 330251291 |
| <a href="#">Dados_Estatisticos_2000_a_2010.json</a> | 30-Jun-2024 01:07 | 482430914 |
| <a href="#">Dados_Estatisticos_2011_a_2020.json</a> | 30-Jun-2024 01:07 | 431706975 |
| <a href="#">Dados_Estatisticos_2021_a_2030.json</a> | 30-Jun-2024 01:07 | 124404464 |
| <a href="#">Dados_Estatisticos_parte.csv</a>        | 09-Mar-2023 10:13 | 62987814  |

Fonte: (ANAC, 2024a).

Além dos dados operacionais do transporte aéreo, foram coletadas informações sobre os aeroportos. Para isso, utilizou-se a Lista de Aeródromos Públicos V2, disponibilizada no Portal de Dados Abertos da ANAC (ANAC, 2024a). Essa base de dados contém informações detalhadas sobre os aeroportos do país, como localização geográfica, código ICAO, categoria e status operacional, sendo essencial para a definição das rotas aéreas com base nos dados de latitude e longitude que são disponibilizados.

Figura 18 – Lista de Aeródromos Públicos V2.

Lista de Aeródromos Públicos V2



Metadados -  
Aeródromos Públicos -  
Lista de Aeródromos  
Públicos V2



Arquivos (CSV/JSON) -  
Aeródromos Públicos -  
Lista de aeródromos  
públicos V2

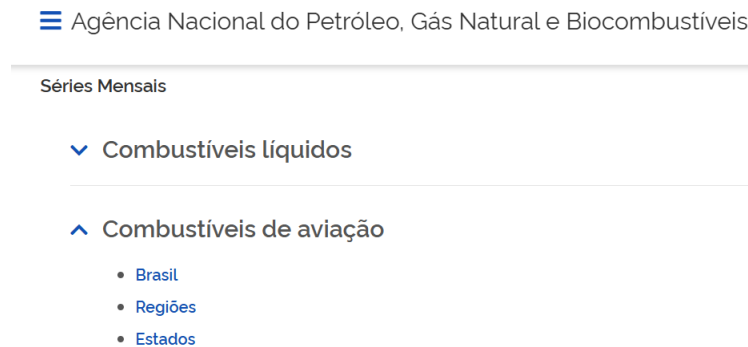


Painel - Aeródromos  
Públicos - Lista de  
Aeródromos Públicos V2

Tags: [dados abertos - aeródromos públicos](#)

Adicionalmente, para obter uma análise mais precisa sobre os custos operacionais, foram coletados dados históricos mensais do preço do Querosene da Aviação (QAV) por estado. Essas informações foram obtidas a partir do banco de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), disponível em seu portal de preços (ANP, 2025). O banco de dados contém registros detalhados do preço médio de distribuição do combustível por estado e região, permitindo a incorporação dessas variações no cálculo do custo operacional das aeronaves cargueiras.

Figura 19 – Séries Mensais do Preço do QAV por Estado.



Para garantir uma melhor precisão dos resultados, foi realizado o download dos arquivos CSV disponibilizados nos portais da ANAC e da ANP. Estes arquivos foram importados para um ambiente de programação em *Python*, onde passaram por um processo de tratamento e limpeza de dados. Esse procedimento foi essencial para estruturar os dados de maneira que pudessem ser utilizados na modelagem computacional e na análise da viabilidade técnica e econômica.

## 5.2 Tratamento de Dados

Após o *download* dos dados, foi realizado o *upload* dos arquivos CSVs em um *Jupyter Notebook*, utilizando a plataforma *Google Colab*, onde foi feito o tratamento dos dados estatísticos. Todo o *Notebook* gerado nessa etapa está presente no Apêndice B.

### 5.2.1 Limpeza e Filtragem de Colunas

#### 5.2.1.1 CSV Lista de Aeródromos Públicos V2

Foi realizada a limpeza do banco de dados, removendo colunas e linhas que não seriam utilizadas para a análise. As colunas desnecessárias continham informações que não contribuiriam para a avaliação da viabilidade do transporte de cargas. As colunas restantes foram:

'OACT', 'Município', 'UF', 'Latitude', 'Longitude'.

Além disso, os nomes das colunas foram padronizados para facilitar a integração dos dados. O objetivo desse banco de dados é fornecer informações de latitude e longitude dos aeródromos, permitindo o cálculo da distância entre os voos. Essa integração foi feita com base no código ICAO dos aeródromos, garantindo maior precisão nos resultados.

#### 5.2.1.2 CSV Séries Mensais do Preço do QAV por Estado

De forma semelhante, foi realizada a limpeza deste banco de dados, garantindo que apenas as informações relevantes fossem mantidas. Para melhor aproveitamento dos dados, foi calculada a média de preços do combustível por estado.

Posteriormente, os valores médios do preço de distribuição do querosene de aviação (QAV) foram incorporados ao conjunto de dados estatísticos da ANAC, levando em consideração o mês, o ano e o estado de aferição. Assim, foi possível obter um histórico confiável da variação dos preços do combustível ao longo do tempo.

#### 5.2.1.3 CSV Dados Estatísticos ANAC

No banco de dados da ANAC, diversas colunas foram removidas por não apresentarem relevância para a análise. Essas colunas continham informações como nome das empresas, regiões e continentes de origem e destino dos voos, dados sobre passageiros gratuitos e outras informações que não impactavam diretamente o transporte de cargas. As colunas restantes foram:

"ANO", "MES", "AEROPORTO\_DE\_ORIGEM\_SIGLA", "AEROPORTO\_DE\_ORIGEM\_UF", "AEROPORTO\_DE\_DESTINO\_SIGLA", "AEROPORTO\_DE\_DESTINO\_UF", "PASSAGEIROS\_PAGOS", "CARGA\_PAGA\_KG", "CORREIO\_KG", "ASK", "RPK", "ATK", "RTK", "COMBUSTIVEL\_LITROS", "CARGA\_PAGA\_KM", "CORREIO\_KM", "PAYLOAD".

Além da remoção de colunas, também foram aplicados filtros nos dados. Foram mantidos apenas registros entre os anos 2021 e 2024, pois esse período apresentou alta demanda por transporte de cargas. Também foram excluídos voos internacionais, uma vez que a análise é focada no mercado doméstico brasileiro.

Adicionalmente, voos onde não houve transporte de carga foram descartados, assim como voos classificados como improdutivos. Dessa forma, os filtros aplicados foram:

- Apenas dados entre os anos de 2021 e 2024.
- Exclusão de voos internacionais, pois a análise trata apenas do Brasil.
- Remoção de registros sem transporte de carga.
- Eliminação de voos classificados como improdutivos.

A seleção dessas informações foi realizada para garantir que os dados analisados fossem relevantes para o estudo da viabilidade do transporte de cargas no Brasil.

### 5.2.2 Distância entre aeroportos: Fórmula de Haversine

A Fórmula de Haversine é um método matemático utilizado para calcular a distância entre dois pontos na superfície de uma esfera, levando em consideração a curvatura da Terra. Essa abordagem é amplamente aplicada na aviação, navegação e geolocalização, pois fornece uma estimativa precisa da distância entre coordenadas geográficas.

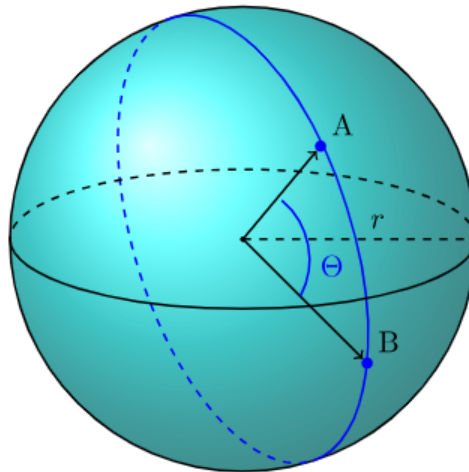
A fórmula foi introduzida por Thaddeus Haversine no século XIX e baseia-se na trigonometria esférica. Diferente da distância euclidiana (que presume um espaço plano), a Fórmula de Haversine corrige essa suposição ao calcular a distância entre dois pontos sobre uma superfície esférica, como a Terra (SINNOTT, 1984).

#### 5.2.2.1 Definição Matemática

A figura 20 apresenta como a fórmula funciona dentro de um sistema de coordenadas esféricas. Os pontos  $A$  e  $B$  representam dois locais na superfície da esfera (como aeroportos), definidos por suas latitudes  $\phi$  e longitudes  $\lambda$ , expressas em radianos.

A distância entre esses dois pontos não é uma linha reta no espaço tridimensional, mas sim um arco ao longo da superfície da esfera. Esse arco pertence a um círculo máximo, que representa a menor distância entre dois pontos sobre a superfície esférica.

Figura 20 – Distância entre dois pontos na esfera.



O cálculo da distância entre os pontos  $A$  e  $B$  segue o teorema de Haversine, que se baseia na lei dos senos para triângulos esféricos. A equação geral é:

$$\text{hav}(\Theta) = \text{hav}(\phi_B - \phi_A) + \cos(\phi_A) \cdot \cos(\phi_B) \cdot \text{hav}(\lambda_B - \lambda_A) \quad (5.1)$$

onde:

- $\Theta$  representa o ângulo central correspondente à distância entre os pontos  $A$  e  $B$ .

- - hav refere-se à função haversine, definida como  $\text{hav}(\theta) = \sin^2(\theta/2)$ .
- -  $r$  é o raio da esfera (para a Terra, aproximadamente 6.371 km).

Após calcular  $\text{hav}(\Theta)$ , podemos encontrar o valor de  $\Theta$  aplicando a **função arco-haversine (archav)**:

$$\Theta = \text{archav}(\text{hav}(\Theta)) \quad (5.2)$$

Onde  $\text{archav}$  é a inversa de haversine, dada por  $\theta = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{\text{hav}(\theta)})$ . Finalmente, a distância entre os dois pontos é:

$$d_{AB} = r \cdot \Theta \quad (5.3)$$

Essa abordagem garante um cálculo preciso, considerando que a Terra não é um plano, mas sim um geoide levemente achatado. Entretanto, para fins práticos, a Fórmula de Haversine assume a Terra como uma esfera perfeita, o que já proporciona resultados precisos.

### 5.2.3 Adicionando Valores do QAV

Os preços do QAV foram obtidos a partir de bases de dados que registram a média mensal do valor do combustível por estado. Como o preço do QAV pode variar significativamente dependendo da localização e do período, essa abordagem permite capturar as flutuações de custo ao longo do tempo e nas diferentes regiões do Brasil.

Para integrar os valores do QAV ao conjunto de dados de voos da ANAC, foi realizada uma correspondência baseada nos seguintes critérios:

- Estado de origem do voo: Associado ao estado de venda do combustível.
- Mês e ano da operação: O preço médio do QAV foi vinculado ao período correspondente ao mês de realização do voo.

Essa integração possibilitou adicionar uma nova coluna no banco de dados de estatísticas de voos, representando o custo médio do QAV para cada operação registrada.

### 5.2.4 Calculando o CATK

Para determinar o CATK, foi necessário reunir dados operacionais das aeronaves analisadas. A escolha de cada aeronave será melhor detalhada no capítulo subsequente.

A tabela 18 apresenta as informações coletadas sobre capacidade de carga, consumo de combustível e autonomia das diferentes aeronaves cargueiras escolhidas para essa análise.

Tabela 18 – Especificações das aeronaves analisadas.

| Aeronave     | Carga Útil Máx (kg) | Combustível (L) | Alcance Máx (km) | Autonomia Máx (h) | Taxa de Consumo (L/h) |
|--------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| A330-200F    | 61000               | 97530           | 7400             | 8.11              | 12030                 |
| A330-300 P2F | 62000               | 97530           | 6850             | 7.5               | 13004                 |
| A321 P2F     | 27000               | 30300           | 3800             | 4.36              | 8580                  |
| 737-300 SF   | 16890               | 20100           | 5510             | 6.93              | 2900                  |
| 737-800 BCF  | 20768               | 26025           | 4760             | 5.75              | 4526                  |
| 767-300 BCF  | 52980               | 90640           | 9520             | 11.2              | 8100                  |
| 747-8F       | 137750              | 226118          | 7900             | 8.7               | 26000                 |
| E190F        | 13500               | 16153           | 4445             | 5.1               | 3168                  |
| E195F        | 14500               | 12971           | 4260             | 4.9               | 2652                  |
| ATR 72-600F  | 9200                | 6250            | 1908             | 3.82              | 1636                  |

#### 5.2.4.1 Cálculo do CATK

A partir dos dados coletados, foi calculado o CATK para cada aeronave. Como os fabricantes não disponibilizam todas as informações operacionais, alguns parâmetros foram estimados a partir de fórmulas conhecidas da aviação. O processo de cálculo seguiu os seguintes passos:

- **Filtragem dos voos:** Apenas os voos cujo alcance estava dentro do limite da aeronave foram considerados.
- **Cálculo do combustível utilizado:** O consumo foi estimado proporcionalmente à distância percorrida e à capacidade máxima de combustível da aeronave.
- **Cálculo do custo do combustível:** Multiplicando o consumo pela média de preços do QAV por estado e período.
- **Cálculo do CATK:** Obtido pela divisão do custo de combustível pela capacidade total disponível de carga em toneladas-quilômetro (ATK).

O CATK foi determinado pela equação 2.5, apresentada anteriormente no capítulo 2.6.3.4.

Além disso, o consumo de combustível foi calculado usando a equação baseada nas condições ISA (*International Standard Atmosphere*), criado pela ICAO, apresentado nas equações 5.4 e 5.5.

$$\text{Taxa de Consumo (L/h)} = \frac{\text{Capacidade Máxima de Combustível (L)}}{\text{Tempo de Voo (h)}} \quad (5.4)$$

Onde:

$$\text{Tempo de Voo (h)} = \frac{\text{Alcance Máximo (km)}}{\text{Velocidade Média (km/h)}} \quad (5.5)$$

A ISA é um modelo atmosférico padronizado utilizado na aviação para representar as condições ideais da atmosfera terrestre em diferentes altitudes. Esse padrão define valores de temperatura, pressão, densidade do ar e velocidade do som para facilitar cálculos de desempenho de aeronaves e sistemas de navegação.

