

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES AÉREOS

Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para
uma comparação detalhada entre Airbus e
Boeing

SALVADOR BELÉM ALEIXO

Provas destinadas à obtenção de grau de Mestre em Operações de
Transporte Aéreo

Dezembro 2024

ISEC LISBOA | INSTITUTO SUPERIOR DE EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS

Escola de Gestão, Engenharia e Aeronáutica

Provas para obtenção do grau de Mestre em Operações de Transporte Aéreo

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES AÉREOS

Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada
entre Airbus e Boeing

Autor(a): Salvador Belém Aleixo

Orientador: Professora Doutora Maria Emília da Silva Baltazar r

Dezembro 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostava de agradecer ao ISEC LISBOA por me ter fornecido os conhecimentos necessários para concluir esta fase académica e que me permitiram desenvolver competências na minha carreira profissional, evoluindo como estudante e profissional da aviação.

Aos docentes do ISEC LISBOA agradeço toda a dedicação, esforço e motivação na partilha de conhecimento e experiências, assim como o apoio no desenvolvimento de capacidades.

Um agradecimento especial dirigido à Professora Doutora Maria Baltazar pelo acompanhamento durante a licenciatura e mestrado, sendo um apoio essencial ao meu sucesso ao longo deste percurso pelo ISEC LISBOA. Agradeço-lhe a disponibilidade dedicada ao meu progresso, ajudando-me a construir o sucesso em todas as etapas ultrapassadas.

Um agradecimento prezado aos meus pais que me deram a oportunidade de estudar e concluir os meus objetivos.

À minha companheira, grato por todo o apoio diário, carinho e motivação, sem ti, não seria possível.

Agradeço aos meus amigos e colegas toda a amizade e companheirismo ao longo deste percurso, recebendo tudo o que tinham para me oferecer e retribuindo.

Obrigado a todos!

RESUMO

O presente Trabalho Final aborda a análise técnica e estratégica de aeronaves comerciais de médio e longo curso, com o objetivo de identificar as opções mais eficientes e sustentáveis para operadores aéreos no contexto das crescentes pressões ambientais e económicas. Este estudo centra-se na comparação entre os modelos Airbus (A320neo e A350) e Boeing (737 MAX e 787 *Dreamliner*), utilizando uma abordagem metodológica mista que combina métodos qualitativos e quantitativos.

A investigação teve como ponto de partida uma revisão bibliográfica abrangente para contextualizar o setor da aviação e os desafios enfrentados pelos operadores aéreos, incluindo o aumento dos custos operacionais, a necessidade de reduzir emissões de carbono e a adaptação às mudanças na procura do mercado.

No âmbito metodológico, foram aplicados dois métodos complementares: o Processo de Hierarquia Analítica (AHP), para definir e priorizar critérios de decisão, e a Análise de Envoltória de Dados (DEA), para avaliar a eficiência relativa das aeronaves selecionadas. Os dados foram adquiridos a partir de relatórios técnicos, estudos de caso e documentos oficiais dos fabricantes, abrangendo critérios como consumo de combustível, custos de manutenção, emissões de CO₂, custo de aquisição, e autonomia. O modelo *hub-and-spoke* foi utilizado como referência operacional para contextualizar a aplicação prática dos critérios analisados.

Os resultados demonstram que, no geral, as aeronaves Airbus apresentam uma ligeira vantagem na vertente ambiental e custos operacionais como com combustível e manutenção. A aplicação do DEA confirmou que ambas as combinações de aeronaves apresentam elevada eficiência relativa, refletindo a competitividade das fabricantes em diferentes cenários operacionais.

Conclui-se que a escolha ideal de aeronaves depende diretamente das prioridades estratégicas de cada operador aéreo, como a sustentabilidade ambiental, redução de custos ou maximização da flexibilidade. Este trabalho oferece uma contribuição prática ao fornecer uma análise estruturada e adaptável às necessidades específicas de operadores aéreos, considerando tanto métricas objetivas quanto prioridades estratégicas. Além disso, destaca a relevância de metodologias multicritério na tomada de decisão, especialmente em setores altamente regulamentados e competitivos como a aviação comercial.

PALAVRAS-CHAVE

Estratégia de seleção de aeronaves, Planeamento de frota, Custos Operacionais, Sustentabilidade ambiental, Operadores Aéreos.

ASBTRACT

This Master's Final Project focuses on the technical and strategic analysis of commercial aircraft for medium and long-haul operations, aiming to identify the most efficient and sustainable options for airline operators amid rising environmental and economic demands. The study compares models from Airbus (A320neo and A350) and Boeing (737 MAX and 787 Dreamliner), employing a mixed methodological approach combining qualitative and quantitative methods.

The research began with an extensive literature review to contextualize the aviation industry, and the challenges faced by airline operators, including rising operational costs, the need to reduce carbon emissions, and adapting to shifting market demands.

Methodologically, two complementary approaches were utilized: the Analytic Hierarchy Process (AHP) to define and prioritize decision criteria and Data Envelopment Analysis (DEA) to evaluate the relative efficiency of the selected aircraft. Data collection relied on reliable sources such as technical reports, case studies, and official manufacturer documents. Key criteria analyzed included fuel efficiency, maintenance costs, co2 emissions, initial purchase cost and range. The hub-and-spoke model served as an operational reference to contextualize the practical application of the analyzed criteria.

The findings reveal that Airbus aircraft generally demonstrate a slight advantage in terms of environmental efficiency and operational costs such as maintenance and fuel. The DEA application confirmed that both aircraft combinations achieve high relative efficiency, reflecting the competitiveness of both manufacturers across various operational scenarios.

In conclusion, the ideal choice of aircraft is directly influenced by the strategic priorities of each airline operator, whether focusing on environmental sustainability, cost reduction, or maximizing operational flexibility. This study provides practical contributions by offering a structured and adaptable analysis tailored to the specific needs of airline operators, while emphasizing the importance of multi-criteria methodologies in decision-making, particularly in highly regulated and competitive industries like commercial aviation.

KEYWORDS

Aircraft Selection Strategy, Fleet Planning, Operating Costs, Environmental Sustainability, Air Operators.

**ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES
AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing**

ÍNDICE

1. Introdução	16
1.1. Generalidades.....	16
1.2. Âmbito	16
1.3. Motivação	16
1.4. Objetivos.....	17
1.5. Metodologia.....	17
1.6. Estrutura do Trabalho	18
2. Enquadramento teórico.....	20
2.1. Planeamento de frota.....	21
2.2. Renovação de frota	24
2.3. Previsões Airbus e Boeing.....	25
2.3.1. Análise das previsões	27
2.3.2. Reflexões Críticas.....	29
2.4. Futuro de frota.....	31
2.5. Receitas	33
2.6. Tomada de decisão.....	35
2.6.1. Processo de Hierarquia Analítica	35
2.6.2. Análise de Envoltória de Dados	36
2.6.3. Integração AHP-DEA.....	36
3. Metodologia e dados.....	39
3.1. Estabelecer os Critérios de Análise.....	39
3.1.1. Custos de Manutenção.....	40
3.1.2. Consumo de Combustível.....	41
3.1.3. Emissões de CO ₂	43
3.1.4. Custo de aquisição.....	45
3.1.5. Autonomia	46
3.2. Recolha de dados	47

3.3.	Contextualização Operacional: O Modelo <i>Hub-and-Spoke</i>	61
3.4.	Aplicação dos Métodos AHP e DEA	62
3.4.1.	Aplicação do método AHP	65
3.4.2.	Construção da Matriz Par-a-Par	69
3.4.3.	Razão de consistência.....	72
3.4.4.	Aplicação do Método DEA	72
4.	<i>Apresentação de Resultados e Discussão</i>	77
4.1.	Resultados do Método AHP	77
4.2.	Resultados do método DEA	81
4.2.1.	Análise dos Resultados.....	95
4.2.2.	Preparação para Discussões Futuras.....	96
5.	<i>Conclusões</i>	99
5.1.	Considerações Finais	99
5.2.	Limitações do estudo	99
5.3	investigações futuras	101
	<i>Referências</i>	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Capacidade e Alcance Airbus vs Boeing	22
Figura 2- Futuro de Frota Airbus	26
Figura 3- Futuro de frota Boeing	27
Figura 4- Procura de aeronaves Airbus.....	28
Figura 5- Procura de aeronaves Boeing	29
Figura 6- Consumo vs Autonomia Boing 787-8, Airbus A350-1000 e Airbus 380-800.....	35
Figura 7- Custos de manutenção anuais.....	41
Figura 8- Custo de combustível	43
Figura 9- Composição de materiais A350.....	48
Figura 10- Custo de Manutenção	49
Figura 11- Consumo de combustível	51
Figura 12- Performance ambiental Boeing 737Max vs NG.....	53
Figura 13- Emissões de CO2.....	54
Figura 14- Airbus A320NEO.....	55
Figura 15- Airbus A350	55
Figura 16- Boeing 737MAX	56
Figura 17- Boeing 787	56
Figura 18- Custo de aquisição.....	57
Figura 19- Alcance A320neo	58
Figura 20- Autonomia da família MAX.....	59
Figura 21- Autonomia B787	59
Figura 22- Autonomia.....	60
Figura 23- Rede United Airlines.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Ordem de importância 1 (Elaboração própria)	65
Tabela 2- Ordem de importância 2 (Elaboração própria)	65
Tabela 3- Ordem de importância 3 (Elaboração própria)	66
Tabela 4- Ordem de importância 4 (Elaboração própria)	66
Tabela 5- Ordem de importância 5 (Elaboração própria)	67
Tabela 6- Soma total dos pontos (Elaboração própria).....	67
Tabela 7- Cálculo dos pesos.....	68
Tabela 8- Pesos Preliminares	69
Tabela 9- Escala de Saaty	71
Tabela 10- Matriz Par-a-Par.....	71
Tabela 11- Inputs e Outputs	73
Tabela 12- Pesos finais.....	78
Tabela 13- CO2 Airbus vs Boeing, AHP.....	79
Tabela 14- Manutenção Airbus vs Boeing, AHP.....	79
Tabela 15- Custo de aquisição Airbus vs Boeing, AHP	80
Tabela 16- Autonomia Airbus vs Boeing, AHP.....	80
Tabela 17-Combustível Airbus vs Boeing, AHP	81
Tabela 18- Pesos Normalizados.....	82
Tabela 19- Valores aplicados no Max DEA Model.....	84
Tabela 20- Resultados DEA.....	84
Tabela 21- Dados dos 4DMUs.....	85
Tabela 22- Valores finais para o Max DEA Model	87
Tabela 23-Resultados DEA (4 DMUs).....	87
Tabela 24- Resultados DEA Fonte: Max DEA Model.....	87
Tabela 25- Resultados DEA Movimento proporcional.....	88
Tabela 26- Resultados DEA Movimento proporcional (continuação).....	89
Tabela 27- Resultados DEA Movimento de folga	90
Tabela 28- Resultados DEA Movimento de folga (continuação).....	90
Tabela 29- Resultados DEA Projeções	91
Tabela 30- Resultados DEA Projeções (continuação)	92
Tabela 31- Resultados DEA Preços Duais.....	93
Tabela 32- Resultados DEA Preços Duais (continuação).....	93
Tabela 33- Resultado DEA final.....	95

ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP- Analytic Hierarchy Process

ASK- Available Seat Kilometer

CORSIA- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

DEA- Data Envelopment Analysis

DMU- Decision Making Units

EU ETS- European Union Emissions Trading System

ICAO- International Civil Aviation Organization

IATA- International Air Transport Association

RASK- Revenue per Available Seat Kilometer

SAF- Sustainable Aviation Fuels

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Desde o início da aviação, tornou-se num meio de transporte estratégico e muito importante comparando com outros meios de transporte a nível global. Consequentemente, a aviação atualmente tem um papel fundamental na globalização, e ajuda a conectar pessoas e mercadorias de forma mais rápida que noutros meios de transporte. Este meio de transporte possui várias características distintivas como a flexibilidade, a rapidez, como referido anteriormente, e a segurança, tornando este meio de transporte indispensável atualmente. Contudo, o crescimento contínuo do setor trouxe também desafios como custos operacionais elevados e pressões ambientais crescentes, devido ao impacto que o mesmo tem nas emissões de carbono.

1.2. ÂMBITO

Este estudo está enquadrado no âmbito da gestão estratégica de operadores aéreos, com um foco específico no planeamento de frota e consequente escolha de aeronaves entre dois fabricantes de aeronaves. Assim, irá abranger algumas das métricas que os fabricantes têm em consideração aquando da escolha de aeronaves, por exemplo, custos relacionados com manutenção ou combustível, ou fatores técnicos como a autonomia. Este trabalho procura assim, auxiliar os operadores aéreos com uma base sólida de informações que os ajudem a escolher um tipo de aeronaves em detrimento de outro. Para tal, será apresentado uma análise comparativa entre as aeronaves da Airbus (A320neo e A350) e da Boeing (737Max e B787), aeronaves referências na aviação comercial atualmente.

1.3. MOTIVAÇÃO

Este tema foi escolhido muito pela atual incerteza na indústria, onde operadores viram-se obrigados a retirar aeronaves das suas frotas mais antigas, e por isso a escolha por um conjunto de aeronaves eficientes para o futuro é importante para colocar os operadores sempre numa janela de operação mais saudável e eficiente. À medida que os operadores se vêm perante desafios, tais como o aumento do preço dos combustíveis, regulações ambientais mais severas, ou até as expectativas dos consumidores por práticas mais

sustentáveis, encontrar e aplicar soluções que equilibrem rentabilidade e responsabilidade ambiental torna-se num fator cada vez mais importante.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é realizar uma análise comparativa entre as aeronaves dos fabricantes mencionados anteriormente, e a partir daí, identificar qual unidade de decisão (Airbus ou Boeing) que no contexto de operações estruturadas no modelo *hub-and-spoke*, tem uma melhor eficiência para os operadores e por isso se pode assumir como a melhor opção para os mesmos no seu planeamento de frota.

1.5. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem que combina métodos qualitativos e quantitativos para analisar aeronaves.

A análise qualitativa terá por base uma revisão bibliográfica e documental, analisando relatórios técnicos, e dados oficiais dos fabricantes Airbus e Boeing, bem como reguladores ICAO (*International Civil Aviation Organization*) e IATA (*International Air Transport Association*).

Já a análise quantitativa será realizada com a aplicação de duas ferramentas complementares: o Processo Hierárquico Analítico e a Análise Envoltória de Dados.

O AHP será utilizado para priorizar critérios e estabelecer os pesos relativos de 5 métricas escolhidas previamente, são essas os custos de manutenção e combustível, custo de aquisição, autonomia e emissões de CO₂, permitindo identificar quais destas métricas são mais relevantes no contexto da seleção de aeronaves, através de uma entrevista e especialistas no setor que dão a sua opinião sobre o grau de relevância de cada um deles. Paralelamente, a DEA terá como objetivo calcular a eficiência relativa de cada uma destas unidades de decisão, considerando *inputs* e *outputs*, derivado dos resultados apresentados pelo AHP.

Por fim, na conclusão serão consolidadas as principais descobertas do estudo, e apresentadas recomendações aos fabricantes com base nesses resultados.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de final de mestrado (TFM) está organizado em cinco capítulos, que seguem uma lógica apresentada em baixo:

O **Capítulo 1** aborda uma introdução ao objetivo e metodologias do trabalho realizado.

O **Capítulo 2** foca-se revisão de literatura, abordando outros estudos relevantes publicados sobre temas como planeamento de frota, e critérios na seleção de aeronaves.

O **Capítulo 3** detalha a metodologia utilizada neste estudo, incluindo a definição dos critérios selecionados, a descrição dos métodos AHP e DEA, e os processos de recolha e análise de dados.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos através das ferramentas de análise AHP e DEA, e ainda inclui uma explicação desses mesmos resultados.

Por fim, no **Capítulo 5** este estudo é concluído, e consolida alguns *insights* e contribuições do trabalho. Este capítulo reflete também sobre as implicações práticas dos resultados, e ainda fornece recomendações para a seleção de frotas para os operadores aéreos.

**ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES
AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing**

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Para um operador aéreo, a escolha de aeronaves e consequente gestão da sua frota tem um papel estratégico e crucial na operação dos mesmos, especialmente considerando que o setor da aviação atualmente é cada vez mais competitivo e regulado por questões ambientais e económicas. Com isto, a gestão eficiente destes recursos é uma prioridade não apenas para maximizar a rentabilidade, mas também para garantir a competitividade a longo prazo de qualquer operador. Nesse contexto, ferramentas analíticas como AHP e o DEA serão utilizadas neste trabalho, assente numa abordagem metodológica eficaz para sustentar as tomadas de decisões estratégicas (T. L. Saaty 2002)

Historicamente, o planeamento de frota está relacionado à procura pela existência de um equilíbrio entre eficiência operacional e custos. A eficiência operacional inclui métricas como tempo de rotação em solo e utilização da frota, e é fundamental para maximizar o retorno sobre o investimento elevado feito por cada aeronave (Tretheway et al 1992). Adicionalmente, os custos operacionais, que incluem o consumo de combustível e custos com manutenção, são custos diretos muito elevados que os operadores têm de ter em conta. Nomeadamente, os custos com combustível, que segundo um estudo da IATA, 2023a. representam entre 25% e 30% do total de custos operacionais, tornando assim este custo talvez o critério mais críticos na seleção de aeronaves pela natureza e impacto dos seus custos.

Adicionalmente, também a sustentabilidade ambiental emergiu como um dos pilares centrais para o futuro da aviação. O compromisso global com metas como o "*Net Zero Emissions*" até 2050 impõe desafios consideráveis para as operadores aéreos, que se sentem obrigados a substituir a sua atual frota por aeronaves com menor impacto ambiental e maior eficiência de emissões. Atualmente, tecnologias como motores *turbofan* mais eficientes, que consomem menos combustível e fuselagens menos pesadas, têm desempenhado um papel crucial na mitigação de emissões e na redução do impacto ambiental (International Transport Forum, 2023) Este fator é especialmente relevante para operadores que utilizam redes *hub-and-spoke*, onde a eficiência nos hubs principais e a flexibilidade operacional em rotas *spoke* de menor densidade desempenham um papel estratégico (Rigas Doganis 2019b).

A capacidade de uma frota corresponder às flutuações de procura e mudanças regulatórias é uma prioridade estratégica para os operadores. Modelos de análise com várias métricas, como o AHP, permitem hierarquizar fatores como desempenho ambiental, financeiro e operacional, enquanto o DEA avalia a eficiência relativa das aeronaves em termos de recursos utilizados (*inputs*) e resultados alcançados (*outputs*). Essas ferramentas oferecem assim, um suporte analítico robusto para decisões complexas, alinhando prioridades estratégicas às capacidades das aeronaves (Podinovski 2020).

Dessa forma, a combinação de métodos analíticos e a consideração de critérios podem oferecer uma abordagem abrangente para a escolha de aeronaves. Enquanto o AHP facilita a priorização e a definição de pesos para os critérios de análise, o DEA contribui para a avaliação da eficiência operacional, auxiliando os operadores aéreos a identificar os modelos que otimizam recursos e atendem à procura do mercado. Essa integração metodológica é particularmente relevante no atual panorama da aviação, marcado por avanços tecnológicos acelerados, exigências ambientais crescentes e flutuações nas condições económicas globais.

2.1. PLANEAMENTO DE FROTA

Uma frota é basicamente um conjunto de ativos por exemplo veículos que podem partilhar características técnicas semelhantes, em instalações de manutenção em comum, e operar sob condições parecidas, mas sobretudo pertencem a uma empresa, instituição ou país, associados ao desenvolvimento da atividade, geralmente transporte ou poteção. Já a gestão de frota é a atividade que envolve coordenar e organizar esses ativos, garantindo que funcionem de maneira segura e eficiente (Eng, Ling, and Kong 2015).

O planeamento da frota diz respeito às decisões sobre a composição a longo prazo das empresas de transporte. Assim, uma empresa procura desenvolver a sua frota para dar resposta de forma mais otimizada possível uma rede de procura, com a quantidade prevista de unidades de transporte, respeitando as limitações operacionais. Esse processo de planeamento geralmente envolve decidir quais unidades são necessárias e quando adquiri-las (Sa, Santos, and Clarke 2020).

Uma das decisões estratégicas mais importantes para um operador aéreo é a composição de frota, tanto para o planeamento da mesma como para as suas operações. A frota de um operador aéreo pode ser caracterizada pelo número total de aeronaves que um operador tem e que pode utilizar na sua operação, e o tipo de aeronaves que possui. Cada tipo de aeronaves

possui diferentes características técnicas, como a autonomia, capacidade de transporte de passageiros e carga e custos associados (Eng, Ling, and Kong 2015).

Além disso, diferentes tipos de aeronaves na mesma categoria geralmente possuem características e valores de performance semelhantes, e consequentemente são considerados "concorrentes" no planejamento de frota. Por exemplo, o Airbus A320neo e o Boeing 737Max são aeronaves concorrentes, pois ambas são aeronaves bimotoras *narrow body*, com uma capacidade de aproximadamente 150 a 180 passageiros e uma autonomia e custos operacionais no geral semelhantes. Estes dois fabricantes de aeronaves continuam a expandir as suas famílias de aeronaves, e a sua existência permite que cada fabricante seja competitivo na sua oferta aeronaves possíveis, já que podem oferecer diferentes modelos que se encaixam nas necessidades específicas de cada operador aéreo (Belobaba, Odoni, and Barnhart 2009).

Na Figura 2, é possível encontrar várias famílias de aeronave, e verificar como se comparam em autonomia e capacidade no transporte de passageiros.

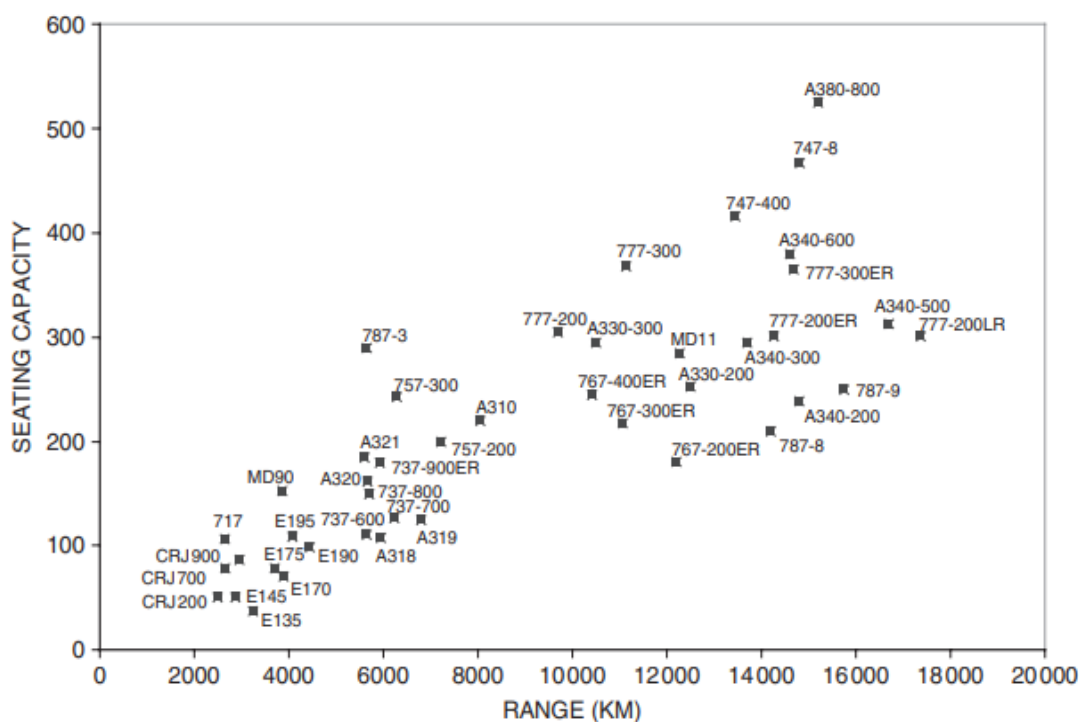


Figura 1- Capacidade e Alcance Airbus vs Boeing
Fonte: (Belobaba, Odoni, and Barnhart 2009)

As decisões dos operadores de adquirir novas aeronaves ou remover aeronaves existentes da sua frota têm um impacto direto na situação financeira global da empresa, nos custos operacionais e, em particular, na sua capacidade de ter lucro em determinadas rotas. A

decisão de obter uma nova aeronave por parte de um operador, é assim um enorme investimento de capital, com uma perspectiva de médio a longo prazo. (Belobaba, Odoni, and Barnhart 2009)

Segundo Stepehn Holloway (2008), um dos principais desafios do planeamento estratégico do operador aéreo é gestão de frota, e essa fase de planeamento consiste em adaptar uma capacidade de produção à procura futura esperada, que requer decisões relacionadas com a aquisição de novas aeronaves. Os operadores aéreos geralmente adquirem aeronaves para substituir a capacidade existente ou, no caso de expansão do mercado e volume de negócio, esta aquisição é exclusivamente para expandir a sua frota e aumentar a sua oferta. Por conseguinte, o planeamento estratégico da frota tem por objetivo orientar a introdução equilibrada da capacidade do operador aéreo no mercado e permitir vantagens competitivas em relação aos concorrentes.

