

METAS SUSTENTÁVEIS DA AVIAÇÃO

Incorporação das responsabilidades ambientais individuais do setor para uma resposta coletiva da aviação face à otimização de esforço para as metas sustentáveis de 2050 definidas pelas organizações internacionais.

CAROLINA CORREIA VIEIRA

Provas destinadas à obtenção de grau de:
Mestre em Operações de Transporte Aéreo
Dezembro 2024

VERSÃO DEFINITIVA

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

METAS SUSTENTÁVEIS DA AVIAÇÃO

Incorporação das responsabilidades ambientais do setor para uma resposta coletiva da aviação face à otimização de esforço para as metas sustentáveis de 2050 definidas pelas organizações internacionais.

Autora: Carolina Correia Vieira

Orientador: Professor Rui Quadros

Dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

O meu progresso académico resultou do meu esforço suportado pelo apoio essencial que tive o privilégio de receber.

Primeiramente, agradeço ao ISEC LISBOA por me proporcionar 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.

O meu agradecimento especial dirige-se ao Professor Doutor Rui Quadros 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.

Agradeço à Direção de Sustentabilidade e Ambiente da ANA Aeroportos de Portugal (Grupo VINCI) pelo seu contributo essencial à obtenção de resultados ao estudo.

Um agradecimento prezado à minha família que me mostraram um horizonte sem limites e que estiveram sempre presentes em todas as conquistas.

Ao meu companheiro agradeço a motivação, tempo e o apoio, caminhando sempre ao meu lado na aviação, guiando-me com coordenadas e mantendo-me as asas alinhadas.

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.

A todos, Muito Obrigada.

RESUMO

Este estudo tem como foco as metas sustentáveis da aviação com incorporação das responsabilidades ambientais individuais do setor para uma resposta coletiva da aviação face à otimização de esforço estratégico para as metas sustentáveis de 2050.

Deste modo pretende-se compreender como as diversas entidades da aviação comercial pretendem exercer um esforço conjunto para que sejam atingidas as metas de sustentabilidade ambiental do setor.

São consideradas as prioridades de investimento das diferentes entidades, que assentam nos seus principais interesses e objetivos, de modo a compreender a possibilidade de flexibilidade no desenvolvimento e aplicação de um sistema de cooperação, por meio de estratégias coletivas, para a evolução conjunta. Isto com a meta de ultrapassar diversas barreiras do mercado, e possibilitando a otimização de esforço das entidades constituintes.

Assim é necessário verificar o crescimento de tráfego aéreo e respetivo impacte no progresso de redução/eliminação das emissões de CO₂, analisar os fatores envolventes às emissões de CO₂ para a descarbonização da aviação, estudar os cenários de evolução para 2050 considerando diferentes perspetivas e fatores, e encontrar o papel das diversas entidades relevantes para cumprir os percursos base de desenvolvimento definidos pelos cenários de evolução.

Isto permite a recolha de interesses e responsabilidades individuais de entidades, de modo a verificar a capacidade do setor aplicar estratégias colaborativas para constituir uma resposta única otimizada, aplicável a todas as partes, para um percurso sustentado que irá possibilitar a concretização dos objetivos de redução de emissões de CO₂ dentro das metas sustentáveis estabelecidas, respondendo à pressão e às obrigações impostas à indústria da aviação.

Palavras-chave

Evolução Sustentável, Emissões de Carbono, Análise de Dados, Estratégia Ambiental, Colaboração.

ABSTRACT

This study focuses on aviation's sustainable goals, incorporating the sector's individual environmental responsibilities for a collective aviation response to optimise strategic efforts towards the 2050 sustainable goals.

The aim is to understand how the various commercial aviation organisations intend to make a joint effort to achieve the sector's environmental sustainability targets.

The investment priorities of the different entities are considered, based on their main interests and objectives, in order to understand the possibility of flexibility in the development and application of a system of co-operation, through collective strategies, for joint evolution. This is done with the aim of overcoming various market barriers and optimising the efforts of the constituent entities.

It is therefore necessary to verify the growth of air traffic and its impact on progress in reducing/eliminating CO₂ emissions, analyse the factors surrounding CO₂ emissions for the decarbonisation of aviation, study the evolution scenarios for 2050 considering different perspectives and factors, and find the role of the various relevant entities in fulfilling the basic development paths defined by the evolution scenarios.

This allows the collection of individual interests and responsibilities of entities, in order to verify the sector's ability to apply collaborative strategies to constitute a single optimised response, applicable to all parties, for a sustained path that will enable the achievement of CO₂ emission reduction objectives within the established sustainable targets, responding to the pressure and obligations imposed on the aviation industry.

Keywords

Sustainable Evolution, Carbon Emissions, Data Analysis, Environmental Strategy, Collaboration.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIV
ABREVIATURAS E SIGLAS	XVI
DEFINIÇÕES.....	XVIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Âmbito	2
1.3. Motivação	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Metodologia	3
1.6. Estrutura do Trabalho.....	4
2. ENQUADRAMENTO	6
2.1. Introdução	6
2.2. Tráfego aéreo	8
2.3. Medidas	13
2.3.1. Híbrido-elétrico	15
2.3.2. Totalmente elétrico	15

2.3.3.	Hidrogénio.....	16
2.3.4.	Configurações avançadas de aeronaves	16
2.4.	2050	17
2.4.1.	Céu Único Europeu	20
2.4.2.	NextGen	21
2.4.3.	Atualizações do Sistema de Aviação da ICAO	21
2.5.	Colaboração.....	26
2.5.1.	ATAG	26
2.5.2.	IATA.....	29
2.5.3.	SKY BREATHE.....	31
2.5.4.	BOEING.....	32
2.5.5.	AIRBUS	33
2.5.6.	EUROCONTROL	35
2.5.7.	NASA.....	36
2.5.8.	Conclusão do assunto	37
3.	DESENVOLVIMENTO DO TEMA.....	41
3.1.	Crescimento do Tráfego Aéreo.....	41
3.2.	Emissões de CO₂ provenientes do transporte aéreo	44
3.3.	Análises de Evolução	50
3.3.1.	Análise 1.....	50
3.3.2.	Análise 2.....	64
3.4.	Conclusão do desenvolvimento	81
4.	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1.	Resposta ANA Aeroportos de Portugal (VINCI Group)	83
	Observações à resposta da ANA Aeroportos de Portugal (Grupo VINCI)	92
5.	CONCLUSÕES.....	95
6.	REFERÊNCIAS.....	100
	ANEXO 1 – ATAG CENÁRIO 1	102

ANEXO 2 – ICAO LTAG S3 104

(ICAO, N.D.)..... 107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Crescimento de tráfego aéreo mundial	10
Figura 2 PACE model	11
Figura 3 Crescimento de tráfego aéreo UE27+EFTA.....	12
Figura 4 Tráfego de passageiros 2050	17
Figura 5 Emissões a eliminar até 2050.....	17
Figura 6 Emissões de CO ₂ anuais	22
Figura 7 Emissões de CO ₂ cumulativas.....	22
Figura 8 Emissões por cenário 2020/2050	23
Figura 9 Evolução das emissões 2050	27
Figura 10 Modelo de Teste A380 MSN1	34
Figura 11 Hidrogénio nos Aeroportos (Airbus)	35
Figura 12 Percentagem de contribuição por fator	38
Figura 13 Crescimento do tráfego de passageiros.....	42
Figura 14 Cenários de evolução do tráfego de passageiros	43
Figura 15 Impacto climático.....	44
Figura 16 Decomposição das raízes das emissões da aviação e as respetivas alavancas de descarbonização.....	45
Figura 17 Intensidade do CO ₂	47
Figura 18 Comparação entre aeronaves a voar a SAF, hidrogénio e elétrico	49
Figura 19 Cenários de redução dos gases de efeito estufa	52
Figura 20 Gases de efeito estufa 2030.....	54
Figura 21 Gases de efeito estufa 2050.....	56
Figura 22 Gases de efeito estufa anuais	57
Figura 23 Comparação entre aeronaves a voar a SAF, hidrogénio e elétrico	58
Figura 24 Custos associados ao combustível	61
Figura 25 Investimentos aplicados.....	62
Figura 26 Evolução dos preços do carbono 2020-2050	74
Figura 27 Efeitos do SAF nos preços do carbono e nos preços médios dos combustíveis	75
Figura 28 Efeito do preço do carbono no tráfego de passageiros	76
Figura 29 Energia do combustível e ciclo de vida energético por tipo sobre o cenário Breakthrough 2019 vs. Produção de energia renovável, 2020-2050	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Previsões de crescimento de tráfego a longo prazo	9
Tabela 2 Marcos 2025-2050.....	18
Tabela 3 Valores relativos aos cenários de evolução do tráfego de passageiros.....	43
Tabela 4 Perspetiva geral de cenários	64
Tabela 5 Redução de intensidade de energia nas aeronaves através de melhorias tecnológicas nas aeronaves	67
Tabela 6 Redução da intensidade de energia através de melhorias na eficiência de payload	68
Tabela 7 Redução de intensidade de energia através de melhorias na eficiência do tráfego	68
Tabela 8 Previsões de aeronaves zero emissões	70
Tabela 9 Previsões de SAF.....	71
Tabela 10 Previsões da mudança intermodal.....	73
Tabela 11 Necessidades de cada cenário	77
Tabela 12 Comparação Cenário Breakthrough vs ATAG Cenário 1	79
Tabela 13 Comparação Cenário Breakthrough vs ICAO IS3	80

ABREVIATURAS E SIGLAS

ATM – Air Traffic Management

ASK – Available Seat Kilometer

CO₂ – Dióxido de Carbono

EJ – Exajoule

FTK – Freight Tonne Kilometer

HPR – High Speed Rail

ICCI – International Council on Clear Transportaion

MJ – Megajoule

RPK – Revenue per Passenger

SAF – Sustainable Aviation Fuel

ZEP – Zero Emission Planes

DEFINIÇÕES

ASK – Available Seat Kilometer, lugares disponíveis por quilómetro voado.

E-fuel – Combustíveis sintéticos produzidos a partir da combinação de gás de hidrogénio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂).

FTK – *Freight Tonne Kilometer*, carga transportada por quilometro voado.

Narrowbody – Aeronaves com apenas um corredor.

Neutralidade Carbónica - Igualar as emissões de CO₂ emitidas às que o setor é capaz de eliminar.

Payload – Capacidade total de peso na aeronave disponível para efetuar o transporte de passageiros, carga e correio.

RPK – *Revenue Passenger Kilometer*, número de quilómetros voados por passageiros pagantes. É calculado com a o número de receita de passageiros multiplicado pela distância total viajada.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O setor do transporte aéreo, apesar de apresentar uma percentagem reduzida de poluição quando comparada aos principais poluidores globais, verifica a necessidade de reduzir as suas emissões de CO₂ derivado das pressões que lhes são impostas e das metas estabelecidas pelas organizações internacionais.

Assim, os atuais valores de emissões da aviação consistem numa preocupação ambiental, derivado dos gases de efeito estufa emitidos pela combustão de combustível fóssil pelos motores das aeronaves e por toda a operação que envolve o transporte aéreo.

Esta preocupação agrava-se cada vez mais devido ao rápido crescimento do volume de tráfego aéreo mundial e simultaneamente o aumento da consciencialização para os impactos ambientais provocados pela indústria. Surge, portanto, uma urgência de respostas capazes de responder a estas pressões, conduzindo o setor a uma evolução que inclui uma redução eficiente dos valores de emissões e que permite que sejam atingidas as metas sustentáveis definidas pelas organizações internacionais para 2050. Esta evolução pretendida exige um forte desenvolvimento nos avanços tecnológicos.

Relativamente às melhorias até hoje desenvolvidas, verifica-se que apesar destas registarem valores positivos na minimização de emissões, ainda não são suficientes para neutralizar a aviação face ao seu crescimento. É necessário aplicar um forte investimento sobre os principais fatores assim como nas estratégias de desenvolvimento.

Deste modo, é necessário o esforço por parte de todas as entidades constituintes da aviação de forma a responder coletivamente às metas estabelecidas pelas organizações internacionais, alimentando a resposta às pressões, metas e aos próprios interesses.

1.2. Âmbito

Este estudo estende-se no âmbito de compreender os interesses das várias entidades do setor do transporte aéreo, por meio das suas estratégias, motivações e objetivos de modo a compreender se existe abertura para o desenvolvimento de uma estratégia colaborativa única, reunindo os interesses individuais das entidades e alimentando-os através de sistemas de parcerias e colaboração dentro do setor. Podendo este método servir de mecanismo de evolução respondendo de forma eficaz ao desenvolvimento tecnológico necessário para que sejam cumpridas as metas estabelecidas pelos organismos internacionais e que exigem uma resposta eficaz por parte destas entidades.

A implementação de uma estratégia única pretende eliminar forças contrárias entre empresas com diferentes interesses, possibilitando um desenvolvimento mais eficiente, criando sinergias e alimentando os objetivos comuns.

1.3. Motivação

Atualmente a aviação enfrenta fortes pressões derivadas do aumento da consciencialização para as questões ambientais globais, e aplicadas pelos organismos responsáveis. Assim, é preciso que o setor consiga encontrar e desenvolver respostas rápidas para estas questões tão urgentes.

Apesar de já serem verificadas várias melhorias ao longo dos últimos anos, é necessário continuar a aplicar investimentos sobre os fatores de melhoria. Para além dos fatores diretamente relacionados ao desenvolvimento tecnológico, é essencial a criação de sinergias entre as entidades, por meio do desenvolvimento de estratégias comuns que respondam individualmente e coletivamente aos interesses.

Através desta sinergia será possível evoluir de forma mais rápida e com os melhores resultados, isto exige políticas e estratégias adaptadas a cada entidade e ajustadas às restantes partes envolventes ao setor, de modo que sejam efetivamente atingidas as metas para 2050.

1.4. Objetivos

Este estudo tem como objetivo explorar a viabilidade de uma estratégia colaborativa entre as entidades da indústria da aviação para o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade ambiental estabelecidos para 2050 pelas organizações internacionais responsáveis.

Isto passa pela verificação do crescimento de tráfego aéreo e respetivo impacte no progresso de redução/eliminação das emissões de CO₂, análise aos fatores envolventes às emissões de CO₂ para a descarbonização da aviação, estudo de cenários de evolução para 2050 considerando diferentes perspetivas e fatores, e explorar o papel das diversas entidades relevantes para cumprir os percursos base de desenvolvimento definidos pelos cenários de evolução.

1.5. Metodologia

A recolha de dados para a elaboração deste estudo é realizada através de uma pesquisa bibliográfica, por meio de uma abordagem mista, portanto qualitativa e quantidade, permitindo a verificação completa dos dados e uma visão alargada sobre o setor.

Verifica-se uma abordagem qualitativa referente à informação obtida através de reportes de empresas com um peso significativo na indústria, e nos resultados obtidos por meio do contributo da Direção de Sustentabilidade e Ambiente da ANA Aeroportos de Portugal, Grupo VINCI, com a resposta ao questionário colocado, sendo este um elemento fundamental ao estudo.

A abordagem quantitativa observa-se na verificação de valores relativos aos fatores de desenvolvimento sustentável, distribuídos por diferentes cenários de evolução para as metas definidas para 2050, com base em duas análises que consideram fatores comuns e não comuns, desenvolvidos pelos principais órgãos reguladores do setor.

Foca-se numa pesquisa descritiva e explicativa através do método dedutivo, com uma análise de dados intensiva sobre a evolução sustentável do transporte aéreo para 2050.

São analisadas áreas distintas de modo a verificar os diferentes ramos da aviação, assim como entidades do mesmo setor de forma a estabelecer uma comparação exata dentro dos mesmos parâmetros. É realizada uma análise quantitativa específica aos fatores-chave de investimento para o possível desenvolvimento das entidades na vertente do

desenvolvimento sustentável cumprindo as metas e respondendo às pressões impostas. Posteriormente, é possível verificar as resposta obtidas em título de resultados, compreendendo como se completam, permitindo uma resposta clara ao proposto.

Reconhecendo limitações à metodologia, considera-se a dependência de cenários hipotéticos de evolução, e o alcance possível de comunicação com a indústria e abertura face a dados de suporte.

1.6. Estrutura do Trabalho

Este estudo assenta em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: É redigida a Introdução do estudo, com abordagem ao tema, onde são apresentadas as Generalidades, Âmbito, Motivação, Objetivos e a Metodologia adotada.

Capítulo 2: Presente o enquadramento do tema, sendo essencial para a compreensão do assunto. Permite compreender a prestação do setor da aviação face às atuais emissões de carbono, considerando uma observação sobre o percurso adotado nos anos anteriores e metas estabelecidas para o futuro. Esta verificação frisa o relevo das emissões de CO₂ provenientes do setor, sendo verificados valores relativos à evolução do tráfego aéreo, diferentes medidas implementadas face ao desenvolvimento tecnológico ao nível de aeronaves com sistemas híbrido-elétricas, totalmente elétrico, hidrogénio, e configurações avançadas de aeronaves, metas para 2050 e respetivos programas já implementados com a intenção de atingir estas metas, e por último conclui a verificação de sistemas de colaboração na visão e estratégias de diferentes entidades constituintes do setor.

Esta análise confere a necessidade de desenvolvimento de mecanismos de minimização do problema, sendo isto possível através da cooperação entre as entidades constituintes da aviação.

Capítulo 3: Refere-se ao desenvolvimento do tema proposto, onde é realizada uma análise detalhada ao crescimento do tráfego aéreo e às emissões de CO₂ provenientes do setor, de forma a compreender as perspetivas de desenvolvimento dos mesmos para 2050 permitindo uma comparação e estabelecimento de uma relação direta com as medidas de redução das emissões que surgem com a intenção de cumprir as metas estabelecidas.

Deste modo, é realizada a análise de dois cenários de evolução, que integram diferentes perspetivas relativamente à relação de evolução dos fatores acima descritos e onde são consideradas variáveis comuns e não comuns.