Dessa forma, é possível aproximar com maior precisão o consumo real das aeronaves e sua eficiência operacional.

#### 5.2.4.2 Geração de Arquivos CSV

Para cada aeronave analisada, foi gerado um arquivo CSV específico contendo os cálculos de CATK e demais informações relevantes. Isso possibilitou a análise detalhada de cada modelo separadamente, facilitando comparações e avaliações econômicas.

Os arquivos gerados possuem o seguinte formato:

- `CATK_Fuel_A330-200F.csv`
- `CATK_Fuel_B737-800BCF.csv`
- `CATK_Fuel_747-8F.csv`
- (e assim por diante para todas as aeronaves)

## 5.3 Análise Exploratória de Dados

A análise exploratória de dados tem como objetivo compreender a distribuição e os padrões dos dados utilizados no estudo. No Trabalho de Conclusão de Curso 1, foram empregadas ferramentas como *Power BI* e *Kepler.gl* para visualizar graficamente as tendências do transporte aéreo de cargas no Brasil, possibilitando uma melhor interpretação dos fluxos e conexões entre aeroportos, seus resultados estão relatados no apêndice A. No Trabalho de Conclusão de Curso 2, essa etapa se concentra em utilizar os resultados obtidos anteriormente para aprimorar as análises e aprofundar a compreensão sobre a viabilidade técnica e econômica das aeronaves no modo de transporte aéreo de cargas.

## 5.4 Cálculo de Rotas Ótimas

A otimização das rotas aéreas para o transporte de carga visa minimizar os custos operacionais, garantindo a eficiência logística da frota. Para isso, utilizamos a modelagem matemática e a Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* -

*MILP*), que nos permite encontrar a melhor combinação de rotas, aeroportos e aeronaves que atenda à demanda de forma eficiente e econômica. Todo o código utilizado nesta etapa está disponível no Apêndice C.

O problema é formulado matematicamente para garantir que a solução encontrada atenda a restrições operacionais realistas. A seguir, detalhamos a formulação matemática do modelo e os principais componentes utilizados.

### 5.4.1 Função Objetivo

A função objetivo do problema busca minimizar o custo total de combustível (*CATK\_Fuel*) da malha aérea. Esse custo é determinado pelo consumo de combustível por quilômetro voado das aeronaves disponíveis na frota.

$$\min \sum_{(i,j) \in R} C_{i,j} \cdot x_{i,j} \quad (5.6)$$

Onde:

- $C_{i,j}$  é o custo operacional da rota entre  $i$  e  $j$ .
- $x_{i,j}$  é uma variável binária que indica se a rota  $(i,j)$  foi selecionada.

### 5.4.2 Restrições do Modelo

Para garantir que a solução seja operacionalmente viável, algumas restrições são impostas ao modelo. Essas restrições refletem as condições do transporte aéreo de carga e asseguram que a solução otimizada seja praticável.

#### 5.4.2.1 Restrição de Conservação de Fluxo

Esta restrição garante que todos os voos que chegam a um aeroporto também tenham uma saída correspondente. Isso impede que a solução contenha aeroportos sem conexões adequadas.

$$\sum_{i \in H} x_{i,j} = \sum_{j \in J} x_{j,i}, \quad \forall i \in H, \quad i \neq \text{aeroporto\_principal} \quad (5.7)$$

Para o aeroporto principal, essa restrição ainda é válida, pois ele deve possuir um fluxo de entrada igual ao fluxo de saída:

$$\sum_{j \in J} x_{\text{aeroporto\_principal},j} = \sum_{i \in H} x_{i,\text{aeroporto\_principal}} \quad (5.8)$$

### 5.4.2.2 Restrição do Número Mínimo e Máximo de Aeroportos Intermediários

Para garantir um nível adequado de conectividade e limitar a complexidade da malha aérea, o número de aeroportos intermediários utilizados deve estar dentro de um intervalo predefinido. O modelo permite que entre 2 e 3 aeroportos intermediários sejam utilizados.

$$\sum_{a \in A} y_a \geq 2 \quad (5.9)$$

$$\sum_{a \in A} y_a \leq 3 \quad (5.10)$$

Onde:

- $y_a$  é uma variável binária que indica se o aeroporto foi utilizado como intermediário na malha.

### 5.4.2.3 Restrição de Participação de Aeroportos Intermediários

Caso um aeroporto intermediário seja selecionado ( $y_a = 1$ ), ele deve possuir pelo menos um voo de entrada e um voo de saída. Isso garante que não haja aeroportos desconectados na solução.

$$\sum_{i \in H} x_{i,a} \geq y_a, \quad \forall a \in A \quad (5.11)$$

$$\sum_{j \in J} x_{a,j} \geq y_a, \quad \forall a \in A \quad (5.12)$$

Isso significa que, se um aeroporto intermediário estiver na solução, ele deve ter pelo menos um voo chegando e um voo partindo.

### 5.4.2.4 Restrição de Partida e Retorno ao Aeroporto Principal

Como o problema modela um ciclo de transporte aéreo, a operação deve sempre começar e terminar no aeroporto principal. Isso significa que o aeroporto principal deve ter exatamente um voo de saída e um de chegada.

$$\sum_{j \in J} x_{aeroporto\_principal,j} = 1 \quad (5.13)$$

$$\sum_{i \in H} x_{i,aeroporto\_principal} = 1 \quad (5.14)$$

Isso garante que todas as rotas operadas formarão um ciclo fechado, evitando soluções inviáveis.

#### 5.4.2.5 Restrição de Eliminação de Subciclos (MTZ - Miller-Tucker-Zemlin)

Para evitar que o modelo crie ciclos menores dentro da malha aérea que não incluam o aeroporto principal, utilizamos a formulação de Miller-Tucker-Zemlin (MTZ). Esse método introduz variáveis auxiliares ( $u_i$ ) que impõem uma ordem nas visitas aos aeroportos.

$$1 \leq u_i \leq |H| - 1, \quad \forall i \neq \text{aeroporto\_principal} \quad (5.15)$$

$$u_i - u_j + |H| \cdot x_{i,j} \leq |H| - 1, \quad \forall i, j \in H, \quad i \neq \text{aeroporto\_principal}, j \neq \text{aeroporto\_principal} \quad (5.16)$$

Onde:

- representa a posição do aeroporto na sequência de visitas.
- O termo garante que a restrição só seja ativada se a rota estiver na solução.

Essa restrição assegura que a solução do modelo forme um único ciclo viável, eliminando ciclos menores isolados.

#### 5.4.3 Resumo das Restrições

As principais restrições do modelo podem ser resumidas na tabela 19.

Tabela 19 – Resumo das Restrições do Modelo.

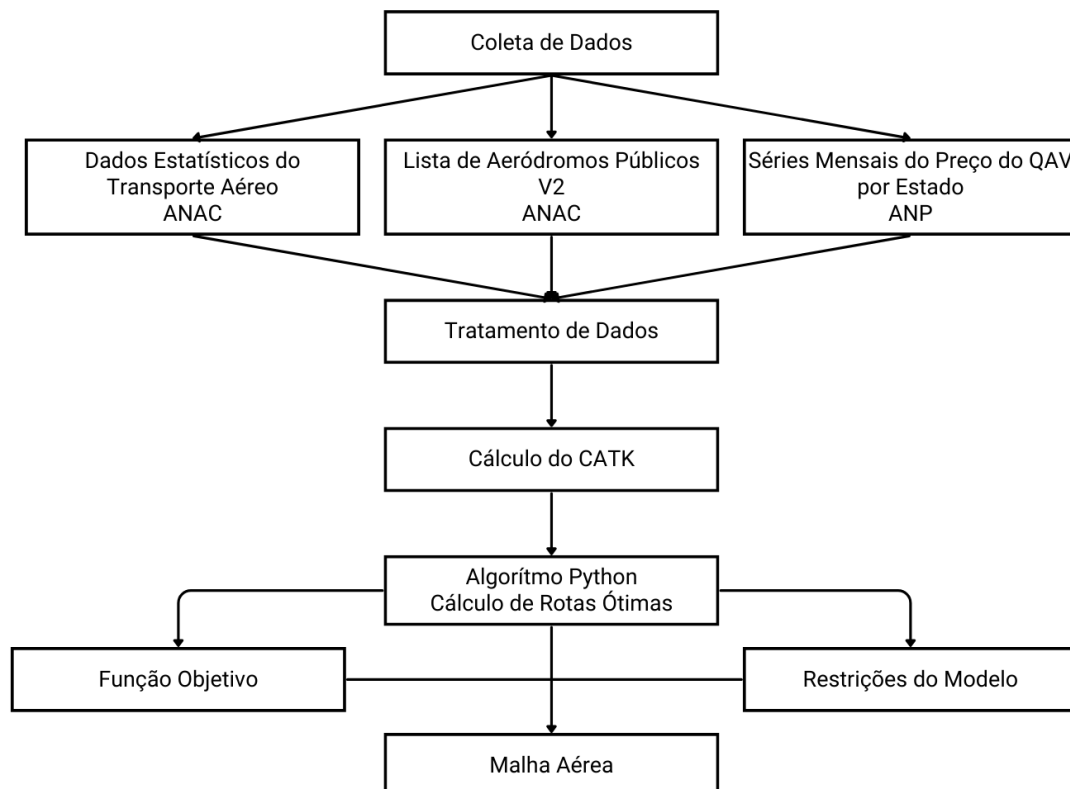
| Restrição                      | Equação                                                                                  |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conservação de Fluxo           | $\sum x_{i,j} = \sum x_{j,i}$                                                            |
| Número de Intermediários       | $2 \leq \sum y_a \leq 3$                                                                 |
| Participação de Intermediários | $\sum x_{i,a} \geq y_a, \sum x_{a,j} \geq y_a$                                           |
| Partida e Retorno ao Principal | $\sum x_{\text{aeroporto\_principal},j} = 1, \sum x_{i,\text{aeroporto\_principal}} = 1$ |
| Eliminação de Subciclos (MTZ)  | $u_i - u_j +  H  \cdot x_{i,j} \leq  H  - 1$                                             |

Vale ressaltar que foram aplicadas restrições adicionais não representadas matematicamente: rotas com custos excessivos foram excluídas, considerando apenas aquelas dentro do limite de 95% do quantil superior. Além disso, todas as rotas são tratadas como bidirecionais, assumindo custo igual nos dois sentidos.

#### 5.4.4 Fluxograma de Trabalho

O fluxograma apresentado na figura 21 ilustra o processo metodológico adotado neste estudo, detalhando as principais etapas envolvidas na coleta, processamento e utilização dos dados.

Figura 21 – Fluxograma do Trabalho Desenvolvido.



### 5.5 Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos

A média diária de carga paga entre aeroportos foi obtida a partir dos dados abertos disponibilizados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Para esse cálculo, foram consideradas todas as movimentações de carga paga registradas entre os aeroportos analisados durante o período estudado. O procedimento adotado consistiu em somar a quantidade total de carga transportada em cada trecho e, posteriormente, dividir esse valor pelo número de dias do período considerado. Dessa forma, obteve-se uma estimativa da carga média movimentada diariamente em cada rota analisada.

## 6 Resultados e Discussão

A análise dos resultados deste estudo baseia-se na otimização de rotas e na viabilidade técnica e econômica das aeronaves cargueiras avaliadas. A partir da modelagem computacional utilizando a biblioteca PuLP, foram identificadas as melhores rotas para cada caso estudado, levando em consideração a demanda média diária de carga entre os aeroportos e as métricas de CATK. Cada caso representa uma configuração diferente de demanda e infraestrutura aeroportuária, permitindo avaliar a eficiência operacional das aeronaves em cenários distintos.

### 6.1 Caso 1

A figura 22 apresenta a rota otimizada pelo modelo para o Caso 1, conectando os aeroportos de Guarulhos (SBGR), Manaus (SBEG) e Recife (SBRF). Essa configuração de rota foi definida com base na demanda média diária de carga entre esses terminais e na capacidade operacional das aeronaves avaliadas.

Figura 22 – Rota Estimada 1.



**Fonte: Autor Próprio.**

A tabela 20 exibe a média diária de carga paga transportada entre os aeroportos dessa rota, utilizando dados abertos da ANAC. Esses valores representam o volume médio

de carga que precisa ser deslocado entre os aeroportos em um dia de operação típica, servindo como referência para dimensionamento da frota e otimização das aeronaves.

Tabela 20 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos.

| Aeroporto de Origem | Aeroporto de Destino | Média Diária de Carga Paga (Kg) |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| SBGR                | SBEG                 | 66968.32                        |
| SBGR                | SBRF                 | 32416.12                        |
| SBEG                | SBRF                 | 2291.01                         |
| SBRF                | SBGR                 | 23642.23                        |

A tabela 21 apresenta os valores de CATK para cada aeronave ao longo da rota completa, além do número de ciclos necessários para atender à demanda total. Para o cálculo aproximado da quantidade de ciclos, foi considerada a carga total movimentada no circuito completo da rota, ou seja, somando a carga transportada de SBGR → SBEG, SBGR → SBRF e SBEG → SBRF, dividido pela capacidade de Carga Útil Máxima de cada aeronáve estudada, presente na Tabela 18. Essa abordagem reflete o fluxo de carga que será movimentado em um único ciclo operacional, garantindo que a análise considere a realidade de uma aeronave operando continuamente no circuito da rota.