As aeronaves são produtos diferenciados e a diferenciação dos produtos gera receitas económicas. Cada tipo de aeronave requer investimentos de capital humano em competências específicas para pilotos, tripulação e mecânicos que aumentam o grau de diferenciação. Consequentemente, as transportadoras tendem a reduzir ao mínimo o número de tipos de aeronaves que operam. A diferenciação dos produtos também implica que as aeronaves são substitutos imperfeitos umas das outras, o que tem implicações importantes para a concorrência (Gavazza 2010).

A escolha dos modelos de aeronaves é, consequentemente, uma decisão crucial que vai muito além da simples aquisição de equipamento. Define a capacidade de um operador se destacar no mercado e, ao mesmo tempo, condiciona a sua performance. Cada tipo de aeronave traz custos específicos, desde manutenção até formação técnica e estas escolhas iniciais limitam as opções nas fases seguintes do planeamento, afetando diretamente a saúde financeira e a flexibilidade da empresa num mercado tão competitivo. A desregulamentação do setor aéreo teve uma forte influência no modelo económico dos operadores aéreos. Consequentemente, o incentivo económico resultante aumentou o interesse em abordagens de otimização de processos dos operadores. O processo de planeamento dos operadores aéreos é sequencial, com cada decisão a impor restrições à seguinte. E a primeira etapa do processo de planeamento dos mesmos é o planeamento da frota. Este mesmo fator, tem uma forte influência na situação financeira de um operador, precisamente por definir os limites das decisões sequenciais (Gavazza 2010).

2.2. RENOVAÇÃO DE FROTA

Para poder sobreviver num mercado com uma concorrência feroz em termos de custos, e sujeito a uma pressão ambiental cada vez mais intensa, é necessário para um operador aéreo ter um planeamento estratégico adequado da sua frota. Uma dessas formas de planeamento é ter uma política eficaz de renovação da frota, que substitua as aeronaves mais antigas por unidades mais recentes, dos mais recentes dos tipos de aeronaves já disponíveis na lista dos fabricantes noutros mercados secundários de aeronaves. Uma estratégia mais agressiva e dispendiosa pode considerar a modernização ativa da frota com as novas gerações de aeronaves lançadas pelos fabricantes.

Embora a operação de uma frota moderna possa levar a custos mais elevados, relacionados com os pagamentos e a amortização do aluguer de aeronaves e amortizações, pode também proporcionar maiores poupanças nos custos de combustível, uma vez que os novos modelos são normalmente mais eficientes do ponto de vista energético. Para além disso, aeronaves mais modernas podem aumentar a fidelidade e a disponibilidade de fazer passageiros frequentes das transportadoras continuar a pagar pelo serviço prestado, uma vez que estas aeronaves mais avançadas podem estar diretamente relacionadas com um maior conforto a bordo e uma maior qualidade percebida pelos passageiros.

Como refere Paul Clark (2017), os operadores aéreos salientam atualmente a capacidade que as aeronaves têm para contribuir para a sua marca como um atributo crítico do produto. Assim, em última análise, a aquisição de aeronaves de nova geração pode constituir uma situação de *win win* que traz vantagens competitivas de procura e custos, além de possivelmente permitir uma mitigação mais rápida das emissões do operador aéreo. Em contrapartida, ainda existe, no entanto, um forte debate sobre se o ritmo da trajetória de inovação do sector do transporte aéreo tem sido suficiente para atingir um objetivo razoável de redução das emissões (Alessandro V.M. Oliveira, Thiago Caliari, and Rodolfo R. Narcizo 2020)

Atualmente, no setor transportes aéreos, é fundamental que um operador aéreo defina adequadamente o seu nível de padronização da frota. Através desta configuração, uma empresa pode decidir sobre a diversificação da sua frota ao longo de um horizonte estratégico. A escolha entre a padronização e a diversificação da frota revela um compromisso importante no planeamento da frota das empresas, uma vez que é um fator chave da competitividade em termos de custos e da capacidade de servir rotas numa

variedade de mercados, especialmente aqueles com características diversas. Quanto maior for a variedade de rotas servidas pela transportadora, maior deverá ser a diversificação da sua frota. No entanto, com a diversificação, os operadores aéreos não podem tirar partido das características comuns da frota presentes na maioria das famílias de aeronaves. Por conseguinte, a definição correta do nível de normalização da frota de standardização da frota é um elemento estratégico fundamental para o posicionamento no mercado nos mercados modernos e desregulamentados do transporte aéreo (Narcizo, Oliveira, and Dresner 2020).

2.3. PREVISÕES AIRBUS E BOEING

Nas próximas duas décadas, o fabricante europeu acredita que a procura por aeronaves terá um foco menor no aumento de frota por parte dos operadores, e será mais focado na substituição de modelos mais antigos, com um consumo de combustível desadequado para atualidade e pouco eficaz. Portanto, estima que o setor precisará de cerca de 39.000 novas aeronaves, que realizem transporte de passageiros e carga, e desse número, 15250 serão apenas para substituir aeronaves mais antigas dos operadores, ou seja não vão ser um acréscimo na sua frota em termos de números. Consequentemente, até 2040, a grande maioria das aeronaves comerciais será de última geração, aumentando significativamente o valor de apenas 13% atualmente, o que melhora significativamente a eficiência geral da frota, no que toca por exemplo à emissão de CO₂ de aeronaves comerciais no mundo. (Airbus Global Market Forecast, 2021)

Os benefícios económicos da aviação vão para além apenas da indústria, contribuindo para cerca de 4% do PIB global anual e apoiando cerca de 90 milhões de empregos em todo o mundo. E embora esta indústria tenha perdido quase três anos de crescimento durante o período de 2020 a 2022, o tráfego de passageiros mostrou ser resistente a crises e agora prevê uma continuação do crescimento anual de cerca de 3,9%, liderado pela expansão da economia e do comércio global, incluindo o turismo.

Até 2040, espera-se que o segmento da população que viaja frequentemente deva aumentar em dois mil milhões de pessoas, atingindo 63% da população mundial, com a maior parte deste crescimento a ser originado do continente asiático. Neste contexto, o mercado interno chinês estima-se que se torne no maior do mundo. Para responder esta crescente procura, a Airbus estima que o setor precisará de cerca de 29700 aeronaves que realizem operações de médio curso, como a família A320neo. No segmento de aeronaves de maior porte e que

realizem operações focadas em longo curso e transporte massivo de passageiros também se espera que haja um aumento da procura, mas em menor escala, como o A350, e espera-se que sejam entregues cerca de 4000 unidades deste tipo até 2040. (Airbus Global Market Forecast, 2021)

Esta tendência pode ser verificada na Figura 3, que sublinha como os operadores vão realizar uma substituição das suas aeronaves mais antigas por modelos mais recentes. Nas últimas décadas, o setor obteve resultados extraordinários, onde conseguiu reduzir para metade o consumo de combustível por passageiro transportado, o que reflete um sólido compromisso com a sustentabilidade ambiental. A pandemia de covid-19, embora tenha sido um desafio muito significativo em várias vertentes para o setor, acabou por ser positiva no sentido onde conseguiu contribuir para esse objetivo. Pois, com a suspensão de muitas operações, vários operadores decidiram retirar da sua frota aeronaves mais antigas e menos eficientes, acelerando a transição para uma frota mais eficiente, menos poluente, e mais sustentável. Embora tenha sido uma transição em parte forçada pelas circunstâncias, está alinhado aos esforços globais para alcançar objetivos de sustentabilidade mais ambiciosos, um aspeto cada vez mais relevante no contexto atual da aviação. (Airbus Global Market Forecast, 2021)

Only 13% of 2019 fleet in service were new generation aircraft

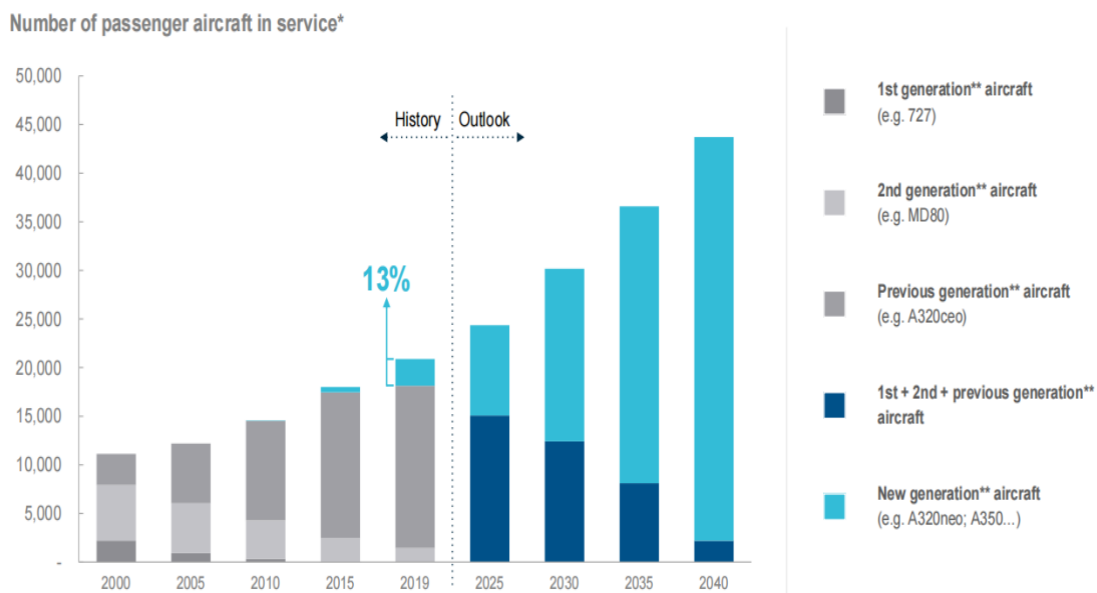


Figura 2- Futuro de Frota Airbus

Fonte: (Airbus, 2021)

O documento analisado da Boeing (2021) também destaca a projeção da recuperação resistente do tráfego de passageiros, liderada pelo crescimento económico global e pela expansão do turismo.

Segundo a Boeing, e de forma muito semelhante à Airbus, uma parte muito significativa da procura futura por aeronaves deve substituir as aeronaves mais antigas. Nas próximas duas décadas, a Boeing inclui um equilíbrio no processo de aquisição de novas aeronaves em renovação e substituição de frota atual.

O que irá culminar numa frota em 2040 composta por aeronaves mais eficazes, refletindo assim a escolha da renovação da frota associada ao compromisso contínuo com a sustentabilidade no setor. A Figura 4 mostra uma projeção de um aumento significativo na frota global nos próximos 20 anos, com a entrega de 54% destinada ao crescimento da frota e 46% para substituição.

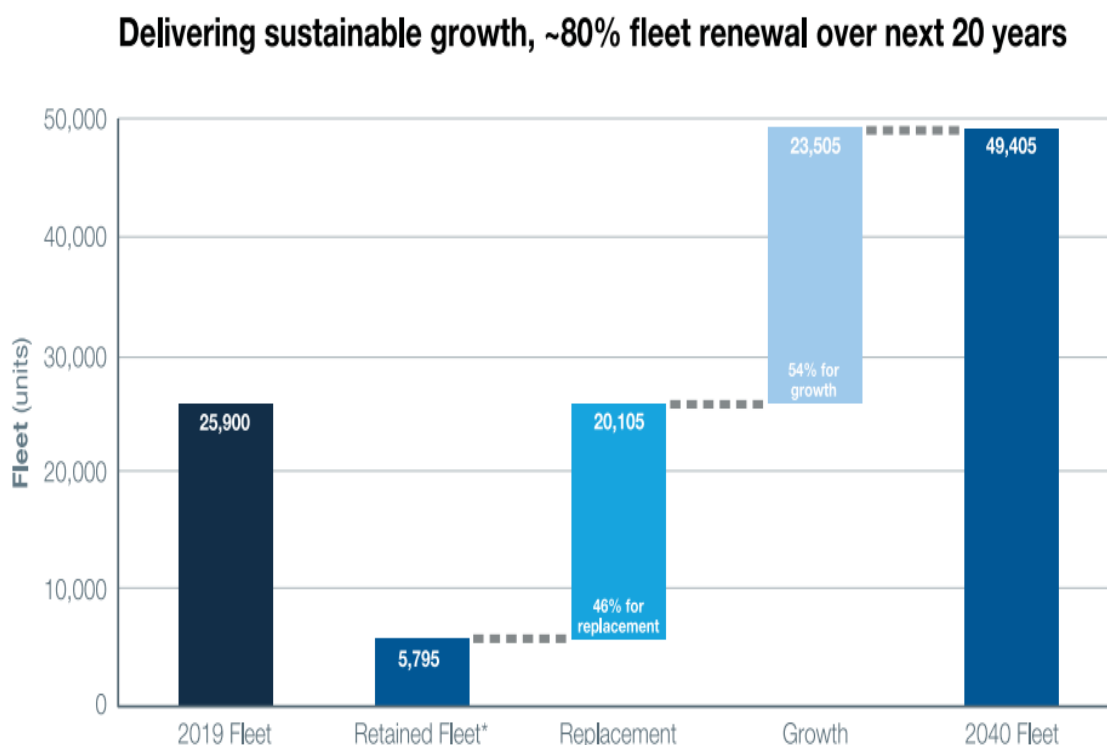


Figura 3- Futuro de frota Boeing
Fonte: (Boeing, 2021)

2.3.1. ANÁLISE DAS PREVISÕES

A análise das previsões fornecidas pela Airbus e pela Boeing demonstra que a indústria atravessa um momento de uma transição fundamental no que toca à composição de frota dos

operadores, guiada pelo progresso tecnológico, por mudanças na procura do mercado e pela crescente pressão pela sustentabilidade ambiental.

As projeções de ambos os fabricantes, esperam que haja um forte crescimento na procura por novas aeronaves nos próximos 20 anos, sublinhando a existência de um equilíbrio entre o aumento número de aeronaves na composição de frota dos operadores, e também na substituição de aeronaves mais antigas. Uma ação que é essencial para atingir metas ambientais globais e corresponder às necessidades operacionais do mercado. Nas recentes previsões da Airbus (2024), esta projeta uma entrega de cerca de 42000 novas aeronaves, com foco para aeronaves de médio curso, que representam cerca de 80% das entregas. Esta transição, inclui 20440 unidades projetadas para substituir aeronaves de gerações anteriores. Além disso, a crescente popularidade do SAF e outras tecnologias disruptivas, como aeronaves movidas a hidrogénio, reforça o compromisso da Airbus com a descarbonização do setor. As iniciativas, como a introdução de uma versão exclusivamente cargueira do A350 e a capacidade de operar com 100% SAF até 2030, mostram uma direção clara para o futuro. Parte desta análise pode ser representada pela Figura 5.

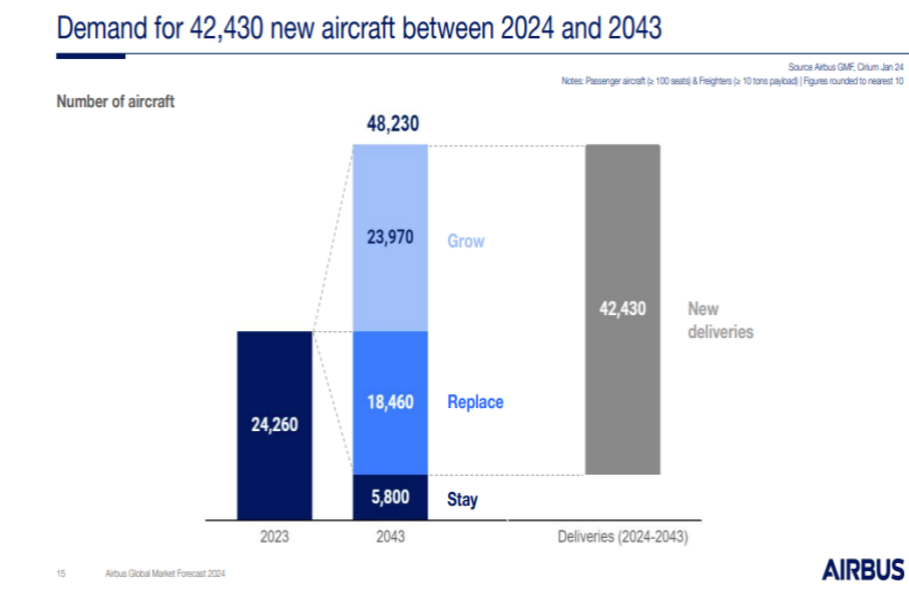


Figura 4- Procura de aeronaves Airbus
Fonte: (Airbus 2024)

A Boeing (2024) aceita uma abordagem semelhante, sublinhando a importância da entrega e operação de aeronaves mais eficientes e menos caras de operar. Com bastante atenção para a recuperação do pós-covid, e ao crescimento do mercado interno como o mercado asiático e do Médio Oriente.

Os modelos analisados neste trabalho como o 737 Max e 787 vão desempenhar um papel principal e fundamental na estratégia do fabricante, que sublinha a sua eficiência de combustível, melhor valores de performance, e custos operacionais gerais menores em comparação com os seus antecessores. A Boeing também estabelece que o retorno de passageiros e transporte de carga irá continuar a ser guiado pelo crescimento económico global e pelo aumento populacional das pessoas que viajam em regiões chave como China e Índia. Em segundo plano e como pode ser visto na Figura 6, o fabricante americano, continua com perspectivas de crescimento bastante positivo nos próximos 20 anos, mantendo as previsões 2021.



Figura 5- Procura de aeronaves Boeing
Fonte: (Boeing 2024)

2.3.2. REFLEXÕES CRÍTICAS

Apesar de os dois fabricantes terem previsões positivas em relação ao crescimento da indústria, mais especificamente na entrega de novas aeronaves e otimização das frotas dos operadores, tornando-se maiores e compostas cada vez mais por aeronaves de novo geração, é essencial que sejam reconhecidos desafios significativos associados à ao sucesso destes mesmos objetivos.

Um dos maiores obstáculos está na disponibilidade limitada da SAF, que atualmente é utilizado apenas como pequena parte do combustível usado globalmente. (European Aviation Safety Agency 2019). Para se poder expandir a utilização de SAF até atingir níveis necessários para corresponder à procura que se espera encontrar no futuro, será necessário fazer grandes investimentos e será também preciso isentivos por parte dos governos.

No que toca à expansão e atualização de frota como apontam os fabricantes, será preciso ter em conta que a insegurança económica global atual, exacerbada por fatores como a inflação, as flutuações dos preços de bens fundamentais e crises financeiras, podem de certa forma colocar em risco os planos de expansão de frota, pelo menos com a velocidade prevista, e em particular para operadores menores.

Outro ponto crítico é a volatilidade geopolítica, que afeta não apenas o fornecimento de matérias-primas essenciais para a produção de aeronaves, mas também a estabilidade dos mercados aéreos regionais. Pois, conflitos, sanções e restrições comerciais podem criar obstáculos inesperados para fabricantes e operadores aéreos, podendo dificultar assim a implementação de estratégias de longo prazo (IATA, 2023).

Apesar do incentivo positivo para substituir aeronaves mais antigas por modelos mais recentes, o respeito dos prazos de entrega fornecidos pelos fabricantes aos operadores, deve enfrentar sérios desafios e possíveis atrasos que já se estão a verificar atualmente. Estes atrasos são causados por várias combinação de fatores, incluindo a alta procura por parte dos operadores, limitações na cadeia de produção e problemas técnicos em programas importantes, como o Boeing 737Max e o 777X (Thompson 2018). Estes atrasos nas entregas de aeronaves dificultam a capacidade dos operadores aéreos de renovarem as suas frotas a um ritmo suficiente para corresponder às metas ambientais e às expectativas dos mercados do que diz respeito à vontade de aumentar a oferta devido ao grande aumento da procura. Além disso, ao aumentar o volume de produção para corresponder ao aumento da procura pode de certa forma comprometer a qualidade e confiabilidade dos produtos finais, gerando possíveis novos riscos para o setor (Kharina et al. 2016).

Ainda outra questão que pode e deve ser abordada é o facto de que para atingir uma redução significativa nas emissões de carbono não dependerá apenas da entrega destas novas aeronaves, e requer uma cooperação conjunta entre vários setores, não é por isso uma tarefa fácil. Por exemplo, seria importante que existe-se uma melhoria na gestão de programas de tráfego aéreo, para desempenhar um papel fundamental na otimização das rotas aéreas, para que as aeronaves consumam menos combustível, e conseqüentemente haja menos emissões de CO₂ e custos para os operadores. E para tal, é necessário que exista um esforço comum entre os fabricantes, operadores aéreos, e entidades governamentais, que devem colaborar e investir significativamente em direção a estes objetivos (Kharina et al. 2016).

Apesar dos desafios, a indústria da aviação já mostrou no passado ser bastante resiliente perante desafios, como por exemplo com a crise relacionada com o Covid-19, e a

consequente rápida recuperação mostrando que o setor tem uma capacidade única de se adaptar e inovar. Atualmente, enfrentar os desafios que o setor da aviação enfrenta é complicada, pois estamos perante uma indústria que deve encontrar um equilíbrio sensível entre o progresso avançar com inovações tecnológicas e garantir a sustentabilidade económica. Assim, como foi referido anteriormente, entre governos, fabricantes, e operadores aéreos terá de existir um compromisso conjunto para tornar este setor mais sustentável e resistente.

Apenas assim será possível conciliar a inovação tecnológica com o crescimento económico, permitindo que a aviação continue a ligar pessoas e mercadorias de todo o mundo, enquanto dá resposta às expectativas ambientais e sociais que vão continuar a aumentar. (Rigas Doganis 2019a)

2.4. FUTURO DE FROTA

Na história da aviação, tem sido um fator recorrente, o aumento no tamanho e na capacidade de transporte de passageiros e carga de uma aeronave de geração em geração, e tal feito culminou no Airbus A380 com uma capacidade típica entre 450 e 600 passageiros.

No entanto, essa tendência tem tido uma trajetória decrescente e está possivelmente a chegar a um fim, e agora é previsível que o tempo de operação do Airbus A380 seja bastante curto, já que, em 2019, menos de 12 anos após o início do seu serviço, a Air France foi a primeira operadora do tipo, a anunciar a retirada antecipada de toda a frota A380 (Marc Praquin, 2019)

Durante vários anos, as novas encomendas do tipo foram relativamente escassas e o final da sua produção foi publicado em fevereiro de 2019 (Airbus, 2019). Um destino algo semelhante ao por exemplo, do Boeing 747-8, dos quais apenas 35 foram construídos para o serviço de passageiros. Esta baixa procura uma aeronave de passageiros de grande dimensão, revela os desafios que se colocam aos operadores aéreos para operarem esta categoria de aeronaves de forma rentável, apesar de uma tendência de crescimento substancial da aviação, uma vez que a procura medida em passageiros-quilómetro tem vindo a aumentar em média 4-4,5 % há várias décadas. A pandemia covid-19 acelerou a retirada deste tipo de aeronaves, uma vez que os operadores retiraram temporariamente ou permanentemente da sua frota aeronaves como A380, Boeing 747-400 e Airbus A340-600. Contudo, não se pode atribuir a culpa apenas à pandemia pela causa do quase

desaparecimento deste segmento de aeronaves, pois estas já tinham começado a ser substituídas por aeronaves bimotoras mais eficientes.

Em 2009, a Airbus, (2009) previu uma procura de 1318 aeronaves *wide body* para o período 2009-2028. Já a Boeing (2009), apesar de mais cética em relação ao desenvolvimento desse segmento de mercado, também previu 960 entregas entre 2006 e 2026, e de seguida reduziu as previsões para 820 unidades entre 2011 e 2030. No entanto, no início do programa do Airbus A380, geraram-se dúvidas no que toca à sua praticabilidade e sucesso a nível operacional. Em sentido contrário, com a estratégia de Boeing que se começou a concentrar em produzir aeronaves de menor dimensão, mas mais eficientes e que operassem nos mesmos mercados (Kummer et al. 2007.) Além da suposição da Airbus, segundo a qual a crescente procura pela aviação seria uma lógica suficientemente razoável para fabricar e operar aeronaves maiores, a existência de questões políticas também tiveram um papel significativo na decisão do projeto do A380, por ser um projeto que iria criar muitos postos de trabalho, e simplesmente também pela rivalidade com os Estados Unidos, onde a Boeing liderava a produção de aeronaves de passageiros de grandes dimensões, com o B747 e B777, à qual a Airbus não tinha resposta ao mesmo nível.