Capítulo 4: Apresentação dos Resultados ao estudo, com a exposição das repostas da Direção de Sustentabilidade e Ambiente da ANA Aeroportos de Portugal ao questionário apresentado, e respetiva análise.

Capítulo 5: Conclusão do estudo, onde são identificados vários desafios do setor face ao assunto, seguidamente são apresentadas soluções viáveis, e por fim são expostas recomendações de implementação para os vários intervenientes da indústria.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Introdução

O atual transporte aéreo enfrenta diferentes pressões dos vários setores envolventes, tanto a nível ambiental, político, social e económico.

A nível ambiental muitos estudos focam-se na redução das emissões de CO₂ uma vez que este representa o maior impacto para o meio ambiente a longo prazo, no entanto o transporte aéreo emite vários gases de efeito estufa.

Atualmente existem projetos de colaboração entre companhias aéreas e a área de investigação de modo a aprofundar os estudos existentes na redução do CO₂ por meio do desenvolvimento tecnológico nos SAF, energia elétrica e hidrogénio (ATAG 2021).

Com base no OpenAirlines (2022) mostra-se essencial acelerar a transição energética para uma aviação sustentável através de avanços tecnológicos. Assim é necessário organizar a transição mundial face às possíveis soluções, uma vez que no caso de não existirem avanços rápidos a pegada da aviação poderá quadruplicar até 2050.

Apesar das soluções de aviões a hidrogénio e elétricos, existem alternativas atuais de redução de consumo de combustível através da otimização das frotas em operação podendo contribuir com uma minimização superior a 10% de CO₂.

Atualmente um voo médio produz cerca de metade das emissões de CO₂ que o mesmo voo em 1990 devido aos rápidos avanços tecnológicos e melhorias nas operações.

Cada nova geração de aeronaves é 15-20% mais eficiente em termos de consumo de combustível do que a geração que substitui, os atuais altos custos do combustível (cerca de um terço dos custos operacionais das companhias aéreas) e as preocupações ambientais têm impulsionado os avanços na eficiência do combustível das aeronaves (ATAG 2015b).

No entanto são necessárias parcerias mais abrangentes entre os fabricantes comerciais e os governos a nível de investigação e desenvolvimento (I&D) para o avanço face a melhorias dentro do setor (OpenAirlines 2022).

De forma responder às necessidades do setor da aviação a ATAG (2020) definiu em 2008 um quadro de ações climáticas globais e setoriais para o combate às emissões de carbono tendo como base três objetivos globais a curto, médio e longo prazo. Para atingir estes objetivos a indústria criou uma estratégia coletiva que permitia reduzir as emissões tanto em terra como no ar.

Em termos de inovações tecnológicas a aviação tem colocado como prioridade as melhorias na eficiência, sendo isto possível através da introdução de inovações tecnológicas. Este fator é fortemente observado a nível do consumo de combustível, onde se colocam as questões ambientais e económicas uma vez que este representa um dos principais custos para as companhias aéreas.

A eficiência impulsionada através dos desenvolvimentos tecnológicos melhorou em 80% o consumo de combustível pelos motores em voo através da introdução de novos modelos de aeronaves. As companhias aéreas registaram entre 2009 e 2019 uma melhoria anual de 2% na eficiência de consumo de combustível, ultrapassando o objetivo definido de 1.5%.

Em uma observação às companhias aéreas dos EUA verificou-se que em 2018 foram emitidas apenas mais 3% do total de CO₂ do ano de 2000, simultaneamente transportando mais 42% de passageiros e de carga. Na Europa o consumo médio de combustível reduziu em 24% entre 2005 e 2017, com um aumento de 60% do número de passageiros para o mesmo período.

Entende-se que estas melhorias mostram-se possíveis devido à entrada de novos modelos de aeronaves e fortes melhorias nas aeronaves existentes de forma a permitir consumos significativamente mais baixos.

2.2. Tráfego aéreo

Por meio de análises de tráfego futuro de Graver (2022), é possível verificar diferentes previsões do crescimento de tráfego aéreo de passageiros. Assim, é essencial uma gestão proativa do mesmo uma vez que é responsável por aproximadamente 80% do total das emissões de dióxido de carbono (CO₂) da aviação comercial, sendo que os voos com mais de 1800km (longa distância sem substitutos atuais viáveis a registrar as zero emissões) representam cerca de dois terços das emissões totais da aviação.

A aviação apresenta objetivos definidos de zero emissões de carbono para 2050 centrados na redução máxima de emissões na fonte, por meio da utilização de combustíveis sustentáveis (SAF), novas tecnologias de propulsão e outras melhorias a nível de eficiência. Estes objetivos devem ser capazes de estabelecer uma relação equilibrada entre a capacidade de redução de emissões poluentes e simultaneamente o crescimento acelerado de passageiros (IATA 2023a).

As previsões de crescimento de tráfego a longo prazo de Graver (2022) mostram diferentes percentagens conforme a entidade que realiza o estudo verificando-se assim ligeiras discrepâncias. Tendo como exemplo o estudo por parte do ICCT (*International Council on Clean Transportation*) observa-se uma análise completa verificada entre um cenário de tráfego mais baixo, base e mais elevado, registando taxas de crescimento entre 2019 e 2050 de 2,4%, 3,0% e 3,7%, respetivamente.

Tabela 1 Previsões de crescimento de tráfego a longo prazo
Fonte: (Graver 2022)

Organization	Analysis period	Passenger traffic growth (per annum)	2040 traffic (trillion RPKs)
Airbus	2019-2040	3.9%	20.0
Boeing	2019-2040	4.0%	19.2
ATAG	2019-2050	Low: 2.3% Central: 3.1% High: 3.3%	Central: 16.3
ICAO	2018-2050	Low: 2.9% Mid: 3.6% High: 4.2%	Mid: 18.1
ICCT	2019-2050	Low: 2.4% Central: 3.0% High: 3.7%	Central: 15.9
IEA	2019-2050	NZE: 1.8% SDS: 2.9%	SDS: 16.2

Segundo a ATAG (2021) é necessário ter em consideração as discrepâncias existentes no crescimento do tráfego aéreo face ao desenvolvimento dos mercados das várias regiões do mundo, sendo necessário considerar diferentes padrões de crescimento.

Verifica-se a Asia-Pacífico com o maior desenvolvimento até 2050, seguida do Médio Oriente, África, América Latina, América do Norte e por fim a Europa.

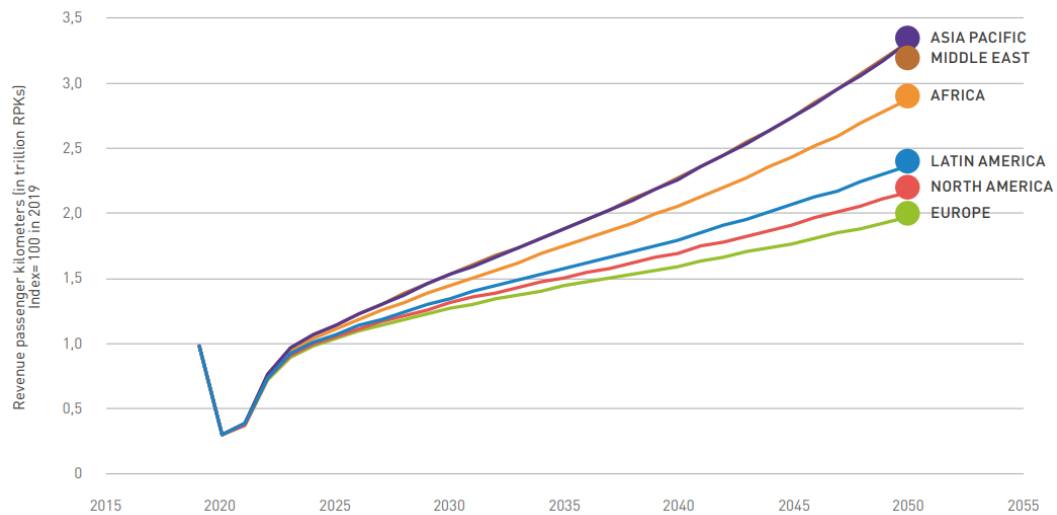


Figura 1 Crescimento de tráfego aéreo mundial

Fonte: (ATAG, 2021)

Considerando o crescimento global de tráfego aéreo e com base no *Projection of Aviation Carbon Emissions (PACE) model* de Graver et al., (2022) é possível projetar as emissões de CO₂ da aviação utilizando diferentes dados tecnológicos, operacionais e económicos. Deste modo será possível calcular as emissões dos vários cenários de desenvolvimento tendo como base uma perspectiva de referência.

A figura 2 apresenta uma versão simplificada do fluxo de modelação do modelo PACE, onde são apontados os diversos fatores e rotação estabelecida para as considerações de emissões por cenário.

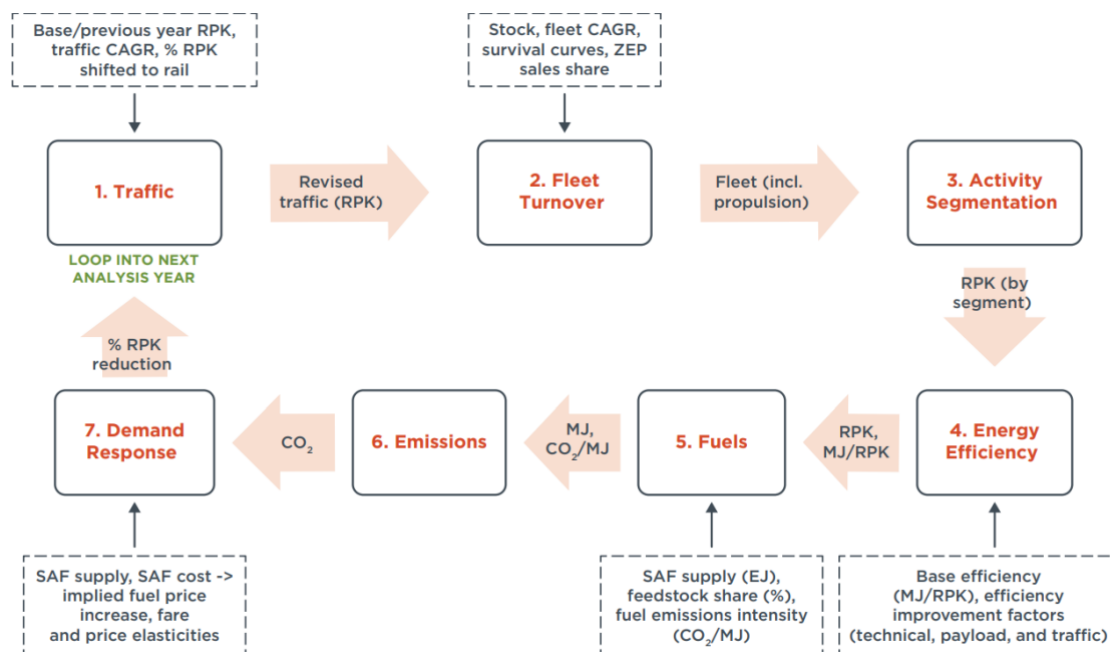


Figura 2 PACE model

Fonte: (Graver et al. 2022)

Com base na EASA, European Environmental Agency, and EUROCONTROL (2022) e através da figura 3 é possível verificar o crescimento do tráfego aéreo na UE27 + EFTA por meio dos movimentos registados entre 2005 e 2020, e definir três cenários distintos de evolução para 2050 considerando uma perspectiva baixa, média e alta.

Primeiramente entre 2005 e 2020 verifica-se um desenvolvimento estável atingindo o pico em 2019. Seguidamente, observa-se o efeito da pandemia COVID-19 em 2020 com uma queda abrupta dos movimentos devido às várias restrições impostas.

Para o futuro (2050), o cenário mais baixo caracteriza-se por 10.1 milhões de movimentos nesta região, seguido do crescimento base/médio com 12.2 milhões e o mais elevado com 15.0 milhões de movimentos.

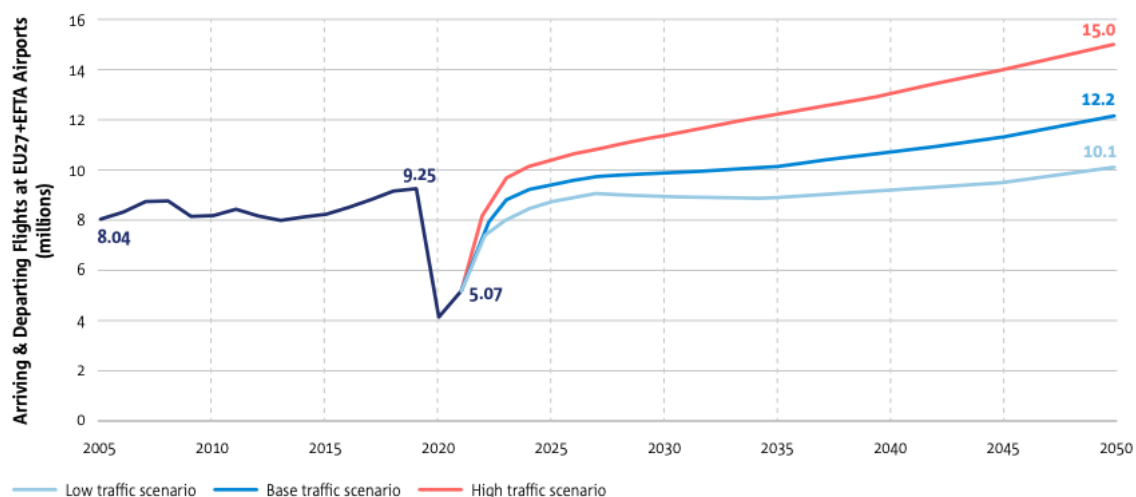


Figura 3 Crescimento de tráfego aéreo UE27+EFTA

Fonte: (EASA, European Environmental Agency, and EUROCONTROL 2022)

Segundo a ATAG (2015) a eficiência do combustível e das emissões de CO₂, numa base de voo individual, tem vindo a registar progressos significativos para o desenvolvimento sustentável do setor. No entanto, as emissões globais da aviação continuam a aumentar conforme o aumento do tráfego aéreo (pax e carga). Grande parte deste crescimento verifica-se nas economias emergentes, devido ao crescente reconhecimento dos benefícios da conectividade do transporte aéreo.

O comércio e o turismo são importantes motores do desenvolvimento económico e social em todo o mundo, assim à medida que as classes médias continuam a crescer surge cada vez mais tráfego.

Deste modo, surge a necessidade de suprimir as necessidades face ao crescimento económico através da conectividade e simultaneamente a redução dos impactos climáticos a longo prazo. Isto exige que os parceiros dentro e fora da indústria do setor do transporte aéreo trabalhem em conjunto de forma a atingir resultados significativos para a evolução da aviação.

2.3. Medidas

A ATAG (2021) afirma que a introdução de alterações tecnológicas radicais, incluindo aeronaves híbridas, a hidrogénio ou elétricas, exigirá um nível de investimento significativo, mas necessário. Até que estes novos modelos entrem em frota, é essencial a aplicação de elevados investimentos na produção e distribuição de SAF.

Para além da aviação, é fundamental que todos os outros setores também apliquem esforços e desenvolvam estratégias para a redução das suas emissões. Muitos destes setores apresentam níveis de transição mais acessíveis e com maior possibilidade de atingir a neutralidade mais cedo com opções viáveis já disponíveis.

A ATAG and Climate Action Takes Flight (2017), assim como as várias entidades verificadas até este ponto, defende que os SAF são a melhor solução na descarbonização da aviação a médio e potencialmente a longo prazo. Embora existam outras soluções viáveis para as metas sustentáveis do setor, os SAF são efetivamente a opção mais realista para uma atuação imediata juntamente com a renovação de frota.

Relativamente ao hidrogénio, este será uma fonte de energia importante na evolução da aviação, porém exige ainda um elevado desenvolvimento tecnológico na alimentação das aeronaves e a nível de infraestruturas associadas.

Deste modo, é fundamental o desenvolvimento de estratégias por parte dos governos e do setor energético para uma futura aplicação do hidrogénio, onde a aviação seja considerada um utilizador-chave, servindo de mecanismo impulsionador.

A atual dependência da indústria ao combustíveis fósseis convencionais expõe-se a ser afetada por várias flutuações, referindo as alterações de preços do petróleo bruto e outras questões relacionadas à oferta e procura.

Por outro lado, os SAF são uma alternativa atrativa, uma vez que as suas matérias-primas não estão limitadas aos locais onde os combustíveis fósseis podem ser extraídos e refinados.

À medida que a oferta de SAF se desenvolve e aumenta, esta deverá proporcionar uma oferta geográfica mais diversificada e, potencialmente, segurança energética para os países que atualmente importam combustível para a aviação.

Irão também desenvolver-se oportunidades para que as infraestruturas de petróleo e gás existentes se tornem compatíveis com o tratamento de novas matérias-primas aplicáveis à produção de SAF.

Segundo a IATA (2023f) os SAF e as novas tecnologias mostram-se como facilitadores-chave para a neutralidade, porém é inevitável que a indústria da aviação continue a ser alimentada principalmente por combustível convencional durante os próximos anos. Nos anos seguintes espera-se que juntamente com os avanços na adoção de SAF e a entrada em frota de novos projetos de aeronaves, surjam ganhos contínuos na eficiência da frota e nas operações.

Independentemente do progresso em novas tecnologias de aeronaves entre a década atual e 2050, prevê-se que o SAF seja o principal contribuinte para a descarbonização da indústria aérea, em conformidade com o compromisso ambiental para 2050.

Apesar dos SAF permitirem reduzir de forma significativa as emissões líquidas de carbono para a indústria aérea, vão continuar a existir emissões residuais onde será necessário aplicar tecnologias de captura de carbono.

Ainda na visão da IATA (2023b), derivado das novas tecnologias nas aeronaves tem-se observado avanços principalmente na eficiência dos motores, melhorias na aerodinâmica e redução de peso.