Tabela 21 – CATK por aeronave e rota para caso 1.

| Aeronave     | SBGR → SBEG | SBEG → SBRF | SBRF → SBGR | Total de CATK | Ciclos Necessários |
|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------------------|
| B737-300 SF  | 0.157993    | 0.168616    | 0.133985    | 0.460593      | 6.01               |
| B737-800 BCF | 0.236798    | 0.252718    | 0.200814    | 0.690330      | 4.89               |
| B747-8F      | 1.239658    | 1.323004    | 1.051282    | 3.613944      | 1                  |
| B767-300 BCF | 0.412360    | 0.440085    | 0.349699    | 1.202143      | 1.92               |
| A321 P2F     | 0.342267    | 0.365279    | 0.290257    | 0.997804      | 3.76               |
| A330-200F    | 0.570821    | 0.609200    | 0.484081    | 1.664102      | 1.67               |
| A330-300 P2F | 0.616654    | 0.658114    | 0.522948    | 1.797716      | 1.64               |
| E190F        | 0.157389    | 0.167971    | 0.133473    | 0.458833      | 7.53               |
| E195F        | 0.131874    | 0.140740    | 0.111834    | 0.384448      | 7.01               |

No contexto da otimização logística, o objetivo é minimizar o CATK, pois essa métrica representa o custo operacional por tonelada-quilômetro disponível ao longo da rota. Como estamos analisando os gastos operacionais com combustível, quanto menor o CATK, mais eficiente será a aeronave, pois isso significa menor consumo de combustível por quilômetro voado em relação à capacidade de carga transportada.

Ao correlacionar CATK e ciclos necessários, percebe-se que aeronaves com maior CATK tendem a exigir menos ciclos para completar a demanda da rota, o que resulta em uma operação mais econômica e eficiente.

O Boeing 747-8F teve o maior CATK (3,61), tornando-o a aeronave menos eficiente em termos de custo operacional na rota estudada. No entanto, ele foi capaz de transportar toda a carga necessária em um único ciclo, o que pode ser vantajoso para operações de alta demanda e rota longa como é o caso, onde a frequência de voos precisa ser minimizada.

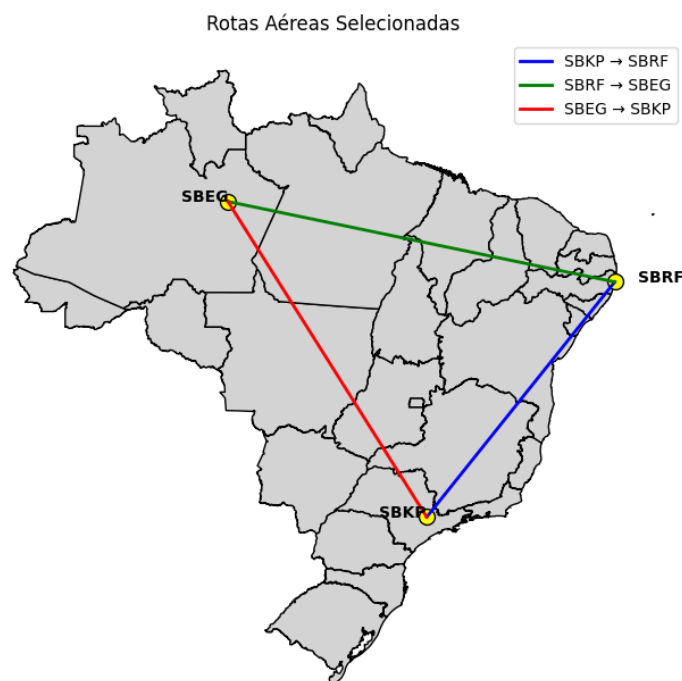
Aeronaves menores, como o Boeing 737-300, 737-800 e os modelos Embraer E190F e E195F, apresentaram valores menores de CATK e exigiram entre 4 e 7 ciclos diários, o que aumenta significativamente os custos operacionais devido ao maior número de decolagens e pousos, além de que por serem aeronaves com baixa capacidade de carga útil máxima, é possível que elas não consigam suprir a demanda de um dia, necessitando de mais de uma aeronave para a operação.

As aeronaves Airbus A330-200F, Airbus A330-300 P2F e Boeing 767-300 se mostraram opções mais equilibradas para a operação, pois apresentam um CATK menor que o do Boeing 747-8F, sem demandar um número excessivo de ciclos. Esse equilíbrio entre custo e eficiência operacional faz com que essas aeronaves sejam as mais indicadas para a rota analisada, garantindo uma operação viável tanto do ponto de vista econômico quanto logístico.

## 6.2 Caso 2

A figura 19 apresenta a rota otimizada para o Caso 2, conectando os aeroportos de Viracopos (SBKP), Recife (SBRF) e Manaus (SBEG). Essa rota foi definida como a segunda melhor alternativa otimizada pelo PuLP, considerando critérios de demanda operacional CATK.

Figura 23 – Rota Estimada 2.



Fonte: Autor Próprio.

A tabela 22 exibe a média diária de carga paga transportada entre os aeroportos dessa rota, utilizando dados abertos da ANAC.

Tabela 22 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos.

| Aeroporto de Origem | Aeroporto de Destino | Média Diária de Carga Paga (Kg) |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| SBKP                | SBRF                 | 10156.73                        |
| SBKP                | SBEG                 | 40028.68                        |
| SBRF                | SBEG                 | 7166.71                         |
| SBEG                | SBKP                 | 34747.38                        |

A tabela 23 apresenta os valores de CATK para cada aeronave ao longo da rota, além do número estimado de ciclos necessários para atender à demanda total.

Tabela 23 – CATK por aeronave e rota para caso 2.

| Aeronave     | SBKP → SBRF | SBRF → SBEG | SBEG → SBKP | TOTAL CATK Mean | Ciclos Necessários |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------------|
| B737-300 SF  | 0.317127    | 0.230359    | 0.276415    | 0.823901        | 3.4                |
| B737-800 BCF | 0.475305    | 0.345259    | 0.414286    | 1.234850        | 2.76               |
| B747-8F      | 2.488264    | 1.807463    | 2.168826    | 6.464553        | 1                  |
| B767-300 BCF | 0.827697    | 0.601235    | 0.721439    | 2.150371        | 1.08               |
| A321 P2F     | 0.687005    | 0.499037    | 0.598809    | 1.784852        | 2.12               |
| A330-200F    | 1.145763    | 0.832277    | 0.998673    | 2.976713        | 1                  |
| A330-300 P2F | 1.237759    | 0.899102    | 1.078858    | 3.215719        | 1                  |
| E190F        | 0.315915    | 0.229479    | 0.275358    | 0.820752        | 4.25               |
| E195F        | 0.264699    | 0.192276    | 0.230718    | 0.687693        | 3.95               |

Com base nos resultados obtidos, observa-se que as aeronaves de maior porte, como o Boeing 747-8F, apresentam o menor número de ciclos necessários para atender à demanda da rota, transportando toda a carga em um único voo. No entanto, assim como no Caso 1, o alto CATK desse modelo torna sua operação menos viável devido ao elevado consumo de combustível e custos operacionais. Por outro lado, aeronaves de médio porte, como o Boeing 767-300 e os Airbus A330-200F e A330-300P2F, demonstram um equilíbrio mais vantajoso entre eficiência operacional e custo, sendo capazes de atender à demanda com apenas um ciclo e um CATK consideravelmente inferior ao do Boeing 747-8F.

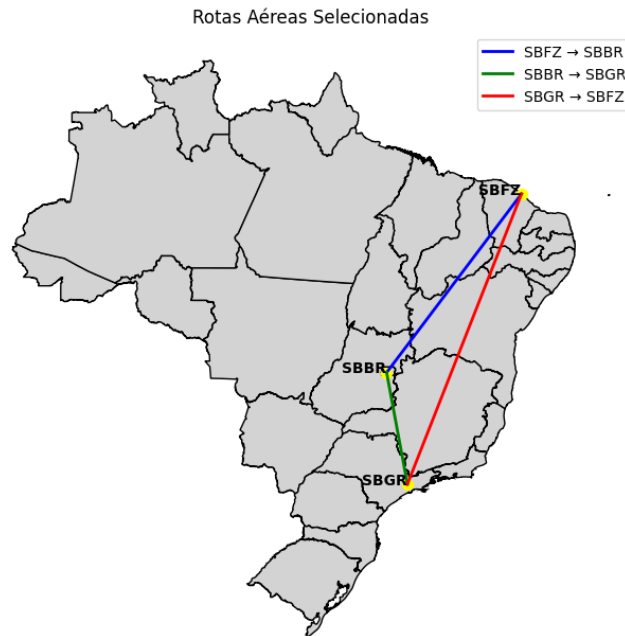
Já as aeronaves de menor porte, como o Boeing 737-300, Boeing 737-800, Airbus A321-P2F e os Embraer E190F/E195F, exigem um número maior de ciclos para transportar a carga total, aumentando os custos operacionais devido ao maior número de decolagens e pousos, além da necessidade de maior disponibilidade de aeronaves para cobrir a operação diária. Logo, o Caso 2 se torna muito semelhante ao Caso 1 devido a quantidade de carga e alcance longo, inviabilizando aeronaves de menor porte.

## 6.3 Caso 3

A figura 24 apresenta a rota otimizada para o Caso 3, conectando os aeroportos de Fortaleza (SBFZ), Brasília (SBBR) e Guarulhos (SBGR). Essa configuração também

foi definida como uma alternativa viável otimizada pelo PuLP, levando em consideração critérios de demanda operacional e CATK.

Figura 24 – Rota Estimada 3.



Fonte: Autor Próprio.

A tabela 24 apresenta a média diária de carga paga transportada entre os aeroportos dessa rota, conforme os dados da ANAC.

Tabela 24 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos.

| Aeroporto de Origem | Aeroporto de Destino | Média Diária de Carga Paga (Kg) |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| SBFZ                | SBBR                 | 4810.25                         |
| SBFZ                | SBGR                 | 23700.93                        |
| SBBR                | SBGR                 | 9216.99                         |
| SBGR                | SBFZ                 | 21679.14                        |

A tabela 25 apresenta os valores de CATK para cada aeronave ao longo da rota, além do número estimado de ciclos necessários para atender à demanda total.

Tabela 25 – CATK por aeronave e rota para caso 3.

| Aeronave     | SBFZ → SBBR | SBBR → SBGR | SBGR → SBFZ | TOTAL CATK Mean | Ciclos Necessários |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------------|
| B737-300 SF  | 0.095484    | 0.101639    | 0.105266    | 0.302389        | 2.23               |
| B737-800 BCF | 0.143110    | 0.152335    | 0.157772    | 0.453216        | 1.82               |
| B747-8F      | 0.749194    | 0.797485    | 0.825950    | 2.372629        | 1                  |
| B767-300 BCF | 0.249212    | 0.265276    | 0.274744    | 0.789232        | 1                  |
| A321 P2F     | 0.206851    | 0.220184    | 0.228043    | 0.655079        | 1.40               |
| A330-200F    | 0.344979    | 0.367216    | 0.380323    | 1.092517        | 1                  |
| A330-300 P2F | 0.372678    | 0.396700    | 0.410860    | 1.180238        | 1                  |
| E190F        | 0.095119    | 0.101250    | 0.104864    | 0.301234        | 2.79               |
| E195F        | 0.079699    | 0.084836    | 0.087864    | 0.252398        | 2.60               |

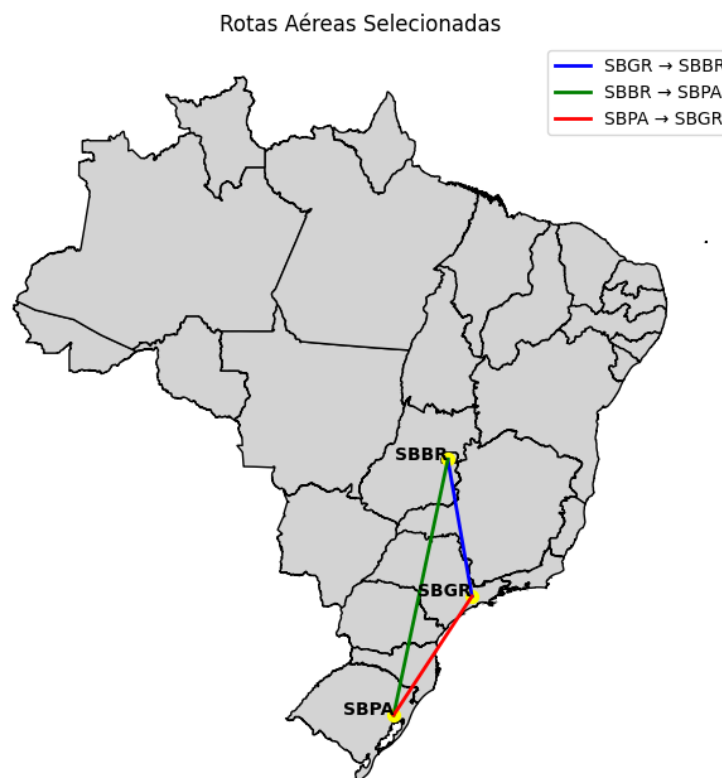
Para a rota deste caso, os resultados mostram que aeronaves de médio porte, como o Boeing 767-300 e os Airbus A330-200F e A330-300P2F, apresentam um equilíbrio ideal entre baixo CATK e eficiência operacional, conseguindo atender à demanda com apenas um ciclo. Esse resultado demonstra que essas aeronaves são adequadas para a operação, combinando custos operacionais reduzidos com alta capacidade de transporte.

Com destaque para o Boeing 767-300, que apresentou um baixo valor de CATK, conseguindo completar a rota com apenas um ciclo, se mostrando a aeronave ideal para esse percurso.

## 6.4 Caso 4

A figura 25 apresenta a rota otimizada para o Caso 4, conectando os aeroportos de Guarulhos (SBGR), Brasília (SBBR) e Porto Alegre (SBPA). Essa configuração foi última alternativa viável otimizada pelo PuLP, considerando critérios de demanda operacional e CATK.

Figura 25 – Rota Estimada 4.



Fonte: Autor Próprio.

A tabela 26 apresenta a média diária de carga paga transportada entre os aeroportos dessa rota, conforme os dados da ANAC.