No geral, a ideia de desenvolver uma aeronave de passageiros cada vez maior é baseada no princípio económico de economias de escala, uma vez que os custos unitários são reduzidos quando o tamanho da aeronave aumenta. Este conceito é suportado na ideia de que certos custos operacionais como por exemplos taxas aeroportuárias devido à dimensão da aeronave permanecem relativamente fixas ou crescem de forma marginal, independentemente do número de assentos. Assim, ao transportar mais passageiros por voo, na teoria o custo por passageiro seria diluído, gerando maior receita para os operadores.

No entanto, estudos como o de Wei and Hansen (2003) indicam que essa lógica nem sempre é validade no mundo real, segundo os autores, as economias de escala associadas ao aumento do tamanho da aeronave podem ser limitadas por fatores como a infraestrutura aeroportuária, que impõe restrições a aeronaves muito de grande dimensão, e para além disso, os custos variáveis associados com a sua operação regular, como o consumo de combustível por passageiro, podem não diminuir proporcionalmente devido a ineficiências relacionadas por exemplo com o seu excesso de consumo de combustível, custos de manutenção com 4 motores ou até relacionadas com o seu peso estrutural. Estas questões sugerem que as vantagens económicas esperadas previamente, encontrar obstáculos para verem o esperado ser realidade.

Outros estudos analisaram os fatores que influenciam nas decisões dos operadores aéreos entre ter uma operação focada em operar aeronaves de grande porte com poucas frequências de voos, ou operar aeronaves de menor dimensão, mas em maior frequência para poder igualar a oferta em cada rota, como é o caso de Givoni and Rietveld (2009) que concluíram que os operadores priorizam cada vez mais o aumento de frequências em detrimento de maiores aeronaves. Pai (2010) destaca que essa escolha depende também de estrutura da procura, ou seja, do tipo de passageiros para cada rota, pois os passageiros de negócios valorizam mais frequências, já passageiros de turismo, apenas são mais sensíveis ao preço.

Embora estes estudos estejam focados em rotas de curto a médio curso, as conclusões a serem retiradas podem ser aplicadas em operações de longo curso, e ajuda a explicar o o fracasso recente e descontinuação das maiores aeronaves de passageiros.

Nesse contexto, a introdução de aeronaves mais eficientes que permitam aos operadores realizar mais frequências, com melhor consumo de combustível por tonelada transportada, ainda que menores no que toca à capacidade de transporte de passageiros e carga, acabam por oferecer benefícios económicos e operacionais com menor risco para os operadores, e por isso são o tipo de aeronaves que os operadores procuram no futuro.

2.5. RECEITAS

A gestão de receita desempenha um papel fundamental na aviação, permitindo que os operadores aéreos sirvam passageiros com diferentes níveis de necessidades. No contexto de voos de longo curso, as receitas individuais de bilhetes podem variar significativamente e a análise de distribuição dos mesmos fornece informações sobre como os passageiros contribuem para o total de receitas dos operadores aéreos.

Por exemplo, segundo Grimme, Maertens, and Bingemer (2022), num estudo sobre o serviço do Airbus A380 da Lufthansa que fazia a rota Frankfurt Singapura em 2019 revela *insights* significativos. Usando os algoritmos da IATA para a alocação de receita, que desagregam os valores dos bilhetes para voos com vários segmentos, a análise concentra-se no lucro líquido após as taxas de dedução e impostos. Em 2019, a Lufthansa transportou 137.000 passageiros nessa rota, com diferentes cenários para cada passageiro. De forma significativa, os passageiros em trânsito representaram 87% desse serviço. Nesse mesmo ano, a operadora alemã teve uma faturação de 83,6 milhões de dólares americanos nessa rota, com uma concentração significativa da receita em subgrupos de passageiros, pois cerca de 20% dos

mesmos contribuíram com 60% da receita, enquanto o segmento com menor poder de compra (40% dos passageiros) contribuiu apenas para 10% da receita.

Apesar da natureza agregada dessa análise ao longo de um ano completo, as variações na procura e no rendimento em diferentes estações sugerem que uma redução na capacidade de assentos oferecida resultaria numa perda de receita proporcionalmente menor. Além disso, a mudança de aeronaves como o A380, para aeronaves menores e mais eficientes, no que toca por exemplo ao consumo de combustível, como o A350, poderia levar à melhoria da lucratividade nessa rota. Por exemplo, a mudança de operar nessa rota o A380 para um serviço diário com A350-1000 poderia reduzir o número de passageiros em cerca de 40%, mas uma perda de receita de apenas 10%.

Assim, dadas um consumo de combustível bastante inferior e consequentemente custos operacionais mais baixos associados a aeronaves menores de longo curso com dois motores, como o A350, é concebível que se tenha uma receita inferior, em comparação com o A380, pois como se pode verificar na figura 7, tanto o B787 como o A350 atingem valores de receita muito mais facilmente, necessitando de transportar muito menos passageiros para atingir valores semelhantes ao A380.

Com base nesta análise, os autores concluem que uma redução na capacidade máxima de assentos por voo (pelo menos a curto prazo) não afeta substancialmente o resultado dos operadores aéreos. Ao mesmo tempo, a operação de aeronaves menores, mas mais modernas, pode ser realizada a um custo mais baixo, de modo que os lucros provavelmente permaneçam relativamente constantes.

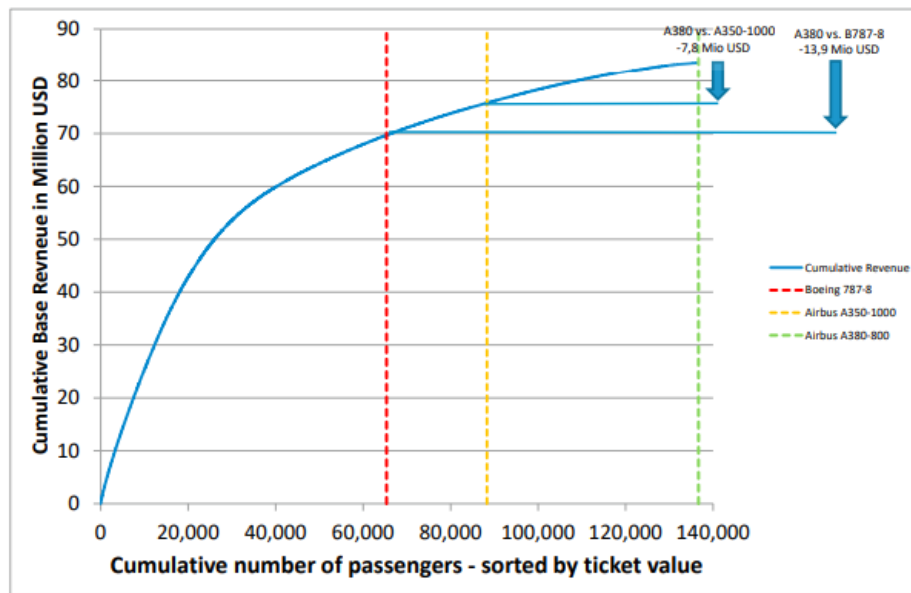


Figura 6- Consumo vs Autonomia Boeing 787-8, Airbus A350-1000 e Airbus 380-800
Fonte: (Grimme, Maertens, and Bingemer 2022)

2.6. TOMADA DE DECISÃO

A escolha da Análise de Envoltória de Dados (DEA) e do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) para este estudo foi decidida pela necessidade de realizar uma análise com rigor da eficiência relativa entre duas unidades de decisão através de métricas de performance. E ambos os métodos são reconhecidos pela sua robustez em contextos industriais e acadêmicos, especialmente quando há necessidade de lidar com vários critérios de decisão. Juntos, eles oferecem uma estrutura metodológica que combina objetividade quantitativa e flexibilidade analítica.

2.6.1. PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA

O AHP, introduzido por Tomas L. Saaty nos anos 1970, é bastante utilizado em estudos com muitas diretrizes. Este método ajusta os critérios numa estrutura hierárquica e utiliza comparações par-a-par para atribuir pesos às dimensões relevantes, garantindo uma avaliação planeada da importância correspondente de cada critério escolhido.

De acordo com Saaty (2008), o AHP é baseado em três etapas:

1. Construção de hierarquias: Definição clara dos níveis de análise, desde os objetivos principais até os critérios e subcritérios;

2. Determinar prioridades: Comparação par-a-par, que permite avaliar a relevância relativa de cada critério no contexto analisado;
3. Consistência lógica: Para garantir uma consistência das decisões tomadas para ter a certeza de que as comparações realizadas sejam livres de contradições.

Neste estudo, os critérios que foram escolhidos para avaliar as aeronaves são os custos de manutenção, o consumo de combustível, as emissões de CO₂, a autonomia e o custo de aquisição. De forma a atribuir-se um peso a cada um destes fatores, usou-se o método AHP, que com base na resposta de especialistas no setor sobre a importância de cada uma destas métricas, vai definir pesos finais, utilizados posteriormente no DEA para calcular a eficiência relativa dos DMUs.

2.6.2. ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

O DEA é uma metodologia quantitativa que avalia a eficiência relativa das unidades de decisão com base em *inputs* e *outputs*. O método DEA, ao contrário de outras metodologias, não requer um peso predeterminado, e calcula a eficiência relativa de cada unidade em comparação com uma fronteira de eficiência, ou seja, o limite no qual, essa unidade de decisão atinge um valor de eficiência $0=1$ (Thomas R. Sexton and Herbert F. Lewis, 2003). Este método oferece a vantagem de identificar as unidades que atuam como padrão nos conjuntos analisados, permitindo que outros DMUs entendam as áreas em que o seu desempenho pode aprimorado para poder chegar à tal fronteira de eficiência. Ao aplicar este método, o estudo é capaz de capturar a complexidade operacional das aeronaves, incluindo fatores que não são diretamente comparáveis aos métodos tradicionais (Thomas R. Sexton and Herbert F. Lewis, 2003).

2.6.3. INTEGRAÇÃO AHP-DEA

A integração destes dois métodos é importante neste trabalho para garantir que se realiza uma análise mais completa. Pois embora o AHP forneça os pesos iniciais com base em pressupostos dados por especialistas, o DEA aplica esses mesmos pesos para avaliar a eficiência relativa de cada unidade de decisão, permitindo assim que os resultados obtidos pelo método possam refletir a importância relativa dos critérios estabelecidos, garantindo uma maior consistência entre o modelo qualitativo e quantitativo (Thomas R. Sexton and Herbert F. Lewis, 2003).

A combinação metodológica refere-se aos limites de cada método individualmente. O AHP, apesar de ser excelente para critérios hierárquicos, acaba por ser limitado pela sua subjetividade na determinação de pesos, enquanto o DEA, apesar da sua objetividade na avaliação da eficiência, carece de um mecanismo interno para definir a relevância de cada critério. Portanto, uma abordagem integrada garante que as análises sejam relevantes para o contexto da decisão (Thomas R. Sexton and Herbert F. Lewis, 2003).

Esta combinação de métodos não é única na literatura, para melhorar ou reforçar processos de decisão tem sido amplamente explorada por vários autores, com resultados publicados em estudos como os de (Hsu, Chang, and Wu 2009), (Fernández and Kekäle 2008) e (Shankar and Sarkis 2008) que integraram AHP e DEA.

Mais especificamente, a combinação do AHP com o DEA pode ser observada em vários estudos como o de Shang and Sueyoshi (1995) onde aplicaram os resultados do AHP no DEA para selecionar um sistema de manufatura flexível. Yang and Kuo (2003) combinaram as metodologias AHP e DEA para resolver problemas de design de layout de plantas industriais. Existem ainda os trabalhos de Tavana et al. (2023), (Tseng and Lee 2009) e Azadeh et al. (2008), que também exploraram a integração entre DEA e AHP.

3. METODOLOGIA E DADOS

O principal objetivo desta análise é poder oferecer uma base comparativa para os operadores aéreos, em particular aqueles que operam em hubs, na seleção de aeronaves mais apropriadas para suas operações, com uma perspectiva de médio a longo prazo. Portanto, o estudo tenta identificar, avaliar e comparar o desempenho das aeronaves da Airbus e da Boeing, com foco em modelos amplamente utilizados, como A320Neo, A350, Boeing 737 Max e Boeing 787. As variantes selecionadas correspondem a ser equilibrado de cada família: As variantes selecionadas correspondem às mais comuns e equilibradas de cada família: Airbus A320neo, A350-900, Boeing 737MAX8 e Boeing 787-9.

No contexto atual, bastante competitivo da aviação comercial, os operadores aéreos enfrentam desafios constantes para otimizar as operações, reduzir custos e, ao mesmo tempo, melhorar a experiência dos passageiros (Rigas Doganis 2019a). Como resultado, a escolha de aeronaves alinhadas a esses objetivos estratégicos é essencial para garantir a sustentabilidade e o sucesso das empresas a longo prazo.

Consequentemente, este estudo irá querer fornecer uma sólida base de informações operacionais sobre aeronaves, e análises que ajudem os operadores aéreos a tomar decisões para escolher a sua frota, entre os dois principais fabricantes de aeronaves comerciais. Para atingir a meta proposta, este capítulo será estruturado em duas partes principais:

Análise de aeronaves da Airbus- Esta parte analisará o desempenho dos principais modelos da Airbus, através da utilização dos critérios de autonomia, custos de aquisição, consumo de combustível, custos de manutenção e emissões de CO₂.

Análise da Boeing- Semelhante à análise do modelo Airbus, esta seção irá ser concentrada no Boeing 737 Max e Boeing 787. Os mesmos critérios serão aplicados para permitir a comparação direta aos modelos Airbus. O objetivo é realizar uma comparação com as aeronaves concorrentes da Airbus e fazer uma análise de eficiência relativa, através de uma análise DEA.

3.1. ESTABELEECER OS CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Este trabalho foca-se nos critérios de custo de combustível, manutenção, aquisição, autonomia e emissões de CO₂, para a avaliação de aeronaves. Estes critérios foram selecionados previamente com a ajuda de (Rigas Doganis 2019a; IATA 2023d; 2024) pela

sua relevância nas operações dos operadores, e refletem a importância de alinhar as capacidades das aeronaves com as exigências operacionais e financeiras dos mesmos. A análise desses critérios permite fazer uma avaliação por parte dos operadores na comparação de aeronaves que são atualmente referência na indústria, e assim ter uma tomada de decisão fulcral para o futuro de um operador aéreo.

3.1.1. CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Os custos de manutenção representam um custo operacional significativo na aviação comercial, que pode chegar até 10% do total de custos dos operadores aéreos (Cros 2022a). É um critério importante para a sustentabilidade econômica das operações, influenciando diretamente a competitividade e a margem de lucro de qualquer operador.

Custos Diretos e Frequência de Manutenção

Os custos diretos de manutenção são ações nas aeronaves que incluem trabalhos de manutenção previamente planejados, substituição de peças, e inspeções programadas, cuja frequência e complexidade variam conforme a idade e os sistemas da aeronave. Atualmente, a utilização de, por exemplo, materiais compósitos contribui para prolongar os intervalos entre inspeções mais demoradas e completas, como as verificações do tipo C, resultando numa redução significativa dos custos ao longo do ciclo de vida da aeronave (Hoi-Lam Ma et al., 2022)

Custos Indiretos

No que se refere aos custos indiretos, estes englobam perdas de receita causadas pela indisponibilidade de aeronaves durante períodos de manutenção, bem como despesas adicionais relacionadas à reorganização de cronogramas de voo e à utilização de aeronaves reserva.

Em sistemas *hub-and-spoke*, a ausência de uma aeronave pode desencadear atrasos em cadeia, afetando várias rotas e elevando os custos operacionais totais (Valeria Vercella and Marco Fioriti, 2021). Assim, a gestão eficiente das atividades de manutenção torna-se crucial para assegurar a resiliência das operações aéreas.

Relevância Estratégica

Os custos de manutenção são cruciais para a viabilidade econômica de uma frota e estão intrinsecamente ligados a outros critérios, como eficiência de combustível.

Uma gestão eficaz desses custos melhora a fiabilidade da frota, reduz interrupções operacionais e amplia as margens financeiras em mercados competitivos. Além disso, a redução de custos de manutenção oferece vantagens diretas em termos de rentabilidade e flexibilidade estratégica (Valeria Vercella and Marco Fioriti, 2021).

Na Figura 8, ilustrada pela (IATA 2022) é possível verificar a elevada despesa anual que a manutenção encarrega aos operadores, e com perspectivas futuras crescentes, daí ser fundamental estarem preparados e equipados com aeronaves o mais eficientes possível.

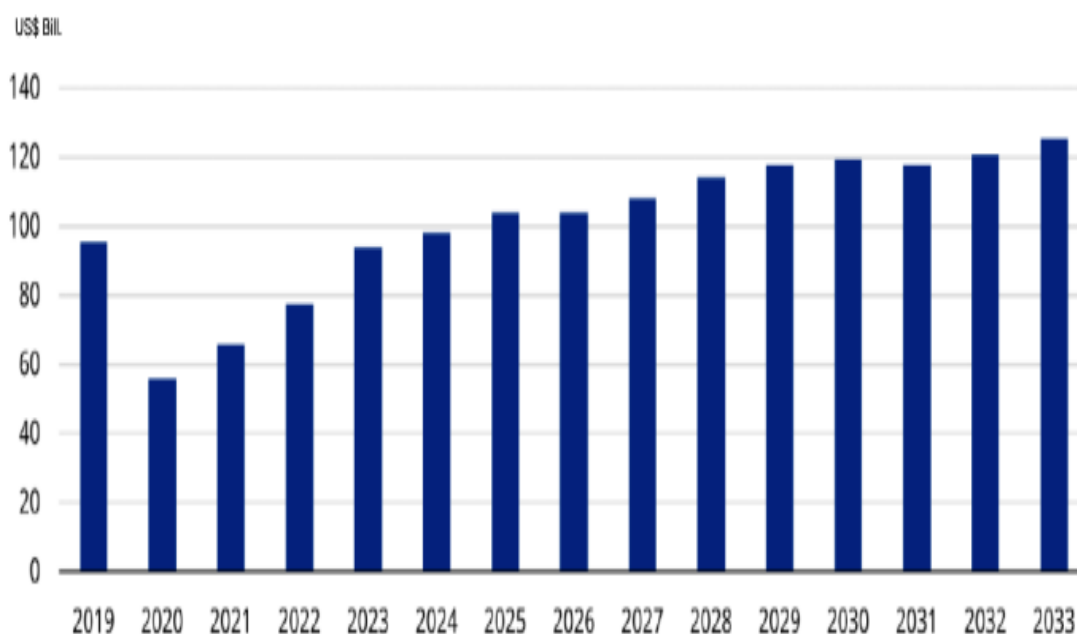


Figura 7- Custos de manutenção anuais
Fonte: (IATA 2022)

3.1.2. CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Atualmente, o consumo de combustível é um dos critérios mais críticos na aviação, tanto para reduzir os custos operacionais dos operadores, como para reduzir a pegada ambiental.

O combustível representa entre 25% e 30% dos custos operacionais totais dos operadores, e é conseqüentemente uma área estratégica de otimização e saúde financeira de um operador Kharina et al. (2016). Ao mesmo tempo, a pressão que corresponde ao aumento dos regulamentos ambientais torna esse critério ainda mais relevante na seleção e operação de aeronaves.

Indicadores de consumo de combustível

Este indicador é geralmente medido com a utilização de dados como passageiros (litro/pax-km). Estas métricas fornecem uma base padrão para a comparação entre o desempenho de diferentes aeronaves em vários cenários operacionais, incluindo curta, média e longa distância. A utilização desses indicadores é fundamental para analisar a eficiência das aeronaves e os benefícios económicos em mercados sujeitos à alta volatilidade nos preços dos combustíveis, segundo indica M.J. Watson et al. (2024).

Tecnologia de motores

Os motores utilizados atualmente em aeronaves como o Airbus A320neo, como o caso do PW1100G e Trent XWB no Airbus a350, são desenvolvidos para ter uma capacidade de oferecer uma maior eficiência através de um menor consumo de combustível. Estes motores são construídos com materiais que suportam altas temperaturas e têm sistemas de combustão otimizados, reduzindo o impacto ambiental e os custos operacionais durante a operação das aeronaves e o seu tempo de vida no geral.

Peso estrutural

A utilização de materiais compostos por fibras de carbono reduz o peso estrutural das aeronaves.

Os fabricantes, nomeadamente Airbus e Boeing adotaram este tipo de tecnologias nas novas aeronaves para melhorar o consumo de combustível no geral, o que consequentemente traz benefícios económicos e ambientais. O consumo de combustível tem um impacto direto na redução dos custos operacionais e da sustentabilidade ambiental. Consequentemente as aeronaves com menores consumos oferecem aos operadores vantagens económicas, especialmente em mercados onde os preços de combustível são mais voláteis.

Os custos de combustível são tão altos que estão associados diretamente à capacidade de um operador de obter lucros como mostrado na Figura 9, onde existe uma relação quase perfeita com a subida de preços e descida de lucro, e descida de preços e subida de lucro dos operadores.

Industry Fuel Costs and Net Profit

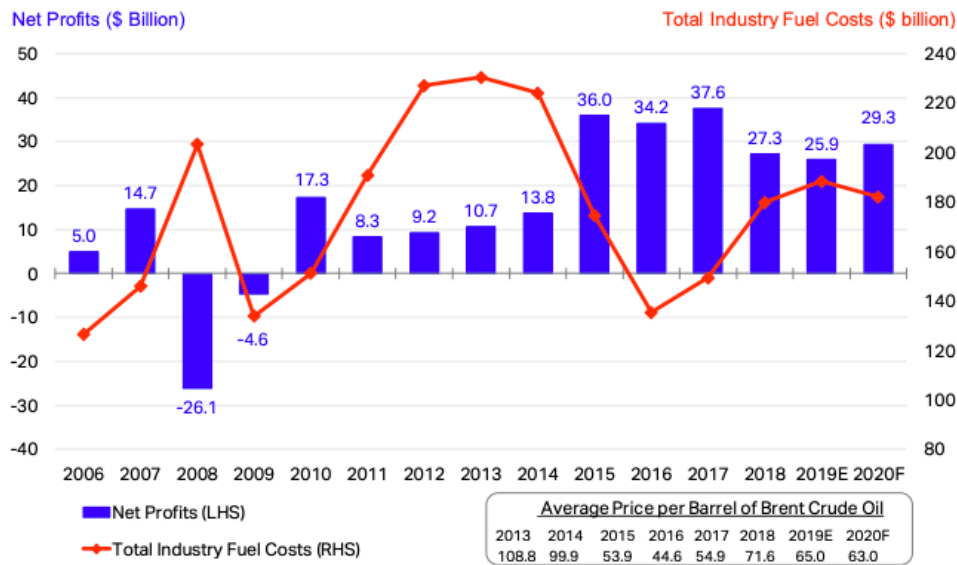


Figura 8- Custo de combustível

Fonte: (IATA 2023c)

Relevância Estratégica

No contexto de redes *hub-and-spoke*, o consumo de combustível é um critério crucial para operações de médio e longo curso. As aeronaves que são capazes de transportar um volume elevado de passageiros e carga e ao mesmo tempo consumir de forma reduzida combustível, reduzem o combustível consumido em quilos por quilómetro, o que pode ser vantajoso para os operadores aéreos.

Para os operadores aéreos, a escolha de frotas mais eficientes neste sentido, é uma estratégia fundamental para equilibrar custos, cumprir regulamentações e mitigar impactos ambientais.

3.1.3. EMISSÕES DE CO₂

Com a crescente preocupação a nível mundial sobre as mudanças climáticas e a sustentabilidade, a performance ambiental das aeronaves tornou-se um critério fundamental na aviação atual, consequentemente, alinhar-se às regulamentações internacionais e às expectativas de consumidores ambientalmente conscientes é vital para os operadores aéreos garantirem competitividade e viabilidade operacional (M.J. Watson et al., 2024).

Este critério avalia o impacto ambiental das aeronaves em termos de emissões de gases de efeito estufa, níveis de ruído e utilização de materiais sustentáveis.

Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa

As emissões de CO₂ são responsáveis por 2-3% do total global de emissões de carbono, destacando a aviação como um setor com impacto significativo no ambiente (Fábio Coelho Barbosa, 2021).

A melhoria no consumo de combustível está diretamente relacionada com a redução de emissões, no sentido em que quanto menos combustível uma aeronave consumir, a sua pegada de carbono quanto às emissões de CO₂ também reduz. Além disso, o uso de SAF pode ser uma ajuda neste sentido, permitindo reduzir as emissões em até 80%. (IATA 2023b).