O último ponto referido a nível de peso considera o uso de materiais compósitos em substituição ao alumínio, permitindo o aumento da eficiência dos motores no consumo de combustível.

De forma a contribuir para a evolução sustentável do setor, a indústria de aeronaves deve continuar a implementação de melhorias na tecnologia existente. A utilização de

motores modernos e os avanços no design irão impulsionar a eficiência de 15 a 25% nas próximas décadas.

Com previsão para 2030, espera-se que as tecnologias de propulsão e designs avançados se tornem viáveis, possibilitando a substituição por tecnologias com menor índice de emissões.

2.3.1. Híbrido-elétrico

Uma destas tecnologias consiste nas aeronaves híbridas-elétricas combinando as vantagens de motores a combustão e elétricos. Estes sistemas podem ser utilizados de forma conjunta, ou seja, funcionariam em simultâneo durante a decolagem fornecendo um maior impulso, e o motor a combustão com utilização reduzida durante a fase de voo cruzeiro ou na aproximação.

Aeronaves híbridas-elétricas juntamente com um novo corpo de estrutura (design) podem contribuir para uma redução de até 40% das emissões. A hibridização considera-se como um passo intermédio em direção a um sistema de propulsão totalmente elétrico.

A nível de entrada nas frotas, espera-se que aeronaves pequenas (15-20 lugares) com propulsão híbrida-elétrica entrem durante esta década, seguidas de aeronaves regionais na década de 2030 e possivelmente aeronaves maiores a partir de 2040.

2.3.2. Totalmente elétrico

Nos futuros modelos totalmente elétricos, os motores elétricos impulsionam hélices convencionais ou conjuntos de múltiplos pequenos ventiladores. A energia elétrica será armazenada em baterias ou potencialmente em células de combustível.

Durante a operação estas aeronaves irão registar zero emissões, porém ao longo do ciclo de vida vão depender fortemente da mistura de energia primária para gerar eletricidade. No caso de serem utilizadas fontes totalmente renováveis será possível registar emissões próximas a zero.

Referente à entrada em frota de aeronaves totalmente elétricas, observa-se atualmente pequenas aeronaves de teste a voar, para o final da década de 2020 prevê-se a entrada das aeronaves até 19 lugares e na década de 2030 as aeronaves regionais.

2.3.3. Hidrogénio

O hidrogénio pode ser utilizado como combustível de propulsão por combustão em motores convencionais, substituindo o combustível de jato (incluindo modelos de aeronaves de longo curso).

O peso do hidrogénio é três vezes inferior à quantidade equivalente de combustível utilizado atualmente com o mesmo conteúdo energético, porém o volume do hidrogénio observa-se quatro vezes maior em volume. Deste modo, são exigidos tanques com capacidades muito superiores e alterações fundamentais no sistema de combustível da aeronaves.

A entrada do hidrogénio em frota apresenta vários desafios, derivados da alta necessidade de desenvolvimento tecnológico relacionado à propulsão e armazenamento da aeronave, necessidade de disponibilidade em grande escala, necessidade de produzir hidrogénio através de meios sem danos ambientais, e a existência de infraestruturas de fornecimento adequadas.

Ajudando a ultrapassar estas barreiras verifica-se o interesse crescente no hidrogénio com programas tecnológicos a prever a entrada em frota em meados de 2035.

2.3.4. Configurações avançadas de aeronaves

De modo a impulsionar melhorias significativas na eficiência das aeronaves e facilitar o sucesso de sistemas de propulsão alternativos estão em desenvolvimento designs aerodinâmicos radicalmente novos.

2.4. 2050

Graver et al. (2022) afirma que a meta definida pela indústria para neutralizar as emissões de carbono visa alcançar a redução máxima de emissões na fonte, através da utilização de SAF em larga escala, avanços tecnológicos a nível de propulsão e outras melhorias de eficiência (melhoria da eficiência da gestão de tráfego aéreo).

Considerando que o tráfego aéreo irá contar com mais de 10 mil milhões de passageiros em 2050, os desenvolvimentos futuros vão permitir eliminar 21.2 GT de CO₂ face à operação com a tecnologia atual.

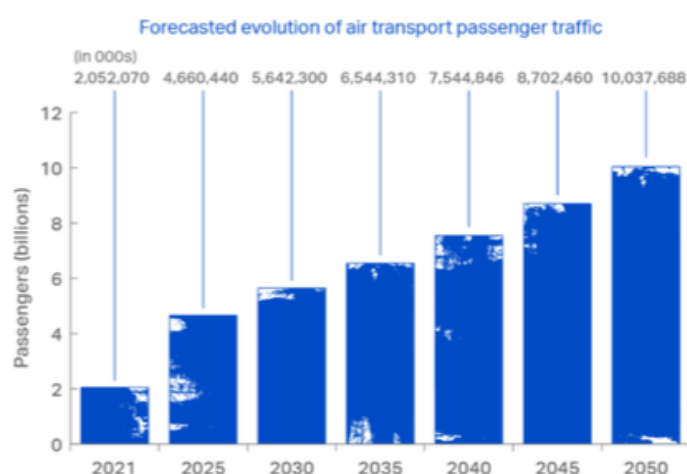


Figura 4 Tráfego de passageiros 2050

Fonte: (Graver et al. 2022)

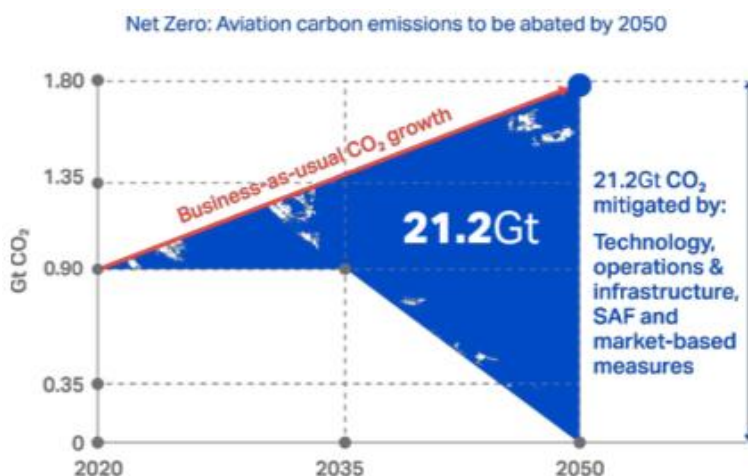


Figura 5 Emissões a eliminar até 2050

Fonte: (Graver et al. 2022)

A tabela 2 expõe um conjunto potencial de marcos estimados para os objetivos definidos em 2050, sendo possível observar um progresso significativo através de metas que podem ser consideradas realistas.

Tabela 2 Marcos 2025-2050

Fonte: (IATA 2023g)

DATE	AMOUNT OF CO ₂ ABATEMENT	PATHWAY	ACTION
2025	381 megatonnes (Mt) (2021-2025)	97% offsets, 2% SAF, 1% improvements above business as usual (BAU)	ICAO agree long-term goal for international aviation (2022); energy sector commits to at least 6 million tonnes SAF production; agreement of full implementation of Article of Paris Agreement
2030	979 Mt (2026-2030)	93% offsets; 5% SAF, 2% Improvements above BAU	Use of 100% SAF on aircraft, ANSPs fully implement ICAO Aviation System Block upgrades to deliver fuel efficiency improvements of 0.3% by 2030
2035	1,703 Mt (2031-2035)	77.5% offsets, 17.5% SAF, 3% improvements above BAU, 2% Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)	Evolutionary technology achieving 30% reduction in fuel burn, electric/hydrogen aircraft for regional markets (50-100 seats, 30-90 min flights) become available
2040	3,824 Mt (2036-2040)	44.5% offsets, 40% SAF, 7.5% non drop-in fuel (new propulsion technologies), 5% CCUS, 3% improvements above BAU	Feasibility of new aircraft such as blended-wing bodies demonstrated with full-scale working prototypes, electric/hydrogen for short-haul markets (100-150 seats, 45-120 min flights) become available.
2045	6,153 Mt (2041-2045)	55% SAF, 24% offsets, 10% non drop-in fuel, 8% CCUS, 3% improvements above BAU	Necessary infrastructure for new energy requirements (low carbon electricity/hydrogen) becomes available
2050	8,164 Mt (2046-2050)	65% SAF, 13% non drop-in fuel, 11% CCUS, 8% offsets, 3% improvements above BAU	Commercially viable annual SAF production of 449 billion litres available

Em concordância com os marcos acima estudados, a IATA (2023e) confirma que os SAF mostram-se como uma vantagem comparando à utilização de combustível fóssil uma vez que os combustíveis fosseis aumentam as emissões de CO₂ pela queima de combustível, enquanto os SAF permitem reciclar estas emissões por meio da absorção pela biomassa utilizada na matéria-prima durante o seu ciclo de vida.

A utilização de combustíveis sustentáveis em larga escala pode contribuir com cerca de 65% na redução de emissões para o objetivo da neutralidade em 2050.

O maior desenvolvimento dos SAF é esperado na década de 2030 conforme o aumento do apoio político global.

Em dados da IATA (2023c) o plano estratégico definido pela indústria para atingir os objetivos prevê uma rápida diminuição da utilização de compensações, conforme o aumento de soluções disponíveis. As compensações apresentam dúvidas face à sua regulamentação e eficácia.

Deste modo, a aviação tem implementado critérios-chave para garantir uma utilização eficaz das compensações. É necessário ter em consideração que a redução de carbono através de compensações deve ser uma medida adicional às atividades habituais do setor.

Já a captura direta de carbono do ar consiste numa técnica onde o CO₂ (e outros gases de efeito estufa) é removido diretamente da atmosfera.

A técnica atual utiliza grandes ventiladores que movimentam o ar ambiente por meio de um filtro, que através de utilização de um absorvente químico permite produzir um fluxo puro de CO₂ que por sua vez pode ser armazenado ou reutilizado.

De forma a atingir resultados significativos na captura de carbono é essencial a extensão em larga escala na indústria.

A utilização e armazenamento de captura de carbono é uma tecnologia que permite até 90% das emissões de CO₂ produzidas pelo consumo de combustíveis fósseis. Esta tecnologia permite efetivamente retirar dióxido de carbono da atmosfera.

Apesar de esta tecnologia já existir há vários anos, até agora não existe uma utilização generalizada do método, verificando-se algum ceticismo face à relevância desta tecnologia para a resposta climática mundial.

Um dos principais argumentos contra o uso da tecnologia de armazenamento e captura de carbono consiste no facto de esta poder facilitar o uso prolongado de energia fóssil, atrasando investimentos em energia renovável e de baixo carbono.

Porém, segundo a IATA (2023f) é essencial limitar o aquecimento global a 1,5°C, exigindo o uso destas tecnologias, caso contrário pode ser colocado em causa o atingir das metas ambientais estabelecidas.

Em análise às melhorias nas operações e infraestruturas, a IATA (2023d) refere que é possível verificar que estas melhorias por si só não são suficientes para atingir o resultado líquido zero, porém estas medidas podem ser implementadas de forma mais rápida do que os avanços tecnológicos nas aeronaves (limitados pela taxa de entrada de aeronaves em frota).

Confirma-se, portanto, o peso significativo das melhorias na eficiência das operações e infraestruturas a curto prazo.

As melhorias em infraestruturas incluem a gestão de tráfego e as operações aeroportuárias, com medidas a nível de mudanças estruturais nas operações de gestão de tráfego e na economia de energia aeroportuária.

As melhorias a nível das operações das aeronaves, proporcionadas pelas companhias aéreas e operadores de aeronaves, incluem medidas face a redução de peso e melhorias na aerodinâmica das aeronaves em serviço e uso de sistemas para aperfeiçoamento e eficiência em voo.

Segundo a IATA (2023g), é possível verificar três programas essenciais à melhoria de gestão de tráfego aéreo:

2.4.1. Céu Único Europeu

Estima que 6 a 10% das emissões da Europa podem ser reduzidas por meio de uma gestão de tráfego aéreo mais eficiente, sendo isto possível através da redução da fragmentação do espaço aéreo europeu e simultaneamente a modernização da estrutura do espaço aéreo e das tecnologias de gestão de tráfego.

A melhoria da eficiência de serviços de tráfego passa pela otimização do espaço aéreo, apoiada por níveis cada vez mais elevados de automação e serviços comuns de dados.

No entanto, o desenvolvimento do céu único europeu mostra-se bastante lento devido às barreiras colocadas por algumas instituições e por falta de liderança política neste assunto.

2.4.2. NextGen

O projeto NextGen abrange a aviação nos EUA, considerando todo o sistema de gestão de tráfego aéreo, e irá permitir substituir tecnologias baseadas no solo por tecnologia de satélite.

Mostra-se como um esforço colaborativo entre a Administração Federal de Aviação (*Aviation Federal Administration*) e parceiros aeroportuários, companhias aéreas, fabricantes, agências governamentais, universidades e associações.

Uma vez que o espaço aéreo dos EUA exige uma menor complexidade política quando comparado à Europa, uma rápida implementação do projeto NextGen irá permitir rápidas reduções das emissões.

2.4.3. Atualizações do Sistema de Aviação da ICAO

A ICAO apresenta o Plano Global de Navegação Aérea (GANP – *Global Air Navigation Plan*) que estabelece várias Atualizações de Blocos do Sistema de Aviação ou projetos de modernização tecnológica que têm como foco quatro áreas de melhoria de desempenho, sendo as operações aeroportuárias, sistemas e *Global Data*, capacidade e flexibilidade dos voos, e eficiência nas trajetórias de voo.

As várias vertentes incidem sobre o desenvolvimento tecnológico, procedimentos e conceitos operacionais essenciais para ultrapassar barreiras futuras relativas à capacidade e na gestão de tráfego aéreo.

Segundo Graver (2022), é viável analisar cenários de evolução de CO₂ face ao crescimento de tráfego aéreo, considerando atingível a neutralidade carbónica do setor para 2050.

Nos três cenários de neutralidade em 2050 (*Action; Transformation; Breakthrough*) observa-se a queda do CO₂ entre 9% e 94% em comparação a 2019, devido à aceitação dos SAF, novas aeronaves e melhorias na eficiência operacional, e a introdução de aeronaves zero emissões alimentadas essencialmente por hidrogénio líquido.

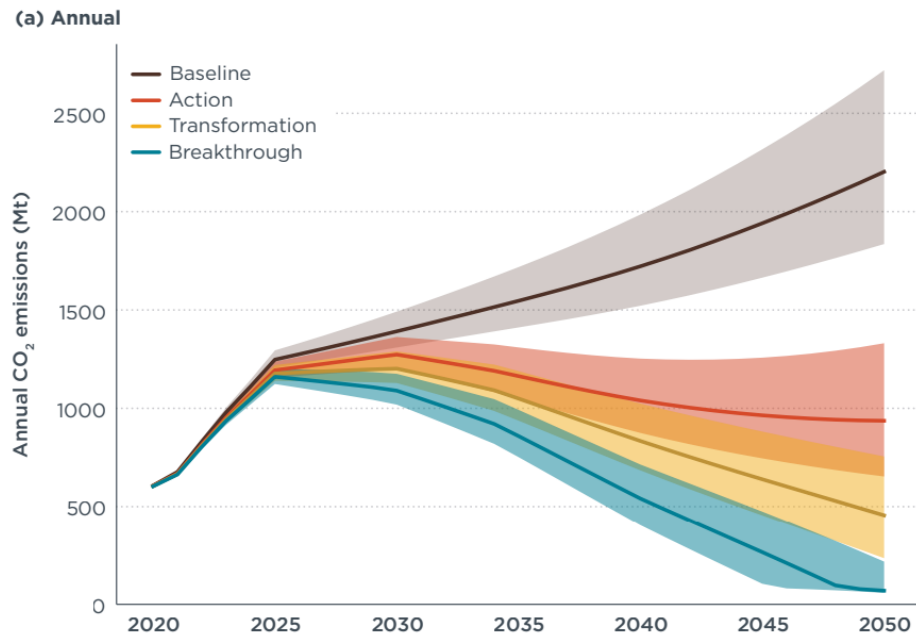


Figura 6 Emissões de CO₂ anuais
Fonte: (Graver et al. 2022)

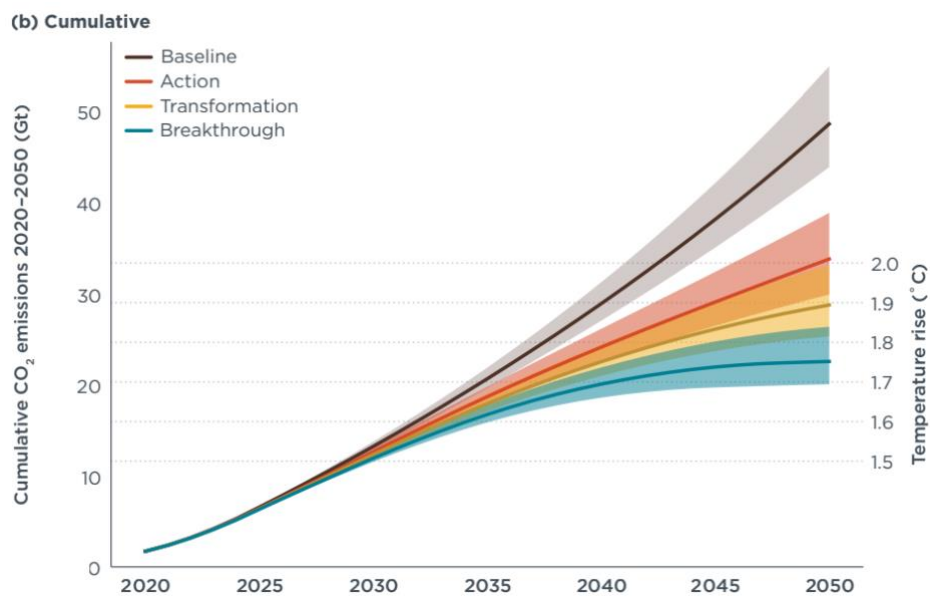


Figura 7 Emissões de CO₂ cumulativas
Fonte: (Graver et al. 2022)

Nota: A linha destacada consiste na previsão central de tráfego. As regiões a sombreado representam o alcance entre o cenário mais alto e baixo.