Tabela 26 – Média Diária de Carga Paga entre Aeroportos.

| Aeroporto de Origem | Aeroporto de Destino | Média Diária de Carga Paga (Kg) |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| SBGR                | SBBR                 | 22654.71                        |
| SBGR                | SBPA                 | 6827.33                         |
| SBBR                | SBPA                 | 636.65                          |
| SBPA                | SBGR                 | 7436.79                         |

A tabela 27 apresenta os valores de CATK para cada aeronave ao longo da rota, além do número estimado de ciclos necessários para atender à demanda total.

Tabela 27 – CATK por aeronave e rota para caso 4.

| Aeronave     | SBGR → SBBR | SBBR → SBPA | SBPA → SBGR | TOTAL CATK Mean | Ciclos Necessários |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------------|
| B737-300 SF  | 0.137086    | 0.084598    | 0.114516    | 0.336200        | 1.77               |
| B737-800 BCF | 0.205463    | 0.126795    | 0.171634    | 0.503891        | 1.45               |
| B747-8F      | 1.075616    | 0.663781    | 0.898521    | 2.637917        | 1                  |
| B767-300 BCF | 0.357793    | 0.220800    | 0.298884    | 0.877478        | 1                  |
| A321 P2F     | 0.296976    | 0.183269    | 0.248080    | 0.728324        | 1.11               |
| A330-200F    | 0.495285    | 0.305649    | 0.413739    | 1.214674        | 1                  |
| A330-300 P2F | 0.535053    | 0.330190    | 0.446959    | 1.312202        | 1                  |
| ATR 72-600F  | 0.123098    | 0.075966    | 0.102830    | 0.301894        | 3.27               |
| E190F        | 0.136562    | 0.084275    | 0.114078    | 0.334915        | 2.23               |
| E195F        | 0.114423    | 0.070612    | 0.095584    | 0.280619        | 2.08               |

Os resultados demonstram que as aeronaves de médio porte, como o Boeing 767-300 e os Airbus A330-200F e A330-300P2F, continuam sendo as mais indicadas para essa rota, pois apresentam um baixo CATK e conseguem operar o trecho completo em apenas um ciclo.

Além disso, o Airbus A321-P2F se destacou por apresentar um equilíbrio entre eficiência e custo operacional, necessitando de poucos ciclos para atender à demanda da rota e mantendo um CATK competitivo. Esse resultado sugere que essa aeronave pode ser uma opção viável para operações de menor porte ou para complementar frotas em cenários que exigem maior flexibilidade.

Diferentemente dos outros casos, este é o único cenário onde a operação com o ATR72-600F se torna viável, devido às menores distâncias entre os aeroportos e à menor demanda de carga quando comparado às demais rotas analisadas. Entretanto, apesar do baixo custo, a aeronave se torna pouco competitiva devido a quantidade de ciclos elevada. Por outro lado, outras aeronaves menores, como o Boeing 737-300 e Boeing 737-800, exigem um número maior de ciclos para suprir a demanda, mas com um CATK bastante competitivo em comparação com as aeronaves de apenas 1 ciclo.

## 7 Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo principal identificar as rotas ótimas para o transporte eficiente de cargas no Brasil, utilizando Programação Inteira/Mista (MILP - *Mixed Integer Linear Programming*) com a biblioteca PuLP da linguagem *Python*. A modelagem computacional permitiu otimizar a alocação de aeronaves cargueiras em diferentes cenários, garantindo um transporte mais eficiente e reduzindo custos operacionais por meio da métrica CATK.

No Trabalho de Conclusão de Curso 1, foi realizada uma análise exploratória de dados sobre o modo de transporte aéreo de cargas no Brasil, utilizando os dados disponibilizados pelo portal aberto da ANAC. Esse estudo preliminar permitiu mapear a distribuição da demanda de carga entre aeroportos, identificar padrões operacionais e compreender os desafios do setor. O levantamento e tratamento desses dados foram essenciais para fundamentar as escolhas metodológicas desta pesquisa, possibilitando a construção de cenários mais realistas para a modelagem e otimização das rotas.

A aplicação da Pesquisa Operacional permitiu definir rotas que minimizam os custos do transporte aéreo de cargas, considerando o custo operacional das aeronaves e a demanda de carga. Os resultados demonstraram que, ao aplicar métodos de otimização, é possível estruturar malhas aéreas mais eficientes, garantindo que a carga seja distribuída com o menor custo e maior aproveitamento da capacidade das aeronaves.

Os quatro casos analisados permitiram comparar diferentes configurações de demanda de carga, possibilitando uma visão abrangente do cenário do transporte aéreo de cargas no Brasil. O estudo revelou que aeronaves de médio porte, como o Boeing 767-300 e os Airbus A330-200F e A330-300P2F, foram as mais eficientes na maioria dos cenários, apresentando um baixo CATK e conseguindo atender à demanda com um número reduzido de ciclos. Em contrapartida, aeronaves de grande porte, como o Boeing 747-8F, apesar de sua alta capacidade de carga, demonstraram um custo operacional elevado, o que limita sua viabilidade econômica para rotas nacionais.

Além da eficiência operacional das aeronaves, os resultados reforçam que a falta de uma malha aérea cargueira bem estruturada no Brasil impacta diretamente os custos e a competitividade do setor. O estudo evidencia que a otimização das rotas utilizando técnicas de Programação Linear Inteira/Mista pode ser uma ferramenta essencial para a criação de uma rede logística aérea mais eficiente.

Conclui-se que a modernização da malha aérea cargueira brasileira, aliada à otimização de rotas e escolha criteriosa de aeronaves, pode proporcionar ganhos operacionais expressivos, tornando o transporte de cargas mais autossustentável, sem depender das

companhias aéreas para o transporte de carga em porões dos aviões. A aplicação de ferramentas de otimização, como o PuLP, mostrou-se fundamental para a obtenção de soluções logísticas eficientes, permitindo reduzir custos e melhorar a utilização da frota.

Contudo, algumas limitações foram consideradas no estudo. A modelagem do CATK adotada foi simplificada, restringindo-se ao CATK fuel (levando em consideração apenas custos com combustível), devido à indisponibilidade de dados mais detalhados sobre outros custos operacionais, como manutenção, salários e outros custos operacionais. Essa abordagem limita a análise econômica a um escopo mais restrito. Além disso, o modelo de Programação Linear Inteira Mista desenvolvido não captura todas as complexidades operacionais do transporte aéreo de cargas, como restrições de capacidade aeroportuária, regulamentações específicas e sazonalidade da demanda. Essas limitações representam oportunidades para trabalhos futuros, que poderão aprofundar a análise e ampliar o escopo da otimização.

Por fim, o estudo abre caminho para outras futuras pesquisas que possam explorar novas metodologias de otimização, considerar variáveis ambientais e custos de infraestrutura aeroportuária, além de avaliar a viabilidade da integração do transporte aéreo com outros modais de carga, criando soluções híbridas para maximizar a eficiência logística. Além disso, é importante destacar as limitações do estudo, como a consideração de valores médios de consumo e de CATK, bem como a utilização de cálculos baseados nas fórmulas da Atmosfera Padrão ISA. Também se recomenda uma análise mais aprofundada sobre a sustentabilidade do setor, abordando impactos ambientais e potenciais estratégias para a redução das emissões no transporte aéreo de cargas, incluindo o combustível sustentável da aviação.

## Referências

- ABEAR, A. B. das E. A. *Panorama 2022: O Desempenho da Aviação Brasileira*. 2022. Disponível em: <<https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama2022-vf.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- ACI, A. C. I. *AIR CARGO GUIDE*. [S.l.]: Airports Council International, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 15, 38 e 39.
- ACI, A. C. I. *Air Cargo Guide*. 2019. Acessado: 2024-07-01. Disponível em: <<https://airports council.org/wp-content/uploads/2020/03/Air-Cargo-Guide.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 38.
- AIRBUS. *Global Market Forecast 2024-2043*. 2024. Disponível em: <[https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-07/GMF%202024-2043%20Presentation\\_4DTS.pdf](https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-07/GMF%202024-2043%20Presentation_4DTS.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 47.
- Airbus. *Airbus Official Website*. 2025. Disponível em: <<https://www.airbus.com>>. Citado na página 51.
- ALLAZ, C. *History of air cargo and airmail from the 18th century*. Google Consultant, 2005. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=fPLm9omt\\_YIC&lpg=PA5&ots=0StYG1hhpp&dq=History%20of%20air%20cargo%20and%20airmail%20from%20the%2018th%20century&lr&hl=pt-BR&pg=PA5#v=onepage&q=History%20of%20air%20cargo%20and%20airmail%20from%20the%2018th%20century&f=false](https://books.google.com.br/books?id=fPLm9omt_YIC&lpg=PA5&ots=0StYG1hhpp&dq=History%20of%20air%20cargo%20and%20airmail%20from%20the%2018th%20century&lr&hl=pt-BR&pg=PA5#v=onepage&q=History%20of%20air%20cargo%20and%20airmail%20from%20the%2018th%20century&f=false)>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- ANAC. *Principais aéreas brasileiras registram lucro de R\$ 4,5 bi no 1º trimestre do ano*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/principais-aereas-brasileiras-registram-lucro-de-r-4-5-bi-no-1o-trimestre-do-ano>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.
- ANAC. *Portal de Dados Abertos*. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 65 e 66.
- ANAC. *Sobre a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)*. 2024. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 32.
- ANAC, A. N. de A. C. *Análise do setor de transporte aéreo de carga*. 2013. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/internacional/publicacoes/b-estudos/nt-transporte-carga.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 25, 27, 28, 29 e 30.
- ANAC, A. N. de A. C. *Demonstrações Contábeis de Empresas Aéreas Brasileiras*. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/demonstracoes-contabeis/demonstracoes-contabeis-de-empresas-aereas-brasileiras>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 33 e 34.
- ANP. *Preços de Distribuição de Combustíveis*. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-combustiveis>>. Citado na página 66.

ASHFORD, N. J. et al. *Operações Aeroportuárias: As Melhores Práticas*. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. Citado na página 25.

ATR Aircraft. *ATR Official Website*. 2025. Disponível em: <<https://www.atr-aircraft.com>>. Citado na página 62.

BOEING. *World Air Cargo Forecast 2022*. Boeing, 2022. Disponível em: <<https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/cargo-forecast/>>. Citado 5 vezes nas páginas 30, 44, 45, 46 e 47.

CHAGAS, V. D. A. *Os Desafios Para o Transporte Aéreo de Cargas*. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/5506/1/Artigo%20PUC%20-%20Os%20Desafios%20Para%20o%20Transporte%20A%C3%A9reo%20de%20Cargas.pdf>>. Citado na página 26.

COIN-OR Foundation. *PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python*. 2024. Disponível em: <<https://coin-or.github.io/pulp/>>. Citado na página 37.

DIAS, A. B. Inovação e empreendedorismo nos primórdios da aviação: Santos-dumont e os irmãos wright. 2004. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Adriano-Dias-4/publication/330887558\\_Inovacao\\_e\\_Empreendedorismo\\_nos\\_primordios\\_da\\_aviacao\\_Santos-Dumont\\_e\\_os\\_Irmaos\\_Wright\\_1/links/5c59df0345851582c3d00eb1/Inovacao-e-Empreendedorismo-nos-primordios-da-aviacao-Santos-Dumont-e-os-Irmaos-Wright-1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Adriano-Dias-4/publication/330887558_Inovacao_e_Empreendedorismo_nos_primordios_da_aviacao_Santos-Dumont_e_os_Irmaos_Wright_1/links/5c59df0345851582c3d00eb1/Inovacao-e-Empreendedorismo-nos-primordios-da-aviacao-Santos-Dumont-e-os-Irmaos-Wright-1.pdf)>. Citado na página 15.

EASA, E. U. A. S. A. *Sustainable Aviation Fuels*. 2020. Accessed: 2024-07-01. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/eaer/climate-change/sustainable-aviation-fuels>>. Citado na página 24.

Embraer. *Embraer Official Website*. 2025. Disponível em: <<https://www.embraer.com>>. Citado na página 59.

FERREIRA, C. E. V. *Uma Análise Exploratória de Dados de Cargas Aéreas no Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade de Brasília - UnB, Faculdade UnB Gama - FGA, Brasília, DF, 2024. Citado na página 18.

gov.br. *PLANO DE DADOS ABERTOS DA ANAC 2023-2025*. 2023. Disponível em: <[https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/planos-e-documentos-de-suporte-ao-plano/plano-vigente-pasta-de-documentos-do-pda-2023-2025/pda\\_anac\\_2023\\_2025.pdf](https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/planos-e-documentos-de-suporte-ao-plano/plano-vigente-pasta-de-documentos-do-pda-2023-2025/pda_anac_2023_2025.pdf)>. Citado na página 16.

Handley Page Ltd. *official Handley Page Website*. s.d. Disponível em: <<https://www.handleypage.co.uk/>>. Citado na página 15.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to Operations Research*. 11. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2021. ISBN 978-1260421288. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.