Iniciativas Regulatórias e Metas Globais

Existem atualmente regulamentos como o esquema de compensação e redução de carbono para a aviação internacional (CORSIA), liderado pela ICAO, que têm estabelecido metas ambiciosas para limitar o crescimento das emissões líquidas de carbono a partir de 2020. Para além disso, existem iniciativas regionais, como o sistema europeu de comércio de emissões (EU ETS), que impõe custos adicionais para emissões, incentivando operadores aéreos a investirem em tecnologias com um menor impacto ambiental e consequentemente aos fabricantes a continuarem a desenvolver e produzir aeronaves com especificações que produzam valores de emissões e ruído cada vez mais inferiores (Fábio Coelho Barbosa, 2021).

Estes regulamentos, juntamente com objetivos como os de emissões zero de IATA até 2050, fortalecem o papel da performance ambiental das aeronaves como um critério necessário na seleção de aeronaves.

Relevância Estratégica

Investir em aeronaves com um efeito ambiental menor, para além de ser uma pressão regulatória, é também uma oportunidade estratégica para os operadores. Os que adotarem opções que poluam menos podem reduzir os custos associados às emissões, aumentar a aceitação dos mercados regulamentados e fortalecer sua reputação com os consumidores que dão prioridade à sustentabilidade. Num setor competitivo como o da aviação, a capacidade de equilibrar níveis de desempenho ambiental e custos operacionais é essencial para garantir sustentabilidade a longo prazo (Prussi et al. 2021)

3.1.4. CUSTO DE AQUISIÇÃO

O custo inicial da aquisição de aeronaves é um dos fatores financeiros mais importantes para os operadores aéreos. Uma vez que é um investimento significativo, muitos operadores recorrem a várias alternativas de financiamento para reduzir o impacto nos fluxos de caixa. Entre as opções mais populares estão os modelos de leasing operacional e financeiro, que não só proporcionam maior flexibilidade, mas também permitem ajustes rápidos na capacidade da frota em resposta a flutuações na procura.

Por exemplo, o leasing operacional funciona como um aluguer de longo prazo que permite que os operadores evitem o impacto financeiro direto da aquisição, enquanto o leasing financeiro, por sua vez, dá à empresa a opção de compra aquando do término do contrato Marintseva and Athousaki (2024)

Valor Residual e Depreciação

A capacidade de uma aeronave de manter um alto residual elevado ao longo do tempo é uma consideração estratégica para os operadores aéreos, particularmente em mercados instáveis. Aeronaves mais recentes, analisadas neste trabalho como o A320Neo e 737 Max, têm uma tendência para ter taxas de depreciação mais baixas devido à sua maior eficiência e procura no mercado em segunda mão. O que faz com que não só reduzam as perdas financeiras durante a renovação da frota, mas também proporciona maior flexibilidade para futuros investimentos em tecnologia e infraestrutura. Além disso, a consideração do valor residual é particularmente relevante nos contratos de leasing. Os operadores podem negociar as condições que mais os beneficiam com base no valor esperado das aeronaves no final do contrato, o que reduz os custos totais do ciclo de vida dos ativos. Esse fator é particularmente importante para os operadores que dependem de contratos de leasing operacionais para manter a sua frota competitiva (David Yu 2020).

Relevância estratégica

O custo inicial é um critério determinante na seleção de frota pois reflete o investimento inicial necessário para a incorporação de um modelo à frota. Esse custo pode afetar diretamente a sustentabilidade financeira do operador, influenciando as decisões de financiamento, contratos de leasing ou compra direta. Além disso, a avaliação dos custos de aquisição deve ser levada em consideração com outros custos operacionais, permitindo a

análise abrangente da relação custo-benefício das aeronaves ao longo do seu ciclo de vida. (David Yu 2020).

3.1.5. AUTONOMIA

A autonomia de uma aeronave é um critério fundamental para operações de médio e longo curso, determinando a capacidade de percorrer uma distância sem ter de abastecer. Esse fator influencia diretamente a eficiência e a utilidade da frota de um operador, pois ter aeronaves com maior autonomia dá ao operador um leque maior de rotas e facilita a gestão da sua frota. (Rigas Doganis 2019a)

Importância da Autonomia nas Operações

A autonomia afeta diretamente a competitividade dos operadores aéreos, pois as aeronaves que têm uma maior autonomia podem operar rotas mais longas sem a necessidade de efetuar escalas, reduzindo assim o tempo de voo, bem como vários custos adicionais no que toca ao consumo de combustível e manutenção (Andrés and Guevara 2023). Além disso, permite também uma maior flexibilidade na gestão de toda a frota, dando a um operador um conjunto de aeronaves com uma utilização mais completa e versátil.

Impacto Estratégico

A escolha de aeronaves com autonomia superior aos concorrentes é essencial para operadores que operam em modelos *hub-and-spoke*, garantindo conectividade eficiente entre hubs. Além disso, maior autonomia pode reduzir a necessidade de escalas técnicas, melhorando a experiência do passageiro e a eficiência do uso da frota (Zhou Ethan 2024.)

A seleção dos cinco parâmetros de análise, custos de manutenção, consumo de combustível, emissões de CO₂, autonomia e custo de aquisição, revelou-se essencial para construir um quadro abrangente e estruturado de avaliação no contexto das operações aéreas de médio e longo curso. Estes critérios foram escolhidos com base na sua relevância estratégica e operacional para os operadores aéreos que operam em redes *hub-and-spoke*, garantindo uma abordagem holística na comparação de aeronaves (Rigas Doganis 2019a)

Cada parâmetro desempenha um papel único, mas inter-relacionado, na definição do desempenho geral das aeronaves. Os custos de manutenção trouxeram uma visão essencial sobre a sustentabilidade de longo prazo e a disponibilidade operacional (Eng, Ling, and Kong 2015). O consumo de combustível, por sua vez, assumiu uma importância dupla, ao influenciar diretamente tanto os custos operacionais quanto os níveis de performance

ambiental, que é cada vez um fator mais central num setor sob pressão para atingir metas de sustentabilidade.

O custo de aquisição complementa a análise ao fornecer *insights* sobre a viabilidade económica das aeronaves, abrangendo custos de aquisição, receita por assento-quilómetro e valor residual. Por fim, a autonomia emerge como um critério essencial para avaliar a adaptabilidade das aeronaves em vários mercados para os operadores (Anshu Agrawal 2024).

A interdependência desses parâmetros ressalta a complexidade das decisões de planeamento de frota. Embora cada critério seja analisado individualmente, é evidente que eles interagem e, muitas vezes, se sobrepõem. Por exemplo, o consumo de combustível impacta diretamente com as emissões de CO₂ e autonomia. Essa interação sublinha a necessidade de uma abordagem analítica estruturada para capturar essas sinergias e compensações (Michael Roskopf, Stephan Lehner, and Volker Gollnick 2024).

Para concluir, a definição destes 5 parâmetros fornece uma base sólida para a aplicação dos métodos AHP e DEA, permitindo uma análise detalhada e consistente das duplas de aeronaves consideradas.

3.2. RECOLHA DE DADOS

Com a definição clara dos critérios de análise para a escolha entre os modelos de aeronaves, é importante recolher os dados das mesmas. Esta parte do trabalho é importante ao garantir que as análises subsequentes são baseadas em informações precisas e relevantes, permitindo uma comparação realista entre os diferentes modelos de aeronaves da Airbus e da Boeing.

Para cada critério estabelecido, foram utilizadas fontes de dados apropriadas, principalmente diretamente dos fabricantes, através de relatórios técnicos, documentos oficiais e análises de performance.

Custos de Manutenção

Airbus A320neo

O A320neo é uma aeronave da Airbus planeada para operar com custos de manutenção significativamente reduzidos em relação ao seu antecessor, o A320ceo. Introduziu motores LEAP-1A e PW1100G que resultaram em intervalos de manutenção ampliados, ou seja, num determinado período, tem de parar de operar menos vezes que os seus antecessores, e menor

frequência de substituição de peças críticas, o que permite reduzir os custos associados às manutenções programadas. Para além disso, utiliza uma estrutura reforçada, mas leve, e a utilização de alumínio e materiais compostos também contribuem para reduzir a necessidade de realizar inspeções com frequência.

O custo médio de manutenção para o A320neo é aproximadamente de \$700 a \$900 por hora de voo, abrangendo todos os tipos de manutenção (preventiva e corretiva), e incluindo inspeções regulares. A Airbus implementou também tecnologias preditivas que monitoram o desgaste de peças em tempo real, evitando falhas inesperadas com maior frequência. (Hensey and Magdalina, 2018).

Airbus A350

O A350 é uma aeronave que possui uma fuselagem feita de 53% de materiais como fibra de carbono, que reduz o peso estrutural consideravelmente e aumenta a resistência à corrosão, eliminando muitas intervenções comuns em aeronaves convencionais. Os motores Rolls-Royce Trent XWB são equipados com sensores inteligentes para monitoramento em tempo real, possibilitando uma abordagem preditiva que antecipa falhas e otimiza os ciclos de manutenção.

Em termos de custo, o A350 apresenta manutenção com valores estimados entre \$1100 e \$1400 por hora. Custos estes compensados pela sua maior durabilidade e custos indiretos inferiores associados ao tempo de inatividade (Airframe Commerce, 2015)

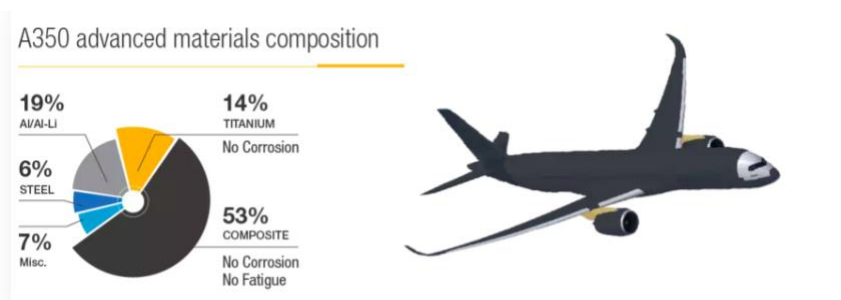


Figura 9- Composição de materiais A350
Fonte: Airbus (2024c)

Boeing 737Max

O 737Max, assim como as aeronaves mencionadas anteriormente, foi projetado para reduzir significativamente os custos de manutenção em relação ao 737 NG. Equipa motores LEAP-1B que apresentam uma maior confiabilidade e, assim como o seu concorrente da Airbus,

permite realizar intervalos de manutenção ampliados, reduzindo assim também a necessidade de parar a mesma para inspeções e substituições de peças. O custo de manutenção por hora de voo é estimado entre \$800 a \$1.000, tornando-o uma opção atraente para rotas de alta frequência (Gailagista et al., 2018).

Boeing 787

O Boeing 787 é composto por 50% de materiais leves, como fibra de carbono, valores semelhantes ao do A350, aliado a isso, é capaz de reduzir significativamente o desgaste estrutural e a necessidade de manutenção frequente. Também possui uma integração de tecnologias capazes monitorizar de forma preditiva e diagnosticar remotamente para permitir prever falhas e otimizar a programação de manutenção. O custo médio de manutenção por hora voo é estimado entre \$1.300 e \$1.500. Assim, como o A350, o Boeing compensa estes custos com uma maior durabilidade, e menos paragens para manutenção comparado com os seus antecessores (Airframe Commerce, 2015)

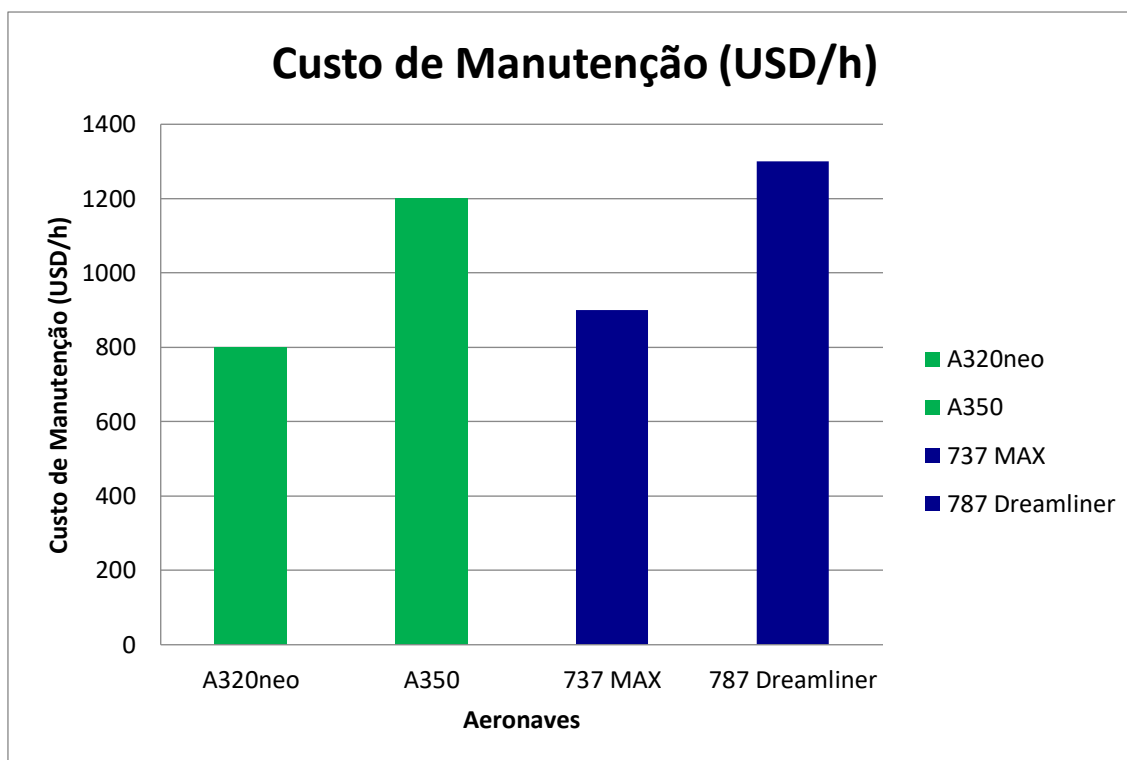


Figura 10- Custo de Manutenção
Fonte: Elaboração própria

Como foi referido anteriormente, e é facilmente perceptível no gráfico de barras em cima, os modelos de menor dimensão dos fabricantes apresentam custos de manutenção inferiores comparativamente às aeronaves de maior capacidade, A350 e B787. Esta diferença entre os tipos de aeronave é originada da simplicidade dos sistemas instalados em aeronaves de menor dimensão e da frequência predominante das suas operações em rotas curtas e médias. (Rahn et al. 2024)

Consumo de Combustível

Airbus A320neo

O A320neo é uma aeronave bastante económica nas rotas de médio curso destinadas ao seu perfil de operação ideal, e é capaz de oferecer uma redução de até 15% no consumo de combustível em comparação ao A320ceo, a versão anterior desta mesma aeronave, o que equivale a um consumo médio de 2,3 litros por 100 km por assento, tornando-se atualmente numa aeronave bastante competitiva neste critério no seu segmento. A sua redução no consumo e melhor eficiência no geral em comparação com o seu antecessor está relacionado com motores mais recentes e eficientes e ligeiras alterações aerodinâmicas nomeadamente nas asas (Airbus, 2024).

Airbus A350

O Airbus A350 opera em rotas de longo curso, e consome até 25% menos combustível do que o seu antecessor, o A340, as razões para tal redução, são uma combinação de motores Rolls-Royce Trent XWB muito mais recentes e uma fuselagem muito mais leve, que reduz consideravelmente o peso da aeronave. Consequentemente, tem um consumo médio de 2,5 a 2,6 litros por 100 km por assento, destacando-se como uma das opções mais eficientes a operar voos de longo curso. O A350 tem também incorporado sistemas de controlo que ajustam automaticamente o desempenho da aeronave para minimizar o consumo em diferentes condições operacionais (Airbus2024).

Boeing 737Max

O 737 MAX oferece uma redução no consumo de combustível de até 15% em comparação com o 737 NG, graças ao facto de possuir novas características relacionadas com os seus novos motores e aerodinâmica. Este modelo consome em média 2,4 litros por 100 km por assento, um nível de eficiência que o torna competitivo em rotas curtas e médias, contribuindo para reduzir significativamente os custos operacionais em mercados de alta frequência (Boeing, 2024).

Boeing 787

O Boeing 787 foi desenvolvido para maximizar a eficiência em operações de longo curso, assim como o A350. É uma aeronave que combina motores GENx e uma estrutura composta por materiais leves, que pode reduzir o consumo de combustível. Consequentemente, o seu consumo é de 2,6 litros por 100 km por assento, representando uma redução de até 20% em comparação com modelos mais antigos, como o Boeing 767. Essa eficiência, aliada à sua capacidade máxima de passageiros e alcance, torna o 787 uma escolha estratégica para rotas intercontinentais e mercados de alta procura (Boeing, 2024).

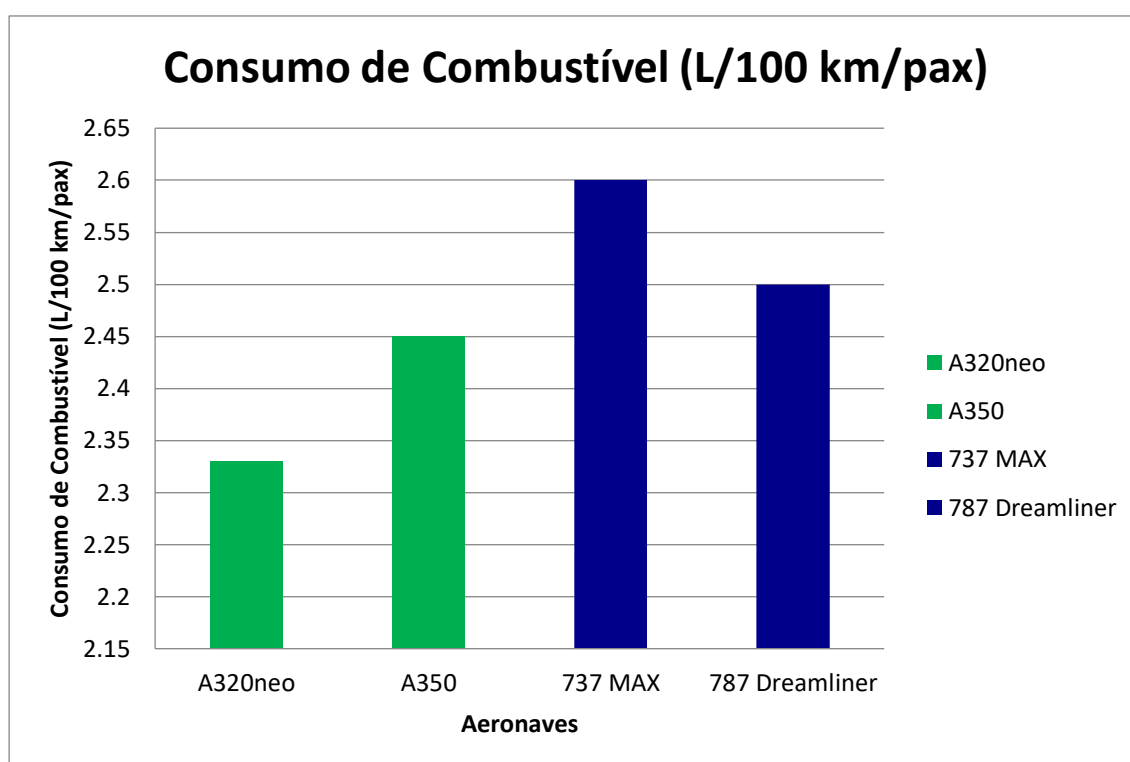


Figura 11- Consumo de combustível
Fonte: Elaboração própria

O consumo de combustível é um fator determinante, que como foi analisado no capítulo anterior tem uma relação direta com o sucesso de um operador, pois tem um custo muito elevado, e a sua oscilação de preços interfere com a capacidade de um operador de obter lucro. Ou seja, mesmo que um operador tenha um desempenho financeiro positivo, o simples aumento do preço do combustível de forma acentuada pode impedir que esse mesmo operador consiga obter lucro no mesmo período, em contrapartida, se esse preço descer, mais facilmente qualquer operador pode ter um período com lucro. Consequentemente, os

fabricantes e nomeadamente a Airbus e Boeing têm investido em tecnologias que permitam maximizar a eficiência de combustível das suas aeronaves (Kühn and Scholz, 2023) .

Como ilustrado na Figura 13, o Airbus A350 lidera no segmento de longo curso, seguido de perto pelo Boeing 787 que também se destaca neste segmento. Em operações de curta e média distância, o Airbus A320neo e o Boeing 737Max apresentam níveis de desempenho semelhantes, ambos representando avanços significativos em eficiência em relação a modelos mais antigos. No entanto, o A320neo demonstra uma ligeira vantagem, capaz de reduzir significativamente o consumo de combustível por passageiro-quilómetro (Flanagan et al. 2020; Kühn and Scholz, 2023.)

Emissões de CO₂

Airbus A320neo

O A320neo emite aproximadamente 75 g CO₂/passageiro/km, destacando-se como uma das aeronaves mais eficientes para operações de médio curso. Além disso, opera com níveis de ruído até 50% menores, cumprindo rigorosamente com as regulamentações ambientais mais recentes da ICAO. Estas características fazem do A320neo uma aeronave otimizada, que permite aos operadores aéreos cumprir normas rigorosas em aeroportos localizados em zonas urbanas e sensíveis ao ruído (Hensey and Magdalina, 2018).

Airbus A350

O A350 é uma aeronave que na vertente ambiental é bastante eficiente, concebida para rotas de longo curso, com emissões efetivas de cerca de 68 g CO₂/passageiro/km. A sua fuselagem feita principalmente de materiais compósitos é capaz de reduzir a necessidade de tratamentos químicos e emissões durante paragens de manutenção, e os seus motores contribuem para menores níveis de poluição sonora. Para além disso, quando opera com SAF pode alcançar uma redução de até 80% nas emissões líquidas de carbono, valores que fazem desta aeronave numa opção bastante viável para operadores poderem reduzir a sua pegada ambiental e custos associados (Airbus, 2024).

Boeing 737Max

O 737Max destaca-se por ter uma redução de cerca de 20% nas emissões de CO₂ em comparação com o 737 NG, resultado direto dos motores LEAP-1B e de melhorias aerodinâmicas. As emissões médias são de aproximadamente 90 gramas de CO₂ por passageiro-quilómetro, tornando-o uma escolha eficiente para operações de especialmente

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing

médio curso. Adicionalmente, a aeronave apresenta níveis de ruído 40% menores do que os exigidos pelas normas ambientais da ICAO, viabilizando operações em aeroportos com restrições ambientais (Boeing, 2014).

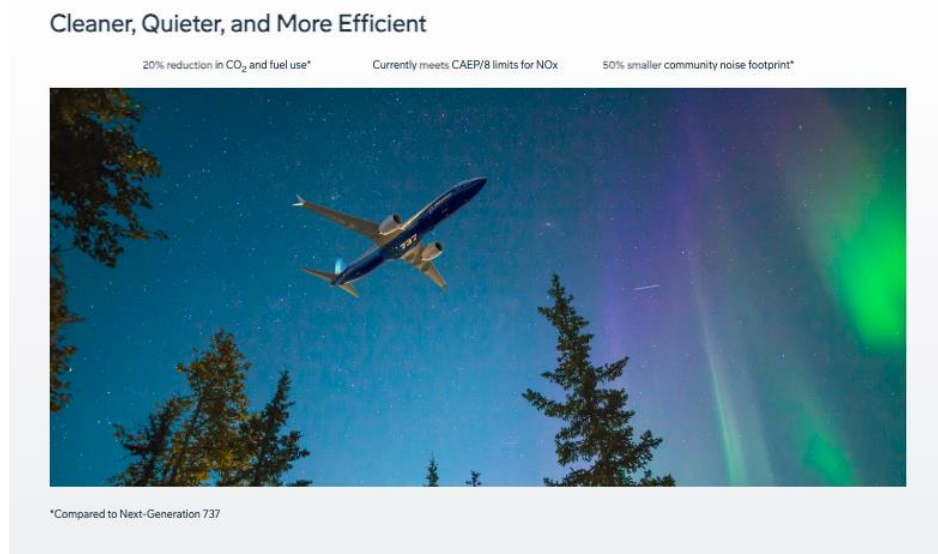


Figura 12- Performance ambiental Boeing 737Max vs NG
Fonte: Boeing (2024a)

Boeing 787

O Boeing 787 é um modelo pioneiro no uso de tecnologias para reduzir o impacto ambiental em rotas de longo curso. É capaz de produzir aproximadamente 85 gramas de CO₂ por passageiro-quilômetro, garantindo conformidade com os padrões da ICAO. Além disso, produz níveis de ruído significativamente menores, tornando-o, assim como as outras aeronaves referidas anteriormente, uma aeronave capaz e ideal para operar em aeroportos com restrições de ruído. O modelo também é capacitado para utilização de SAF, com potencial de reduzir as emissões em valores até 80% para operações futuras (Boeing, 2014).