A figura 8 permite comparar as emissões acumuladas de CO₂ por cenário com limites críticos de temperatura, considerando que a aviação mantém a sua quota atual de emissões.

No cenário *Action* observa-se o esgotamento da quota na aviação no orçamento de carbono de 2°C até 2050. No caso *Transformation*, a aviação emite carbono em volumes de acordo com o limite de 1,9°C até meados do século. Ambos os cenários têm 67% de probabilidade de atingir os respectivos objetivos de temperatura.

O desenvolvimento de *Breakthrough* é consistente com o objetivo de 1,75°C de temperatura, atingindo o pico de emissões 2025 e eliminando-as até 2050.

Face às perspectivas para 1,5°C, seria necessária a redução adicional de 50% das emissões acumuladas (11Gt de CO₂) abaixo do cenário *Breakthrough*. Isto equivale a que seja atingida a neutralidade em 2030, duas décadas mais cedo do que as metas atuais.

Nos três cenários analisados é verificado que os SAF surgem com o maior potencial de redução de CO₂ com variações entre os 59% e 64%. Adicionalmente, por meio de melhorias na eficiência técnica e operacional das aeronaves será possível reduzir mais um terço das emissões. Os modelos que têm como fonte de energia o hidrogénio (Zero Emissions Plane – ZEP) são responsáveis por 4% e 5% da redução de emissões nos cenários *Transformation* e *Breakthrough*, respetivamente. (Graver et al. 2022)

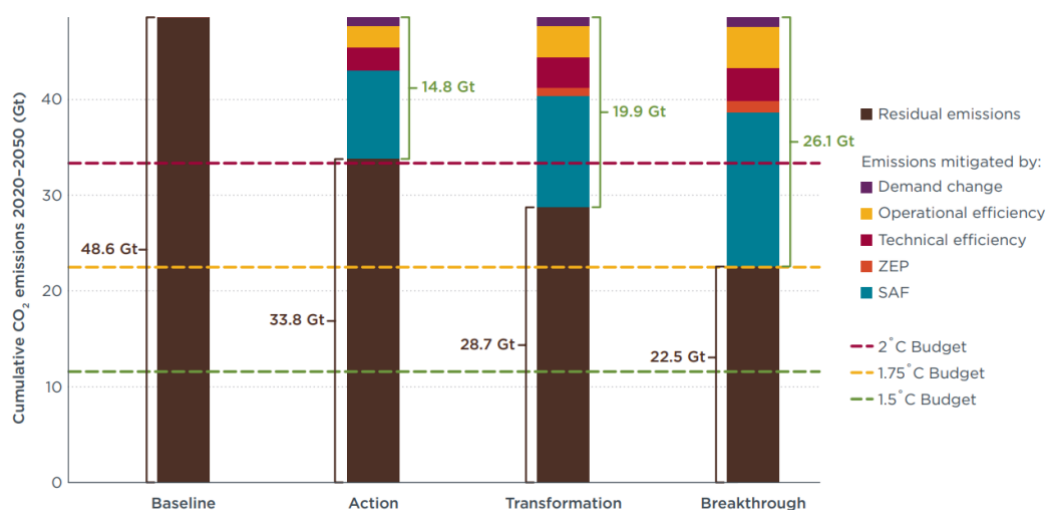


Figura 8 Emissões por cenário 2020/2050

Fonte: (Graver et al. 2022)

Apesar das altas percentagens de crescimento anual verificadas na ATAG (2021), estes cenários consideram uma redução das emissões de 2,5% total ou 0,25% anual até 2050, considerada através de uma ligeira diminuição de passageiros devido ao aumento do custo dos combustíveis e pela transferência modal para os comboios de alta velocidade (High Speed Rail – HSR).

A verificação destes cenários permitiu a Graver et al. (2022) desenvolver uma visão objetiva para 2050 onde em vários fatores será bastante semelhante à atual, mas também bastante diferente.

Neste marco da evolução a aviação será responsável por cerca de 325 milhões de toneladas de CO₂ (um terço em comparação aos valores de 2019) ao mesmo tempo que irá transportar cerca de 10 milhões de passageiros (mais do dobro do que em 2019), sendo este um registo bastante positivo para a aviação. Em algumas regiões do mundo já terá atingido as emissões líquidas nulas e toda a indústria estará encaminhada para a descarbonização.

Para os voos de curto e médio curso vão ser utilizadas novas fontes de energia a rondar as zero emissões, com aeronaves elétricas e híbridas a estabelecer ligações entre as cidades secundárias aos grandes hubs. Os modelos a hidrogénio vão permitir voos com distâncias ligeiramente maiores, consideradas médio curso.

As longas distâncias serão satisfeitas por aeronaves de uma geração superior à atual tendo os SAF como fonte energética. Os SAF referidos são provenientes de várias fontes, incluindo combustíveis produzidos através da combinação de eletricidade com baixo teor de carbono de CO₂ retirado do ar.

Já as infraestruturas aeroportuárias vão constituir centros de produção e distribuição de energia renováveis.

Todo o setor terá adotado uma forte estratégia para atingir os objetivos, sendo essencial o aumento de produção de SAF e a investigação aprofundada de novas fontes de propulsão.

Deste modo, é necessário a união de todo o setor de forma a maximizar as melhorias operacionais e as infraestruturas de modo a permitir a redução das emissões e diminuir

a lacuna existente entre o crescimento do tráfego aéreo e os objetivos ambientais. Simultaneamente toda a economia estará também em esforços para reduzir as suas emissões e avançar com novos modelos de negócio.

De forma direta e com base na IATA (2023a) entende-se que para que sejam atingidas as metas de sustentabilidade e a neutralidade carbónica da aviação comercial é necessário que sejam realizados investimentos por parte das entidades envolvidas no progresso do setor.

Segundo a IATA (2023a) estas aplicações devem incidir sobre:

- Infraestruturas e operações, com melhorias nas instalações e eficiência operacional face a uma melhor gestão de tráfego (-3% CO₂);
- Novas tecnologias, investimentos nas aeronaves incluindo novos métodos aerodinâmicos e alternativas de propulsão (elétrica e hidrogénio) (-13% CO₂);
- *Offsetting* e Sistemas de Captura de Carbono (-19% CO₂);
- SAF, utilização de combustíveis sustentáveis em larga escala com foco nos voos de longa distância onde não vão existir substitutos zero emissões viáveis nos próximos anos (-65% CO₂).

Entende-se a necessidade de diferentes entidades prestarem esforços no sentido de orientação organizacional e financeira para que seja possível um desenvolvimento estruturado para as metas de redução/minimização de CO₂. Porém, observam-se barreiras à estruturação do desenvolvimento do setor para uma evolução encaminhada para as metas estabelecidas devido a uma alta concorrência e competitividade nos mercados.

É deste modo essencial compreender como as organizações do setor podem evoluir de forma conjunta e justa para os bons resultados individuais e coletivos face às metas e simultaneamente perante os interesses individuais.

2.5. Colaboração

2.5.1. ATAG

A ATAG (2021) refere um nível significativo de avanços notáveis em novos conceitos de propulsão, como aeronave elétricas, a hidrogénio e híbridos. Nos últimos 30 anos foi possível reduzir metade das emissões de CO₂ por cada viagem de um passageiro.

Os últimos 10 anos do setor englobaram altos investimentos por parte das companhias aéreas em aeronaves mais eficientes, aplicação de fundos do setor aeroespacial na investigação e desenvolvimento no domínio da eficiência, foi possível registar melhorias de 21.5% nas emissões de CO₂ por *seat/kilometer*, entraram dez novos modelos de aeronaves em serviço (com novos modelos ainda por entrar), mais de 270 000¹ voos descolaram com SAF, e a primeira norma mundial de CO₂ para aeronaves e o primeiro mecanismo de fixação de preços do carbono para um único setor global foi negociado e adotados pela ICAO. Esta colaboração de todo o setor permitiu melhorias de eficiência na gestão de tráfego aéreo.

O setor comprometeu-se a reduzir as suas emissões líquidas de CO₂ para metade dos valores de 2005, até 2050 (um total de 325 milhões de toneladas de CO₂). Embora muitos países estejam a estabelecer objetivos de emissões líquidas nulas para 2050, existem diferentes velocidades de desenvolvimento, sendo que a falta de soluções prontamente disponíveis para a aviação mostra-se como um fator negativo para rápidas melhorias no desenvolvimento.

A ATAG (2021) defende que existem potenciais opções para a atingir a neutralidade carbónica quase completa do setor aeronáutico, considerando que o setor a nível global será capaz de atingir as emissões líquidas zero uma década após 2050.

Apesar de o setor de certo modo já trabalhar de forma conjunta, a estratégia aplicada ainda não me mostra suficiente. É essencial uma aceleração considerável dos esforços

¹ Valor referente à data de publicação do reporte (2021) e tendo em consideração que a utilização de SAF foi aprovada apenas em 2011.

dos parceiros do setor com outras instituições, com especial foco na força dos governos face a políticas de desenvolvimento sustentável.

Durante as próximas três décadas até 2050, e as seguintes, será possível entrar numa fase da aviação onde será possível a utilização de combustíveis sustentáveis, voos elétricos e híbridos e possivelmente a atingir a conectividade sem emissões.

Segundo a ATAG (2021), derivado o esforço conjunto o setor da aviação no desenvolvimento de melhorias de eficiência já foi possível reduzir 11Gt de CO₂ desde 1990, no entanto é necessário continuar a aplicar esforços no sentido de a indústria atingir a neutralidade carbónica em 2050.

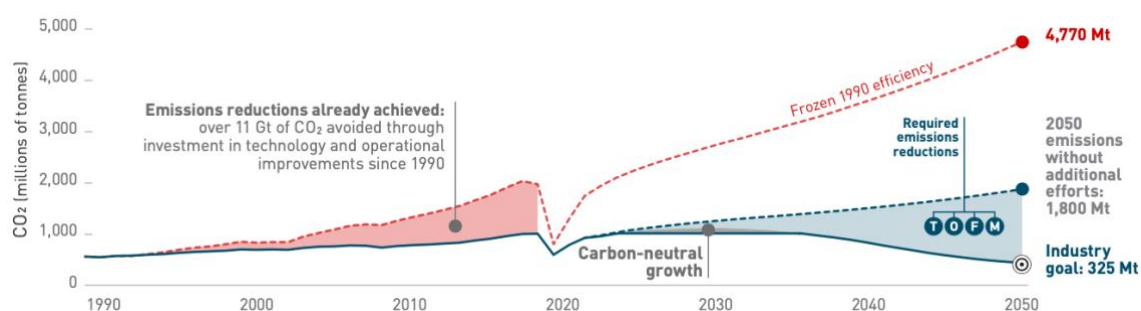


Figura 9 Evolução das emissões 2050

Fonte: (ATAG 2021)

Observações:

Esse percurso pode ser analisado na Figura 9, onde se verifica a evolução desde 1990 até 2050 considerando perspetivas onde não existem avanços face às tecnologias de 1990, onde o desenvolvimento acontece com a tecnologia atual, uma evolução com melhorias constantes e um cenário onde é considerada a entrada de novas tecnologias revolucionárias juntamente com os SAF, e as respetivas capacidades de redução de emissões.

A comparação entre estes cenários permite entender a redução de 11Gt de CO₂, juntamente com o caminho de precisamos cumprir para os objetivos.

Por outro lado, são verificadas várias barreiras à neutralidade carbónica, uma vez que acelerar o desenvolvimento de novas tecnologias vem com um preço significativo, que será suportado pelos intervenientes do setor da aviação. Este fator mostra-se como um desafio até para metas de -50% das emissões de CO₂ para 2050.

No caso das companhias aéreas investirem em novos modelos de aeronaves, podem ter menos capacidade de investir de forma significativa na expansão de SAF.

Deste modo, é fundamental tomar decisões essenciais ao desenvolvimento, percebendo se faz mais sentido ter um foco singular em SAF, ou esperar décadas para que as aeronave elétricas ou com propulsão a hidrogénio entrem nas frotas.

Assim, o setor precisa de investigar as várias opções e seguir as mais realistas, de qualquer forma vão existir lacunas de financiamento e de recursos impossibilitando ou pelos menos dificultando o empurrar de todos os esforços de uma só vez.

O setor não consegue ter um controlo direto sobre todas as medidas de mitigação. As tecnologias, operações e melhorias na gestão de tráfego aéreo vão desempenhar um papel significativo para os objetivos estabelecidas, porém não serão o elemento-chave.

O fator central serão as questões energéticas, o setor depende fortemente das transições energéticas que se espera que ocorram a nível global de forma a combater as emissões produzidas pela economia global. Deste modo, a colaboração entre os intervenientes da aviação é crucial, com o devido apoio de políticas públicas, vontade política e o envolvimento antecipado com os fornecedores de energia.

É fundamental que a aviação seja levada em consideração no desenvolvimento de estratégias de transição energética para maximizar a oportunidade de atingir as metas, com financiamento para a transição do próprio setor. Devem ser aplicadas soluções inovadoras de forma a apoiar o transporte aéreo com investimentos promovidos em áreas-chave para impulsionar a variedade de opções que o setor necessita de forma urgente.

Todas as opções devem ser consideradas de forma equilibrada, de modo a oferecer flexibilidade para o setor se adaptar e conseguir realizar a sua transição, tendo em consideração diferentes abordagens possíveis.

As investigações para a aplicação de uma estratégia equilibrada mostram que os esforços devem ser exercidos sobre o desenvolvimento tecnológico, aplicação de novos quadros políticos criados para incentivar a utilização de SAF e energias alternativas e facilitar uma transição suave e acessível para a neutralidade.

Porém são levantadas várias questões face à evolução do setor:

- Como será dada prioridade ao investimento na utilização de SAF e em novas tecnologias radicais?
- Se os fornecedores de SAF terão capacidade de aumentar de forma maciça a produção de SAF e de hidrogénio simultaneamente?
- Os governos, instituições financeiras e os consumidores vão desempenhar o seu papel no processo de aceleração da transição energética?

Numa última análise da ATAG (2021) percebe-se que a aviação conseguirá atingir o objetivo de -50% das emissões de CO₂ em 2050 e atingir a neutralidade a nível global até 2060/65.

A eficiência irá continuar a aumentar e os transportes aéreos modernos continuarão a ser um fator essencial de conectividade, negócios e ligações em todo o mundo após 2050.

2.5.2. IATA

Na perspetiva da IATA (2023a) são identificadas as fontes relevantes de emissões e os respetivos processos apropriados para o controlo/rastreio do seu progresso. Desenvolveu também recomendações face a aspetos de recolha e verificação de dados, com foco na importância de manter a propriedade de dados dentro da indústria. No caso da indústria não conseguir garantir o controlo sobre os seus dados, poderia transmitir uma imagem errada da evolução da aviação para a sustentabilidade.

O setor está unido no compromisso para a neutralização, acordada unanimemente na Assembleia Anual da IATA em 2021, atribuindo o papel crucial da monitorização da indústria na evolução para as metas de 2050 à IATA.

A nível tecnológico, a IATA (2023a) refere que as novas tecnologias de aeronaves desempenhem um papel essencial no progresso do setor com a entrada de aeronaves a hidrogénio, aeronaves elétricas e aeronaves híbridas-elétricas.

Face aos desenvolvimentos tecnológicos nas aeronaves a IATA (2023a) afirma que as suas companhias aéreas membro aprovaram em 2021 uma resolução para a redução das emissões de carbono. Para além disto, refere que a ICAO adotou uma Meta Aspiracional de Longo Prazo destinada à aviação internacional, com o objetivo da neutralidade até 2050.

Apesar destes compromissos apresentarem metas estabelecidas, ainda não foi desenvolvido o método concreto de como será monitorizado o progresso face à indústria. Assim, mostra-se necessário que a indústria adote uma metodologia consistente que permita acompanhar o progresso em direção às metas estabelecidas.

Caso contrário a indústria aeronáutica poderá enfrentar o risco de ausência de iniciativas próprias, permitindo que terceiros se posicionem neste sentido, conduzindo a potenciais problemas administrativos e de propriedade de dados. Também possíveis falsas perceções trazem vários riscos financeiros, como medidas políticas mal direcionadas e pouco definidas.

Observa-se também uma forte pressão pública para a neutralidade do setor, o que cria situações potencialmente delicadas caso não exista consistência no desenvolvimento da indústria.

Para dar resposta às necessidades, é possível verificar diversos programas desenvolvidos por vários membros da indústria com o objetivo de atingir melhorias significativas para as metas.

No caso da IATA (2023e) foi desenvolvido um grupo de apoio, definido como “TrackZero 2050”, tendo como vantagem a experiência dos membros e tendo como foco a criação de um mecanismo de rastreio no progresso para a neutralidade líquida de todo o setor da aviação.

O TrackZero 2050 é uma metodologia desenvolvida por especialistas da indústria e implementada pela IATA, irá servir como ponto de referência para entender os vários pontos onde o setor se encontra no desenvolvimento para as metas definidas.

Ainda na asa da IATA (2023h) foram desenvolvidas metodologias com a intenção de reforçar o compromisso que veio alinhar o transporte aéreo aos objetivos do Acordo de Paris, que tem como meta limitar o aquecimento global abaixo de 2°C.

Assim apresenta o programa “Fly Net Zero” tendo como base o compromisso das companhias aéreas em atingir as zero emissões líquidas até 2050.

De modo a atingir os objetivos estabelecidos é essencial o esforço coordenado de toda a indústria (companhias aéreas, aeroportos, fornecedores de serviços de navegação aérea, e fabricantes) e apoios significativos por parte do governo.