HOEL, L. et al. *Intermodal Transportation: Moving Freight in a Global Economy*. Eno Transportation Foundation, 2010. Disponível em: <[https://enotrans.org/wp-content/uploads/2023/02/IntermodalFreightTextbook\\_compressed.pdf](https://enotrans.org/wp-content/uploads/2023/02/IntermodalFreightTextbook_compressed.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

- ICAO. *Presentation of 2022 Air Transport Statistical Results*. 2022. Disponível em: <[https://www.icao.int/sustainability/WorldofAirTransport/Documents/ARC\\_2022\\_Tables\\_final\\_12032024.pdf](https://www.icao.int/sustainability/WorldofAirTransport/Documents/ARC_2022_Tables_final_12032024.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- ICAO. *International Civil Aviation Organization (ICAO)*. 2024. Disponível em: <<https://www.icao.int>>. Citado na página 16.
- LABTRANS/UFSC. *Relatório de Diagnósticos de Carga Aérea, Projeto Horus*. 2023. Disponível em: <<https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#CargaAerea>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- LINGOPASS. *Transporte aéreo de cargas no Brasil: um panorama atual*. 2024. Disponível em: <<https://www.lingopass.com.br/blog/transporte-aereo-de-cargas-no-brasil-um-panorama-atual>>. Citado na página 20.
- MANSILHA, M. B. et al. Programação linear: método de otimização simplex e software otimiza. *Revista Espacios*, v. 38, n. 60, p. 4, 2017. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a17v38n60/a17v38n60p04.pdf>>. Citado na página 36.
- MELLO, J. C. C. B. S. de et al. Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras. *Pesquisa Operacional*, v. 23, n. 2, p. 325–345, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pope/a/dRzTnPmFDJNXCYTbrpmDQXD/>>. Citado na página 20.
- SINNOTT, R. W. Virtues of the haversine. *Sky and Telescope*, v. 68, n. 2, p. 159, 1984. Citado na página 69.
- The Boeing Company. *Boeing Official Website*. 2025. Disponível em: <<https://www.boeing.com>>. Citado na página 55.
- The STAT Trade Times. *Air cargo revenue to be above \$200bn in 2022: IATA*. 2022. Disponível em: <<https://www.stattimes.com/air-cargo/air-cargo-revenue-to-be-above-200bn-in-2022-iata-1347198?infinite-scroll=1>>. Citado na página 17.
- TUKEY, J. W. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Exploratory-Data-Analysis-John-Tukey/dp/0201076160>>. Citado na página 34.
- VARIG. *Varig Cargo/Varig Log*. s.d. Disponível em: <<https://www.varig-airlines.com/pt/variglog.htm#:~:text=O%20transporte%20de%20carga%20a%C3%A9rea,a%20aeronave%20aqu%C3%A1tica%20Dornier%20Wal>>. Citado na página 16.
- WINSTON, W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4. ed. [S.l.]: Duxbury Press, 2003. ISBN 978-0534380588. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- World Bank. *Air transport, freight (million ton-km) - United States*. 2024. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.GOOD.MT.K1?locations=US>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

## Apêndices

## APÊNDICE A – Resultados do Trabalho de Conclusão de Curso 1

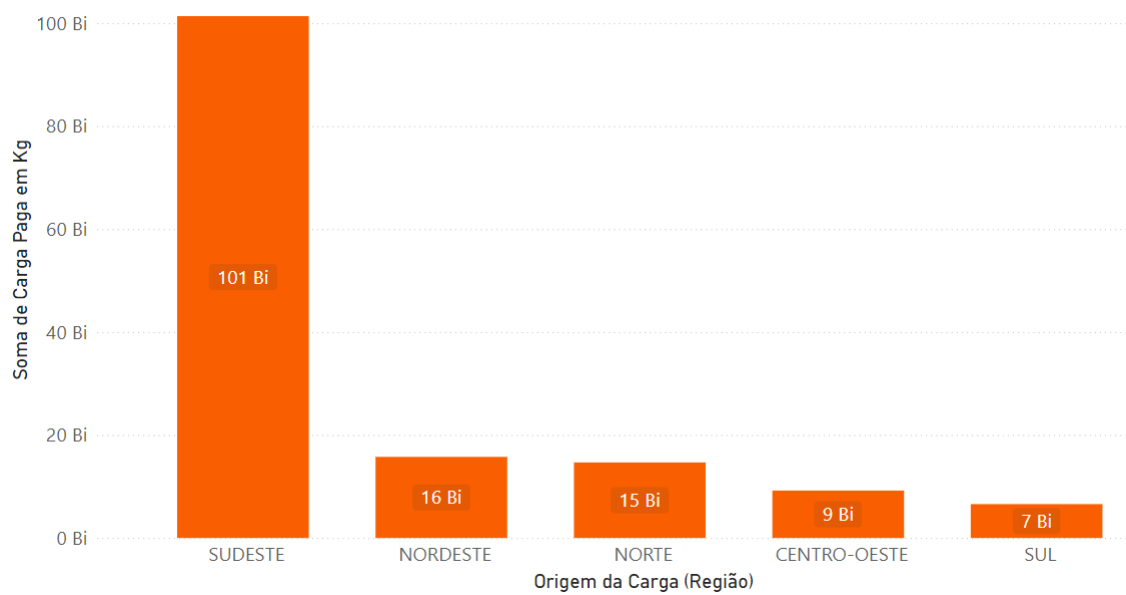


Figura 26 – Carga por região de origem.

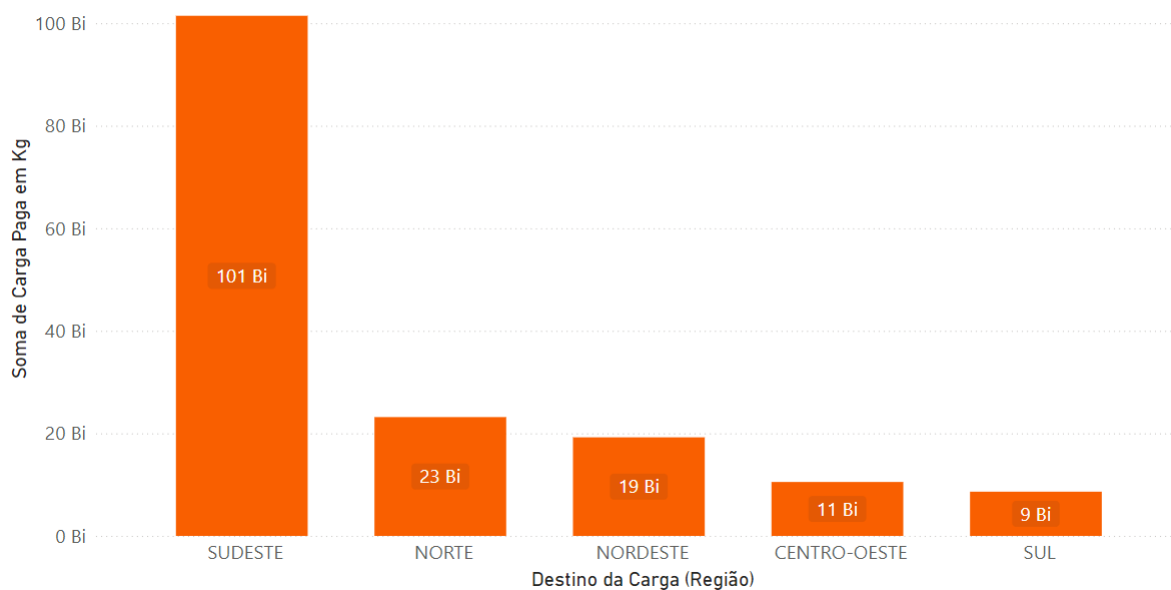


Figura 27 – Carga por região de destino.

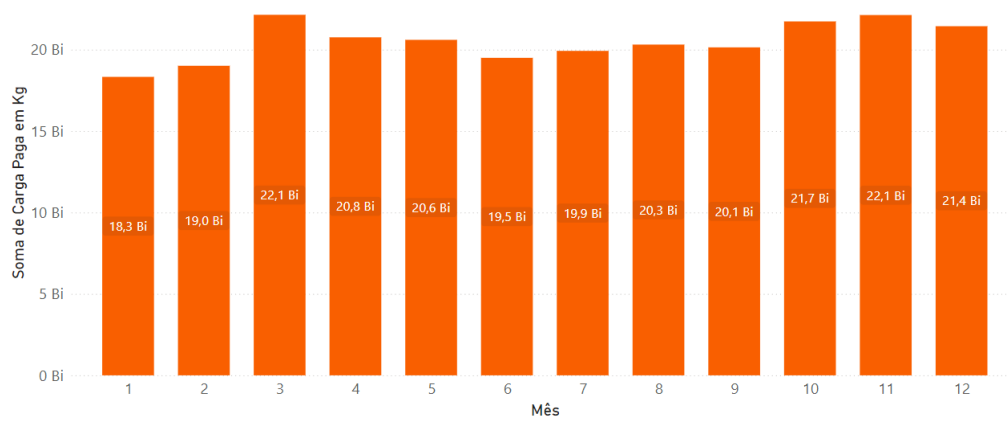


Figura 28 – Soma de carga paga por mês.

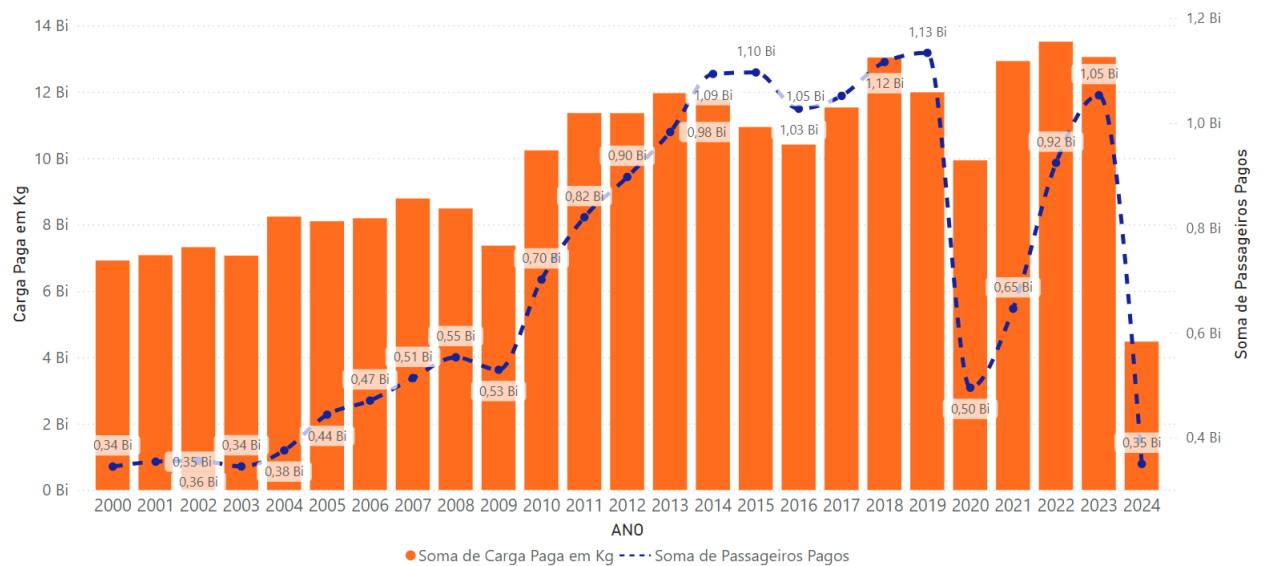


Figura 29 – Comparativo de Carga x Passageiros totais.



Figura 30 – Mapa da malha aérea com principais rotas.

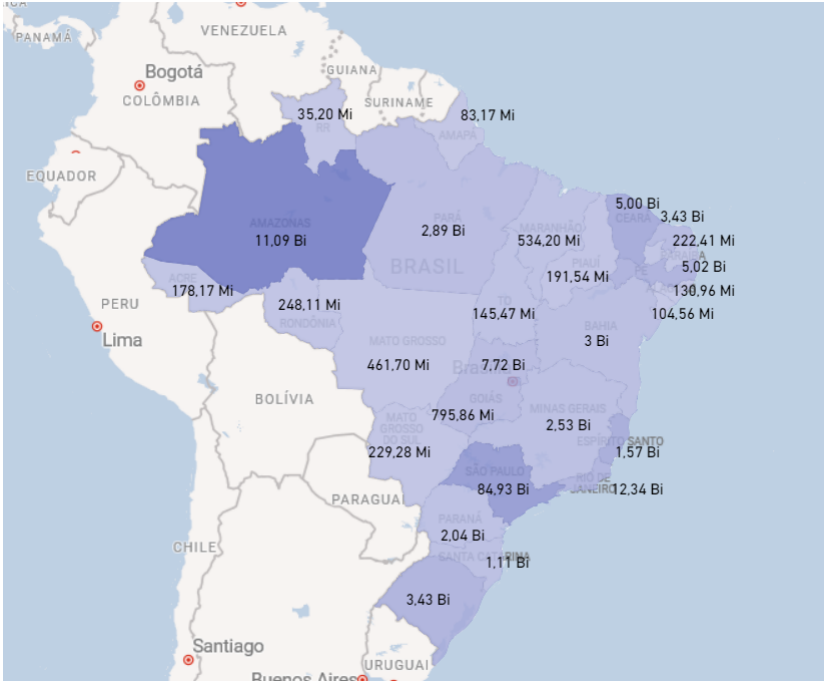


Figura 31 – Mapa de saídas de Cargas por UF de 2000 a 2024.