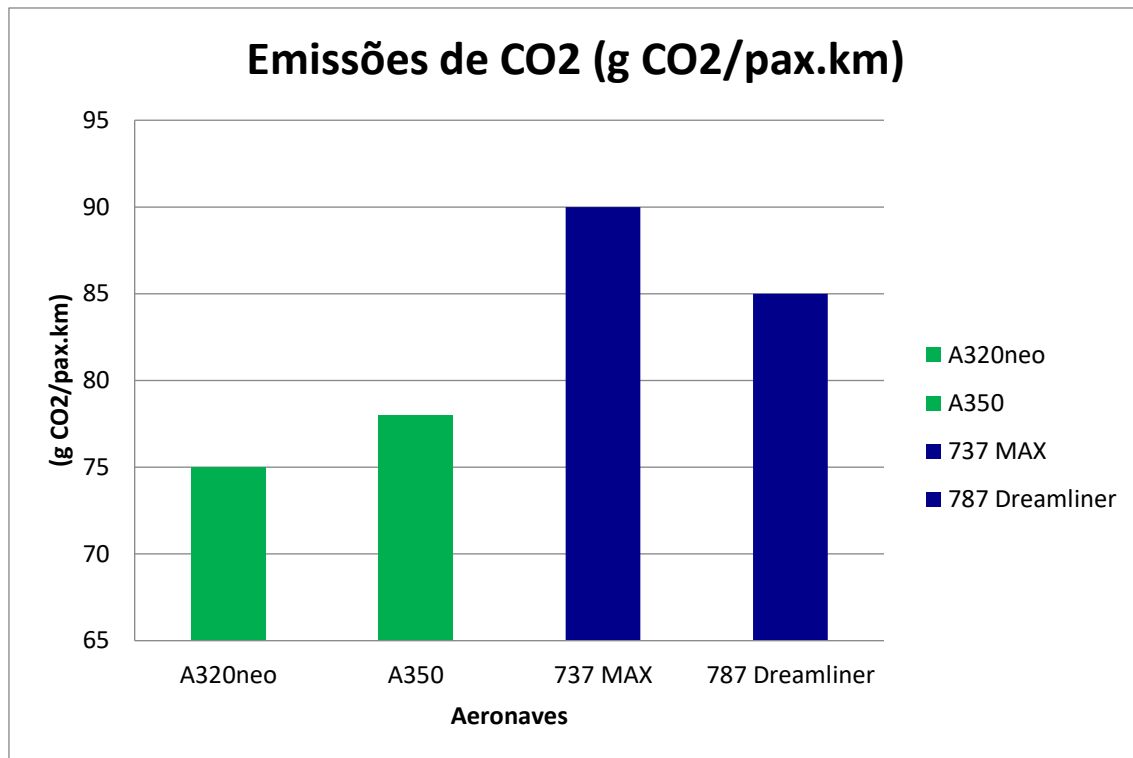


Figura 13- Emissões de CO2
Fonte: Elaboração própria

Em rotas de médio curso o A320neo e o 737Max têm valores de emissões de CO₂ comparáveis, ambos reduzindo as emissões em cerca de 15% a 20% em relação a modelos anteriores, como o A320ceo e o 737 NG. Estes avanços posicionam estes 2 modelos como líderes nos seus respectivos segmentos, e refletem o compromisso das fabricantes em conceber e fabricar aeronaves cada vez menos poluentes. Já o Boeing 787 e o A350 permanecem mais uma vez como concorrentes diretos, oferecendo valores ambientais de performance eficientes que correspondem às crescentes pressões regulatórias e de mercado.

Custo de aquisição

Airbus A320neo

O preço médio do custo de aquisição por unidade do A320neo é de \$110 milhões, um valor capaz de garantir um retorno sobre o investimento rápido para operadores que operam em mercados competitivos. Além disso, os custos de operação reduzidos e a alta utilização diária tornam o A320neo uma escolha econômica para rotas de alta frequência (Hensey and Magdalina, 2018).



Figura 14- Airbus A320NEO
Fonte: Airbus (2024a)

Airbus A350

O custo de aquisição do A350 é significativamente mais elevado, variando entre \$317 e \$366 milhões, é de forma destacada a aeronave mais cara analisada neste estudo, contudo, tem uma elevada eficiência a nível de combustível e possui uma autonomia elevada, consequentemente, oferece uma vantagem financeira em operações de longa curso. O A350 é capaz de ser utilizado por operadores que operam rotas intercontinentais com elevada procura, onde o maior custo inicial é compensado por um retorno financeiro em operações contínuas a curto/médio prazo. (Airbus, 2024)



Figura 15- Airbus A350
Fonte: Airbus (2024b)

Boeing 737Max

O Boeing 737Max tem um de aquisição estimado em \$121 milhões, é uma aeronave que também combina acessibilidade com alta eficiência, tem um baixo custo relativo de manutenção, e consumo de combustível reduzido, sendo capaz assim de garantir margens

operacionais sustentáveis, especialmente para operadores que priorizam alta frequência de voos em mercados competitivos. (Gailagista et al.,2018)



Figura 16- Boeing 737MAX
Fonte: Boeing (2024a)

Boeing 787

O custo de aquisição do 787 varia entre \$239 e \$292 milhões, valores altos, contudo consideravelmente inferiores aos do A350, e justificam-se pela sua tecnologia e nos seus elevados níveis de performance. Apesar do elevado investimento inicial para aquisição do mesmo, o seu consumo de combustível e a sua capacidade de transportar mais passageiros em rotas de longa distância, assim como as aeronaves referidas anteriormente, garante um excelente retorno financeiro ao longo da sua vida útil de operação. (Boeing 2024)



Figura 17- Boeing 787
Fonte: Boeing (2024b)

O custo de aquisição é um dos fatores decisivos na seleção de aeronaves pelos operadores aéreos, pois engloba tanto o custo inicial de aquisição quanto o retorno económico ao longo do ciclo de vida operacional da aeronave. Como demonstrado no gráfico em baixo, o Airbus A320neo apresenta o menor custo de aquisição entre os modelos analisados, tornando-se

uma escolha atrativa para operadores que priorizam alta frequência de rotas e necessitam de um rápido retorno sobre o investimento (Bijan Vasigh and Farshid Azadian 2022).

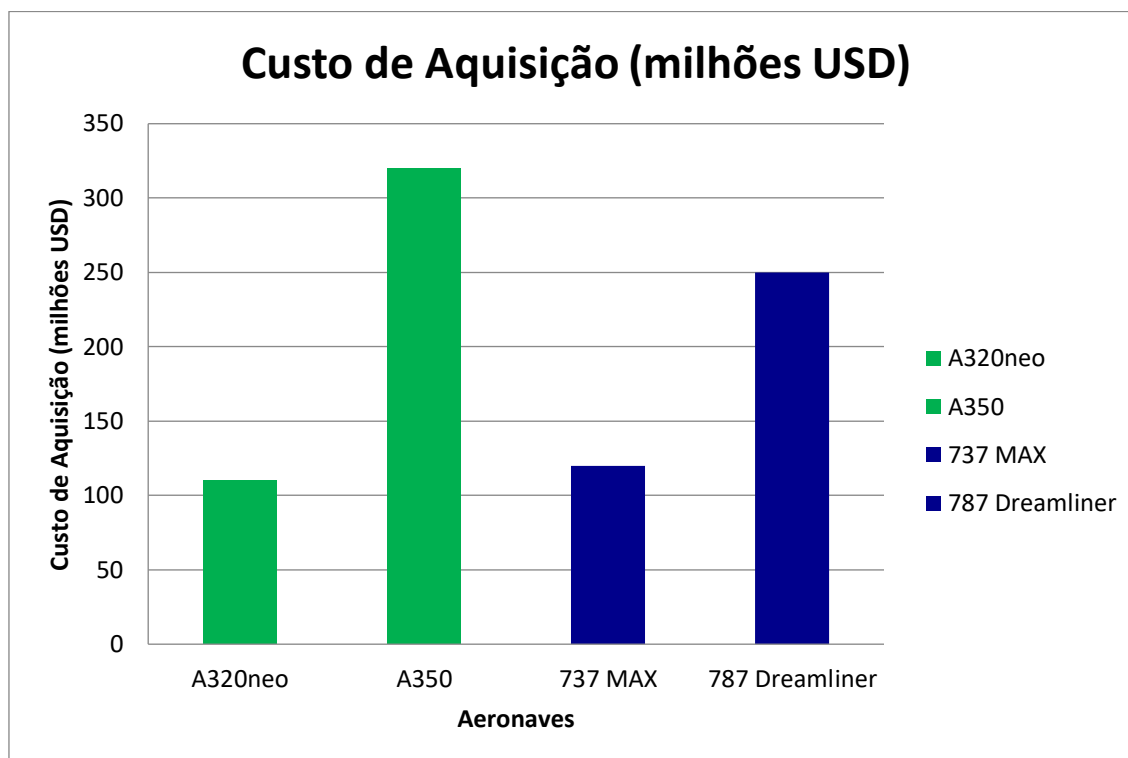


Figura 18- Custo de aquisição
Fonte: Elaboração própria

O Boeing 737Max, apesar de ter um custo de aquisição ligeiramente superior ao do A320neo, é também bastante competitivo nesse segmento.

No segmento de longo curso, o Airbus A350 e o Boeing 787 destacam-se apesar dos seus custos de aquisição significativamente mais elevados, nesta comparação entre os dois, existe uma maior diferença no custo de aquisição por unidade em comparação com as outras duas aeronaves que têm uma maior proximidade no seu custo de aquisição inicial.

Resumidamente, os custos financeiros associados ao A320neo e ao 737Max reforçam a sua atratividade para operações de médio curso, enquanto o A350 e o 787 consolidam a sua posição como escolhas estratégicas para operadores focados em rotas com elevada procura de longo curso, ou até domésticas com configurações de alta densidade. A escolha ideal depende, portanto, do modelo de negócio e das prioridades financeiras e operacionais de cada operador aéreo.

Autonomia

Airbus A320neo

O A320neo está concebido para operar em rotas de médio curso, contudo tem uma capacidade de autonomia de aproximadamente 6800km tornando exequível a sua operação até em rotas transatlânticas. Além disso, possui uma configuração modular que permite que se realizem rápidos alterações de configuração de assentos na cabine, adaptando-se a diferentes procuras sazonais e diferentes tipos de mercados. Essa flexibilidade faz do A320neo uma solução versátil tanto para redes *hub-and-spoke*, como para tipos de operação ponto a ponto (Airbus, 2024; Hensey and Magdalina, 2018)

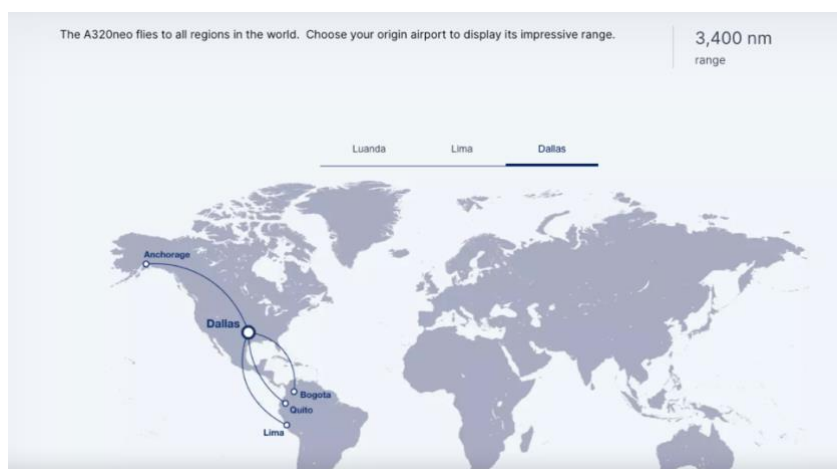


Figura 19- Alcance A320neo
Fonte: Airbus (2024a)

Airbus A350

Embora o Airbus A350 esteja otimizado para operar rotas de longo curso, a aeronave também demonstra flexibilidade para corresponder diferentes mercados, incluindo operações e mercados domésticos de alta capacidade. A aeronave possui vários tipos de configurações de cabine e autonomia de até 15.000 km que tornam o A350 uma aeronave capaz de corresponder a todos os tipos de necessidades dos operadores aéreos (Airbus, 2024).

Boeing 737Max

É uma aeronave capaz de operar em aeroportos com infraestruturas limitadas, o 737Max é uma escolha versátil para rotas curtas e médias e possui uma autonomia de aproximadamente 6500km. Possui também uma adaptabilidade a diferentes tipos de condições atmosféricas e tem capacidade e versatilidade de corresponder a diferentes configurações de classes tornam-

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing

no ideal para operadores aéreos que operam em mercados dinâmicos e altamente competitivos (Gailagista et al.,2018).

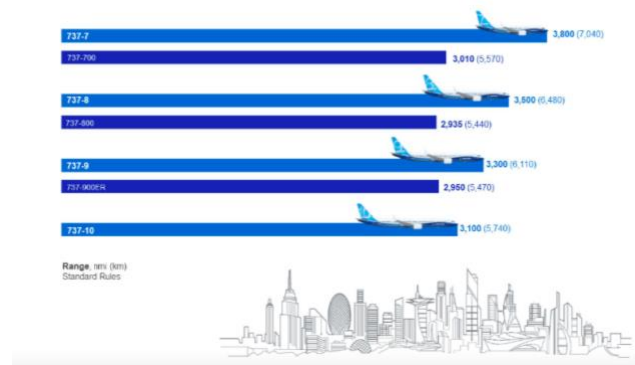


Figura 20- Autonomia da família MAX
Fonte: Boeing (2024a)

Boeing 787

Com uma autonomia de 14000 km, o B787 é utilizado para operações especialmente internacionais de longo curso com uma elevada capacidade de transporte de passageiros. Embora seja mais adequado para rotas de longo curso, pode ser configurado para corresponder com tipos de operações domésticas de alta densidade, maximizando a sua utilização em diferentes requisitos operacionais. (Gkirgis, Kassapoglou, and Curran 2017).



Figura 21- Autonomia B787
Fonte: Boeing (2024b)

A autonomia é uma característica essencial para os operadores aéreos, especialmente em mercados dinâmicos e diversificados. Estes modelos foram pensado pelos fabricantes com o objetivo de maximizar a adaptabilidade em diferentes condições operacionais, sendo ideais para operações em aeroportos menores e com diferentes tipos de infraestruturas e em rotas

de curta e média distância. Ambos os modelos destacam-se pela capacidade de oferecer frequências elevadas e corresponder a mercados regionais com eficiência, muito graças a possuírem um design otimizado para a eficiência aliado a menores custos operacionais (Jupp 2016; Gailagista 2018; Hensey and Magdalina, 2018)

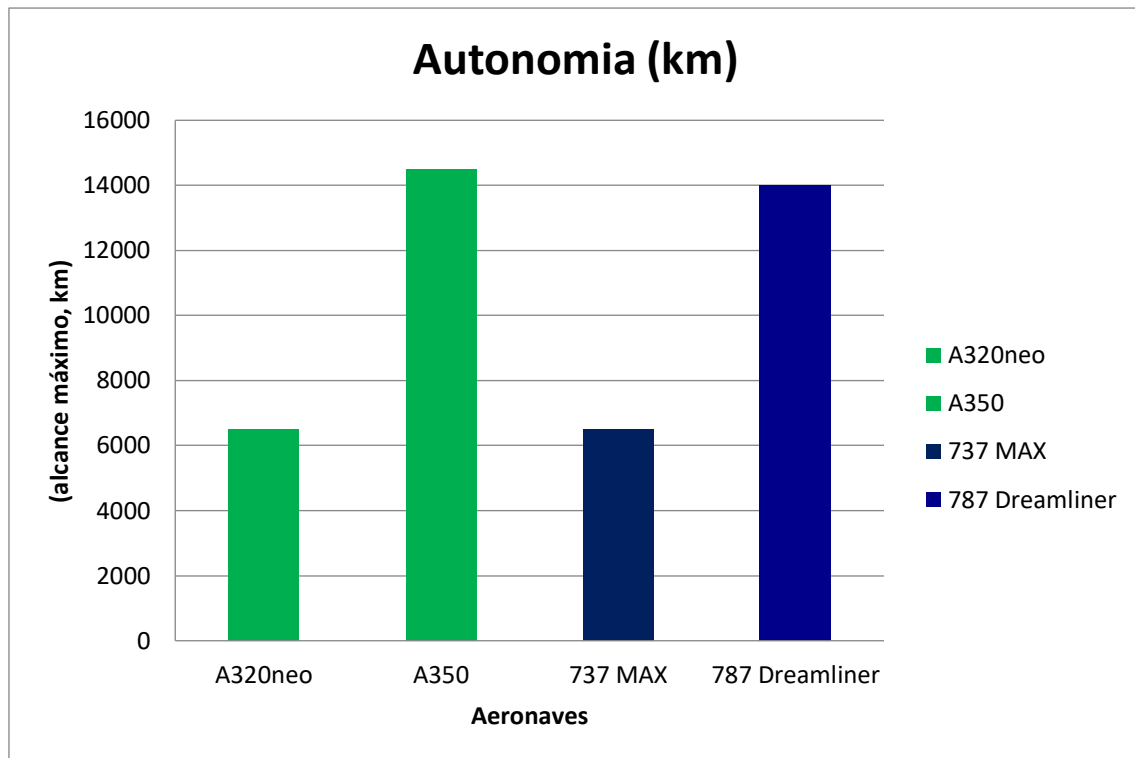


Figura 22- Autonomia
Fonte: Elaboração própria

Como ilustrado no gráfico, a autonomia do A320neo e do 737Max é de entre 6500km a 6800km, o que as posiciona como aeronaves capazes de fazer todo o tipo de operações de médio curso e até algumas rotas transatlânticas. Em contraste, o Airbus A350 e o Boeing 787 oferecem uma autonomia significativamente maior em rotas intercontinentais. Com uma autonomia de até 15000 km e 14.000 km, respectivamente, são ambas projetadas para maximizar a eficiência em rotas de longo curso, garantindo a cobertura de mercados globais. (Airbus, 2024)

Esta combinação de autonomia e eficiência tornam o A350 e o 787 escolhas estratégicas para operadores aéreos que operam rotas intercontinentais de alta densidade, permitindo a qualquer operador que adapte a sua operação a diversas condições económicas e geográficas (Aircraft Commerce, 2015; Bijan Vasigh and Farshid Azadian 2022)

Em suma, tanto a Airbus como a Boeing para qualquer tipo de mercado e operação oferecem aos operadores aeronaves altamente capazes de trazerem grandes benefícios económicos para os mesmos.

3.3. CONTEXTUALIZAÇÃO OPERACIONAL: O MODELO *HUB-AND-SPOKE*

Apesar deste trabalho ter como objetivo realizar análise técnica e de comparação entre aeronaves Airbus e Boeing e calcular a sua eficiência, é importante também considerar o contexto operacional em que as mesmas são habitualmente utilizadas. O modelo *hub-and-spoke* é um dos modelos mais adotados por operadores aéreos, e é o modelo adotado por operadores *full service*, ou de “bandeira” por exemplo a TAP, Lufthansa ou United Airlines para redes de médio e longo curso, e neste modelo, as rotas são operadas a partir de um aeroporto principal (hub) que conecta vários destinos regionais e intercontinentais, tendo sempre esse hub como aeroporto de ligação, promovendo maior conectividade e eficiência na gestão das redes de transporte aéreo (Alderighi et al. 2005; O’kelly, n.d.)

Para operar desta forma, tanto o A320neo como o B737Max são aeronaves práticas e importantes nas rotas spoke, conectando o hub (ou hubs) de um determinado operador, com aeroportos menores em rotas de alta frequência e curta distância. E as aeronaves como o Airbus A350 e o Boeing 787 são otimizadas para operar em rotas geralmente intercontinentais de hub para hub, alimentadas pelas aeronaves menores, através das ligações realizadas no hub, que advém das rotas domésticas mencionadas anteriormente, oferecendo maior capacidade de autonomia e carga, dando resposta à procura intercontinental, com elevados níveis de performance para os operadores. A correlação entre os mesmos é assim fundamental para uma eficiência operacional num hub.

A relevância deste modelo está na sua influência sobre os critérios de seleção de aeronaves. Por exemplo, em operações spoke, critérios como tempo de *turnaround*, e consumo de combustível são prioritários, considerando a necessidade de um elevado número de frequências. Já para rotas intercontinentais que conectam hubs, geralmente são priorizados critérios como capacidade, autonomia e emissões de CO₂ refletindo a necessidade de aeronaves de maior dimensão e autonomia (Alderighi et al. 2005).

A rede operacional da United Airlines, representada na imagem abaixo, exemplifica perfeitamente como o modelo *hub-and-spoke* é implementado na prática. Os hubs centrais do operador, atuam como pontos de conexão que permitem à United ligar inúmeros destinos

domésticos e intercontinentais. Esta configuração evidencia o papel estratégico de aeronaves de diferentes categorias para corresponder à procura específica de cada rota.

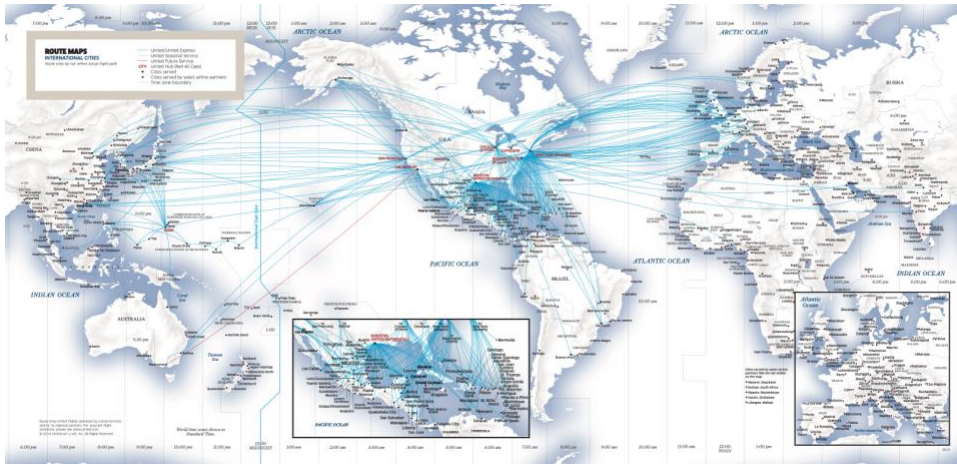


Figura 23- Rede United Airlines
Fonte: Airlines Rote Maps (2024)

Embora o foco desta investigação não seja o modelo *hub-and-spoke* em si, ele fornece um contexto operacional prático que ajuda a contextualizar os critérios utilizados nos métodos DEA e AHP, garantindo que os resultados obtidos reflitam cenários reais de operação.

3.4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS AHP E DEA

Conforme foi discutido na revisão de literatura, a aplicação dos métodos AHP e DEA será realizada para chegar a um valor indicativo de eficiência do Airbus A320neo, A350 e Boeing 737Max e Boeing 787. O AHP será utilizado para determinar os pesos dos critérios, refletindo a importância relativa de cada um. Seguidamente, a DEA será aplicada para calcular a eficiência relativa das combinações de aeronaves, considerando os *inputs* (recursos consumidos) e *outputs* (resultados alcançados).

Os métodos foram aplicados duas fases consecutivas, onde como foi referido no tópico anterior, o AHP definiu os pesos iniciais para os critérios e consequentemente o DEA avaliou a eficiência relativa das unidades de decisão, considerando essas ponderações. O modelo permitiu identificar os pontos fortes de cada DMU, fornecendo *insights* com utilidade especialmente para os fabricantes, cumprindo assim o objetivo do trabalho.

A análise revelou que, embora todos os modelos apresentem níveis de performance semelhantes, cada um possui características que os tornam mais adequados para certos cenários.

Para utilizar a abordagem que relacione AHP e DEA na avaliação das alternativas em estudo, segundo Hadad and Hanani (2011) devem ser seguidos os seguintes passos:

- **Passo 1: Definir as alternativas a comparar**

O primeiro passo é identificar alternativas competitivas que serão analisadas por uma decisão. No contexto deste estudo, as alternativas correspondem a duas unidades de decisão. DMU Airbus (Airbus a320neo e a350) e DMU Boeing (Boeing 737max e Boeing 787).

- **Passo 2: Definir os critérios de avaliação**

Consequentemente, é necessário determinar os critérios com base nos quais a alternativa mais eficiente será determinada.