A IATA coloca como métodos a utilização de SAF (estratégia base para eliminar 80% das emissões de CO₂), implementação de tecnologias radicais, melhorias na eficiência de voo e *offsetting*, sendo fundamental a proximidade e cooperação entre a indústria e governos.

2.5.3. SKY BREATHE

Numa outra vertente pode-se observar o software SkyBreathe da OpenAirlines (2022) que envolve e difunde as preocupações ambientais entre as várias partes interessadas através da recolha de dados com avaliação de performance. Isto permite a apresentação de análises claras e informações em tempo real.

SkyBreathe, a solução de software de poupança de combustível da OpenAirlines, é o resultado direto de um projeto de investigação CleanSky financiado pela Europa.

Este software recolhe todos os dados das aeronaves, controlo de tráfego aéreo e da manutenção de forma a aplicar os *big data algorits* por meio de inteligência artificial de modo a desenvolver recomendações para as companhias aéreas e pilotos. Isto permite a redução do consumo de combustível e emissões de CO₂ em 5% (aeronaves) sem quaisquer alterações.

Este sistema disponibiliza várias ferramentas para estabelecer uma comunicação eficiente com os stakeholders, incluindo CEO, financeiros, operações de voo, despacho e manutenção, e pilotos.

Em 2022 o programa permitiu uma redução total de cerca de um milhão de toneladas de CO₂ e contribuindo para alcançar as ambições Net-Zero 2050 através dos seus vários participantes.

No total desde o início do programa foram reduzidas 3 150 000 toneladas de CO₂ e 996 000 toneladas de combustível.

Assim, o SkyBreathe é atualmente considera a solução de eficiência de combustível líder mundial, permitindo às companhias reduzir o consumo de combustível e emissões até 5% poupando milhares de toneladas de CO₂ por ano. Porém, é essencial continuar o desenvolvimento deste programa atingindo uma poupança de 15% através da melhoria da eficiência das operações das companhias aéreas e ATM².

2.5.4. BOEING

Surgiu também o programa ecoDemonstrator da Boeing (2023) que permitiu acelerar a inovação do setor colocando operacionais tecnologias capazes de solucionar desafios das companhias aéreas face às ambições ambientais.

Desde o seu início em 2012 foram utilizados 11 modelos de aviões em ensaio, o mais recente ecoDemonstrator é o modelo 777-200ER da Boeing que irá testar 19 projetos para tornar a aviação mais sustentável e simultaneamente mais segura.

Estes projetos incluem painéis de parede sustentáveis no porão de carga produzidos com 40% de fibra de carbono reciclada e 60% de resina feita a partir de matéria-prima com base biológica e um sensor de quantidade de combustível de fibra ótica compatível com 100% SAF.

O programa adicionou também aviões “*Explorer*” para testar tecnologias específicas.

² Air Traffic Management

Esta tecnologia permite uma ajuda avançada ao sistema de trajetória de navegação (*Trajectory Based Operations*) tendo parcerias de fornecedores de serviços de tráfego aéreo nos Estados Unidos, Singapura, Japão e Tailândia.

Isto permite demonstrar que a navegação coordenada entre as várias regiões pode melhorar a eficiência operacional, safety³ e sustentabilidade.

2.5.5. AIRBUS

A Airbus (2024) criou o projeto ZEROe que explora uma variedade de configurações e tecnologias de forma a desenvolver um ecossistema capaz de produzir e fornecer hidrogénio possibilitando a colocação no mercado do primeiro avião comercial do mundo a hidrogénio até 2035. Têm sido exploradas tecnologias de propulsão por combustão de hidrogénio e por células de combustível, sendo lançados demonstradores.

A Airbus criou também centros de desenvolvimento específicos para trabalhar em tanques e sistemas de combustível criogénico⁴ (França, Reino Unido Alemanha, e Espanha).

Face às tecnologias de propulsão, no caso da combustão de hidrogénio, as turbinas a gás com injetores de combustível e sistemas de combustível são alimentadas com hidrogénio de uma forma semelhante à que é utilizada atualmente nas aeronaves. Em uma segunda técnica, as células de combustível de hidrogénio criam energia elétrica que alimentam os motores elétricos que fazem girar uma hélice, sendo este um sistema de totalmente elétrico, bastante diferente dos sistemas atualmente em uso.

Estes métodos mostram-se complementares e encontram-se distribuídos por quatro conceitos de aeronaves ZEROe movidas a hidrogénio (Turbofan; Turboprop; Blended-Wing Body (BWB); Fully electrical concept).

³ Segurança Operacional

⁴ É utilizado para arrefecer as paredes da câmara de combustão e da ponta (hidrogênio ou metano).

A Airbus utiliza o modelo A380 MSN1 (Figura 10) como avião de testes, estando a assumir a liderança vital para a introdução de aeronaves comerciais movidas a hidrogénio no mercado.



Figura 10 Modelo de Teste A380 MSN1
Fonte: (Airbus 2024)

É necessário que a produção e utilização do hidrogénio sejam regulamentadas e certificadas.

Assim, a Airbus parte do princípio de que a implementação de infraestruturas de hidrogénio nos aeroportos é um pré-requisito para apoiar o aumento generalizado e a adoção de aeronaves com propulsão a hidrogénio a registar as zero emissões.

Deste modo, o fabricante tem estabelecidas parcerias com produtores e distribuidores de hidrogénio para aeroportos e companhias aéreas em várias regiões, reunindo os principais intervenientes.

Isto exige uma colaboração com os aeroportos de forma a desenvolver uma abordagem faseada para eliminar as emissões das infraestruturas aeroportuárias, operações em terra e transportes, através do recurso ao hidrogénio.

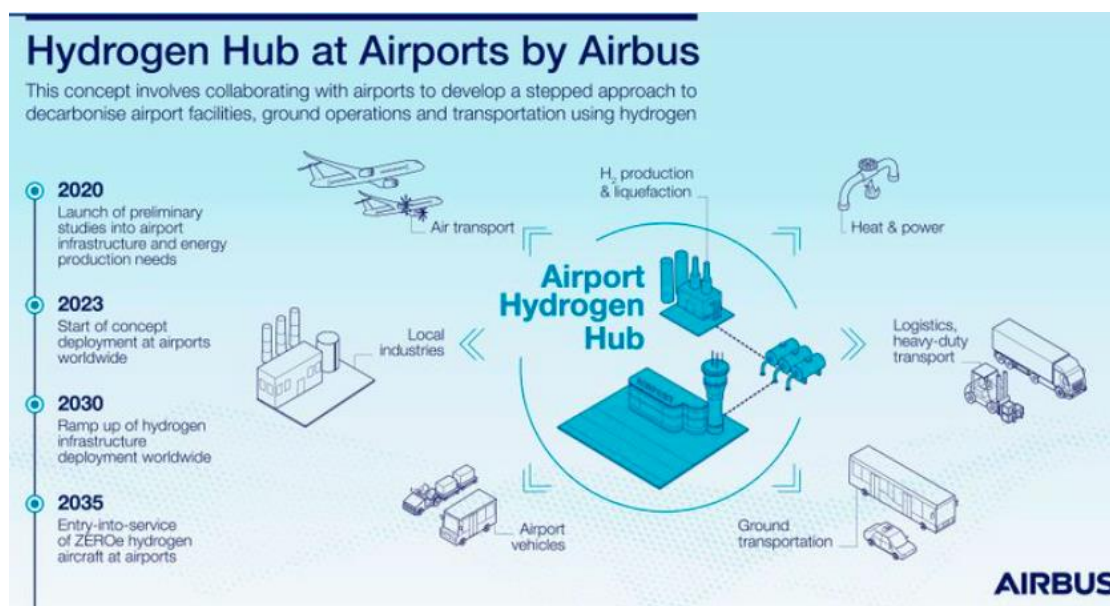


Figura 11 Hidrogénio nos Aeroportos (Airbus)
Fonte: (Airbus 2024)

2.5.6. EUROCONTROL

O EUROCONTROL em conjunto com a EASA e European Environmental Agency (2022) apresentaram o “*Collaborative Environmental Management*” (CEM) inicialmente desenvolvido em 2014 com o objetivo de facilitar a discussão entre partes e permitindo adaptações às necessidades. Este programa foi atualizado em 2021 para conseguir responder aos crescentes desafios da sustentabilidade na aviação.

Esta atualização permitiu implementar novas medidas de resposta às medidas de União Europeia, reforçar o envolvimento e colaboração das partes com as autoridades para compreender claramente as dificuldades e limitações às medidas estabelecidas, refletir o crescimento dos mercados, e apresentou novos estudos de caso onde são referidas as melhores práticas para o envolvimento das várias entidades interessadas nas iniciativas operacionais.

Este programa foi aprovado pela ACI como sendo uma prática recomendada pelo setor, com previsões para uma maior coordenação para reforçar a troca de informações técnicas ambientais e alargar a cooperação face a práticas positivas.

Tendo como referência base o CEM, o projeto *SESAT Total Management* trabalha no sentido de conduzir a colaboração na gestão aeroportuária através do desenvolvimento

de ferramentas ativas de gestão do desempenho ambiental dos aeroportos em tempo real, incorporando parâmetros-chave no Plano de Operações Aeroportuárias.

2.5.7. NASA

Em uma última análise verifica-se o estudo da NASA (2018) que consiste no modelo X-57 “Maxwell”, o primeiro avião totalmente elétrico com o objetivo de partilhar com os reguladores do setor o processo de conceção e aeronavegabilidade da aeronave centrado na propulsão elétrica. Permitindo assim avançar com a certificação da propulsão elétrica distribuída nos mercados emergentes.

O Modelo X-57 será submetido a três configurações como avião elétrico, tendo uma configuração final que inclui motores e hélices elétricas, considerando doze motores de alta elevação ao longo do bordo de ataque da asa e dois grandes motores de cruzeiro na ponta da asa que sendo considerados leves não afetam a aeronavegabilidade.

A atual equipa do projeto X-57 utiliza um “motor de conceção” como um desafio técnico, de forma a retirar dados para o desenvolvimento de melhores práticas.

Este modelo de conceção inclui um aumento de 500% na eficiência de cruzeiro a alta velocidade, zero emissões durante o voo e uma melhoria significativa no ruído.

Na perspetiva das aeronaves atuais, a NASA utiliza o modelo X-plane construído através da modificação do modelo Tecnam P2006T de forma que este tenha como fonte a propulsão elétrica.

A utilização de um projeto existente de uma aeronave de aviação geral mostra-se como uma vantagem uma vez que os dados do modelo base, alimentado por motores de combustão tradicionais, podem ser comparados com os dados resultantes do mesmo modelo alimentado por propulsão elétrica.

A propulsão elétrica em desenvolvimento pela NASA permite uma redução de cinco a dez vezes das emissões de gases de efeito estufa. O modelo X-57 alimentado por baterias pode funcionar com eletricidade de base renovável, tornando claras as vantagens ambientais e económicas.

2.5.8. Conclusão do assunto

Após verificados os vários pontos críticos às metas sustentáveis da aviação entende-se que desenvolvimento exige que todos os stakeholders da indústria se comprometam com os objetivos ambientais estabelecidos.

Segundo a IATA (2022) é necessária a compra de combustíveis sustentáveis em larga escala aos produtores com um custo competitivo para o mercado.

O desenvolvimento da indústria exige que os vários stakeholders assumam o compromisso das políticas ambientais estabelecidas com foco na obtenção de SAF em larga escala, eliminação das ineficiências da gestão de tráfego aéreo e nas infraestruturas, produção de tecnologias de fuselagem e propulsão radicalmente mais eficientes por parte dos fabricantes de aeronaves e motores, e disponibilização pelos aeroportos de infraestruturas capazes de realizar a distribuição de SAF de forma economicamente viável.

Um dos mecanismos imediatos será o programa CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) da ICAO, permitindo estabilizar as emissões internacionais a curto e médio prazo, sendo este apoiado pela IATA.

Na base deste programa as companhias aéreas são colocadas na posição onde comprem unidades de emissões elegíveis para compensar aumento nas emissões de CO₂ acima de uma linha base definida com base nas emissões médias de 2019.

Porém, segundo a IATA (2023a) estes valores já foram revistos, sendo estabelecidas novas metas para 85% dos valores base de 2019.

De modo a atingir as metas definidas o setor já apresentou vários projetos, desde a compra de grandes quantidades de SAF e investimentos para aumentar o seu fornecimento, até protótipos de aeronaves elétricas e com propulsão a hidrogénio.

Em 2021 foram produzidos e utilizados 100 milhões de litros de SAF pelas companhias aéreas, sendo que até à data da emissão do reporte 38 países implementaram políticas específicas direcionadas à maior utilização de combustíveis sustentáveis.

Para o futuro alcançar a neutralidade carbónica⁵ até 2050 irá exigir a eliminação das emissões na fonte, utilização de compensações e tecnologias de captura de carbono.

A estratégia passa por reduzir o máximo possível das emissões de CO₂ por meio de soluções viáveis no setor, como a utilização de SAF, novas tecnologias nas aeronaves, operações e infraestruturas mais eficientes, e o desenvolvimento de fontes de energia a registar as zero emissões (aeronaves elétricas e propulsão a hidrogénio).

A possível lacuna restante destes métodos será compensada através de sistemas de captura e armazenamento de carbono, e por meio de compensações.

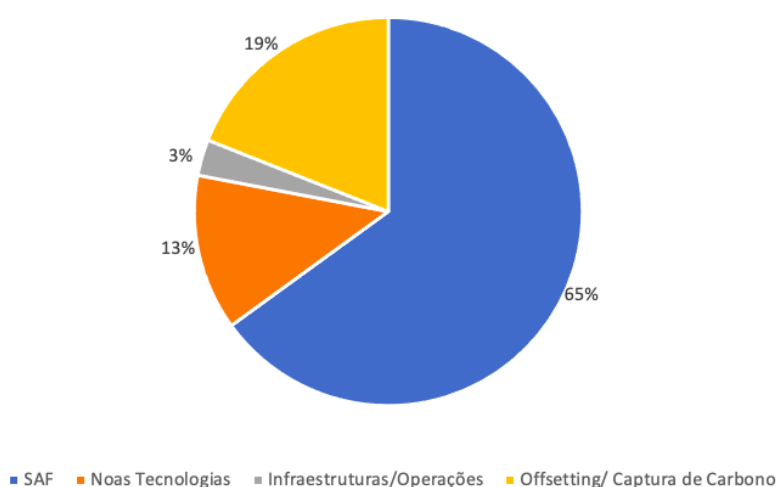


Figura 12 Percentagem de contribuição por fator
Fonte: (IATA 2022)

Com novos dados, é possível analisar a IATA (2023a) onde é referido que a sustentabilidade ambiental continua a ser um desafio para o setor, porém são realizados investimentos significativos e aplicados esforços, incluindo a criação de quadros políticos que permitam o desenvolvimento estratégico para a neutralidade em 2050.

Face às convenções e assembleias realizadas pelos organismos internacionais ao longo dos últimos anos, atualmente tanto os governos como a indústria estão concentrados

⁵ Quando é eliminada a mesma quantidade de CO₂ que é emitido.

em atingir as zero emissões líquidas. Desde modo, o programa CORSIA é referido pelos governos como a única medida económica aplicada para gerir as emissões de carbono.

Os esforços realizados pela indústria esperam uma forte iniciativa política nas áreas chave para descarbonizar o setor, incluindo incentivos à capacidade de produção de combustíveis sustentáveis (SAF).

A redução do valor para 85% das emissões de 2019 coloca uma maior pressão sobre as companhias aéreas, porém mostra-se essencial para resultados positivos do programa e das metas estabelecidas.

O SAF mostra-se como um dos elementos de peso, sendo que a IATA (2023a) estima que através dos combustíveis sustentáveis será possível reduzir em 65% as emissões de forma a cumprir as metas definidas para 2050.

Em 2022 a produção global de SAF atingiu pelo menos 300 milhões de litros, mais 200% em comparação ao total de 2021 de 100 milhões de litros. Assim, e com o apoio de políticas eficazes, a indústria dos SAF vê-se perante um aumento exponencial da capacidade e produção, estimando-se uma potencial produção de 300 mil milhões de litros em 2030. Verifica-se, portanto, o SAF como tendo o maior papel na descarbonização.

Em 2022, o Governo dos EUA aprovou novas leis com a intenção de redução da inflação, providenciando um investimento de 369 mil milhões de dólares em energias renováveis, incluindo SAF, com um sistema de aumento de crédito conforme a redução das emissões.

Na mesma vertente, em 2023 a Comissão Europeia publicou a sua proposta, visando aumentar o desenvolvimento tecnológico na UE, tendo como objetivo fornecer pelo menos 40% das necessidades tecnológicas para a neutralidade até 2030.

Ainda nos programas da IATA, verifica-se o IATA CO₂ Connect, consiste numa ferramenta online que tem como base metodologias de cálculo de CO₂, fornecendo os cálculos de emissão de CO₂ precisos de qualquer voo comercial. Permite assim responder à crescente procura de transparência de dados de CO₂ associada às companhias aéreas sobre o seu consumo real de combustível e fatores de carga.

Este programa permite avaliar e melhorar de forma independente as companhias aéreas, exigindo que estas e que as entidades com atividades diretas acompanhem e reduzam os impactes ambientais.

A avaliação realizada está alinhada com as normas de gestão internacionais de forma a abordar de forma eficaz os desafios ambientais mais significativos que o setor enfrenta.

3. DESENVOLVIMENTO DO TEMA

3.1. Crescimento do Tráfego Aéreo

Segundo Graver (2022), a ICAO atualizou a sua previsão de tráfego aéreo a longo prazo tendo em consideração os impactos da pandemia, prevê-se um crescimento anual de passageiros-quilómetros voados (RPK – *Revenue per passenger*) seja de 3.6% entre 2018 e 2050, contra os 4.2% anuais que se previa antes da pandemia. Este abrandamento reflete um atraso de 4 anos no crescimento do setor, porém a Airbus (2024) afirma que o atraso será de apenas 2 anos.