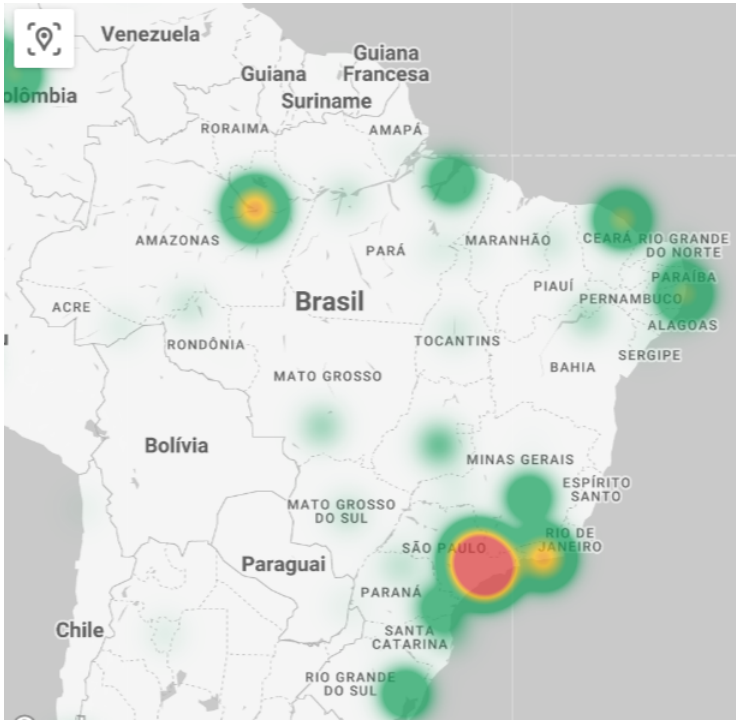


Figura 32 – Mapa de calor de saídas de cargas

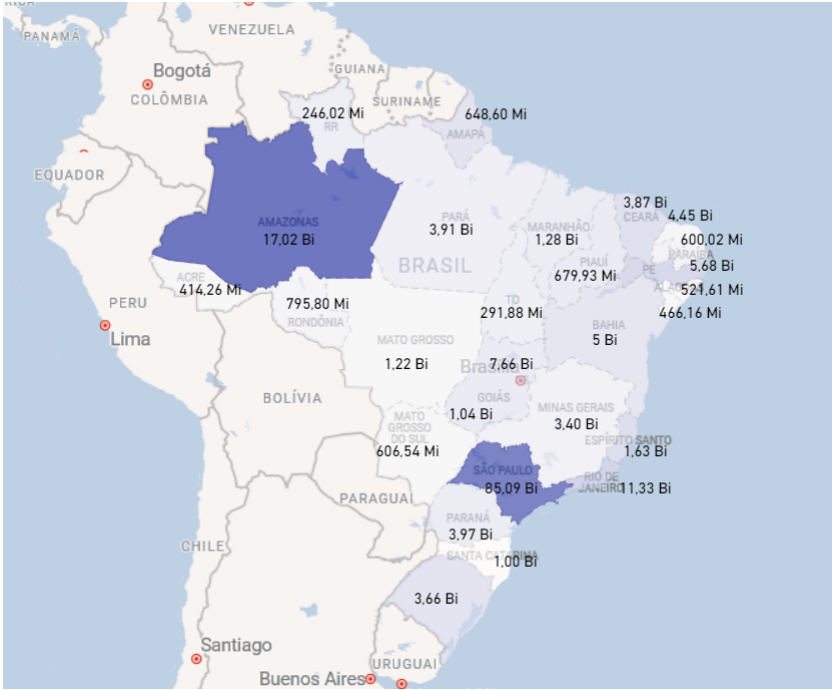


Figura 33 – Mapa de chegada de Cargas por UF de 2000 a 2024.

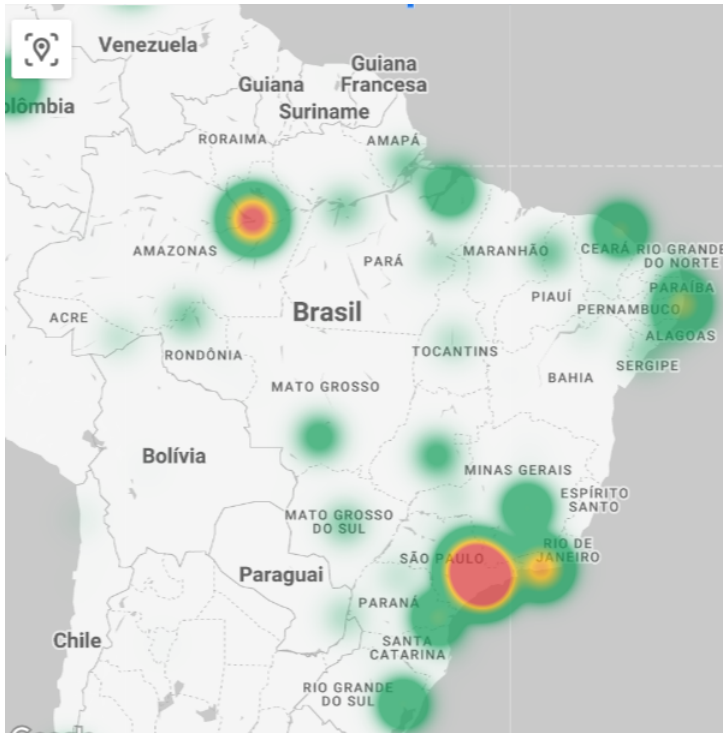


Figura 34 – Mapa de calor de chegadas de cargas.

## APÊNDICE B – Código Python para Tratamento de Dados e Cálculo CATK

```

import numpy as np # linear algebra
import pandas as pd # data processing, CSV file I/O (e.g. pd.read_csv)
import matplotlib.pyplot as plt

# Input data files are available in the read-only "../input/"
# directory
# For example, running this (by clicking run or pressing Shift+Enter)
# will list all files under the input directory

import os
for dirname, _, filenames in os.walk('/kaggle/input'):
    for filename in filenames:
        print(os.path.join(dirname, filename))

path = os.path.join('/kaggle/input/tccanac2/Dados_Estatisticos
(3).csv')
df = pd.read_csv(path, sep=';', skiprows=1, encoding='utf-8')

path2 =
os.path.join('/kaggle/input/adpublicos/AerodromosPublicos.csv')
ADp = pd.read_csv(path2, sep=';', encoding='cp1252')

path3 = os.path.join('/kaggle/input/qav-estados2/QAV-estados2.csv')
QAV = pd.read_csv(path3, encoding='utf-8')

/kaggle/input/adpublicos/AerodromosPublicos.csv
/kaggle/input/qav-estados2/QAV-estados2.csv
/kaggle/input/tccanac2/Dados_Estatisticos (3).csv

ADp.drop(['CIAD', 'Nome', 'Município', 'UF', 'Latitude',
'Longitude', 'Altitude', 'Operação Diurna', 'Operação Noturna',
'Designação 1', 'Comprimento 1', 'Largura 1', 'Resistência 1',
'Superfície 1', 'Designação 2', 'Comprimento 2', 'Largura 2',
'Resistência 2', 'Superfície 2', 'Situação', 'Validade do
Registro', 'Portaria de Registro', 'Link Portaria'], axis=1,
inplace=True)
ADp.columns = ['OACI', 'Município', 'UF', 'Lat', 'Long']
ADp = ADp.dropna()
ADp.info()

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Index: 495 entries, 0 to 496
Data columns (total 5 columns):
#   Column      Non-Null Count  Dtype
---  -
0    OACI         495 non-null    object
1    Município    495 non-null    object
2    UF           495 non-null    object
3    Lat          495 non-null    float64
4    Long         495 non-null    float64

```

```
dtypes: float64(2), object(3)
memory usage: 23.2+ KB
```

```
df.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 1035644 entries, 0 to 1035643
Data columns (total 38 columns):
```

| #  | Column                          | Non-Null Count   | Dtype   |
|----|---------------------------------|------------------|---------|
| 0  | EMPRESA_SIGLA                   | 1035644 non-null | object  |
| 1  | EMPRESA_NOME                    | 1035644 non-null | object  |
| 2  | EMPRESA_NACIONALIDADE           | 1035644 non-null | object  |
| 3  | ANO                             | 1035644 non-null | int64   |
| 4  | MES                             | 1035644 non-null | int64   |
| 5  | AEROPORTO_DE_ORIGEM_SIGLA       | 1030432 non-null | object  |
| 6  | AEROPORTO_DE_ORIGEM_NOME        | 1030432 non-null | object  |
| 7  | AEROPORTO_DE_ORIGEM_UF          | 883563 non-null  | object  |
| 8  | AEROPORTO_DE_ORIGEM_REGIAO      | 883563 non-null  | object  |
| 9  | AEROPORTO_DE_ORIGEM_PAIS        | 1030432 non-null | object  |
| 10 | AEROPORTO_DE_ORIGEM_CONTINENTE  | 1030432 non-null | object  |
| 11 | AEROPORTO_DE_DESTINO_SIGLA      | 1035644 non-null | object  |
| 12 | AEROPORTO_DE_DESTINO_NOME       | 1035644 non-null | object  |
| 13 | AEROPORTO_DE_DESTINO_UF         | 880123 non-null  | object  |
| 14 | AEROPORTO_DE_DESTINO_REGIAO     | 880123 non-null  | object  |
| 15 | AEROPORTO_DE_DESTINO_PAIS       | 1035644 non-null | object  |
| 16 | AEROPORTO_DE_DESTINO_CONTINENTE | 1035644 non-null | object  |
| 17 | NATUREZA                        | 1035644 non-null | object  |
| 18 | GRUPO_DE_VOO                    | 1035642 non-null | object  |
| 19 | PASSAGEIROS_PAGOS               | 990584 non-null  | float64 |
| 20 | PASSAGEIROS_GRATIS              | 990584 non-null  | float64 |
| 21 | CARGA_PAGA_KG                   | 990584 non-null  | float64 |
| 22 | CARGA_GRATIS_KG                 | 990584 non-null  | float64 |
| 23 | CORREIO_KG                      | 990584 non-null  | float64 |
| 24 | ASK                             | 803231 non-null  | float64 |
| 25 | RPK                             | 803721 non-null  | float64 |
| 26 | ATK                             | 803231 non-null  | float64 |
| 27 | RTK                             | 803225 non-null  | float64 |
| 28 | COMBUSTIVEL_LITROS              | 710089 non-null  | float64 |
| 29 | DISTANCIA_VOADA_KM              | 803232 non-null  | float64 |
| 30 | DECOLAGENS                      | 803788 non-null  | float64 |
| 31 | CARGA_PAGA_KM                   | 803721 non-null  | float64 |
| 32 | CARGA_GRATIS_KM                 | 803225 non-null  | float64 |
| 33 | CORREIO_KM                      | 803721 non-null  | float64 |
| 34 | ASSENTOS                        | 803787 non-null  | float64 |
| 35 | PAYLOAD                         | 803787 non-null  | float64 |
| 36 | HORAS_VOADAS                    | 803270 non-null  | object  |
| 37 | BAGAGEM_KG                      | 862508 non-null  | float64 |

```
dtypes: float64(18), int64(2), object(18)
memory usage: 300.3+ MB
```

```

df.drop(["EMPRESA_SIGLA", "EMPRESA_NACIONALIDADE",
"AEROPORTO_DE_ORIGEM_NOME", "AEROPORTO_DE_ORIGEM_REGIAO",
"AEROPORTO_DE_ORIGEM_PAIS", "AEROPORTO_DE_ORIGEM_CONTINENTE",
"AEROPORTO_DE_DESTINO_NOME", "AEROPORTO_DE_DESTINO_REGIAO",
"AEROPORTO_DE_DESTINO_PAIS", "AEROPORTO_DE_DESTINO_CONTINENTE",
"PASSEGEIROS_GRATIS", "CARGA_GRATIS_KG", "CARGA_GRATIS_KM",
"BAGAGEM_KG", "DECOLAGENS", "DISTANCIA_VOADA_KM", "HORAS_VOADAS",
"ASSENTOS"], axis=1, inplace=True)

df = df.drop(df[(df['ANO'] < 2021) | (df['ANO'] > 2024)].index)
df = df.drop(df[df["NATUREZA"] == "INTERNACIONAL"].index)
df = df.drop(df[df["CARGA_PAGA_KG"] == 0.0].index)
df = df.drop(df[df["GRUPO_DE_VOO"] == "IMPRODUTIVO"].index)
df.info()
display(df)

# Mesclar as coordenadas do aeroporto de origem
df = df.merge(ADp[['OACI', 'Lat', 'Long']],
left_on='AEROPORTO_DE_ORIGEM_SIGLA', right_on='OACI', how='left')
df.rename(columns={'Lat': 'Lat_Origem', 'Long': 'Long_Origem'},
inplace=True)

# Mesclar as coordenadas do aeroporto de destino
df = df.merge(ADp[['OACI', 'Lat', 'Long']],
left_on='AEROPORTO_DE_DESTINO_SIGLA', right_on='OACI', how='left')
df.rename(columns={'Lat': 'Lat_Destino', 'Long': 'Long_Destino'},
inplace=True)

# Excluir colunas duplicadas 'OACI'
df.drop(columns=['OACI_x', 'OACI_y'], inplace=True)
df.info()

```

## Fórmula de Haversine para encontrar distância entre aeroportos por meio de latlong

```

# Converter latitudes e longitudes para radianos
df['Lat_Origem'] = np.radians(df['Lat_Origem'].astype(float))
df['Long_Origem'] = np.radians(df['Long_Origem'].astype(float))
df['Lat_Destino'] = np.radians(df['Lat_Destino'].astype(float))
df['Long_Destino'] = np.radians(df['Long_Destino'].astype(float))

# Fórmula de Haversine
R = 6371 # Raio da Terra em km
df['Delta_Lat'] = df['Lat_Destino'] - df['Lat_Origem']
df['Delta_Long'] = df['Long_Destino'] - df['Long_Origem']

a = np.sin(df['Delta_Lat']/2)**2 + np.cos(df['Lat_Origem']) *
np.cos(df['Lat_Destino']) * np.sin(df['Delta_Long']/2)**2
c = 2 * np.arcsin(np.sqrt(a))