- **Passo 3: Avaliação dos critérios qualitativos com AHP**

Para os critérios qualitativos, é realizada uma comparação par a par das alternativas em relação a cada subcritério, assim como entre os próprios subcritérios, para determinar os seus pesos relativos. Esta etapa é executada usando o AHP e permite quantificar a importância de qualquer critério de forma coerente.

- **Passo 4: Cálculo dos valores próprios e vetores de prioridade**

Com base na matriz de comparação par a par construída no AHP, calcula-se o autovalor máximo e o vetor de prioridade normalizado correspondente. Este vetor representa a distribuição final dos pesos atribuídos a cada critério e subcritério.

- **Passo 5: Cálculo das pontuações ponderadas**

Após a obtenção dos pesos dos critérios através do AHP, procede-se ao cálculo da pontuação ponderada de cada alternativa. Esta pontuação resulta da multiplicação dos pesos normalizados pelo desempenho de cada alternativa nos critérios avaliados.

- **Passo 6: Separação dos critérios em Inputs e Outputs**

Os critérios são organizados em dois grupos distintos:

- **Inputs:** Representam os recursos consumidos e os fatores que se pretende minimizar.
- **Outputs:** Correspondem aos benefícios ou desempenhos desejados, que se pretende maximizar.

Para cada alternativa, regista-se o valor correspondente a cada critério, garantindo a consistência dos dados antes da aplicação do Data Envelopment Analysis (DEA).

- **Passo 7: Cálculo da eficiência com o DEA**

Utilizando a metodologia DEA, calcula-se o índice de eficiência de cada alternativa.

- Se apenas uma alternativa for considerada eficiente (com um score de eficiência de 100%), o processo termina, e essa alternativa é selecionada como a melhor.
- Caso contrário, prossegue-se para o Passo 8.

- **Passo 8: Classificação das alternativas**

Nesta fase, as alternativas são classificadas de acordo com os resultados obtidos. Existem três possíveis abordagens:

- (a) O decisor adota um método de ranking específico e aceita os seus resultados, selecionando a melhor alternativa.
- (b) São aplicados vários métodos de ranking e todos apontam para a mesma alternativa como a mais eficiente. O processo termina, e essa alternativa é escolhida.
- (c) São aplicados vários métodos de ranking, mas as alternativas concorrentes apresentam desempenhos semelhantes, sem uma clara superioridade. Neste caso, passa-se ao Passo 9.

- **Passo 9: Definição da melhor alternativa**

Se diferentes métodos de ranking indicarem diferentes alternativas como a melhor, o decisor deve adotar um dos seguintes caminhos:

- Escolher o método de ranking mais adequado, com base na função objetivo de cada abordagem.
- Determinar a melhor alternativa com base na média das pontuações normalizadas obtidas nos diferentes métodos de ranking.
- Selecionar a alternativa mais bem posicionada considerando o ranking médio entre os diferentes métodos utilizados.

Após esta análise, a alternativa considerada mais eficiente é escolhida como a melhor opção.

3.4.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Com base na revisão da literatura e nos diferentes níveis de procura específica do modelo *hub-and-spoke* adotado por operadores aéreos tradicionais (*legacy carriers*), foram definidos cinco critérios fundamentais para avaliar as aeronaves Airbus e Boeing.

Após então a definição das alternativas e critérios a utilizar, partiu-se para a avaliação dos critérios qualitativos com AHP, estes critérios refletem aspetos técnicos, operacionais e financeiros indispensáveis para operações de médio e longo curso. A atribuição de pesos a cada critério foi realizada considerando respostas de 5 especialistas no setor, gestores de frota da United Airlines, da direção de performance de frota que deram o seu input sobre a importância de cada critério.

O consumo de combustível será considerado como C1, custos de manutenção como C2, custos de aquisição como C3, emissões de CO₂ como C4 e autonomia como C5.

Tabela 1- Ordem de importância 1 (Elaboração própria)

Ordem de importância	Especialista 1
1	C1
2	C5
3	C3
4	C2
5	C4

Tabela 2- Ordem de importância 2 (Elaboração própria)

Ordem de importância	Especialista 2
1	C3
2	C5
3	C1

Ordem de importância	Especialista 2
4	C2
5	C4

Tabela 3- Ordem de importância 3 (Elaboração própria)

Ordem de importância	Especialista 3
1	C1
2	C3
3	C5
4	C2
5	C4

Tabela 4- Ordem de importância 4 (Elaboração própria)

Ordem de importância	Especialista 4
1	C1
2	C5
3	C3
4	C4
5	C2

Tabela 5- Ordem de importância 5 (Elaboração própria)

Ordem de importância	Especialista 5
1	C1
2	C5
3	C3
4	C2
5	C4

Cada especialista classificou os critérios de **1 a 5** (sendo 1 o mais importante e 5 o menos importante). Para converter isso em valores quantitativos, e determinar pesos preliminares para o passo seguinte, é possível atribuir pontos para cada posição, onde o primeiro critério obtém 5 pontos, o segundo, 4 pontos, o terceiro, 3 pontos, o segundo, 2 pontos, e por fim o quinto critério 1 ponto. Significando que quanto mais alta a classificação de um critério, mais pontos o mesmo recebe. De seguida, somamos os pontos para cada critério, e obtemos os seguintes resultados:

Tabela 6- Soma total dos pontos (Elaboração própria)

Critério	Soma Total dos Pontos
C1 - Consumo de combustível	46
C5 - Autonomia	38
C3 - Custo de aquisição	36
C2 - Custos de manutenção	18
C4 - Emissões de CO₂	12

Para transformar esses valores em percentagens, é necessário somar todas as pontuações:

$$46+38+36+18+12=150$$

E de seguida, dividir a pontuação de cada critério pelo total para obter o peso normalizado:

Tabela 7- Cálculo dos pesos
Fonte: Elaboração própria

Critério	Cálculo	Peso (%)
C1 - Consumo de combustível	$(46 \div 150) \times 100$	30,67%
C5 - Autonomia	$(38 \div 150) \times 100$	25,33%
C3 - Custo de aquisição	$(36 \div 150) \times 100$	24,00%
C2 - Custos de manutenção	$(18 \div 150) \times 100$	12,00%
C4 - Emissões de CO₂	$(12 \div 150) \times 100$	8,00%

O consumo de combustível, com um peso de 30,67%, destacou-se como sendo o critério mais relevante, o que acaba por não ser surpreendente tendo em que o combustível representa entre 25 e 30% dos custos operacionais dos operadores, segundo a IATA (2024), conseqüentemente é o maior custos dos operadores, e por isso é o critério com um maior peso de forma geral para os especialistas. Este critério é particularmente crítico em rotas de longo curso, onde o consumo de combustível aumenta proporcionalmente à distância percorrida, e conseqüentemente vai ser um custo muito presente nos operadores *full service*, que fazem das rotas de longo curso uma componente muito importante da sua operação.

Com um peso de 25,33%, a autonomia foi considerada o segundo critério mais relevante, o que indica que para os operadores, uma maior autonomia proporciona uma maior flexibilidade na escolha de rotas e permite reduzir escalas, otimizando o tempo de voo e os custos associados. A evolução tecnológica tem permitido melhorias na autonomia das aeronaves sem aumentar o consumo de combustível, tornando este um fator crucial na gestão de frotas.

O custo de aquisição, teve um peso de 24%, refletindo assim a importância do investimento inicial necessário para a introdução de novas aeronaves na frota. Embora seja um critério secundário face aos custos operacionais ao longo do ciclo de vida da aeronave, este continua a ser um fator determinante na decisão de compra, especialmente quando os operadores consideram financiamento, leasing e valor residual da aeronave. Como destacado por Doganis (2019a), a escolha entre aquisição direta e leasing operacional pode influenciar a rentabilidade dos operadores a longo prazo.

Os custos de manutenção, com um peso de 12%, representa ser um parâmetro importante para a saúde financeiro e operacional dos operadores. De acordo com a IATA (2024), estes custos podem representar até 10% dos custos totais dos operadores. Adicionalmente, ter uma manutenção eficiente melhora a disponibilidade operacional da frota e minimiza interrupções inesperadas, garantindo maior confiabilidade e eficiência nas operações aéreas. Por fim, as emissões de CO₂, com um peso de 8%, refletem um critério de importância crescente, impulsionado pelas regulamentações globais, contudo, acabou por ser a métrica menos valorizada de forma unânime.

Estes pesos foram atribuídos por base em respostas de especialistas do setor, de forma a tentar obter um modelo de avaliação válido e alinhado às necessidades das *legacy carriers*. A estruturação destes critérios possibilita a aplicação do AHP, garantindo que a decisão sobre a escolha das aeronaves seja tomada com base em critérios validados. Os resultados obtidos a partir desta abordagem guiarão a análise subsequente com o método DEA, de forma a permitir uma avaliação quantitativa da eficiência operacional das alternativas estudadas.

Tabela 8- Pesos Preliminares
Fonte: Elaboração própria

Critério	Peso Relativo (%)
Consumo de Combustível	30.67%
Autonomia	25.33%
Custo de aquisição	24%
Custo de manutenção	12%
Emissões de CO₂	8%

3.4.2. CONSTRUÇÃO DA MATRIZ PAR-A-PAR

No Método de Análise Hierárquica, as comparações entre pares de critérios são fundamentais para o processo de tomada de decisão Saaty (1987). Como tal, para que o método seja aplicado corretamente, é necessário estabelecer os principais critérios de julgamento, atribuindo uma importância relativa a cada comparação. Essas comparações são representadas por uma escala fundamental de valores, organizados numa matriz quadrática de ordem n , onde (a_{ij}) representa a comparação entre os critérios I_i e I_j .

Conforme definido por Saaty (1987), a matriz de comparação par a par segue as seguintes propriedades matemáticas:

$$A_{ij} > 0, \text{ para } i, j = 1, 2, \dots, n, \text{ e } A_{ji} = 1/a_{ij}, \text{ para } i, j = 1, 2, \dots, n$$

Estas propriedades garantem a consistência da matriz A ao representar as comparações entre os critérios i e j . Os elementos localizados acima da diagonal principal (A_{ij}) correspondem às comparações diretas entre os critérios, utilizando a escala de Saaty (de 1 a 9). Já os elementos abaixo da diagonal (A_{ji}) são calculados como o valor recíproco dessas comparações ($1/A_{ij}$), assegurando a coerência das avaliações par-a-par, conforme representado na Equação 1.

Dessa forma, a matriz A assume a seguinte estrutura:

$$A = \begin{matrix} & 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ & 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ & 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ & 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{matrix}$$

Segundo Saaty (2008), para garantir a validade dos julgamentos, esta deve obedecer às seguintes condições:

- Regra 1: Se $a_{ij} = \alpha$, então $a_{ji} = 1/\alpha$, sendo $\alpha \neq 0$.
- Regra 2: Se I_i for julgado como igualmente importante em relação a I_j , então $a_{ij} = 1$ e $a_{ji} = 1$. Além disso, a diagonal principal da matriz sempre terá valores iguais a 1 ($a_{ii} = 1$ para todo o i).

A formação dessas matrizes de julgamento é baseada em escalas de intensidade de importância, que são definidas para cada critério ou subcritério. A escala de Saaty (1991), frequentemente utilizada no método AHP, é apresentada na Tabela abaixo:

Tabela 9- Escala de Saaty
Fonte: Gwarda (2022)

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Ambos os critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente um critério em relação ao outro
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância muito forte	Um critério é significativamente mais importante que o outro, com evidências claras
9	Importância extrema	A superioridade de um critério sobre o outro é indiscutível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	São utilizados para ajustar comparações entre os níveis anteriores

Esta escala permite que os decisores atribuam valores às comparações par a par com base na experiência, conhecimento do setor e dados objetivos. A matriz de comparação resultante será posteriormente utilizada para calcular os pesos normalizados dos critérios, garantindo que a tomada de decisão seja estruturada, fundamentada e matematicamente consistente.

Tabela 10- Matriz Par-a-Par
Fonte: Online Output AHP

Critério	Consumo de Combustível	Autonomia	Custo de Aquisição	Manutenção	Emissões de CO₂
Consumo de Combustível	1	3	3	5	7
Autonomia	1/3	1	3	5	7
Custo de aquisição	1/3	1/3	1	3	5
Manutenção	1/5	1/5	1/3	1	3
Emissões de CO₂	1/7	1/7	1/5	1/3	1

A matriz de comparação par a par foi elaborada com base na Escala de Saaty (1-9), permitindo quantificar a importância relativa de cada critério no processo de decisão. A hierarquia foi estabelecida conforme os pesos preliminares definidos, onde o consumo de combustível foi o critério mais relevante (30.67%), seguido pela autonomia (25.33%), custo de aquisição (24%), custo de manutenção (12%) e emissões de CO₂ (8%).

3.4.3. RAZÃO DE CONSISTÊNCIA

A aplicação do AHP precisa que exista uma verificação da consistência dos julgamentos, de forma a garantir que existe coerência das comparações par a par realizadas entre os critérios. De acordo com Saaty (1990), este é um processo determinado através do Índice de Consistência (CI) e da Razão de Consistência (CR), os quais asseguram que os julgamentos realizados seguem um padrão lógico e matematicamente válido.

Para a realização dos cálculos e validação da consistência da matriz, foi utilizada a ferramenta **Online Output AHP**, que permitiu a obtenção dos pesos normalizados e a verificação automática da coerência dos julgamentos. Após a realização dos cálculos utilizando a **Online Output AHP**, obteve-se um Índice de Consistência Relativo de 0.065, o que confirma que a matriz de comparações atende aos critérios de consistência estabelecidos por (Saaty 2002). Consequentemente, os pesos atribuídos aos critérios foram validados e podem ser aplicados na avaliação da eficiência das alternativas no modelo DEA, garantindo que as decisões são fundamentadas.

3.4.4. APLICAÇÃO DO MÉTODO DEA

A análise de eficiência utilizando o método DEA irá ter por base os critérios definidos anteriormente no AHP, e a sua aplicação irá permitir avaliar a eficiência relativa das aeronaves Airbus e Boeing ao transformar os critérios do AHP em *inputs* e *outputs*, e assim poder garantir que se possa realizar uma análise quantitativa da performance das aeronaves abordadas divididas por fabricante.

Esta análise será estruturada a partir dos critérios previamente definidos, e os pesos atribuídos pelo AHP, estabelecendo uma abordagem híbrida que combina a priorização qualitativa com a avaliação quantitativa de desempenho. Esta integração entre AHP e DEA é reconhecida na literatura como uma boa estratégia para mitigar a subjetividade inerente à atribuição de pesos e à seleção de alternativas, promovendo decisões mais fundamentadas (Hadad and Hanani 2011a; Lai et al. 2015). De acordo com (Cooper, 2007), esta abordagem

híbrida permite alinhar preferências subjetivas como os pesos atribuídos a critérios como consumo de combustível, autonomia e custos operacionais com uma análise objetiva de eficiência, transformando os *outputs* e *inputs* numa fronteira de eficiência mensurável.

3.4.4.1. DEFINIÇÃO DE INPUTS E OUTPUTS

Os critérios selecionados no AHP foram utilizados para estruturar os inputs e outputs do modelo DEA, seguindo a abordagem sugerida por (Hadad and Hanani 2011b). Os *inputs* representam os recursos consumidos pelas aeronaves e devem ser minimizados para melhorar a eficiência. Já os *outputs* refletem o desempenho operacional desejado e devem ser maximizados.

Como *inputs*, foram considerados o consumo de combustível (litros por km), que representa um dos principais custos operacionais dos operadores; o custo de manutenção, (dólares americanos por hora de voo); e o custo de aquisição, que determina o investimento inicial necessário para a aquisição das aeronaves. Como *outputs*, foram utilizados a autonomia, expressa em quilómetros e as emissões de CO₂, em gramas por passageiro-quilómetro. As emissões de CO₂ têm uma particularidade de serem configuradas como um *output* indesejável, porque contrariamente à autonomia que é uma característica que quer ser maximizada, as emissões querem ser minimizadas, como indicam Seiford and Zhu (2002), que sugerem transformar os valores obtidos nessa métrica para adequá-los ao modelo DEA.

Os valores padronizados calculados foram organizados conforme a Tabela seguinte:

Tabela 11- Inputs e Outputs
Fonte: Elaboração própria

Critério	Airbus (A320neo e A350)	Boeing (737 MAX e 787)
Consumo de Combustível (L/km)	2.4	2.5
Custo de Manutenção (USD/h)	2000	2300
Custo de aquisição (milhões USD)	430	370
Autonomia (km)	22300km	20500km
Emissões de CO₂ (g/pax/km)	73	87

Para avaliar a eficiência das aeronaves Airbus (A320neo e A350) e Boeing (737Max e 787) neste estudo, foi selecionado o modelo BCC, desenvolvido por Banker, Charnes e Cooper com retornos de escala variáveis (VRS), que incorpora a restrição de convexidade:

$$(\Sigma \times j = 1)$$

Através deste modelo é possível analisar se cada aeronave analisada está a operar de forma ideal, ou se ainda há espaço para ajustes nas métricas analisadas neste trabalho, um aspeto importante para operadores aéreos que gerem frotas em redes *hub-to-spoke*, onde as condições de operação podem variar bastante (Cooper, 2007).

A análise foi estruturada com uma abordagem *input-oriented*, já que o foco está em perceber como os operadores podem reduzir recursos, sem comprometer os resultados David Yu (2020). Para operadores aéreos tradicionais, tentar reduzir o máximo possível custos operacionais é essencial para se manterem competitivos, e este modelo ajuda a identificar as melhores formas de alcançar esse objetivo Hadad and Hanani (2011a). Além disso, o VRS foi escolhido por ser capaz de refletir as diferenças entre aeronaves de cada segmento, cujas características de performance como a autonomia e custos gerais, afetam diretamente a sua eficiência relativa (Hadad and Hanani (2011a)

As unidades de decisão foram definidas como pares de aeronaves, agrupadas por fabricante: a DMU 1 inclui as aeronaves da Airbus (A320neo e A350), e a DMU 2 as da Boeing (737 MAX e 787). Esta divisão alinha-se com a forma como os operadores habitualmente adquirem vários tipos de aeronaves do mesmo fabricante, e muitas vezes toda a sua frota é composta por apenas ou Airbus ou Boeing.

Uma das grandes vantagens desta abordagem é combinar o AHP com o DEA, juntando os pesos calculados no AHP como os 45,2% atribuídos ao consumo de combustível a uma análise mais objetiva e quantitativa no DEA. Este método permite identificar onde há espaço para melhorias, ou seja, de que forma é que uma das aeronaves abordadas pode chegar ao limiar da eficiência relativa, melhorando os seus valores, por exemplo, o 737 MAX poderia reduzir os seus custos gerais ou emissões para se aproximar do desempenho do A320neo, e o 787 seria mais competitivo em relação ao A350 se tivesse uma autonomia superior, ou o A350 em relação ao B787 se tivesse um custo de aquisição inferior.

Para correr o Max DEA Model, é necessário aplicar no programa todas as especificações referidas, e exportar os dados que querem ser analisados. No caso deste trabalho, é necessário utilizar os valores na tabela 11 normalizados com os pesos finais a cada critérios atribuídos

**ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES
AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing**

pelo AHP. Como os pesos finais atribuídos pelo AHP serão apenas apresentados no capítulo seguinte, o processo final de construção de uma tabela com os valores finais para submeter no modelo vão ser apresentados apenas nos resultados. Após a normalização dos pesos de cada critério por *input* e *output* como sugerido por Cooper, (2007), então parte-se para a aplicação dessas percentagem sobre os dados das aeronaves, e o Max DEA Model, pode finalmente calcular o resultado de eficiência relativa.

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo irá mostrar detalhadamente os resultados da aplicação dos métodos AHP e DEA, e conseqüentemente os valores da eficiência relativa de cada unidade de decisão.

Primeiramente, os pesos finais atribuídos a cada critério são apresentados com base no método AHP, e posteriormente, os resultados do método DEA irão ser apresentados, com uma análise sobre os resultados de eficiência calculada pelo Max DEA Model.

4.1. RESULTADOS DO MÉTODO AHP

Os resultados alcançados neste método evidenciam as prioridades estratégicas associadas aos critérios definidos para a análise da eficiência das aeronaves analisadas, e a matriz de comparação par-a-par, desenvolvida no Capítulo 3, permitiu obter resultados dos pesos finais dos critérios, garantindo um alinhamento com os fatores críticos para operações em modelos *hub-and-spoke*.

A atribuição dos pesos finais foi realizada utilizando **Online Output AHP**, um software que possibilita a implementação do método AHP de forma estruturada, assegurando que as decisões refletissem a escala de Saaty e validando a consistência lógica das comparações. A sua consistência serve como base quantitativa para a aplicação do modelo DEA, permitindo que a análise de eficiência considere os critérios alinhados com os pesos atribuídos no AHP.

A Razão de Consistência foi de 0,065, calculada através do **Online Output AHP** um valor abaixo do limite aceitável de 0,10, conforme estabelecido por Saaty (1987). Este resultado confirma a coerência dos pesos e assegura que as comparações realizadas foram consistentes e metodologicamente válidas.

Os pesos finais atribuídos a cada critério refletem a hierarquia de importância estabelecida pelos especialistas e confirmada pelo processo AHP. Estes valores serão utilizados como referência no modelo DEA, permitindo avaliar a eficiência relativa das alternativas. A Tabela seguinte apresenta os pesos finais obtidos.

Tabela 12- Pesos finais
Fonte: Online Output AHP

Critério	Peso Final (%)
Consumo de Combustível	45.2%
Autonomia	28.7%
Custo de aquisição	15.2%
Custos de manutenção	7,2%
Emissões de CO₂	3.7%

Após a atribuição dos pesos finais aos critérios definidos no AHP, o mesmo software determinou a performance relativa entre os fabricantes Airbus e Boeing em cada um dos critérios. A comparação par-a-par entre os dois fabricantes permitiu identificar qual deles apresenta uma melhor performance em cada métrica, refletindo as preferências que advém do modelo AHP.

De seguida, serão então apresentados resultados individualmente para cada critério, destacando a pontuação relativa da Airbus e Boeing e ilustrando a sua relevância no contexto da decisão.

A primeira tabela que se segue é referente às emissões de CO₂, e destaca uma diferença de assinalar entre os fabricantes, onde a dupla da Airbus apresenta um peso consideravelmente superior, significando assim, que na componente ambiental da operação os modelos Airbus foram considerados mais eficientes na redução de emissões por passageiro-quilómetro.

A matriz de comparação para este critério mostrou ser consistente, (CR = 0), garantindo que existe coerência na atribuição de pesos.

Tabela 13- CO2 Airbus vs Boeing, AHP
Fonte: Online Output AHP

Inconsistency ratio: 0 (Consistent matrix)

Rank	Name	Weight
2	boeing	0.248
1	airbus	0.752

De seguida, e relação aos custos de manutenção, os resultados da comparação mostraram que a Airbus teve um peso novamente consideravelmente superior relativamente à Boeing, sugerindo que os custos de manutenção para a combinação A320neo + A350 são inferiores em relação aos modelos Boeing. Mais uma vez, a matriz de comparação obteve $CR = 0$, mostrando assim que a atribuição de pesos foi realizada de forma coerente.

Tabela 14- Manutenção Airbus vs Boeing, AHP
Fonte: Online Output AHP

Inconsistency ratio: 0 (Consistent matrix)

Rank	Name	Weight
2	boeing	0.248
1	airbus	0.752

A comparação no critério do custo de aquisição revelou uma forte vantagem para a Boeing, mostrando que, na análise de custo inicial de aquisição das aeronaves, os modelos Boeing 737 MAX e 787 terão à partida uma vantagem por terem um custo menor.

Tal como nos critérios anteriores, a matriz apresentou $CR = 0$, confirmando que as comparações foram feitas de forma estruturada e sem contradições, suportando uma atribuição de pesos coerente.

Tabela 15- Custo de aquisição Airbus vs Boeing, AHP
Fonte: Online Output AHP

Inconsistency ratio: 0 (Consistent matrix)

Rank	Name	Weight
1	boeing	0.833
2	airbus	0.167

Analisando a autonomia, neste critério a Airbus também obteve um peso igualmente superior em comparação com os custos de manutenção e emissões de CO₂, refletindo uma autonomia superior, graças à vantagem do A350 em comparação com o B787, tendo em conta que os valores das aeronaves menores eram muito próximos de ser iguais.

Mais uma vez, a consistência desta matriz também foi perfeita (CR = 0).