O valor de 4.2% representa atualmente o cenário mais elevado em que a atividade económica se restabelece rapidamente e onde se verifique a recuperação do volume de tráfego aéreo. Na previsão inferior ao previsto o crescimento de tráfego aéreo poderá ser representando por 2.9% anual.

Face ao estudo desenvolvido pela Agência Internacional de Energia (IEA)⁶, o cenário desenvolvido em concordância com o alinhamento da mudança de temperatura de 1.8°C apresenta um crescimento de tráfego de 2.9% anual entre 2019 e 2050. Já no cenário de emissões líquidas zero para 2050, alinhado com uma mudança de temperatura de 1.5°C., o crescimento diminui para 1.8% anual no mesmo período de referência.

Num terceiro estudo realizado pela ATAG, incidindo sobre possíveis caminhos para a descarbonização da aviação até 2050, verifica-se previsões entre 2.3% e 2.2% anual entre 2019 e 2050, com o cenário intermédio a representar 3.1% (Graver 2022).

Nos dados disponibilizados pelos fabricantes de aeronaves verifica-se as previsões mais otimistas.

⁶ International Energy Agency

Através dos dados da Airbus (Shparberg and Lange 2022) observa-se uma previsão de 3,6% de crescimento anual de tráfego aéreo entre 2019 e 2041, porém com um ligeiro decréscimo de 0,3% face à previsão estabelecida no ano anterior.

É possível a análise ao crescimento do setor desde 1991, sentindo-se claramente o impacto da pandemia e seguida recuperação, mantendo perspectivas positivas face ao futuro da aviação (Figura 13).

Passenger traffic expected to grow at 3.6% from 2019 to 2041



Figura 13 Crescimento do tráfego de passageiros
Fonte: (Shparberg and Lange 2022)

Tendo em consideração os vários estudos das entidades competentes, Graver (2022) estabeleceu diferentes cenários de evolução de tráfego entre 1985 e 2050, divididos no cenário mais alto, central e baixo, obtendo um crescimento médio anual de 3,7% entre 2019 e 2050 (Figura 14).

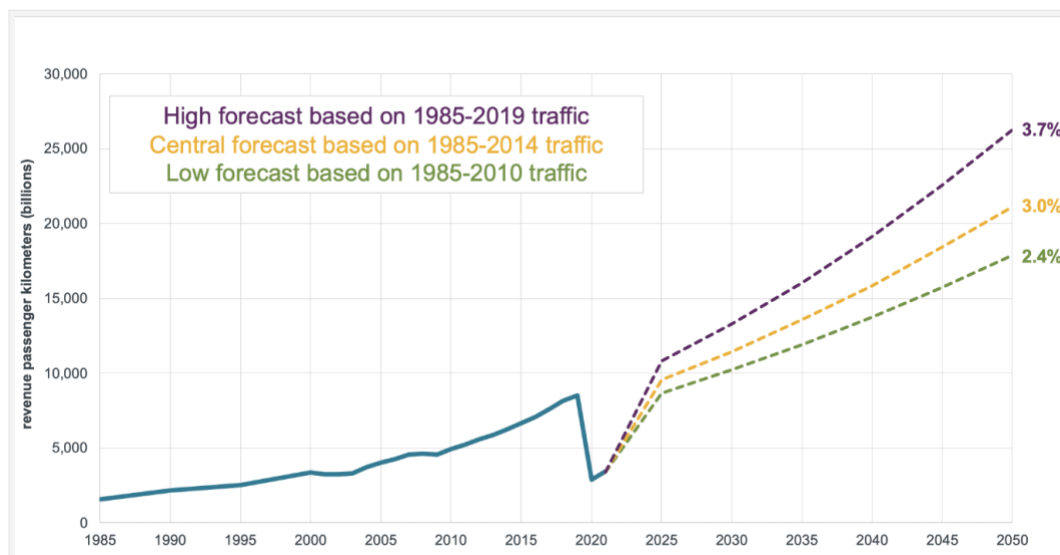


Figura 14 Cenários de evolução do tráfego de passageiros

Fonte: (Graver 2022)

Portanto, em termos de transporte de passageiros verifica-se um crescimento de 2.4% por ano no cenário mais baixo, 3% no central e 3.7% no mais alto. A nível de carga verifica-se valores ligeiramente superiores, mas com um ritmo de crescimento semelhante (Graver et al. 2022) (Tabela 3).

Tabela 3 Valores relativos aos cenários de evolução do tráfego de passageiros

Fonte: (Graver et al. 2022)

Low	Central	High
Passenger: +2.4% RPK p.a., 2019-2050	Passenger: +3.0% RPK p.a., 2019-2050	Passenger: +3.7% RPK p.a., 2019-2050
Freight: +2.6% FTK p.a., 2019-2050	Freight: +3.5% FTK p.a., 2019-2050	Freight: +4.2% FTK p.a., 2019-2050

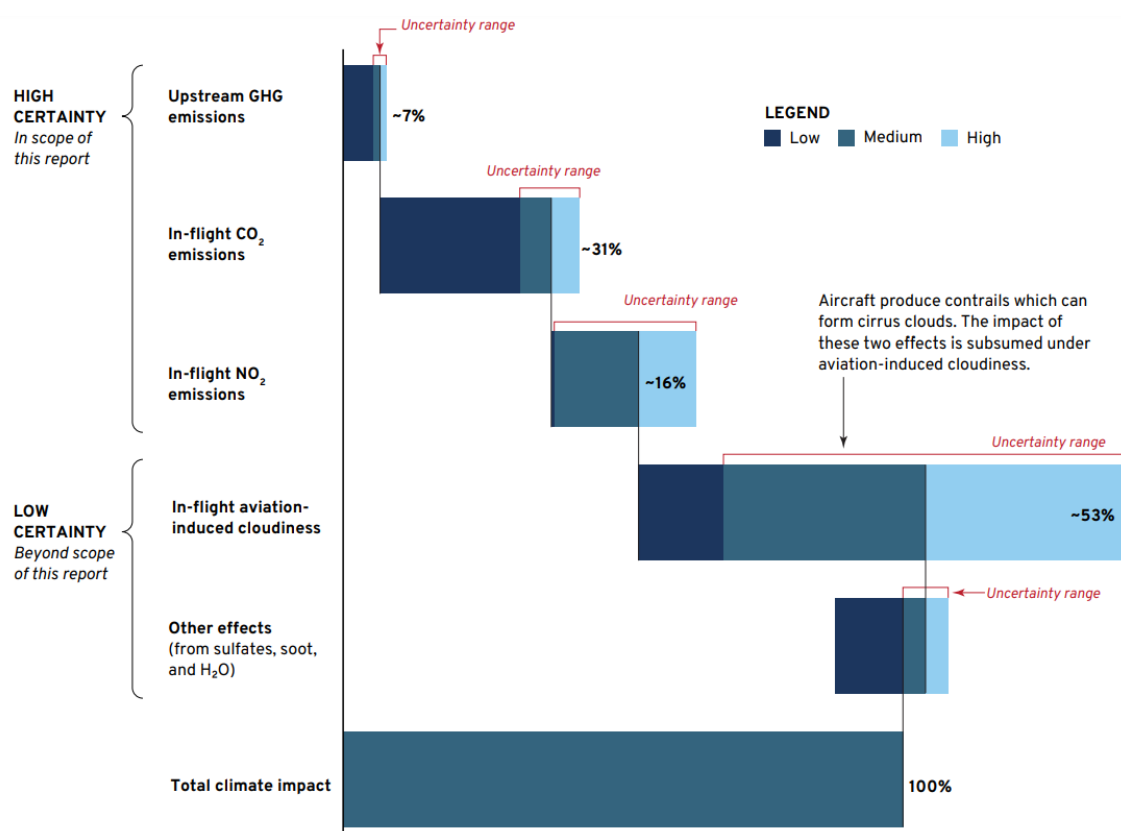
Segundo a ATAG (2020), o espectável crescimento do tráfego aéreo mostra-se como um dificuldades a ser ultrapassada pelas metas de redução de CO₂, isto verifica-se uma vez que o aumento de tráfego aéreo representa simultaneamente um aumento das emissões. Deste modo, surge a necessidade de desenvolvimentos tecnológicos de modo a contrariar as emissões provenientes do aumento de tráfego, com uma redução das emissões derivadas das aeronaves e da operação envolvente.

Uma parte significativa deste foco deve ser colocado sobre as economias emergentes, que pela sua fase de desenvolvimento apresentam um alto desenvolvimento do setor da aviação apresentando uma maior resistência às metas sustentáveis.

Verifica-se, portanto, a necessidade de esforço conjunto entre os vários parceiros globais do setor de modo a reduzir limitações e aplicar sinergias sobre novos desenvolvimentos que venham a permitir atingir os objetivos.

3.2. Emissões de CO₂ provenientes do transporte aéreo

Com base no reporte “Making Net-Zero Aviation Possible” (2022), entende-se a necessidade de atingir a neutralidade carbônica do setor até 2050 de forma a evitar efeitos maiores em termos de alterações climáticas.



Cerca de 90%-95% das atuais emissões de carbono devem reduzidas através de medidas que tenham como objetivo a descarbonização/neutralidade do setor, os restantes 5%-10% são as emissões residuais que exigem sistema de captura de carbono.

A aviação tem na sua base cinco grandes pilares que têm a capacidade de impulsionar a evolução no sentido da redução do impacto ambiental:

- Redução na procura de viagens aéreas;
- Melhorias na eficiência;
- Utilização em larga escala de SAF;
- Novas aeronaves de propulsão (hidrogénio, elétricas e híbridas);
- Soluções de captura de carbono.

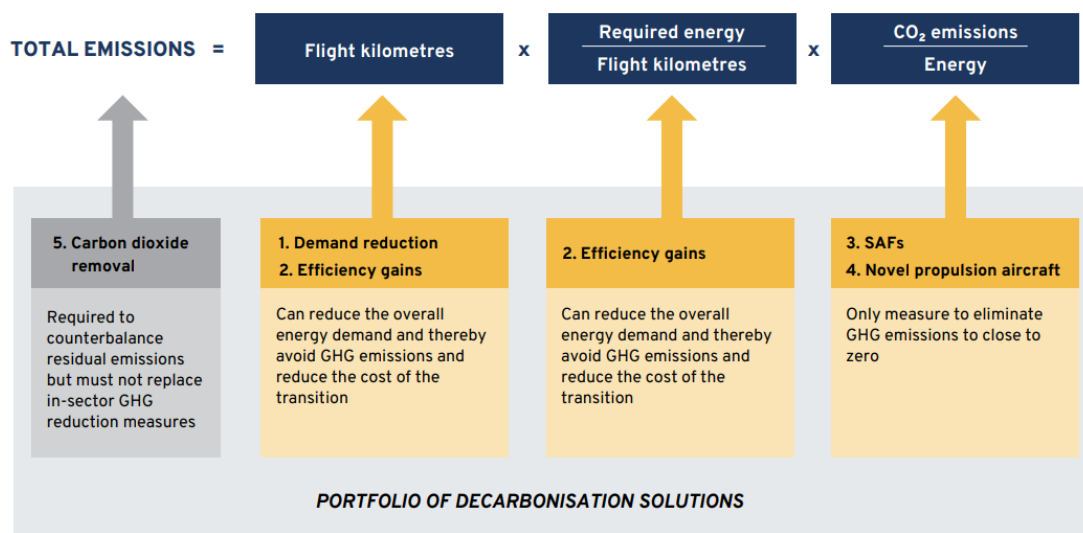


Figura 16 Decomposição das raízes das emissões da aviação e as respetivas alavancas de descarbonização

Fonte: (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022)

Observações:

Em termos de quilómetros voados os fatores que vão provocar alterações baseiam-se na redução da procura e melhorias na eficiência, através da redução da energia necessária para resposta à procura e assim evitar emissões de GEE, simultaneamente reduz os custos de transição.

A utilização dos SAF e os novos sistemas de propulsão devem ser utilizados como medida para eliminar as emissões de GEE, aproximando-se das zero emissões.

O “Removel Carbon Dioxide”, sistemas de captura de carbono, deverá incidir sobre o total de emissões, eliminando o valor residual que serve de barreira à neutralidade.

Melhorias na Eficiência

Nas últimas décadas a aviação tem demonstrado um avanço positivo no sentido de tornar as aeronaves e procedimentos de voo mais eficientes.

Quando ocorre a substituição de aeronaves reformadas por aeronaves novas e mais eficientes são verificadas melhorias com custos negativos de redução de CO₂ de 65-233€ por tonelada.

Observa-se também outras melhorias tecnológicas nas aeronaves com custos de redução negativos semelhantes, como a redução de peso da cabine, aeronaves com *winglets*⁷, e a mudança para aeronaves elétricas.

As estratégias operacionais individuais implementadas pelas companhias aéreas e as melhorias na gestão de tráfego aéreo (ATM) podem ter efeitos semelhantes, com custos de redução negativos de 233-280€ por tonelada de CO₂.

Através do aumento da eficiência dos voos é possível reduzir os custos de combustível. Assim, como resultado a indústria obteve melhorias médias anuais de 1,0% entre 1970 e 2019, e atingiu 1.5%/ano entre 2010 e 2019 (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022).

Ultrapassando estas tendências continuas, as melhorias de eficiência podem ser aumentadas para 2%/ano até 2030 através de ganhos adicionais de eficiência:

- Melhorias operacionais e ATM (tendo como exemplo procedimentos otimizados de aproximação/descolagem, melhorias durante a velocidade cruzeiro através de aerodinâmica melhorada, gestão eficaz do congestionamento, táxi⁸ com apenas um motor);
- Outros esforços de ajuste ou novas concepções de motores e aeronaves.

⁷ Componente aerodinâmico posicionado na extremidade livre da asa de uma aeronave, permite reduzir o arrasto induzido relacionado ao vórtice de ponta de asa.

⁸ Movimento de uma aeronave no solo, pelo uso da sua própria potência.

Caso estes ganhos adicionais de eficiência sejam atingidos, a frota global de aeronaves poderá ser cerca de 40% mais eficiente em termos de combustível em 2050 face à comparação com 2019.

Face à Figura 17 a substituição das aeronaves médias pelas aeronaves mais eficientes atualmente a operar pouparia cerca de 16%-21% de combustível, sem que fossem introduzidas novas tecnologias no mercado. Estas novas melhorias referem-se a tecnologias de turbinas, estruturas de aeronave e melhorias operacionais.

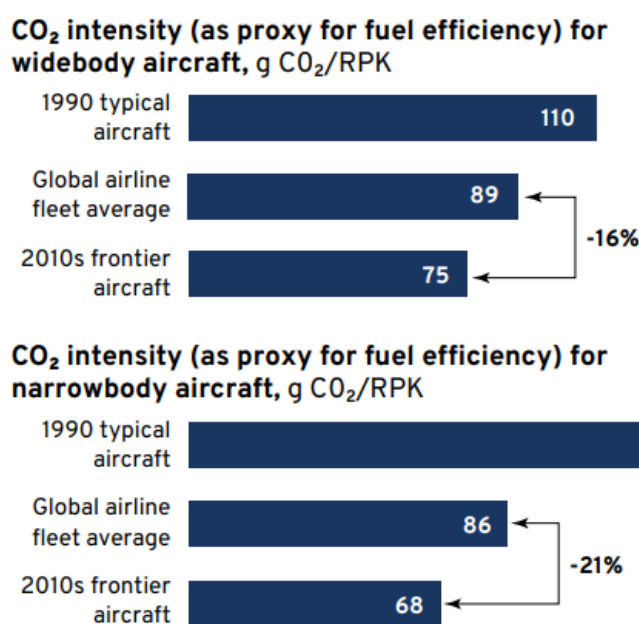


Figura 17 Intensidade do CO₂
Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Portanto, a aeronave mais atual a operar é 15%-20% mais eficiente do que a média de frota global.

Contribuição para a descarbonização – SAF / Aeronaves Elétricas / Aeronaves a Hidrogénio

Ainda com base no reporte "Making Net-Zero Aviation Possible" (2022), refere-se que os SAF são efetivamente o elemento mais importante para a neutralidade da aviação.

Até à entrada no mercado dos aviões a hidrogénio e elétricos a partir de 2030, os SAF serão a única opção viável para diminuir as emissões para valores próximos a zero e vão continuar também a ser a única opção para voos de longo curso no futuro.

Os SAF são quimicamente quase idênticos ao combustível de avião convencional, e, portanto, compatíveis com as atuais infraestruturas aeroportuárias e motores de aeronaves.

Atualmente, a maioria dos SAF certificados podem ser misturados com combustível fóssil convencional para aviões a jato até 50%. No entanto, continuam os esforços por parte das entidades responsáveis para que os SAF sejam certificados com utilização a 100%.

As aeronaves com propulsão a hidrogénio, aeronaves elétricas e aeronaves híbridas podem reduzir as emissões de CO₂ em cerca de 95%.

Porém existem barreiras que limitam a contribuição para atingir a neutralidade:

- Limitações de alcance;
- Risco de desenvolvimento tecnológico;
- Período de entrada no mercado.

Comparação:

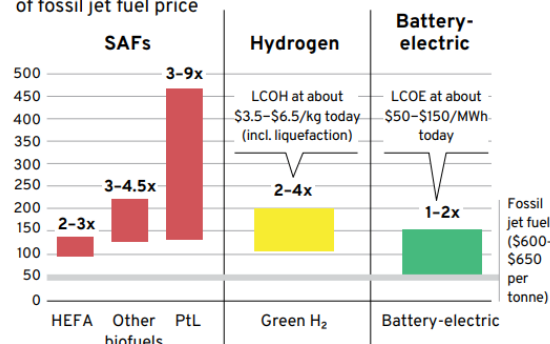
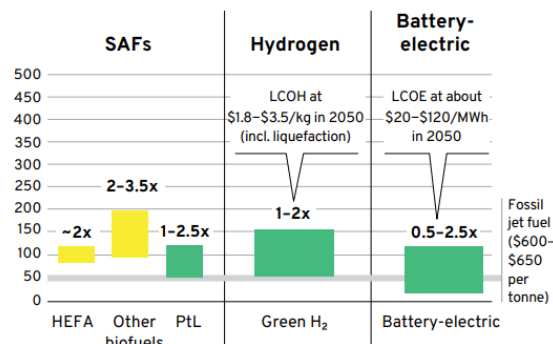
Apesar de se poder considerar melhorias na eficiência não é possível eliminar completamente as emissões.