```

```
# Distância em quilômetros
df['Distancia_Calculada_km'] = R * c
```

## Adicionando valores de QAV

```
QAV.info()

# Convertendo a coluna 'DATA' no DataFrame QAV para datetime
QAV['DATA'] = pd.to_datetime(QAV['DATA'], format='%d/%m/%Y',
errors='coerce')

# Criando a coluna 'MES' como número inteiro
QAV['MES'] = QAV['DATA'].dt.month.astype('int64')

# Criando a coluna 'ANO' como número inteiro
QAV['ANO'] = QAV['DATA'].dt.year.astype('int64')

QAV.info()
display(QAV)
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 4023 entries, 0 to 4022
Data columns (total 9 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   DATA                                4023 non-null   datetime64[ns]
1   PRODUTO                             4023 non-null   object
2   REGIAO                              4023 non-null   object
3   ESTADO                              4023 non-null   object
4   UNIDADE DE MEDIDA                   4023 non-null   object
5   PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO         4023 non-null   object
6   DESVIO PADRAO                       4023 non-null   object
7   MES                                  4023 non-null   int64
8   ANO                                  4023 non-null   int64
dtypes: datetime64[ns](1), int64(2), object(6)
memory usage: 283.0+ KB
```

|          | DATA       | PRODUTO             | REGIAO | ESTADO | UNIDADE DE |
|----------|------------|---------------------|--------|--------|------------|
| MEDIDA \ |            |                     |        |        |            |
| 0        | 2018-11-01 | GASOLINA DE AVIAÇÃO | NORTE  | ACRE   |            |
| R\$/l    |            |                     |        |        |            |
| 1        | 2018-12-01 | GASOLINA DE AVIAÇÃO | NORTE  | ACRE   |            |
| R\$/l    |            |                     |        |        |            |
| 2        | 2019-01-01 | GASOLINA DE AVIAÇÃO | NORTE  | ACRE   |            |
| R\$/l    |            |                     |        |        |            |
| 3        | 2019-02-01 | GASOLINA DE AVIAÇÃO | NORTE  | ACRE   |            |
| R\$/l    |            |                     |        |        |            |
| 4        | 2019-03-01 | GASOLINA DE AVIAÇÃO | NORTE  | ACRE   |            |
| R\$/l    |            |                     |        |        |            |

```

...
...
4018 2024-08-01 QUEROSENE DE AVIAÇÃO NORTE TOCANTINS
R$/l
4019 2024-09-01 QUEROSENE DE AVIAÇÃO NORTE TOCANTINS
R$/l
4020 2024-10-01 QUEROSENE DE AVIAÇÃO NORTE TOCANTINS
R$/l
4021 2024-11-01 QUEROSENE DE AVIAÇÃO NORTE TOCANTINS
R$/l
4022 2024-12-01 QUEROSENE DE AVIAÇÃO NORTE TOCANTINS
R$/l

```

|      | PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO | DESVIO PADRAO | MES | ANO  |
|------|-----------------------------|---------------|-----|------|
| 0    | -                           | -             | 11  | 2018 |
| 1    | -                           | -             | 12  | 2018 |
| 2    | -                           | -             | 1   | 2019 |
| 3    | -                           | -             | 2   | 2019 |
| 4    | -                           | -             | 3   | 2019 |
| ...  | ...                         | ...           | ... | ...  |
| 4018 | 6,030                       | 0,939         | 8   | 2024 |
| 4019 | 5,489                       | 1,004         | 9   | 2024 |
| 4020 | 4,917                       | 1,207         | 10  | 2024 |
| 4021 | 4,963                       | 0,828         | 11  | 2024 |
| 4022 | 5,081                       | 0,927         | 12  | 2024 |

```
[4023 rows x 9 columns]
```

```
#Retirar colunas que não serão utilizadas
```

```
QAV = QAV.drop(columns=['PRODUTO', 'REGIAO', 'DATA', 'UNIDADE DE MEDIDA'])
```

```
QAV = QAV.drop(QAV[QAV["PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO"] == '-'].index)
```

```
QAV = QAV.dropna(subset=['PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO'])
```

```
# Transformar as colunas PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO e DESVIO PADRAO em float64
```

```
QAV['PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO'] = QAV['PRECO MEDIO DE DISTRIBUICAO'].str.replace(',', '.').astype('float64')
```

```
QAV['DESVIO PADRAO'] = QAV['DESVIO PADRAO'].str.replace(',', '.').astype('float64')
```

```
valores_unicos = QAV['ESTADO'].unique()
```

```
print("Valores únicos na coluna 'ESTADO':")
```

```
print(valores_unicos)
```

```
Valores únicos na coluna 'ESTADO':
```

```
['ACRE' 'ALAGOAS' 'AMAPA' 'AMAZONAS' 'BAHIA' 'CEARA' 'DISTRITO FEDERAL'
```

```
'ESPIRITO SANTO' 'GOIAS' 'MARANHAO' 'MATO GROSSO' 'MATO GROSSO DO
```

```

SUL'
'MINAS GERAIS' 'PARA' 'PARAIBA' 'PARANA' 'PERNAMBUCO' 'PIAUI'
'RIO DE JANEIRO' 'RIO GRANDE DO NORTE' 'RIO GRANDE DO SUL' 'RONDONIA'
'RORAIMA' 'SANTA CATARINA' 'SAO PAULO' 'SERGIPE' 'TOCANTINS']

# Transformar estados em siglas (UF)
estados_para_uf = {
    "ACRE": "AC",
    "ALAGOAS": "AL",
    "AMAPA": "AP",
    "AMAZONAS": "AM",
    "BAHIA": "BA",
    "CEARA": "CE",
    "DISTRITO FEDERAL": "DF",
    "ESPIRITO SANTO": "ES",
    "GOIAS": "GO",
    "MARANHAO": "MA",
    "MATO GROSSO": "MT",
    "MATO GROSSO DO SUL": "MS",
    "MINAS GERAIS": "MG",
    "PARA": "PA",
    "PARAIBA": "PB",
    "PARANA": "PR",
    "PERNAMBUCO": "PE",
    "PIAUI": "PI",
    "RIO DE JANEIRO": "RJ",
    "RIO GRANDE DO NORTE": "RN",
    "RIO GRANDE DO SUL": "RS",
    "RONDONIA": "RO",
    "RORAIMA": "RR",
    "SANTA CATARINA": "SC",
    "SAO PAULO": "SP",
    "SERGIPE": "SE",
    "TOCANTINS": "TO"
}

QAV['ESTADO'] = QAV['ESTADO'].map(estados_para_uf)
QAV.info()
display(QAV)

# Remover duplicatas agrupando e mantendo a média
QAV = QAV.groupby(['ANO', 'MES', 'ESTADO'], as_index=False).mean()

# Verificar duplicatas no QAV com base nas colunas do merge
duplicates = QAV[QAV.duplicated(subset=['ANO', 'MES', 'ESTADO'],
keep=False)]

print(duplicates)
print(f"Número de duplicatas em QAV: {len(duplicates)}")

```



```

13 COMBUSTIVEL_LITROS          60318 non-null float64
14 PAYLOAD                     60318 non-null float64
15 Lat_Origem                  60724 non-null float64
16 Long_Origem                 60724 non-null float64
17 Lat_Destino                 60709 non-null float64
18 Long_Destino                 60709 non-null float64
19 Distancia_Calculada_km      60524 non-null float64
20 PREÇO MÉDIO DE DISTRIBUIÇÃO 58174 non-null float64
dtypes: float64(15), int64(2), object(4)
memory usage: 9.8+ MB

# Adicionar a coluna TIPO_VOO
merged_df['TIPO_VOO'] = merged_df['PASSAGEIROS_PAGOS'].apply(lambda x:
'Cargueiro' if x == 0 else 'Misto')

merged_df.to_csv('/kaggle/working/final_df.csv', index=False)

import numpy as np # linear algebra
import pandas as pd # data processing, CSV file I/O (e.g. pd.read_csv)
import matplotlib.pyplot as plt

# Input data files are available in the read-only "../input/"
directory
# For example, running this (by clicking run or pressing Shift+Enter)
will list all files under the input directory

import os
for dirname, _, filenames in os.walk('/kaggle/input'):
    for filename in filenames:
        print(os.path.join(dirname, filename))

path = os.path.join('/kaggle/input/final-df/final_df.csv')
final_df = pd.read_csv(path)

path2 = os.path.join('/kaggle/input/aeronaves/aeronaves.csv')
ac = pd.read_csv(path2)

/kaggle/input/final-df/final_df.csv
/kaggle/input/aeronaves/aeronaves.csv

# Iterar sobre as aeronaves no DataFrame `ac`
for _, aeronave in ac.iterrows():
    nome_aeronave = aeronave['AERONAVE']
    alcance_max = aeronave['ALCANCE MAX (KM)']
    capacidade_combustivel = aeronave['COMBUSTIVEL (L)'] # Capacidade
total de combustível em litros

# Filtrar os voos que estão dentro do alcance máximo da aeronave
voos_filtrados = final_df[
    (final_df['Distancia_Calculada_km'] <= alcance_max)
].copy()

```

```

# Calcular o combustível utilizado
voos_filtrados['Combustivel_Utilizado'] = (
    (voos_filtrados['Distancia_Calculada_km'] / alcance_max) *
    capacidade_combustivel
)

# Calcular o custo de combustível
voos_filtrados['Custo_Combustivel'] = (
    voos_filtrados['Combustivel_Utilizado'] *
    voos_filtrados['PRECO_MEDIO_DE_DISTRIBUICAO']
)

# Calcular o CATK Fuel
voos_filtrados['CATK_Fuel'] = voos_filtrados['Custo_Combustivel']
/ voos_filtrados['ATK']

# Salvar os resultados em um CSV específico para a aeronave
filename = f'CATK_Fuel_{nome_aeronave}.csv'
voos_filtrados.to_csv(filename, index=False)
print(f'Resultados salvos para {nome_aeronave} em: {filename}')

print("Processo concluído. Arquivos gerados para todas as aeronaves.")

Resultados salvos para A330-200F em: CATK_Fuel_A330-200F.csv
Resultados salvos para A330-300 P2F em: CATK_Fuel_A330-300 P2F.csv
Resultados salvos para A321 P2F em: CATK_Fuel_A321 P2F.csv
Resultados salvos para 737-300 SF em: CATK_Fuel_737-300 SF.csv
Resultados salvos para 737-800 BCF em: CATK_Fuel_737-800 BCF.csv
Resultados salvos para 767-300 BCF em: CATK_Fuel_767-300 BCF.csv
Resultados salvos para 747-8F em: CATK_Fuel_747-8F.csv
Resultados salvos para E190F em: CATK_Fuel_E190F.csv
Resultados salvos para E195F em: CATK_Fuel_E195F.csv
Resultados salvos para ATR 72-600F em: CATK_Fuel_ATR 72-600F.csv
Processo concluído. Arquivos gerados para todas as aeronaves.

```

## APÊNDICE C – Código Python para Rotas Aéreas por PuLP

## Cenário:

- Objetivo: Construir uma malha partindo de um aeroporto e passando por pelo menos 2 ou 3 aeroportos intermediários (quando viável), retornando ao aeroporto inicial.

## Aeroportos de partida: São 8 aeroportos definidos:

- SBGR (Guarulhos)
- SBKP (Viracopos)
- SBEG (Manaus)
- SBBR (Brasília)
- SBGL (Galeão)
- SBRF (Recife)
- SBFZ (Fortaleza)
- SBPA (Porto Alegre)

## Saída esperada:

- Mapa mostrando a malha otimizada.
- Dados utilizados para plotar essa malha, com opção para download em CSV/Excel.

## Lista de Restrições Utilizadas no Modelo

### 1. Minimização do Custo Total

- O modelo busca minimizar o custo total de combustível (CATK\_Fuel) para as rotas selecionadas.
- 

### 2. Restrição de Fluxo no Aeroporto Principal

- O aeroporto principal será o ponto de partida e de retorno da rota.
  - Apenas **uma saída** do aeroporto principal para outro aeroporto é permitida.
  - Apenas **uma entrada** no aeroporto principal vinda de outro aeroporto é permitida.
- 

### 3. Restrição de Fluxo nos Aeroportos Intermediários

- Para cada aeroporto intermediário, o número de entradas deve ser igual ao número de saídas.
  - Isso garante que os aeroportos intermediários estejam conectados de maneira balanceada no fluxo da rota.
-

#### 4. Restrição de Número de Aeroportos Intermediários

- A rota deve passar por **pelo menos 2** aeroportos intermediários.
  - A rota pode passar por **no máximo 3** aeroportos intermediários.
  - Apenas aeroportos que pertencem à lista de intermediários especificada são considerados.
- 

#### 5. Conexão dos Aeroportos Intermediários

- Se um aeroporto intermediário for ativado (visitado), ele deve ter pelo menos:
    - Uma **entrada** proveniente de outro aeroporto.
    - Uma **saída** para outro aeroporto.
- 

#### 6. Restrição de Subtour Elimination (MTZ)

- Elimina a formação de ciclos internos entre aeroportos intermediários que não passam pelo aeroporto principal.
  - Assegura que todas as conexões formem um único ciclo conectado, partindo e retornando ao aeroporto principal.
- 

#### 7. Limitação de Variáveis de Ordem (MTZ Bounds)

- Cada aeroporto intermediário possui um limite inferior e superior associado à sua posição na rota.
  - Essa restrição organiza a ordem dos aeroportos na rota e evita múltiplas subrotas independentes.
- 

#### 8. Consideração de Conexões Bidirecionais

- As rotas entre aeroportos são tratadas como bidirecionais, assumindo custo igual para ambos os sentidos.
  - Se uma rota (**origem, destino**) for ativada, a rota inversa (**destino, origem**) é equivalente no custo.
- 

#### 9. Filtragem dos Custos Máximos Permitidos

- Somente rotas com custo de combustível dentro do limite de 95% do quantil superior dos dados são consideradas.
  - Essa restrição remove rotas com custos extremamente altos, focando em opções viáveis e econômicas.
- 