Tabela 16- Autonomia Airbus vs Boeing, AHP
Fonte: Online Output AHP

Inconsistency ratio: 0 (Consistent matrix)

Rank	Name	Weight
2	boeing	0.248
1	airbus	0.752

Por fim, no último critério, e mais uma vez a tabela referente ao consumo de combustível apresenta um peso significativamente maior para a Airbus, indicador que mostra que os modelos A320neo e A350 consomem menos combustível, e por isso tem menos custos associados em comparação com a dupla da Boeing. Esta avaliação foi baseada nos dados de consumo médio de combustível, onde nos quais os modelos Airbus apresentaram um menor consumo por quilómetro voado, contribuindo para menores custos operacionais e redução de emissões.

A matriz de comparação para este critério apresentou Razão de Consistência (CR) = 0 novamente.

Tabela 17-Combustível Airbus vs Boeing, AHP
Fonte: Online Output AHP

Inconsistency ratio: 0 (Consistent matrix)

Rank	Name	Weight
2	boeing	0.248
1	airbus	0.752

As tabelas de comparação par-a-par confirmam que a Airbus teve melhor desempenho global, dominando a maioria dos critérios analisados, e a razão de consistência igual a zero em todas as matrizes reforça a robustez do processo decisório, garantindo que as avaliações foram realizadas sem incoerências matemáticas.

Os pesos finais atribuídos às alternativas serão agora utilizados na próxima fase da análise, onde a metodologia DEA será aplicada para validar quantitativamente a eficiência operacional das aeronaves.

4.2. RESULTADOS DO MÉTODO DEA

A análise DEA foi conduzida através do Software Max DEA Model, com os critérios e métricas definidos anteriormente, com objetivo de avaliar a eficiência relativa das duplas de aeronaves Airbus e Boeing.

Para garantir uma avaliação credível da eficiência relativa das aeronaves analisadas, o método DEA foi configurado, como referido no capítulo anterior como um modelo *Input Oriented, Variable Returns to Scale*, e com 2 DMUS, Airbus e Boeing.

Como foi referido na metodologia, segundo Cooper, (2007) os pesos do AHP devem ser normalizados dentro de cada grupo de *inputs* e *outputs*, para que a soma dos pesos de cada grupo seja igual a 1. Essa abordagem foi adotada para equilibrar a influência relativa dos critérios dentro de cada categoria no modelo DEA, e garantir assim que os *inputs* e *outputs* sejam proporcionalmente representados na análise de eficiência relativa do DEA.

Como tal, para normalizar os *inputs*, soma-se:

$45,2\% + 7,2\% + 15,2\% = 67,6\%$ (0,676), estes valores são referentes aos pesos finais do consumo de combustível, custo de aquisição e custo de manutenção.

Cada peso foi dividido pela soma total dos inputs para normalizar:

Consumo de combustível: $0,452 / 0,676 = 0,67$

Custo de manutenção: $0,072 / 0,676 = 0,106$

Custo de aquisição: $0,152 / 0,676 = 0,224$

Verificação: $0,6686 + 0,1065 + 0,2249 = 1,0$

Para os *outputs*:

$28,7\% + 3,7\% = 32,4\%$ (0,324), valores referentes à autonomia e emissões de CO₂

Autonomia: $0,287 / 0,324 = 0,885$

Emissões de CO₂: $0,037 / 0,324 = 0,114$

Verificação: $0,8858 + 0,1142 = 1,0$

Tabela 18- Pesos Normalizados
Fonte: (Elaboração própria)

Métricas	Peso normalizado
Inputs	
Consumo de combustível	0,67
Custo de aquisição	0,224
Custo de manutenção	0,106
Outputs	
Autonomia	0,885
Emissões de CO₂	0,114

A tabela 18 representa os pesos normalizados, de seguida serão aplicados nos dados da tabela 11 de cada DMU:

Para os *inputs*:

Consumo de combustível (0,668)

Airbus: $2,4 \times 0,6686 = 1,605$

$$\text{Boeing: } 2,5 \times 0,6686 = 1,671$$

Custo de manutenção (0,106)

$$\text{Airbus: } 2000 \times 0,1065 = 213$$

$$\text{Boeing: } 2300 \times 0,1065 = 244,95$$

Custo de aquisição (0,224)

$$\text{Airbus: } 430 \times 0,2249 = 96,707 = 96,71$$

$$\text{Boeing: } 370 \times 0,2249 = 83,213 = 83,21$$

Para os *outputs*:

Autonomia (0,8858)

$$\text{Airbus: } 22300 \times 0,8858 = 19753,34 = 19753,3$$

$$\text{Boeing: } 20500 \times 0,8858 = 18158,9$$

Emissões de CO₂ (0,1142)

$$\text{Airbus: } 73 \times 0,1142 = 8,3366 = 8,34$$

$$\text{Boeing: } 87 \times 0,1142 = 9,9354 = 9,94$$

As Emissões de CO₂, como referido anteriormente são um *output indesejável* porque o objetivo é que os seus valores sejam minimizados, mas não puderam ser configurados diretamente como tal no programa utilizado, que apenas considera a opção de *output* normal e não suporta essa funcionalidade. Para poder contornar esta limitação, e para manter o critério como *output* seguindo a abordagem de Seiford and Zhu (2002), cada valor será subtraído do valor máximo de emissões no conjunto de entre cada DMU, para que os valores menores de emissões (desejáveis) se possam transformar em valores maiores e permitir que o modelo considere o critério como um *output* a maximizar como a autonomia.

Ou seja, efetua-se o seguinte cálculo:

$$\text{Airbus: } 9,94 - 8,34 = 1,60$$

$$\text{Boeing: } 9,94 - 9,94 = 0$$

Os valores calculados são representados na tabela em baixo, e serão aplicados no modelo para este calcular a eficiência relativo dos DMUSs.

Tabela 19- Valores aplicados no Max DEA Model
Fonte: (Elaboração própria)

DMU	Consumo de Combustível	Custo de Manutenção	Custo de Aquisição	Autonomia	Emissões de CO₂
Airbus	1,6046	213	96,71	19753,3	1,60
Boeing	1,6715	244,95	83,21	18158,9	0

A definição destes parâmetros permite que o modelo DEA reflita as condições operacionais das aeronaves num contexto realista, possibilitando uma comparação equitativa entre os fabricantes e destacando possíveis ganhos de eficiência. Após o cálculo da eficiência relativa, com os valores na tabela em cima, o Max DEA Model calculou os na tabela em baixo.

Tabela 20- Resultados DEA
Fonte: Max DEA Model

Dupla de Aeronaves	Eficiência Relativa (DEA)
Airbus (A320neo & A350)	1
Boeing (737 MAX & 787)	1

Os resultados iniciais da análise DEA, segundo o Max DEA Model indicaram resultados de eficiência de $0 = 1$ para ambos os fabricantes. Esta igualdade pode ter ocorrido devido ao número limitado de unidades de decisão, que reduz a capacidade de discriminação quando apenas duas unidades são analisadas, especialmente se não houver domínio claro entre elas, junto com a proximidade dos resultados que correram no programa, fazendo com que, no que toca ao nível de eficiência relativa, não tenho sido possível calcular uma diferença. (Springer Science & Business Media 1995). Assim, foi decidido utilizar 4 DMUs, ou seja, calcular a eficiência relativa das 4 aeronaves de forma separada, com o objetivo de tentar existir uma diferenciação.

Como tal, segue-se a mesma lógica do processo anterior, primeiro normaliza-se os pesos, com os mesmos pesos calculados para os *inputs* e *outputs*, mas agora os dados para cada

ANÁLISE ESTRATÉGICA PARA A SELEÇÃO DE AERONAVES NO PLANEAMENTO DE FROTA DE OPERADORES
AÉREOS. Uma aplicação dos métodos AHP e DEA para uma comparação detalhada entre Airbus e Boeing

métrica utilizados são para cada aeronave. A tabela em baixo vai indicar esses dados, e de seguida serão calculados os novos valores para colocar no Max DEA Model.

Tabela 21- Dados dos 4DMUs
Fonte: (Elaboração própria)

Métricas	A320neo	A350	B737Max	B787
Consumo de combustível (L/km)	2,33	2,45	2,6	2,5
Custo de aquisição (milhões USD)	110	320	120	250
Custo de manutenção (USD/h)	800	1200	900	1300
Autonomia (km)	6800	15000	6500	14000
Emissões de CO ₂ (g/pax/km)	75	78	90	85

Para os *inputs*:

Consumo de combustível (0,668)

$$\text{A320neo: } 2,33 \times 0,6686 = 1,56$$

$$\text{A350: } 2,45 \times 0,6686 = 1,64$$

$$\text{B737 MAX: } 2,6 \times 0,6686 = 1,74$$

$$\text{B787: } 2,5 \times 0,6686 = 1,67$$

Custo de aquisição (0,224)

$$\text{A320neo: } 110 \times 0,2249 = 24,74$$

$$\text{A350: } 320 \times 0,2249 = 71,97$$

$$\text{B737 MAX: } 120 \times 0,2249 = 26,99$$

$$B787: 250 \times 0,2249 = 56,26$$

Custo de Manutenção (0,1065)

$$A320neo: 800 \times 0,1065 = 85,2$$

$$A350: 1200 \times 0,1065 = 127,8$$

$$B737 MAX: 900 \times 0,1065 = 95,85$$

$$B787: 1300 \times 0,1065 = 138,45$$

E para os *outputs*:

Autonomia (0,8858)

$$A320neo: 6800 \times 0,8858 = 6023,44$$

$$A350: 15000 \times 0,8858 = 13287$$

$$B737 MAX: 6500 \times 0,8858 = 5757,7$$

$$B787: 14000 \times 0,8858 = 12401,2$$

Emissões de CO₂ (0,1142)

$$A320neo: 75 \times 0,1142 = 8,57$$

$$A350: 78 \times 0,1142 = 8,91$$

$$B737 MAX: 90 \times 0,1142 = 10,28$$

$$B787: 85 \times 0,1142 = 9,71$$

E outra vez para que se possa colocar as emissões como um *output* normal no programa, efetua-se o mesmo raciocínio de anteriormente:

$$A320neo: 10,28 - 8,57 = 1,71$$

$$A350: 10,28 - 8,91 = 1,37$$

$$B737 MAX: 10,28 - 10,28 = 0$$

$$B787: 10,28 - 9,71 = 0,57$$

Após estes cálculos, serão então aplicados novos valores no programa, com as mesmas configurações do anterior, mas com a divisão de 4 DMUs e os valores apresentados na tabela seguinte:

Tabela 22- Valores finais para o Max DEA Model
 Fonte:(Elaboração própria)

DMU	Consumo de Combustível	Custo de Manutenção	Custo de Aquisição	Autonomia	Emissões de CO₂
A320neo	1,5579	85,2	24,74	6023,4	1,71
A350	1,6381	127,8	71,97	13287	1,37
B737Max	1,7384	95,85	26,99	5757,7	0
B787	1,6715	138,45	56,23	12401,2	0,57

Os resultados de eficiência relativa calculados pelo programa com os valores em cima, resultaram nos valores apresentados em baixo.

Tabela 23-Resultados DEA (4 DMUs)
 Fonte: Max DEA Model

DMUs	Eficiência Relativa (DEA)
Airbus A320neo	1
Airbus A350	1
Boeing 737Max	0.92
Boeing 787	1

As tabelas a seguir apresentam os resultados detalhados e completos, incluindo valores de eficiência (0), rankings, *benchmarks* e movimentos proporcionais.

Tabela 24- Resultados DEA Fonte: Max DEA Model

DMUs	Score (0)	Rank	Benchmark
A320neo	1	1	A320neo
A350	1	1	A350

DMUs	Score (0)	Rank	Benchmark
B737Max	0.91676	4	A320neo
B787	1	1	B787

Os resultados mostram que o A320neo, o A350 e o 787 alcançaram $\theta = 1$, ocupando o primeiro lugar no ranking. Ou seja, as 3 aeronaves operam de forma eficiente, considerando os pesos AHP (Saaty, 1990), com ênfase nos 45,2% no consumo de combustível e 28,7% no autonomia. Cada uma destas DMUs serve como *benchmark* para si mesma, ou seja, o *benchmark* do A320neo é considerado o próprio A320neo, por exemplo, indicando que não há necessidade de ajustes para melhorar a sua eficiência.

O 737 Max, por outro lado, obteve um resultado de $\theta = 0,916667$, estando assim classificado como quarto lugar, o que sugere uma ineficiência relativa. O seu *benchmark* é o A320neo, o que indica que o desempenho do 737Max deve ser comparado e alinhado ao A320neo para chegar à fronteira de eficiência. Essa diferença inicial pode estar relacionada às variações nos dados utilizados, como por exemplo o consumo de combustível (2,6 L/PAX/100KM para o 737 Max vs. 2,33 L/PAX/100KM para o A320neo), que suporta o maior peso (45,2%) na análise. Estes resultados preliminares demonstram que existe a necessidade de analisar os movimentos proporcionais e de folga para entender como pode o 737 MAX pode melhorar (Springer Science & Business Media 1995), o que será explorado na próxima tabela, enquanto as médias por fabricante serão analisadas posteriormente para determinar um vencedor entre Airbus e Boeing.

Tabela 25- Resultados DEA Movimento proporcional

Fonte: Max DEA Model

Proportionate Movement			
DMUs	Consumo de combustível	Custo de aquisição	Custo de manutenção
A320neo	0	0	0
A350	0	0	0

DMUs	Consumo de combustível	Custo de aquisição	Custo de manutenção
B737Max	-0,14492	-2,25	-7,990459
B787	0	0	0

Tabela 26- Resultados DEA Movimento proporcional (continuação)
 Fonte: Max DEA Model

Emissões de CO ₂	Autonomia
0	0
0	0
0	0
0	0

Os movimentos proporcionais, que podem ser visualizados na tabela em cima, refletem uma redução proporcional nos *inputs* requerida para uma DMU ineficiente alcançar a fronteira de eficiência inicial, com base no resultado de eficiência (0). Para as DMUs consideradas eficientes o A320neo, o A350 e o 787, todas com $0 = 1$, os valores são zero, indicando que os seus *inputs* e *outputs* já estão otimizadas em relação aos pesos AHP.

No caso do Boeing 737Max, este apresenta movimentos proporcionais que indicam reduções específicas nos *inputs* para alinhar o seu desempenho ao seu *benchmark* (A320neo). A redução de 0,14492 no consumo de combustível, (de 1,7384 para 1,59348 L/km, correspondente a uma melhoria de 2,6 L/PAX/100KM para aproximadamente 2,39 L/PAX/100KM) é significativa, especialmente pelo peso de 45,2% atribuído a esse critério. Adicionalmente, a redução de 2,25 no custo de aquisição (de 26,99 para 24,74), e de 7,990459 no custo de manutenção (de 95,85 para 87,85954) pode significar que o 737 MAX pode otimizar os seus custos para se aproximar da eficiência do *benchmark* (A320neo). O movimento proporcional nulo na autonomia e emissões (0) é normal por ser um modelo orientado para *input*.

A tabela seguinte, representa os valores nos movimentos de folga.

Tabela 27- Resultados DEA Movimento de folga
Fonte: Max DEA Model

Slack Movement			
DMUs	Consumo de combustível	Custo de aquisição	Custo de manutenção
A320neo	0	0	0
A350	0	0	0
B737Max	-0,03558	0	-2,6595
B787	0	0	0

Tabela 28- Resultados DEA Movimento de folga (continuação)
Fonte: Max DEA Model

Emissões de CO₂	Autonomia
0	0
0	0
-1,71	265,7
0	0

Os movimentos de folga, representados nas tabelas 27 e 28 complementam os movimentos proporcionais ao identificar ajustes adicionais necessários para eliminar ineficiências residuais, ajustando *inputs* excedentes ou aumentando *outputs* em falta (Springer Science & Business Media 1995).

Para o A320neo, o A350 e o 787, os valores de folga são zero, reforçando sua posição na fronteira de eficiência, sem excessos ou défices a corrigir, podendo validar assim a sua robustez de suas configurações operacionais sob os pesos AHP.

Para o 737 Max, a folga de -0,03558 L/km no consumo de combustível indica que, após a redução proporcional, ou seja, o valor de folga tendo em conta o valor da sua eficiência relativa, de 0,14492 L/km (de 1,7384 para 1,59348 L/km, ou de 2,6 para 2,39

L/PAX/100KM), pode reduzir-se ainda mais 0,03558 L/km, atingindo 1,5579 L/km (aproximadamente 2,33 L/PAX/100KM), ao mesmo nível do seu *benchmark*.

Outro ponto importante é o custo de manutenção. A folga de -2,659541 USD/h sugere que, além da redução proporcional de 7,990459 USD/h (de 95,85 para 87,859541 USD/h), o 737 pode reduzir mais 2,659541 USD/h, atingindo 85,2 USD/h.

Nas Emissões de CO₂, a folga de 1,71 indica que as emissões podem ser reduzidas de 10,28 para 8,57 g/pax/km (valor do A320neo), uma melhoria relevante no ponto de vista da sustentabilidade, apesar de um valor do peso residual de 3,7%.

Por último, a folga de 86,1 km na autonomia, com a projeção ajustada para 6023,4 km (baseada no A320neo), significa que o 737 poderia aumentar a sua autonomia de 5757,7 km para 6023,4 km, um aparentemente pouco significativo, mas relevante tendo em conta o peso de 28,7%.

Os movimentos proporcionais e de folga criam uma lógica para corrigir a ineficiência do 737 através de ajustes nos resultados que o colocariam na fronteira da eficiência. Resumidamente, os movimentos de folga revelam que o 737 pode tornar-se mais eficiente com ajustes específicos no consumo de combustível, custos de manutenção, emissões de CO₂ e autonomia.

Na próxima seção de resultados, as projeções e preços duais vão aprofundar as implicações económicas e encontrar qual fabricante entre Airbus e Boeing tem a melhor performance geral com base nas médias.

Tabela 29- Resultados DEA Projeções
Fonte: Max DEA Model

Projection			
DMUs	Consumo de combustível	Custo de aquisição	Custo de manutenção
A320neo	1,558	24,74	85,2
A350	1,638	71,997	127,8
B737Max	1,558	24,74	85,2
B787	1,672	56,23	183,45

Tabela 30- Resultados DEA Projeções (continuação)
Fonte: Max DEA Model

Emissões de CO₂	Autonomia
1,71	6023,4
1,37	13287
1,71	6023,4
0,57	12401,2

As projeções refletem os valores ajustados nos 5 critérios definidos. Esta análise oferece uma base para compreender as implicações operacionais e estratégicas dos resultados DEA.

Para o A320neo, as projeções (1,5579 para consumo de combustível, 24,74 para custo de aquisição, 85,2 para custo de manutenção, 1,71 para emissões de CO₂ e 6023,4 para autonomia) são idênticas aos valores reais, o que mostra que esta aeronave apresenta-se numa posição na fronteira de eficiência ($0 = 1$), ou seja, o A320neo opera de forma otimizada, alinhando-se perfeitamente aos critérios definidos. O A350 apresenta projeções semelhantes (1,6381, 71,997, 127,8, 1,37 e 1328,7), valores consistentes com seu a sua performance eficiente ($0 = 1$), assim como com a outra aeronave Airbus, apesar de ter o custo de aquisição mais elevado (320 milhões USD).

O 737 Max, com $0 = 0,9169$, exibe projeções alinhadas ao *benchmark* A320neo (1,5579, 24,74, 85,2, 1,71 e 6023,4), o que indica que a sua eficiência poderia ser alcançada reduzindo os *inputs* aos níveis do A320neo, como vimos anteriormente. O que reforça a análise anterior, onde os movimentos proporcionais e de folga sugeriram reduções nos consumos e custos. O 787, eficiente com $0 = 1$, continua com projeções realistas (1,6715, 56,23, 183,45, 0,57 e 12401,2), o que revela a sua otimização como *widebody*.

As projeções indicam que o 737 Max pode alcançar eficiência adotando padrões do A320neo, enquanto o 787 já opera de forma otimizada. A vantagem da Airbus sugere uma superioridade em termos de performance, que será explorada na próxima tabela com os preços duais e os retornos de escala, oferecendo *insights* sobre a sensibilidade dos resultados.

Tabela 31- Resultados DEA Preços Duais
 Fonte: Max DEA Model

Dual Price/RTS Constant			
DMUs	Consumo de combustível	Custo de aquisição	Custo de manutenção
A320neo	0	0	0
A350	0	-0,03705076	0
B737Max	0	0	0
B787	-0,00439129	-0,006971806	-0,00697180

Tabela 32- Resultados DEA Preços Duais (continuação)
 Fonte: Max DEA Model

Emissões de CO₂	Autonomia	RTS Constant
0	0,5847965	0
0	0,000006743434	0,910444
0	0	0,916936
0	0,00007108703	0,118436

Os preços duais são a taxa de mudança no resultado de eficiência (0) em resposta a variações marginais nos *inputs* e *outputs*, enquanto o *RTS Constant* avalia se os retornos de escala são crescentes, decrescentes ou constantes, considerando os pesos AHP (Springer Science & Business Media 1995). Esta análise complementa as projeções, oferecendo uma perspectiva económica e técnica dos resultados.

O A320neo tem preços duais zero para o consumo de combustível, custo de aquisição, e custo de manutenção, mas um preço dual positivo de 0,5847965 para a autonomia, mostrando que um aumento marginal de 1 km na autonomia melhoraria a sua eficiência em 0,5847965 unidades (0 = 1). O *RTS Constant* de 1 indica retornos de escala constantes, o

que significa que o A320neo opera num ponto de equilíbrio onde aumentos proporcionais em *inputs* resultam em aumentos proporcionais em *outputs* (Banker et al, 1984).

O A350 apresenta preços duais 0 para o consumo de combustível e custo de manutenção, mas um preço dual negativo de -0,03705076 para o custo de aquisição, indicando que uma redução de 1 milhão nesse *input* iria melhorar a sua eficiência em 0,0370507 apesar de ser eficiente.

O preço dual positivo de 0,000006743434 para a autonomia reflete um valor muitíssimo marginal positivo, o que pode sugerir que um aumento na autonomia tem um impacto positivo, mas limitado na sua eficiência. Por fim, o RTS *Constant* de 0,910444 revela que tem retornos de escala decrescentes, onde os aumentos adicionais nos *inputs* geram retornos menores (Banker et al, 1984).

O 737Max tem preços duais 0 para todas as variáveis, por ser ineficiente ($\theta = 0,916936$), e os preços duais para DMUs ineficientes são frequentemente nulos no modelo DEA, já que a eficiência é determinada pelo *benchmark*. O RTS *Constant* de 0,916936 indica retornos de escala decrescentes, sugerindo que o 737Max opera numa escala ligeiramente acima da ideal, onde aumentos nos *inputs* geram ganhos menores em *outputs* (Banker et al, 1984).

O 787 tem preços duais negativos de -0,00439129 para o consumo de combustível, -0,006971806 para o custo de manutenção, e -0,006971806 para o custo de aquisição, indicando que reduções marginais nesses *inputs* melhorariam a eficiência, embora o impacto seja pequeno, já que a DMU é eficiente ($\theta = 1$). Além disso, o preço dual positivo de 0,00007108703 para a autonomia destaca o valor estratégico desse *output*, indicando que pequenos aumentos na autonomia poderiam gerar benefícios marginais, especialmente considerando o peso de 28,7% atribuído a esse critério. e o potencial de expansão sugerido pelo RTS *Constant* de 0,118436, indicando retornos de escala crescentes (Banker et al, 1984).

De seguida, é apresentada uma tabela com os resultados aplicados pelo modelo finais, tendo em conta a média das aeronaves da Boeing e Airbus calculada após terem sido calculados como DMUs separados.

Tabela 33- Resultado DEA final
Fonte: Max DEA Model

Dupla de Aeronaves	Eficiência Relativa (DEA)
Airbus (A320neo & A350)	1
Boeing (737 MAX & 787)	0.96

4.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos no capítulo anterior destacou nuances importantes no valor da eficiência relativa das unidades de decisão analisadas neste trabalho. Apesar de ambas as unidades de decisão terem apresentado níveis de eficiência elevados, os resultados indicaram uma vantagem para a Airbus, suportado pelos fatores analisados neste trabalho, onde as duas aeronaves da Airbus tiveram constantemente valores mais competitivos que as suas homologas da Boeing, como no geral, custos menores e níveis de performance semelhantes. Estes resultados estão alinhados com os objetivos traçados no início do estudo, que procuravam identificar a combinação de aeronaves mais eficiente de forma a auxiliar os operadores aéreos com uma escolha na seleção de frota para o futuro.

A performance ambiental das aeronaves da Airbus foi talvez o maior diferenciador, que apesar de neste trabalho ter tido um peso como critério relativamente baixo, é importante para os operadores operarem em mercados onde há crescente pressão regulatória e metas ambientais rigorosas, como na União Europeia (Strategic Foresight Report, 2023). A Airbus, teve valores de emissões médias de CO₂ inferiores em comparação com a Boeing, e reforça a relevância das aeronaves A320neo e A350 em mercados onde a sustentabilidade é uma prioridade competitiva.