Os SAF e os avanços na propulsão das aeronaves são os elemento-chave para reduzir as emissões de gases de efeito estufa a quase zero, porém apresentam elevados custos de produção de combustível e de desenvolvimento de aeronaves.

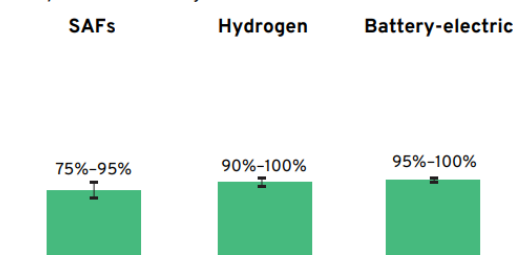
As soluções com base na captura de dióxido de carbono, não reduzindo as emissões, são essenciais para neutralizar permanentemente as emissões residuais dos SAF e das aeronaves elétricas e aeronaves a hidrogénio, que apenas reduzem as emissões de GEE em cerca de 75%-95%.

Indicative energy cost in 2020 ...

\$/MWh and as multiple of historical average of fossil jet fuel price

**... and in 2050****GHG abatement potential ...**

Upstream GHG + in-flight CO₂ emissions only; compared with fossil jet fuel

**... and total climate impact abatement potential**

In addition to the GHG abatement potential, this includes non-CO₂ in-flight effects; compared with fossil jet fuel

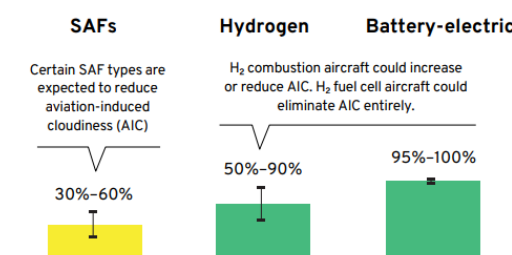
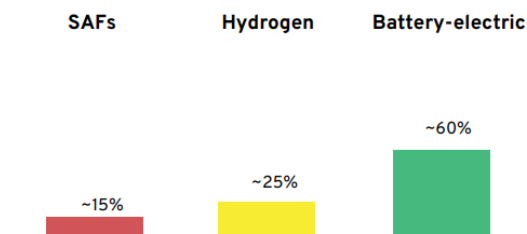
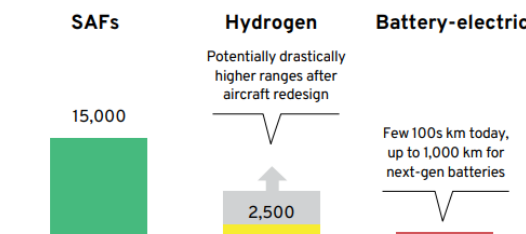
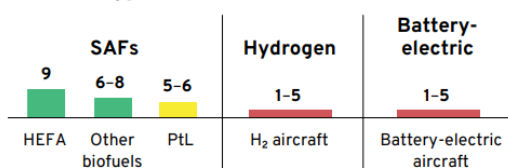
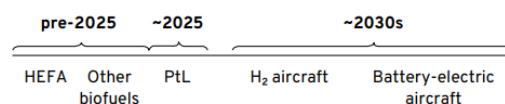
**Well-to-wake efficiency ...****... and maximum range, km****Technology readiness level (TRL) ...****... and large-scale market entry**

Figura 18 Comparação entre aeronaves a voar a SAF, hidrogénio e elétrico

Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Observações:

Primeiramente, observa-se que os custos energéticos em 2050 serão significativamente mais baixos em comparação a 2020, tendo em consideração um preço idêntico para o combustível fóssil para os dois anos em estudo.

Verifica-se, em comparação ao combustível fóssil, os SAF com 75%-95% de potencial de redução de Gases de Estufa, a propulsão a hidrogénio com 90%-100% de potencial de redução e as aeronaves elétricas com a maior percentagem, 95%-100%.

Em termos de potencial de redução do impacto ambiental total compreende-se os SAF com menor percentagem, 30%-60%, seguidos do hidrogénio com 50%-90%, e com o maior valor as aeronaves elétricas a registar 95%-100%

Na eficiência os SAF apresentam mais uma vez os valores mais baixos, aproximadamente 15%, hidrogénio cerca de 25% e as aeronaves elétricas com valores aproximados a 60%.

A nível de alcance máximo, a tendência inverte-se, sendo que os SAF representam o valor mais alto, seguido da propulsão a hidrogénio que poderá aumentar o seu alcance caso existam alterações no design, e com menor representação as aeronaves elétricas.

A prontidão da tecnologia mostra valores superiores nos SAF, subdividida nos vários tipos deste combustível, e a propulsão a hidrogénio e as aeronaves elétricas em situações idênticas.

Relativamente à entrada no mercado, verifica-se a utilização dos vários tipos de SAF até à entrada das aeronaves elétricas e a hidrogénio em 2030.

3.3. Análises de Evolução

3.3.1. Análise 1

Em 2019, a aviação global foi responsável por 1.2 Gt⁹ CO₂e¹⁰, para colocar a aviação no caminho para as emissões líquidas zero em 2050 é essencial melhorias na eficiência de consumo de combustível pelas aeronaves, rápida implementação do SAF e entrada de novos sistemas propulsão em meados de 2030.

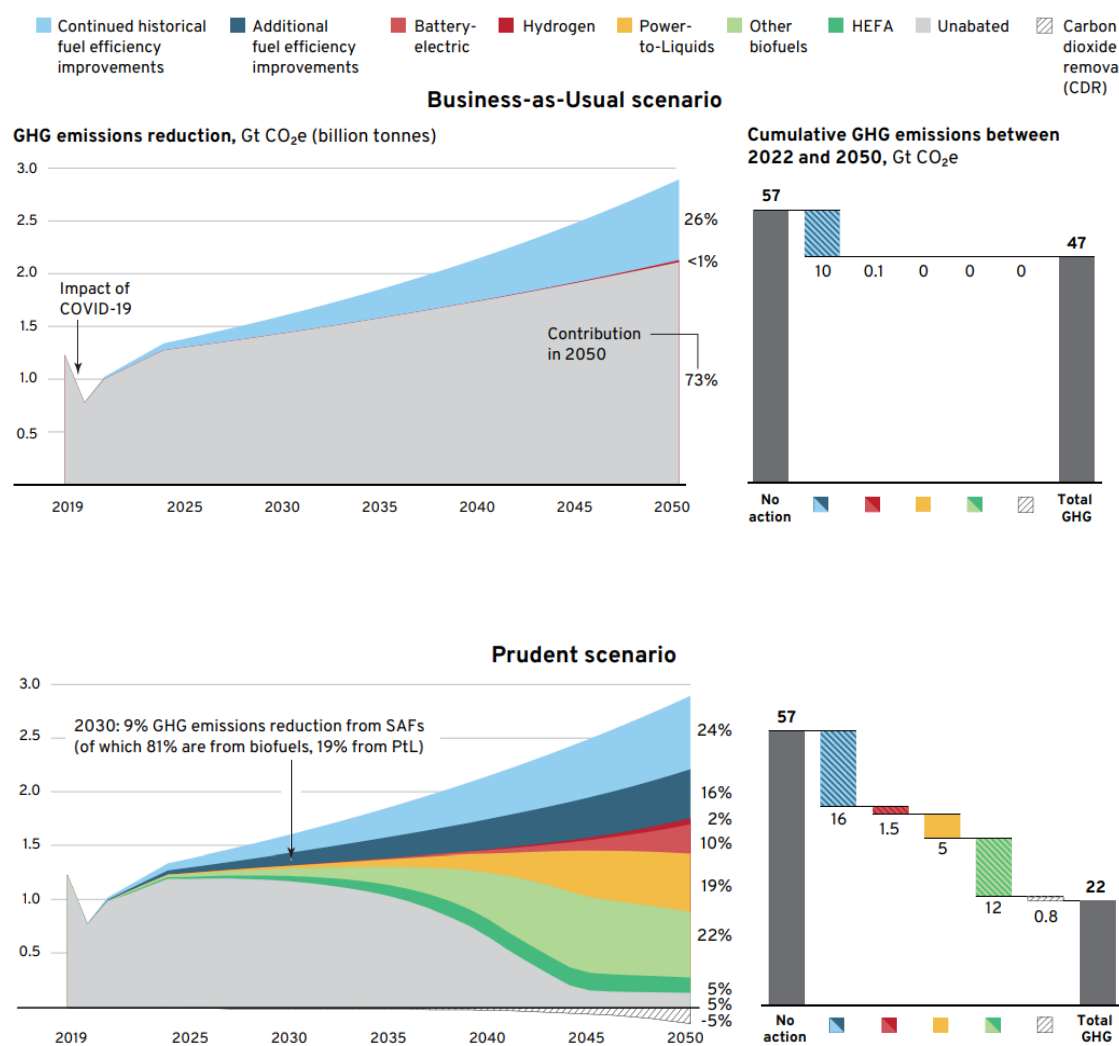
⁹ Gigatoneladas.

¹⁰ Dióxido de Carbono Equivalente: medida internacional de equivalência entre todos os gases de efeito estufa e o dióxido de carbono, ou seja, os gases de efeito estufa são convertidos em CO₂ para ser mais fácil analisar os impactos das emissões no aquecimento global.

Assim, é possível estudar diferentes cenários, onde o cenário *Business-as-Usual* (BAU) se destaca dos dois cenários net-zero em termos de medidas de descarbonização para atingir as zero emissões em 2050, sendo esta primeira análise estabelecida com base no reporte “Making Net-Zero Aviation Possible” (2022).

A principal diferença entre o cenário *Prudent* (PRU) e o cenário *Optimistic Renewable Electricity* (ORE) reside no facto do ORE assumir um declínio mais rápido dos custos da eletricidade renovável e consequentemente melhores condições económicas para tecnologias baseadas na eletricidade. Em resultado disto, os SAF produzidos a partir de eletricidade, aviões a hidrogénio e elétricos entram no mercado mais cedo e em grande escala, ao contrário do cenário PRU onde prevalecem biocombustíveis.

Os seguintes cenários analisados permitem verificar como a redução dos gases de efeito estufa possibilitam que o net-zero da aviação seja uma realidade.



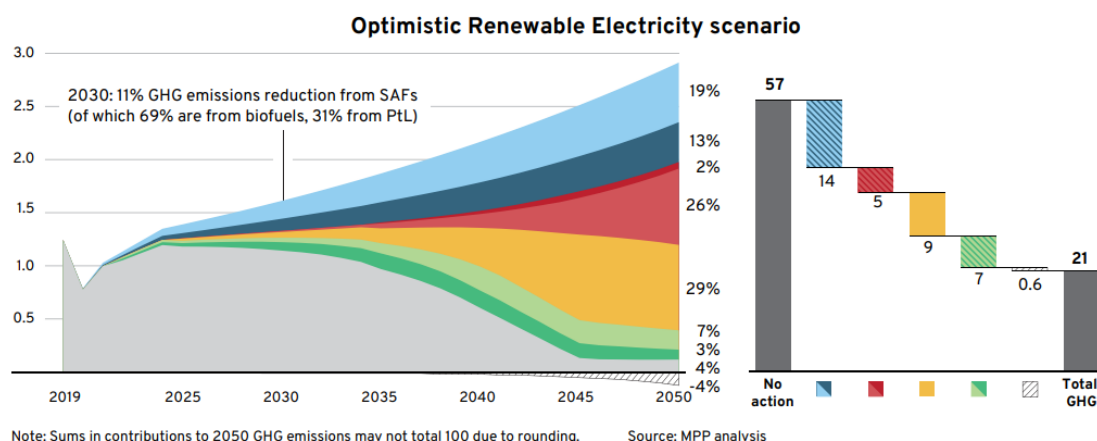


Figura 19 Cenários de redução dos gases de efeito estufa
Fonte: (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022)

Análise *Business-as -Usual*:

Verifica-se a contribuição de 26% através de melhorias contínuas na eficiência histórica dos combustíveis, reduzindo 10 Gt CO₂e. A entrada de aeronaves elétricas e a hidrogénio no mercado representa um valor inferior a 1% para 2050. A restante percentagem de redução (73%) permanecerá sem ser abatida em 2050.

Deste modo, a emissão de CO₂ será reduzida de 57 Gt CO₂e caso não existissem melhorias para Gt CO₂e através da contribuição das melhorias implementadas neste cenário.

Análise *Prudent*:

É possível estudar as melhorias contínuas na eficiência histórica dos combustíveis com uma contribuição de 24% na redução das emissões de carbono, sendo a mais significativa, já as melhorias adicionais na eficiência dos combustíveis apresentam 16%; em conjunto permitem reduzir 16 Gt CO₂e.

Com a entrada de aeronaves a hidrogénio e aeronaves elétricas estuda-se a percentagem de 2% e 10%, respetivamente, como elemento conjunto permitem reduzir 1.5Gt de CO₂. Os combustíveis produzidos a partir de eletricidade com 19% e 5 Gt CO₂e de redução.

Com o segundo peso mais significativo observa-se outros biocombustíveis, 22%, que juntamente com HEFA (5%) permitem reduzir 12 Gt CO₂e.

Permanecem 5% das emissões sem serem abatidas, que vão ser compensadas através de programas de remoção de dióxido de carbono, demonstrando uma redução de 0.8 Gt CO₂e.

Este cenário prevê que em 2030 exista uma redução de 9% dos gases de efeito de estufa, das quais 81% devido à utilização de biocombustíveis e 19% dos combustíveis produzidos a partir de eletricidade.

Análise Optimistic Renewable Electricity:

Em estudo compreende-se 19% de redução através de melhorias contínuas na eficiência histórica dos combustíveis e 13%, reduzindo conjuntamente 14 Gt CO₂e.

A entrada de aeronaves a hidrogénio e aeronaves elétricas regista 2% e 26% respetivamente, com menos 5 Gt CO₂e.

Os combustíveis produzidos a partir de eletricidade apresentam o maior peso de redução de emissões neste cenário, 29%, menos 9 Gt CO₂e. Os biocombustíveis apresentam 3% e os HEFA 4%, portanto 7 Gt CO₂e.

Mantém 4% de emissões não abatidas, que serão compensadas através de programas de remoção de dióxido de carbono, menos 0.6 Gt CO₂e.

Finalizando a análise, a melhoria da eficiência do combustível das aeronaves e os SAF apresentam o maior peso na redução das emissões. A duplicação da eficiência de combustível em comparação com os desenvolvimentos históricos evita cerca de 14-16 Gt CO₂e entre 2020 e 2050, comparando com um futuro em que não exista qualquer ação no sentido de reduzir o impacto ambiental. Poderá colocar-se a redução de 16-17 Gt CO₂e através da utilização dos SAF.

Fatores para a neutralidade:

a. Crescimento com carbono neutro para 2030

No estudo de como será atingindo o crescimento neutro de carbono até 2030, verifica-se a aplicação das diferentes variáveis estudadas no plano, sendo considerados os abatimentos de custos.

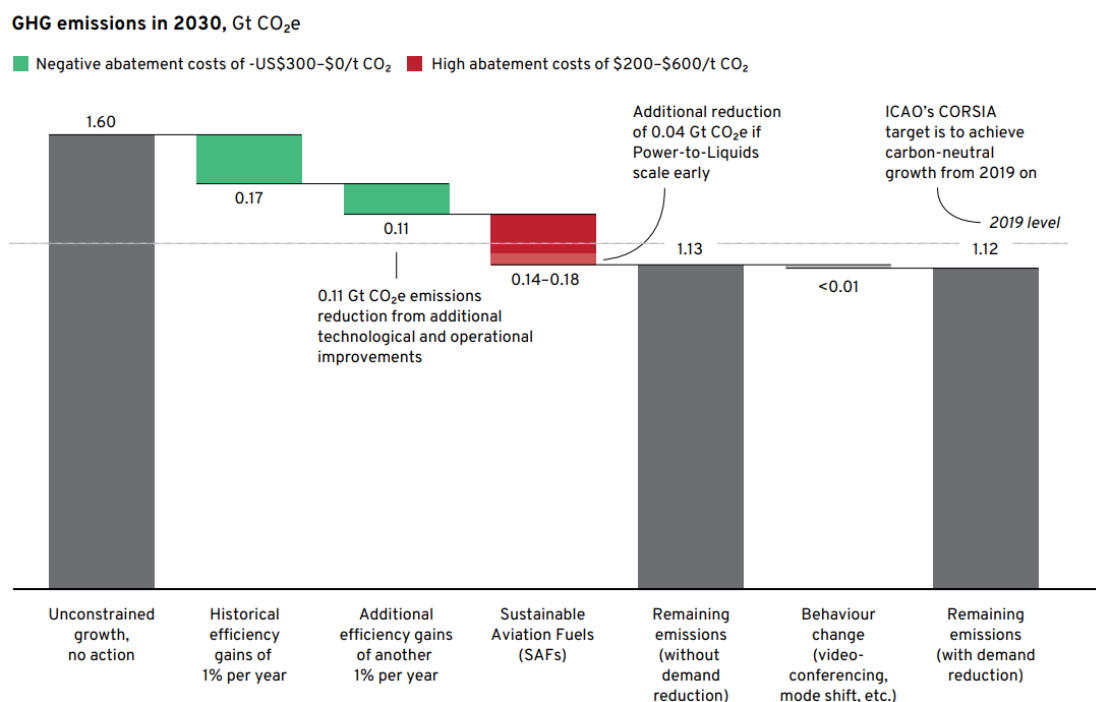


Figura 20 Gases de efeito estufa 2030

Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Observações:

Verifica-se primeiramente o valor de 1.60 Gt CO₂e no caso de o transporte aéreo operar sem constrangimentos no crescimento (sem ações climáticas) até 2030.