## Instalando dependencias

```
!pip install folium pulp pandas networkx numpy branca
```

# Plotando Mapa

```
import pandas as pd
import os
from pulp import LpProblem, LpMinimize, LpVariable, LpBinary, lpSum,
LpStatus, value, LpInteger
import folium
from IPython.display import display, HTML
import numpy as np
import networkx as nx

base_path = '/content/drive/MyDrive/AERONAVES/'

arquivos_csv = {
    '737-300 SF': 'CATK_Fuel_737-300 SF.csv',
    '737-800 BCF': 'CATK_Fuel_737-800 BCF.csv',
    '747-8F': 'CATK_Fuel_747-8F.csv',
    '767-300 BCF': 'CATK_Fuel_767-300 BCF.csv',
    'A321 P2F': 'CATK_Fuel_A321 P2F.csv',
    'A330-200F': 'CATK_Fuel_A330-200F.csv',
    'A330-300 P2F': 'CATK_Fuel_A330-300 P2F.csv',
    'ATR 72-600F': 'CATK_Fuel_ATR 72-600F.csv',
    'E190F': 'CATK_Fuel_E190F.csv',
    'E195F': 'CATK_Fuel_E195F.csv'
}

# Saída
aeroportos_saida = ["SBGR", "SBKP", "SBEG", "SBBR", "SBGL", "SBRF",
"SBFZ", "SBPA"]

def extrair_coordenadas_bidirecional(arquivos_csv, base_path):
    """
    Extrai as coordenadas de origem e destino de todos os arquivos CSV
    e cria um dicionário único de aeroportos.
    As rotas são tratadas como bidirecionais.

    :param arquivos_csv: Dicionário mapeando nomes de aeronaves para
    seus respectivos arquivos CSV.
    :param base_path: Caminho base onde os arquivos CSV estão
    armazenados.
    :return: Dicionário com os códigos dos aeroportos como chaves e
    suas coordenadas (latitude, longitude) em graus como valores.
    Dicionário de custos mapeando tuplas (origem, destino)
    para o custo CATK_Fuel.
    """
    coordenadas_aeroportos = {}
    cost_dict = {}

    for nome_aeronave, arquivo in arquivos_csv.items():
        caminho_completo = os.path.join(base_path, arquivo)
```

```

if os.path.exists(caminho_completo):
    df = pd.read_csv(caminho_completo)
    for _, row in df.iterrows():
        origem = row['AEROPORTO_DE_ORIGEM_SIGLA']
        destino = row['AEROPORTO_DE_DESTINO_SIGLA']
        custo = row['CATK_Fuel']

        if origem not in coordenadas_aeroportos:
            lat_origem_rad = row['Lat_Origem']
            long_origem_rad = row['Long_Origem']
            if pd.notnull(lat_origem_rad) and
pd.notnull(long_origem_rad):
                lat_origem_deg = np.degrees(lat_origem_rad)
                long_origem_deg = np.degrees(long_origem_rad)
                coordenadas_aeroportos[origem] =
(lat_origem_deg, long_origem_deg)

                if destino not in coordenadas_aeroportos:
                    lat_destino_rad = row['Lat_Destino']
                    long_destino_rad = row['Long_Destino']
                    if pd.notnull(lat_destino_rad) and
pd.notnull(long_destino_rad):
                        lat_destino_deg = np.degrees(lat_destino_rad)
                        long_destino_deg =
np.degrees(long_destino_rad)
                        coordenadas_aeroportos[destino] =
(lat_destino_deg, long_destino_deg)

                        cost_dict[(origem, destino)] = custo
                        if (destino, origem) not in cost_dict:
                            cost_dict[(destino, origem)] = custo # Custo
igual para rotas inversas?
                        else:
                            print(f"Arquivo não encontrado: {caminho_completo}")

        return coordenadas_aeroportos, cost_dict

def verificar_conectividade_bidirecional(cost_dict):
    """
    Verifica se o grafo de aeroportos é conexo em um grafo não
    direcionado.

    :param cost_dict: Dicionário mapeando tuplas (origem, destino)
    para o custo CATK_Fuel.
    :return: Booleano indicando se o grafo é conexo.
    """
    G = nx.Graph()
    G.add_edges_from(cost_dict.keys())

    is_connected = nx.is_connected(G)

```

```

if is_connected:
    print("O grafo de aeroportos é conexo (não direcionado).")
else:
    print("O grafo de aeroportos NÃO é conexo (não direcionado).")
    components = list(nx.connected_components(G))
    print(f"Número de componentes conexos: {len(components)}")
    for idx, component in enumerate(components, 1):
        print(f"Componente {idx}: {component}")

return is_connected

def otimizar_malha_cenario2(cost_dict, aeroportos,
aeroporto_principal, intermediarios, min_intermediarios=2,
max_intermediarios=3):
    """
        Otimiza a malha de rotas minimizando o custo de combustível
        CATK_Fuel em um grafo não direcionado,
        garantindo passar por pelo menos 2 e no máximo 3 aeroportos
        intermediários restritos.

        :param cost_dict: Dicionário mapeando tuplas (origem, destino)
        para o custo CATK_Fuel.
        :param aeroportos: Lista de códigos de aeroportos.
        :param aeroporto_principal: Código do aeroporto principal (início
        e fim do ciclo).
        :param intermediarios: Lista de aeroportos intermediários
        permitidos.
        :param min_intermediarios: Número mínimo de aeroportos
        intermediários.
        :param max_intermediarios: Número máximo de aeroportos
        intermediários.
        :return: Status do modelo, custo total e lista de rotas
        selecionadas.
    """
    model = LpProblem("MinCATK_Fuel_Cenario2", LpMinimize)
    x = LpVariable.dicts("x", cost_dict.keys(), cat=LpBinary)

    model += lpSum(cost_dict[(i, j)] * x[(i, j)] for (i, j) in
cost_dict), "Custo_Total_CATK_Fuel"

    for aeroporto in aeroportos:
        if aeroporto != aeroporto_principal:
            model += lpSum(x[(i, aeroporto)] for i in aeroportos if
(i, aeroporto) in cost_dict) == lpSum(x[(aeroporto, j)] for j in
aeroporto if (aeroporto, j) in cost_dict), f"Flow_{aeroporto}"
        else:
            model += lpSum(x[(i, aeroporto)] for i in aeroportos if
(i, aeroporto) in cost_dict) == lpSum(x[(aeroporto, j)] for j in
aeroporto if (aeroporto, j) in cost_dict), "Flow_Principal"

```

```

    y = LpVariable.dicts("y", intermediarios, cat=LpBinary)
    model += lpSum(y[a] for a in intermediarios) >=
min_intermediarios, "Min_Intermediarios"
    model += lpSum(y[a] for a in intermediarios) <=
max_intermediarios, "Max_Intermediarios"

    for a in intermediarios:
        model += lpSum(x[(i, a)] for i in aeroportos if (i, a) in
cost_dict) >= y[a], f"Min_Entrada_{a}"
        model += lpSum(x[(a, j)] for j in aeroportos if (a, j) in
cost_dict) >= y[a], f"Min_Saida_{a}"

    model += lpSum(x[(aeroporto_principal, j)] for j in aeroportos if
(aeroporto_principal, j) in cost_dict) == 1, "Start_at_Principal"
    model += lpSum(x[(i, aeroporto_principal)] for i in aeroportos if
(i, aeroporto_principal) in cost_dict) == 1, "End_at_Principal"

    u = LpVariable.dicts("u", aeroportos, lowBound=0,
upBound=len(aeroportos), cat=LpInteger)
    for i in aeroportos:
        if i != aeroporto_principal:
            model += u[i] >= 1, f"MTZ_Lower_{i}"
            model += u[i] <= len(aeroportos) - 1, f"MTZ_Upper_{i}"
    for (i, j) in cost_dict:
        if i != aeroporto_principal and j != aeroporto_principal:
            model += u[i] - u[j] + (len(aeroportos)) * x[(i, j)] <=
(len(aeroportos)-1), f"MTZ_{i}_{j}"

    model.solve()

    status = LpStatus[model.status]
    rotas_selecionadas = []
    custo_total = None
    if status == "Optimal":
        custo_total = value(model.objective)
        for (i, j) in cost_dict:
            if x[(i, j)].varValue == 1:
                rotas_selecionadas.append((i, j))
    else:
        print("Modelo inviável ou não resolvido.")

    return status, custo_total, rotas_selecionadas

def processar_aeronave_cenario2(nome_aeronave, caminho_csv,
coordenadas_aeroportos, subset_aeroportos=None):
    """
    Processa a otimização de rotas para uma aeronave específica
focando no Cenário 2.

    :param nome_aeronave: Nome da aeronave.

```

```

        :param caminho_csv: Caminho para o arquivo CSV correspondente.
        :param coordenadas_aeroportos: Dicionário de coordenadas dos
aeroportos.
        :param subset_aeroportos: Lista de códigos de aeroportos para o
subconjunto (intermediários).
        """
        print(f"Processando aeronave: {nome_aeronave}")

        coordenadas_extraidas, cost_dict =
extrair_coordenadas_bidirecional({nome_aeronave:
os.path.basename(caminho_csv)}, base_path)

        coordenadas_aeroportos_atualizado = {**coordenadas_aeroportos,
**coordenadas_extraidas}

        df = pd.read_csv(caminho_csv)
        df = df.dropna(subset=['CATK_Fuel'])
        limite_superior = df['CATK_Fuel'].quantile(0.95)
        df = df[df['CATK_Fuel'] <= limite_superior]

        df_avg = df.groupby(['AEROPORTO_DE_ORIGEM_SIGLA',
'AEROPORTO_DE_DESTINO_SIGLA'], as_index=False)['CATK_Fuel'].mean()

        cost_dict = {}
        for row in df_avg.itertuples(index=False):
            origem = row.AEROPORTO_DE_ORIGEM_SIGLA
            destino = row.AEROPORTO_DE_DESTINO_SIGLA
            custo = row.CATK_Fuel
            if origem in aeroportos_saida and destino in aeroportos_saida:
                cost_dict[(origem, destino)] = custo
                if (destino, origem) not in cost_dict:
                    cost_dict[(destino, origem)] = custo

        aeroportos = aeroportos_saida.copy()
        aeroporto_principal = aeroportos_saida[0]
        intermediarios = aeroportos_saida.copy()
        intermediarios.remove(aeroporto_principal)

        coordenadas_aeroportos_filtradas = {k: v for k, v in
coordenadas_aeroportos_atualizado.items() if k in aeroportos_saida}

        if not verificar_conectividade_bidirecional(cost_dict):
            print("A malha de rotas não é conexa mesmo após adicionar
rotas bidirecionais. Verifique os dados.")
            return

        status, custo, rotas = otimizar_malha_cenario2(
            cost_dict, aeroportos, aeroporto_principal, intermediarios,
            min_intermediarios=2, max_intermediarios=3
        )

```

```

    print("\nCenário 2: Intermediários limitados aos aeroportos
    fornecidos")
    if status == "Optimal":
        print(f"Custo total (CATK_Fuel): {custo:.6f}")
        print("Rotas selecionadas:")
        for rota in rotas:
            print(f"{rota[0]} -> {rota[1]}, Custo:
{cost_dict[rota]:.6f}")

        df_rotas = pd.DataFrame(rotas, columns=['Origem', 'Destino'])
        df_rotas['Custo_CATK_Fuel'] = df_rotas.apply(lambda row:
cost_dict[(row['Origem'], row['Destino'])], axis=1)

df_rotas.to_csv(f'rotas_{nome_aeronave}_cenario2_intermediarios_limita
dos.csv', index=False)
    else:
        print("Não foi possível encontrar uma solução ótima para o
Cenário 2.")

    def visualizar_mapa(rotas, titulo, coordenadas_aeroportos):
        """
        Visualiza as rotas selecionadas em um mapa interativo.

        :param rotas: Lista de tuplas representando as rotas (origem,
destino).
        :param titulo: Título do mapa.
        :param coordenadas_aeroportos: Dicionário de coordenadas dos
aeroportos.
        """
        if rotas:
            primeiro_origem = rotas[0][0]
            centro = coordenadas_aeroportos.get(primeiro_origem, (-
14.235, -51.9253)) # Centro do Brasil
        else:
            centro = (-14.235, -51.9253) # Centro do Brasil

        mapa = folium.Map(location=centro, zoom_start=4)

        for aeroporto, coord in coordenadas_aeroportos.items():
            folium.Marker(
                location=coord,
                popup=f"Aeroporto: {aeroporto}",
                icon=folium.Icon(color="blue", icon="info-sign")
            ).add_to(mapa)

        for (origem, destino) in rotas:
            if origem in coordenadas_aeroportos and destino in
coordenadas_aeroportos:
                coord_origem = coordenadas_aeroportos[origem]

```

```

        coord_destino = coordenadas_aeroportos[destino]
        folium.PolyLine(
            locations=[coord_origem, coord_destino],
            color="red",
            weight=2.5,
            opacity=1
        ).add_to(mapa)
        folium.Marker(
            location=((coord_origem[0] + coord_destino[0]) /
2, (coord_origem[1] + coord_destino[1]) / 2),
            popup=f"Origem: {origem}<br>Destino:
{destino}<br>Custo: {cost_dict[(origem, destino)].6f}",
            icon=folium.Icon(color="green", icon="info-sign")
        ).add_to(mapa)

    mapa_html = mapa._repr_html_()
    display(HTML(f"<h3>{titulo}</h3>"))
    display(HTML(mapa_html))

    if status == "Optimal":
        visualizar_mapa(rotas, f"Mapa de Rotas - {nome_aeronave} -
Cenário 2: Intermediários Limitados",
        coordenadas_aeroportos_filtradas)

    print("\n" + "="*50 + "\n")

def main():
    """
    Função principal que percorre cada arquivo CSV, extrai as
    coordenadas bidirecionais, verifica a conectividade e processa a
    otimização para o Cenário 2.
    """
    coordenadas_aeroportos_extraidos, cost_dict_total =
    extrair_coordenadas_bidirecional(arquivos_csv, base_path)

    coordenadas_aeroportos = coordenadas_aeroportos_extraidos.copy()

    print("Coordenadas Extraídas dos Arquivos CSV:")
    for aeroporto, coord in coordenadas_aeroportos.items():
        print(f"{aeroporto}: {coord}")

    print("\n" + "="*50 + "\n")

    for nome, arquivo in arquivos_csv.items():
        caminho = os.path.join(base_path, arquivo)
        if os.path.exists(caminho):
            processar_aeronave_cenario2(
                nome, caminho, coordenadas_aeroportos
            )
        else:

```

```
        print(f"Arquivo não encontrado: {caminho}")  
if __name__ == "__main__":  
    main()
```