Em relação a custos operacionais, tanto de manutenção como de combustível, a fabricante europeia também apresentou melhores resultados, principalmente devido ao menor consumo médio de combustível, que teve bastante importância neste trabalho devido ao peso atribuído a esta métrica. Nas rotas de longo curso, onde se espera que sejam operadas por exemplo, pelo A350 ou B787, e onde os custos de combustível têm um peso altíssimo dos gastos totais, a diferença entre os fabricantes, embora relativamente pequena, pode resultar em economias substanciais ao longo da vida útil das aeronaves, ou seja, após décadas da sua utilização e milhares de ciclos de voo, as aeronaves da Airbus serão capazes de gastar muito menos dinheiro em custos de combustível. Estes fatores fazem com que a Airbus seja um fabricante

bem posicionado para os operadores que dão prioridade à eficiência económica em operações com uma procura elevada.

No que diz respeito à autonomia, as duas fabricantes apresentaram valores semelhantes, contudo, e mais uma vez, a Airbus demonstrou ser a fabricante superior nesse aspeto.

Embora a Boeing tenha apresentado uma eficiência relativa ligeiramente inferior, os resultados indicam que a fabricante mantém uma competitividade sólida em mercados específicos. Os modelos analisados deste fabricante são particularmente relevantes para cenários onde a autonomia e a lucratividade imediata são priorizadas, já que apresenta valores na autonomia muito parecidos, e as aeronaves da Boeing juntas têm custos de aquisição mais baixos que as aeronaves da Airbus.

Os resultados também revelam a importância de várias opções de análise para decisões estratégicas no setor aéreo. Ao analisar performance operacional, e ambiental das aeronaves, a análise DEA demonstrou que tanto a Airbus quanto a Boeing oferecem soluções robustas para operadores com diferentes prioridades. No entanto, a ligeira vantagem da Airbus reflete uma abordagem estratégica mais orientada para o futuro, com maior foco em sustentabilidade e consumo de combustível.

Do ponto de vista prático, os *insights* gerados a partir desta análise podem orientar os operadores aéreos na renovação e expansão das suas frotas. A abordagem metodológica utilizada no estudo reforça a aplicabilidade prática do AHP e DEA, demonstrando como ambos os métodos complementares podem oferecer uma base analítica sólida para decisões estratégicas.

Em suma, a análise dos resultados confirmou a utilidade do AHP e DEA como ferramentas uteis para decisões com vários fatores a ter em conta, no setor aéreo, enquanto destacou as vantagens competitivas da Airbus em critérios técnicos e ambientais. Contudo, os resultados também reforçam a necessidade de análises contínuas e adaptativas, considerando a dinâmica do setor e os avanços tecnológicos, para garantir que os operadores estejam preparados para corresponder à procura futuras com eficácia e responsabilidade.

4.2.2. PREPARAÇÃO PARA DISCUSSÕES FUTURAS

Os resultados obtidos ao combinar o AHP e o DEA são um indicador com o objetivo de auxiliar operadores aéreos no seu planeamento de frota com uma perspetiva de médio a longo prazo, especialmente num setor de aviação comercial em contante mudança e transformação.

Ao comparar a eficiência das aeronaves, a Airbus teve sempre uma vantagem desde a recolha de dados até ao final, com uma eficiência relativa de 1,0 no DEA, enquanto a Boeing ficou um pouco atrás, com 0,958335.

Uma questão que pode surgir com este trabalho, é como é que os operadores podem ajustar as suas frotas em cenários de mudança, especialmente com as regras ambientais a serem cada vez mais severas, e onde, por exemplo aeronaves como o A350 ou o 787, que vimos serem ambas eficientes a nível ambiental, parecem escolhas acertadas para operar em rotas de longo curso, mas será que estas opções continuam a fazer sentido se os custos subirem, por exemplo, com a adoção de SAF. cerca de 2 a 5 vezes mais caros que o combustível convencional, segundo a IATA, (2024), o custo adicional para um voo transatlântico pode chegar a milhares de dólares, afetando a rentabilidade de aeronaves *widebody* como o A350, e B787. Este cenário destaca a importância de considerar fatores externos, como políticas de incentivos (subsídios para SAF), que podem alterar as prioridades dos operadores na seleção de aeronaves, por exemplo (EUROCONTROL, 2022).

Outro ponto com destaque é o papel das preferências dos passageiros. Embora seja uma métrica que não foi de todo analisada neste estudo, o conforto a bordo e a experiência dos passageiros estão a tornar-se fatores com relevância na indústria, e consequentemente poderia ser analisado como um fator a juntar a todos os outros analisados para ajudar os operadores aéreos a avaliar a escolher uma aeronave em detrimento de outra. (EUROCONTROL, 2022)

Por fim, a versatilidade dos métodos AHP e DEA é uma característica muito útil, ao permitir adaptá-los a diferentes contextos, como na análise de operadores *low cost*, ou operadores de carga, e abordando apenas diferentes tipos de operação, através do ajuste de critérios e pesos que estes tipos de operadores iriam dar importância.

5. CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal comparar a eficiência relativa das aeronaves Airbus (A320neo e A350) e Boeing (737Max e 787), através da utilização de métricas operacionais, oferecendo aos operadores um quadro analítico na escolha de aeronaves no seu planeamento de frota para longo prazo. Para tal, foram utilizados os métodos AHP e DEA, que se complementaram, onde o AHP permitiu identificar e priorizar as métricas definidas através do input de especialistas, e de seguida, o DEA, utilizando o modelo BCC com retornos de escala variáveis, avaliou a eficiência relativa de cada unidade de decisão. Os resultados indicaram que a unidade de decisão Airbus teve uma eficiência relativa superior, com o valor de 1, face à Boeing, que teve 0,96, uma diferença que se deve, em grande parte, aos menores custos (combustível e manutenção) das aeronaves do fabricante europeu. Apesar destes resultados, a obtenção dos mesmos não foi fácil, pois a proximidade nas métricas entre as duas unidades de decisão levou a que o Max DEA Model não fosse capaz de encontrar uma diferença no valor de eficiência relativa, e por isso decidiu-se dividir as aeronaves em 4 unidades e comparar as 4 individualmente, o que expôs ligeiras lacunas no B737Max em comparação com o seu *benchmark* (a320neo) e conseqüente menor eficiência geral das aeronaves da Boeing. A integração do AHP e DEA foi útil na realização deste trabalho e mostrou ser uma abordagem interessante para decisões no setor aéreo, por ter permitido equilibrar vários fatores de decisão na escolha de aeronaves.

Este trabalho confirmou assim, que a Airbus atualmente possui nas suas aeronaves principais uma vantagem técnica e ambiental em comparação com a concorrente americana, contudo, a Boeing mostrou-se também competitiva. Assim, este estudo oferece uma base sólida para os operadores aéreos que pretendam renovar ou expandir a sua frota, com uma perspetiva para as próximas décadas.

5.2. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Existem algumas limitações durante o desenvolvimento deste trabalho que podem, e devem ser consideradas ao interpretar os resultados. Uma das principais limitações está relacionada com a exclusão de fatores externos e intangíveis que influenciam a decisão dos operadores aquando da aquisição de novas aeronaves, mas que não foram incorporados devido à sua complexidade e à falta de dados exemplo, como por exemplo, os acordos comerciais entre

fabricantes e operadores, como descontos na aquisição de aeronaves por geralmente serem compradas várias ao mesmo tempo, ou incentivos governamentais, segundo Rigas Doganis (2019a), o que poderia mudar consideravelmente os valores atribuídos no preço de aquisição e conseqüentemente os resultados de eficiência, por ter sido considerado um fator com bastante peso. Além disso, a existência de fatores externos como pressões ou influências políticas, subsídios a fabricantes, flutuações económicas globais ou mudanças nas preferências dos passageiros por exemplo o conforto a bordo das aeronaves, também afetam as decisões estratégicas, mas não foram incluídos no modelo devido à ausência de dados consistentes (EASA, 2025).

Outra limitação reside na subjetividade inerente à atribuição de pesos no AHP. Embora os pesos tenham sido atribuídos por entrevistas a especialistas na gestão de frota, os mesmos podem variar consoante o contexto operacional de operador para operador, introduzindo possíveis variações nos resultados.

Outra possível limitação foi no cálculo dos valores nas métricas de custos de manutenção, consumo de combustível e emissões de CO₂, por não existirem na literatura valores exatos para o que era pretendido. Conseqüentemente os valores foram em parte calculados através de estimativas da IATA e dos fabricantes tendo em conta os valores das aeronaves antecessoras (por exemplo o a320ceo, a330, b737ng e b767).

As conclusões deste trabalho são também condicionadas pela limitação no número de unidades de decisão (DMUs) analisadas, apenas duas ou quatro. Esta restrição compromete a generalização dos resultados, uma vez que a amostra reduzida dificulta a obtenção de resultados robustas.

Ao considerar duas DMUs, a aplicação do método DEA torna-se estatisticamente sensível. Nestes casos, é frequente que várias unidades sejam classificadas como “eficientes” (com score de eficiência igual a 1), não necessariamente por refletirem uma performance superior, mas sim pela baixa exigência comparativa resultante da proporção entre variáveis e observações. Isto reduz o poder discriminatório do modelo e pode gerar uma perceção distorcida da realidade.

Adicionalmente, embora a metodologia adotada, combinando AHP e DEA, seja válida no contexto académico desta investigação, a sua aplicabilidade prática em cenários reais é limitada. No mundo real, decisões estratégicas de planeamento de frota envolvem um número significativamente maior de variáveis, unidades comparáveis e fatores externos, o que exigiria modelos mais robustos, dados mais extensos e simulações mais complexas.

Por fim, a indústria da aviação comercial é bastante dinâmica e estão sempre presentes avanços tecnológicos e mudanças regulatórias que facilmente alteram o cenário analisado, através da alteração de pesos nas métricas analisadas por exemplo, tornando assim, os resultados atuais sujeitos a alterações no futuro (EuroControl, 2024)

5.3 INVESTIGAÇÕES FUTURAS

A ideia utilizada neste trabalho pode ser aproveitada e utilizada em estudos futuros, por exemplo na inclusão de como o impacto dos combustíveis sustentáveis de aviação, pode alterar os resultados no consumo de combustível e de emissões de CO₂ e os custos operacionais relacionados com essa redução para os operadores.

Também é possível explorar o impacto de alterações regulatórias, como taxas de carbono mais elevadas ou taxas aeroportuárias na escolha de aeronaves de um fabricante ou do outro. Outra possibilidade seria ainda completar a métrica do custo de aquisição e tentar aplicar casos reais de pacotes feitos pelos transportadores aos operadores na compra de várias aeronaves, ou então a utilização de acordos de leasing a empresas terceiras em vez de uma aquisição direta ao fabricante.

Para concluir, os métodos AHP e DEA podiam também ser utilizadas num contexto onde os critérios e pesos são diferentes e focados noutra tipo de modelo de negócio ou operacional, como por exemplos apenas rotas regionais para operadores *low cost* ou até operações de carga.

REFERÊNCIAS

- “A350 FAMILY: SHAPING THE FUTURE OF AIR TRAVEL.” 2024.
- Airbus. 2024a. “A320neo The Benchmark.” December 13, 2024.
- 2024b. “A350-900 The Long Range Leader.” December 13, 2024.
- 2024c. “Save up to 25% Maintenance Costs with the A350.” December 13, 2024.
- AIRBUS. n.d.-a. “A320neo The Most Successful Commercial Aircraft Family Ever.”
- n.d.-b. “A350 | The Long Range Leader.”
- “Airbus Global Market Forecast 2021 Aviation Connects and Unites Us!” n.d.
- “Airframe Maintenance.” n.d.
- “Airlines Rote Maps.” 2024. United Airlines. December 8, 2024.
- Alderighi, Marco, Alessandro Cento, Peter Nijkamp, and Piet Rietveld. 2005. “Network Competition - The Coexistence of Hub-and-Spoke and Point-to-Point Systems.” *Journal of Air Transport Management* 11 (5): 328–34. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2005.07.006>.
- Alessandro V.M. Oliveira, Thiago Caliari, and Rodolfo R. Narcizo. n.d. “An Empirical Model of Fleet Modernization: On the Relationship between Market Concentration and Innovation Adoption by Airlines.”
- Andrés, Wilmar, and Calderón Guevara. 2023. “Incorporating Flexibility in Infrastructure Systems Planning & Management.”
- Anshu Agrawal. 2024. “Empirical Analysis of Fleet Commonality Strategy’s Impact on the Operating Performance of the Indian Aviation Sector.” *Sage Journals*.
- Azadeh, A., S. F. Ghaderi, and H. Izadbakhsh. 2008. “Integration of DEA and AHP with Computer Simulation for Railway System Improvement and Optimization.” *Applied Mathematics and Computation* 195 (2): 775–85. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.05.023>.
- Belobaba, Peter., Amedeo R. Odoni, and Cynthia. Barnhart. 2009. *The Global Airline Industry*. Wiley.
- Bijan Vasigh, and Farshid Azadian. 2022. *Aircraft Financial and Operational Efficiencies*.

Boeing. 2024a. “737Max.” December 13, 2024.

2024b. “787 Dreamliner.” December 13, 2024.

. n.d.-a. “737 MAX.”

. n.d.-b. “787 Dreamliner.”

BOEING. n.d. “COMMERCIAL MARKET OUTLOOK 2021-2040.”

“BoeingCurrentMarketOutlook2009to2028.” n.d.

“Bringing Our World Together.” n.d.

“Commercial Aviation and the Environment.” 2014. www.boeing.com/environment.

Cros, Geraldine. 2022a. “Airline Maintenance Cost Executive Commentary FY2022 Data.”

. 2022b. “Airline Maintenance Cost Executive Commentary FY2022 Data.”

“Data Envelopment Analysis Second Edition.” n.d.

David Yu. 2020. *Aircraft Valuation*.

Eng, Lay, Hooi Ling, and Lee Kong. 2015. “Airline Strategic Fleet Planning Framework.”
Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol. 11.

EUROCONTROL. 2022. “EUROCONTROL Aviation Outlook 2050.” Vol. 161.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2022.02.008>.

“EUROCONTROL Aviation Long-Term Outlook: Flights and CO 2 Emissions Forecast
2024-2050.” n.d.

European Aviation Safety Agency. 2019. “European Aviation Environmental Report 2019.”

Fábio Coelho Barbosa. n.d. “Aircraft Emissions and Noise Review – Technological Paths
for Pursuing Sustainability in the Aviation Industry.”

Fernández, Isabel, and Tauno Kekäle. 2008. “Better Models with Delphi and Analytic
Hierarchy Process Approaches: The Case of Reverse Logistics.” *Int. J. Logistics
Systems and Management*. Vol. 4.

“Financial Statements 2 Airbus / Financial Statements 2019.” n.d.

Flanagan, Connor, Luke Distasio, Omar Abed, Mitchell Foster, Eitan Ghelman, Jeffrey
Hernandez, Hamid Nazemi, Eric Richter, and Abdulrahman Shuraym. 2020. “High
Capacity Short Range Transport Aircraft Final Design Report.”

- Gailagista, Ayank, Zakia Rahma, Charles An, Asep Suparman, and Novembriani Irenita. n.d. “Is It Worth Replacing B 737-800 NG with B 737 Max 8?”
- Gavazza, Alessandro. n.d. “Leasing and Secondary Markets: Theory and Evidence from Commercial Aircraft *.” <http://ssrn.com/abstract=869227>.
- Givoni, Moshe, and Piet Rietveld. 2009. “Airline’s Choice of Aircraft Size - Explanations and Implications.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 43 (5): 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.01.001>.
- Gkirgkis, Akis, Christos Kassapoglou, and Richard Curran. 2017. “A Value Operations Methodology (VOM) Approach to Multi-Criteria Assessment of Similar-Class Air Vehicles: An Airbus A350 versus the Boeing 787 Case Study.” In *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2017*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4253>.
- “Global Market Forecast 2024.” n.d.
- “Global Outlook for Air Transport A Local Sweet Spot December 2023 2 Global Outlook for Air Transport-A Local Sweet Spot Contents.” n.d. <http://www.thisismotif.com>.
- “Global Outlook for Air Transport A World with Lower Oil Prices?” 2024.
- Grimme, Wolfgang, Sven Maertens, and Stephan Bingemer. 2022. “The Role of Very Large Passenger Aircraft in Global Air Transport - A Review and Outlook to the Year 2050.” In *Transportation Research Procedia*, 59:76–84. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.099>.
- Gwarda, Karolina. 2022. “Using the Analytic Hierarchy Process Method to Select the Best Supplies: A Case Study of a Production Company.” *European Research Studies Journal*. Vol. XXV.
- Hadad, Yossi, and Michael Z Hanani. 2011a. “Combining the AHP and DEA Methodologies for Selecting the Best Alternative.” *Int. J. Logistics Systems and Management*. Vol. 9.
- . 2011b. “Combining the AHP and DEA Methodologies for Selecting the Best Alternative.” *Int. J. Logistics Systems and Management*. Vol. 9.
- Hensey, Rory, and Ana Magdalena. n.d. “A320 NEO vs. CEO Comparison Study.”
- Hoi-Lam Ma, Yige Sun, Sai-Ho Chung, and Hing Kai Chan. n.d. “Tackling Uncertainties in Aircraft Maintenance Routing: A Review of Emerging Technologies.”

- Hsu, Pi-Fang, Che-Wei Chang, and Cheng-Lung Wu. 2009. "Her Papers Have Appeared in Quality and Quantity, Waste Management, Building and Environment." *International Journal of Manufacturing Technology and Management, Information and Software Technology, Quality and Quantity*. Vol. 5.
- Hulst, Darren. 2024. "Commercial Market Outlook."
- IATA. 2023a. "Annual Review 2023."
- . 2023b. "Net Zero 2050: Operational and Infrastructure Improvements." www.iata.org/flynetzero.
- . 2023c. "Net Zero 2050: Progress Tracking Methodology." <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf>.
- . 2023d. "Net Zero 2050: Sustainable Aviation Fuels." www.iata.org/flynetzero.
- . 2024. "Unveiling the Biggest Airline Costs." 2024.
- "In Brief Ambitious Timelines for Zero-Emission Vehicles and Alternative Fuels Must Be Met." n.d. <https://stat.link/2cqbkr>.
- Jupp, J. A. 2016. "The Design of Future Passenger Aircraft Â€" the Environmental and Fuel Price Challenges." *Aeronautical Journal* 120 (1223): 37–60. <https://doi.org/10.1017/aer.2015.4>.
- Kharina, Anastasia, Daniel Rutherford, Mazyar Zeinali, Juan Alonso, Meyer J Benzakein, Fayette Collier, Nicholas A Cumpsty, Richard Golaszewski, William Norman, and Dianne Wiley. 2016. "COST ASSESSMENT OF NEAR AND MID-TERM TECHNOLOGIES TO IMPROVE NEW AIRCRAFT FUEL EFFICIENCY ACKNOWLEDGEMENTS." www.theicct.orgcommunications@theicct.org.
- Kühn, Marius, and Ing Dieter Scholz. n.d. "Project Fuel Consumption of the 50 Most Used Passenger Aircraft." <https://doi.org/10.15488/xxxxx>.
- Kummer, Sebastian ;, Marcus ; Einbock, Philipp ; Nagl, and Jan-Philipp Schlaak. n.d. "The Road Toll for Heavy Vehicles in the Czech Republic. Charts for Calculating Toll Costs for Trucks in the Combined Shipment and Less-than-Truckload Sector in the Czech Republic."

Lai, Po Lin, Andrew Potter, Malcolm Beynon, and Anthony Beresford. 2015. "Evaluating the Efficiency Performance of Airports Using an Integrated AHP/DEA-AR Technique." *Transport Policy* 42 (August):75–85. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.04.008>.

Marc Praquin, Agence. n.d. "Including the Annual Financial Report."

Marintseva, Kristina, and Roxani Athousaki. 2024. "Assessment of Aircraft Leasing Efficiency: An Airline Perspective." *Journal of the Air Transport Research Society* 3 (December):100039. <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2024.100039>.

Michael Roskopf, Stephan Lehner, and Volker Gollnick. 2024. "Economic–Environmental Trade-Offs in Long-Term Airline Fleet Planning." *Journal of Air Transport Management* 34.

M.J. Watson, P.G. Machado, A.V. da Silva, Y. Saltar, C.O. Ribeiro, A.W. Dowling, and C.A.O. Nascimento. n.d. "Sustainable Aviation Fuel Technologies, Costs, Emissions, Policies, and Markets: A Critical Review."

"Mnsc.30.9.1078." n.d.

"Module 3 - Tretheway et al (1992), Ch 2." n.d.

Narcizo, Rodolfo R., Alessandro V.M. Oliveira, and Martin E. Dresner. 2020. "An Empirical Model of Airline Fleet Standardization in Brazil: Assessing the Dynamic Impacts of Mergers with an Events Study." *Transport Policy* 97 (October):149–60. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.05.021>.

O'Kelly, Morton E. n.d. "A Geographer's Analysis of Hub-and-Spoke Networks'."

Pai, Vivek. 2010. "On the Factors That Affect Airline Flight Frequency and Aircraft Size." *Journal of Air Transport Management* 16 (4): 169–77. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.08.001>.

Paul Clark. 2017. *Buying the Big Jets*.

Podinovski, Vladislav V. 2020. "Maximum Likelihood Solutions for Multicriterial Choice Problems." *European Journal of Operational Research* 286 (1): 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.028>.

Prussi, Matteo, Uisung Lee, Michael Wang, Robert Malina, Hugo Valin, Farzad Taheripour, César Velarde, Mark D. Staples, Laura Lonza, and James I. Hileman. 2021. "CORISIA:

- The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-Cycle GHG Emissions for Aviation Fuels.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.
- Rahn, Antonia, Melissa Schuch, Kai Wicke, Benjamin Sprecher, Clemens Dransfeld, and Gerko Wende. 2024. “Beyond Flight Operations: Assessing the Environmental Impact of Aircraft Maintenance through Life Cycle Assessment.” *Journal of Cleaner Production* 453 (May). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142195>.
- Rigas Doganis. 2019a. *Flying Off Course*.
- 2019b. *Flying Off Course Airline Economics and Marketing*.
- Sa, Constantijn A.A., Bruno F. Santos, and John Paul B. Clarke. 2020. “Portfolio-Based Airline Fleet Planning under Stochastic Demand.” *Omega (United Kingdom)* 97 (December). <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.08.008>.
- Saaty, R W. 1987. “THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-WHAT IT IS AND HOW IT IS USED.” Vol. 9.
- Saaty, T. L. 2002. “Decision Making with the Analytic Hierarchy Process.” *Scientia Iranica* 9 (3): 215–29. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>.
- Saaty, Thomas L. 2008. “Decision Making with the Analytic Hierarchy Process.” *Int. J. Services Sciences*. Vol. 1.
- “Saaty1990.” n.d.
- Seiford, Lawrence M, and Joe Zhu. n.d. “Continuous Optimization Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation.” www.elsevier.com/locate/dsw.
- Shang, Jen, and Toshiyuki Sueyoshi. 1995. “EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL Theory and Methodology A Unified Framework for the Selection of a Flexible Manufacturing System.” *European Journal of Operational Research*. Vol. 85.
- Shankar, M A, and R Sarkis. 2008. “Supplier Selection in an Agile Manufacturing Environment Using Data Envelopment Analysis and Analytical Network Process.” *Journal of Advances in Management Research, Journal of Enterprise Information Management*. Vol. 4.

Springer Science & Business Media. 1995. *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. Edited by Abraham Charnes, William W. Cooper, Arie Y. Lewin, and Lawrence M. Seiford.

Stephcn Holloway. 2008. *Straight and Level Practical Airline Economics*.

Tavana, Madjid, Mehdi Soltanifar, Francisco J. Santos-Arteaga, and Hamid Sharafi. 2023. "Analytic Hierarchy Process and Data Envelopment Analysis: A Match Made in Heaven." *Expert Systems with Applications* 223 (August). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119902>.

Thomas R. Sexton, and Herbert F. Lewis. 2003. *Two-Stage DEA: An Application to Major League Baseball*.

Thompson, Donald. 2018. "Boeing 737 Max Crisis Of." <https://doi.org/10.5281/zenodo.13916413>.

Valeria Vercella, and Marco Fioriti. n.d. "Towards a Methodology for New Technologies Assessment in Aircraft Operating Cost."

Wei, Wenbin, and Mark Hansen. 2003. *Cost Economics Os Aircraft Size*.

Yang, Taho, and Chunwei Kuo. n.d. "Decision Aiding A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the Facilities Layout Design Problem." www.elsevier.com/locate/dsw.

Zhou Ethan, Wenxiang. n.d. "Competition and Development in the Aviation Industry: An Analysis of Strategic Adaptability and Challenges."