Através da aplicação de melhorias da eficiência histórica de mais 1% por ano obtém-se uma redução de 0.17 Gt CO₂e (1.60-0.17)¹¹, com as melhorias adicionais na eficiência de mais 1%, baseadas no desenvolvimento tecnológico e das operações, obtém-se uma

¹¹ Unconstrained growth, no action – Historical efficiency gains of 1% per year.

redução de 0.11% (1.60-0.17-0.11)¹², sendo ambos os fatores considerados custos de redução negativos.

Seguidamente, mostram-se os SAF a reduzir 0.14 Gt CO₂e ou 0.18 Gt CO₂e caso os combustíveis produzidos a partir de eletricidade tenham uma difusão precoce (1.60-0.17-0.11-0.18)¹³, considerados custos de redução elevados.

Portanto, através da contribuição destes três fatores obtém-se 1.13 Gt CO₂e restantes (sem “*demand reduction*”). Após isto será aplicada uma redução inferior a 0.01 Gt CO₂e proveniente das mudanças de comportamento por parte dos vários elementos constituintes do setor, conduzindo a 1.12 Gt CO₂e restantes (com “*demand reduction*”).

Deste modo, é possível prever 2030 com valores inferiores a 2019 e termos de impacto ambiental provocados pelos gases de efeito estufa.

b. Net-zero 2050

É possível estudar a contribuição dos elementos fundamentais de forma a atingir o net-zero em 2050, tendo em consideração custos negativos, médios e altos de redução.

¹² Unconstrained growth, no action – Historical efficiency gains of 1% per year – Additional efficiency gains of another 1% per year.

¹³ Unconstrained growth, no action – Historical efficiency gains of 1% per year – Additional efficiency gains of another 1% per year – Sustainable Aviation Fuels (SAF’s).

GHG emissions in 2050, Gt CO₂e (billion tonnes)

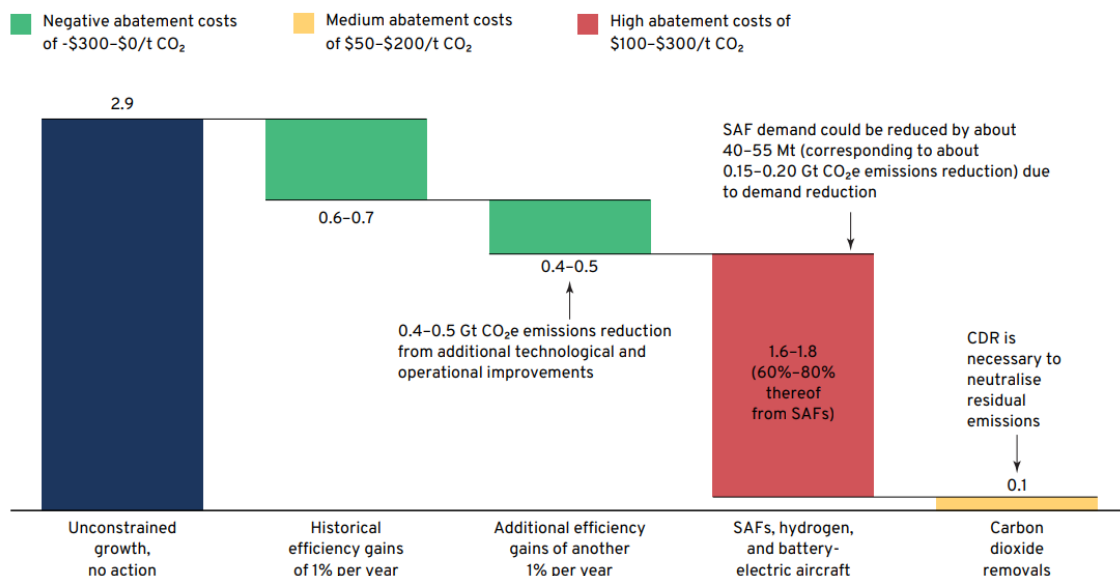


Figura 21 Gases de efeito estufa 2050
Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Observações:

Verifica-se 2.9 Gt CO₂e num crescimento sem ações climáticas, com a aplicação de melhorias históricas na eficiência com aumento de 1% por ano obtém-se uma redução de 0.6/0.7 Gt CO₂e, com as melhorias adicionais na eficiência com aumento de 1% por ano, baseadas em melhorias na tecnologia e operações, é possível menos 0.4/0.5 Gt CO₂e. Ambos os elementos são considerados custos negativos de redução.

Em seguida, observa-se os SAF's e aeronaves elétricas e a hidrogénio a reduzir 1.6/1.8 Gt CO₂e, dos quais 60%-80% são referentes aos SAF. Este elemento constitui um alto custo de redução.

Finalmente, a Redução de Dióxido de Carbono (CDR) é essencial para neutralizar as emissões que permanecem após a aplicação das restantes medidas, sendo um fator com custos médios de redução.

c. Emissões de Gases de Efeito estufa /CO₂ 2050

Os dados permitem verificar a evolução dos três cenários desta análise face às Gt CO₂e e emissões de CO₂ acumuladas (soma contínua).

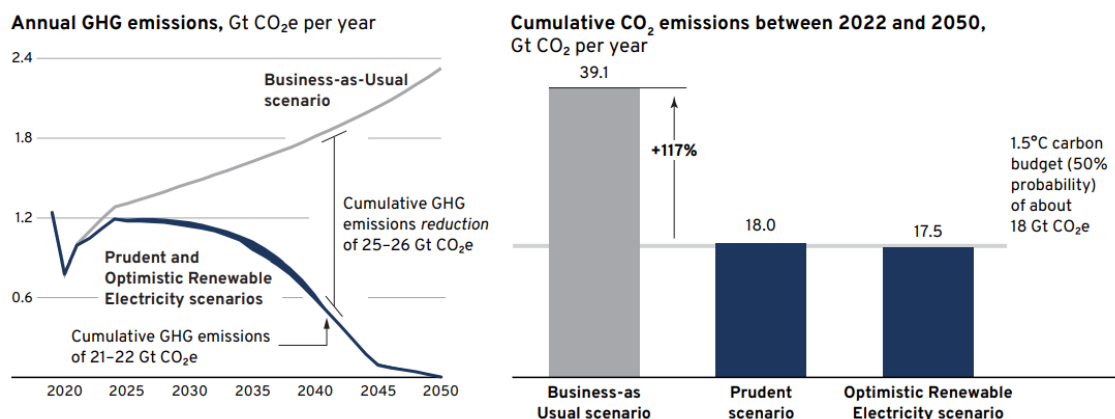


Figura 22 Gases de efeito estufa anuais
Fonte: (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022)

Observações:

No cenário BAU, as emissões acumuladas de GEE entre 2022 e 2050 são de 47 Gt CO₂e, dos quais cerca de 39 Gt são emissões de CO₂ em voo, portanto um excesso de mais de 100% face ao orçamento de carbono de 1.5°C para a aviação global de cerca de 18 Gt CO₂e.

Em contraste, os cenários net-zero (PRU e ORE) estão aproximadamente em linha com um orçamento de carbono de 1.5°C, sendo responsáveis por emissões acumuladas de GEE de apenas 21-22 Gt CO₂e, dos quais cerca de 18 Gt CO₂ são emissões de CO₂ em voo e emissões de CO₂ do ciclo de vida de combustíveis renováveis.

d. Potencial tecnológico dos combustíveis renováveis

As aeronaves a hidrogénio e as aeronaves elétricas têm a capacidade de tornar a aviação mais eficiente a partir de 2030 e providenciar até um terço da procura de energia em 2050.

Pormenorizando o assunto, as aeronaves a hidrogénio podem entrar no mercado em 2030 e desenvolver-se até 2050 para atingir cerca de um terço da procura energética da aviação.

Tendo em consideração as atuais conceções de aeronaves, os aviões a hidrogénio poderão ter um alcance limitado a 2500km uma vez que o armazenamento de

hidrogénio em comparação com o combustível para aviões a jato requer pelo menos cinco vezes mais volume para o transporte da mesma quantidade de energia. Compreende-se, portanto, a necessidade na remodelação das estruturas das aeronaves e investimentos em inovação tecnológica de armazenamento.

Caso as aeronaves a hidrogénio entrem no mercado até 2035 podem ganhar uma quota de mercado significativa até 2050 pela procura energética na aviação. Caso entrem apenas por volta de 2040 o seu impacto será menor e irão representar um peso menor na resposta à procura energética.

No assunto das aeronaves elétricas e assumindo avanços na química das baterias, as aeronaves elétricas poderão alimentar aeronaves regionais em voos até cerca de 1000km nos anos de 2030. Embora pudessem substituir mais de 15% da frota mundial de aviões a jato até 2050, contribuiriam apenas para uma redução de cerca de 2% das emissões de GEE devido à sua limitação de alcance.

É possível verificar através da figura 23 os dados de desempenho das aeronaves elétricas, aeronaves a hidrogénio e SAF.

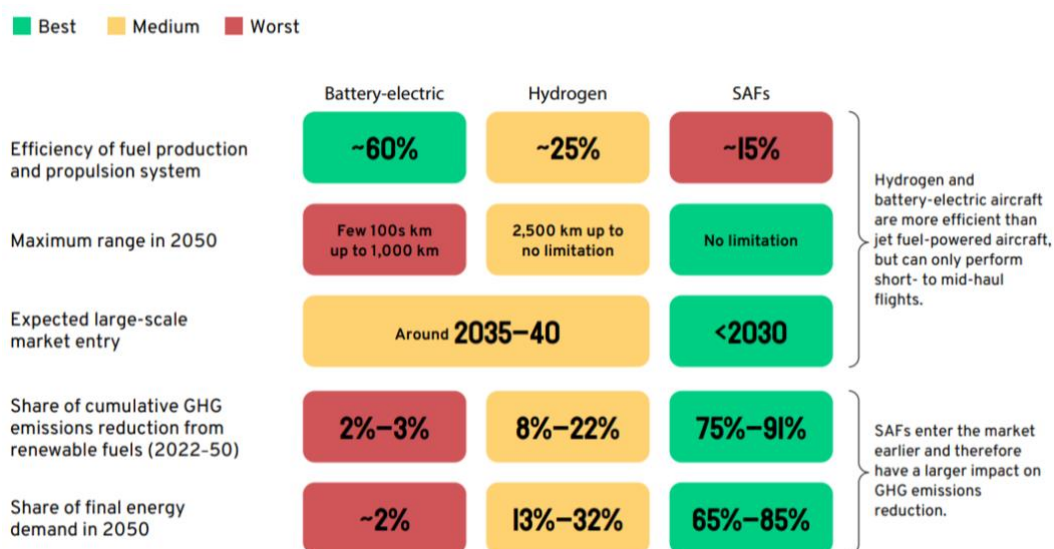


Figura 23 Comparação entre aeronaves a voar a SAF, hidrogénio e elétrico

Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Observações:

Primeiramente permite-se a análise à eficiência da produção de combustível e sistemas de propulsão, onde as aeronaves elétricas têm a maior representação, aproximadamente 60%, seguidas das aeronaves a hidrogénio 25% e os SAF com apenas 15%.

Em termos de alcance máximo em 2050 observa-se as aeronaves elétricas entre os 100km e 1000km, aeronaves a hidrogénio a voar desde 2500km e sem limitação, os SAF mostram-se sem limitações no alcance sendo este o elemento mais significativo.

Nas expectativas de entradas em larga escala no mercado estão as aeronaves elétricas e aeronaves a hidrogénio entre 2035 e 2040, e essencialmente os SAF antes de 2030.

Nestes três elementos (eficiência da produção de combustível e sistemas de propulsão, alcance máximo em 2050, e expectativas de entradas em larga escala no mercado) existe maior eficiência por parte das aeronaves elétricas e aeronaves a hidrogénio, em comparação aos aviões a jato movidos por combustível, porém apenas seriam capazes de realizar voos de curta e médio distância.

Face à redução de emissões acumuladas de gases de efeito estufa devido à utilização de combustíveis renováveis, compreende-se em primeiro lugar os SAF com 75%-91% de contribuição, em seguida as aeronaves a hidrogénio (8%-22%) e com menor peso as aeronaves elétricas (2%-3%).

O último elemento estudado reflete-se na quota da procura energética em 2050, onde os SAF mostram o maior impacto (65%-85%), aeronaves a hidrogénio com uma contribuição média (13%-32%) e finalmente as aeronaves elétricas com aproximadamente 2%.

- e. Equilíbrio entre aumento do preço dos combustíveis e aumento da eficiência

Apesar dos custos médios do combustível estarem a aumentar nos cenários net-zero (PRU e ORE), o custo do voo poderia permanecer estável, sendo contrabalançado por ganhos de eficiência.

Os SAF são atualmente 2-5 vezes mais caros do que o combustível fóssil para as aeronaves a jato, mesmo a longo prazo são suscetíveis de manter um peso significativo na aviação, apesar dos preços elevados do petróleo poderem reduzir consideravelmente esta margem.

O custo médio da energia para a aviação mundial vai depender de:

- Quota de mercado dos combustíveis renováveis, que irá aumentar com o tempo;
- Custos de produção, que vão diminuir com o tempo devido à inovação tecnológica, economias de escala, e/ou preço do carbono;
- Eficiência do combustível das aeronaves, que irá aumentar com o tempo.

Como resultado da quota de mercado dos combustíveis renováveis e dos custos de produção, uma quota de 13%-15% dos SAF até 2030 poderá aumentar o custo médio do combustível em cerca de 15%-20%. No entanto, considerando os ganhos de eficiência de combustível das aeronaves, o aumento do RPK poderia ser negligenciável.

Até 2050, os custos médios de combustível para um setor da aviação totalmente descarbonizado poderiam aumentar cerca de 90%-190% em comparação com os custos previstos de combustível fóssil para aviões a jato. Porém, os custos médios por RPK poderiam aumentar em apenas 5%, mas também poderá ser considerada uma redução de 5% caso sejam consideradas outras melhorias tecnológicas, economias de escala e a introdução de aviões mais eficientes a hidrogénio e elétricos.

É necessário ter em consideração que estes valores são meramente indicativos, sendo que não existe um fator de certeza em como os segmentos individuais da cadeia de valor vão reagir ao aumento dos custos de combustível. Os ganhos de eficiência poderiam permitir às companhias aéreas compensar grandes partes do impacto económico do aumento dos custos de combustível.

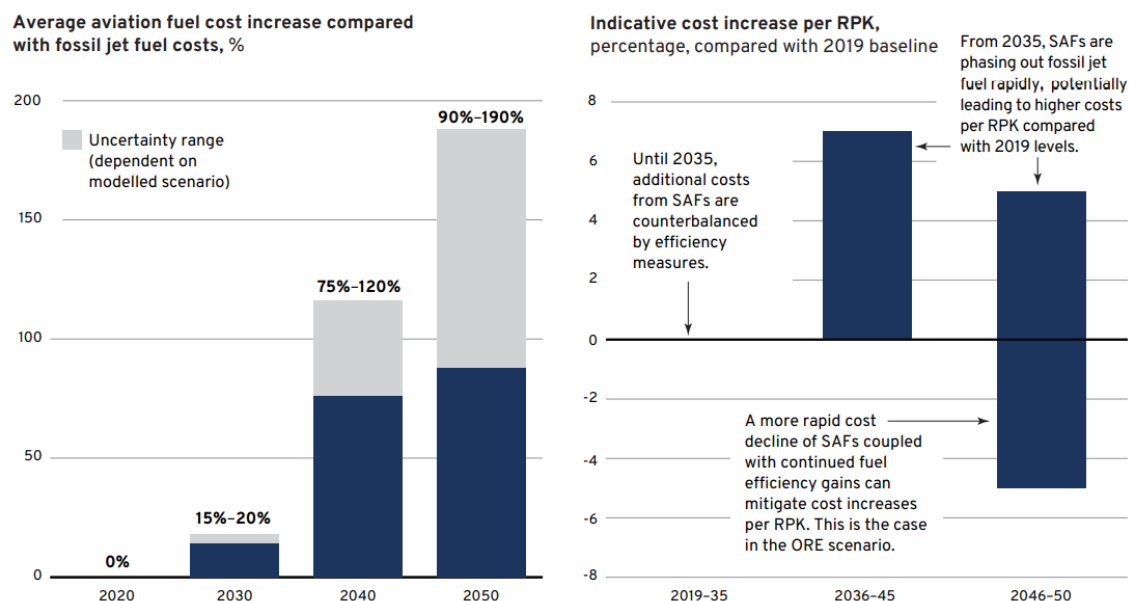


Figura 24 Custos associados ao combustível
Fonte: ("Making Net-Zero Aviation Possible" 2022)

Observações:

Na comparação entre o aumento do preço médio do combustível da aviação e os custos do combustível fóssil para aviões a jato, verifica-se um aumento de 15%-20% em 2030, 75%-120% em 2040 e 90%-190% em 2050, representando um rápido e acentuado aumento.

Face ao aumento de custos por RPK, até 2035 os custos adicionais provenientes do SAF serão contrabalançados através de medidas eficientes, a partir de 2035 os SAF vão provocar a eliminação rápida do combustível fóssil para aeronaves a jato, levando potencialmente a custos mais elevados por RPK em comparação com os níveis em 2019.

Em 2050 uma redução dos custos dos SAF juntamente com a melhoria continua da eficiência de combustível podem mitigar os aumentos de custos por RPK.

f. Investimentos para net-zero global 2050

Estima-se que os investimentos médios anuais entre 2022 e 2050 para que a aviação mundial chegue ao zero líquido sejam de cerca de 175 mil milhões de dólares (164 mil milhões de euros), dos quais cerca de 95% seriam necessários para a produção de combustível e ativos a montante.

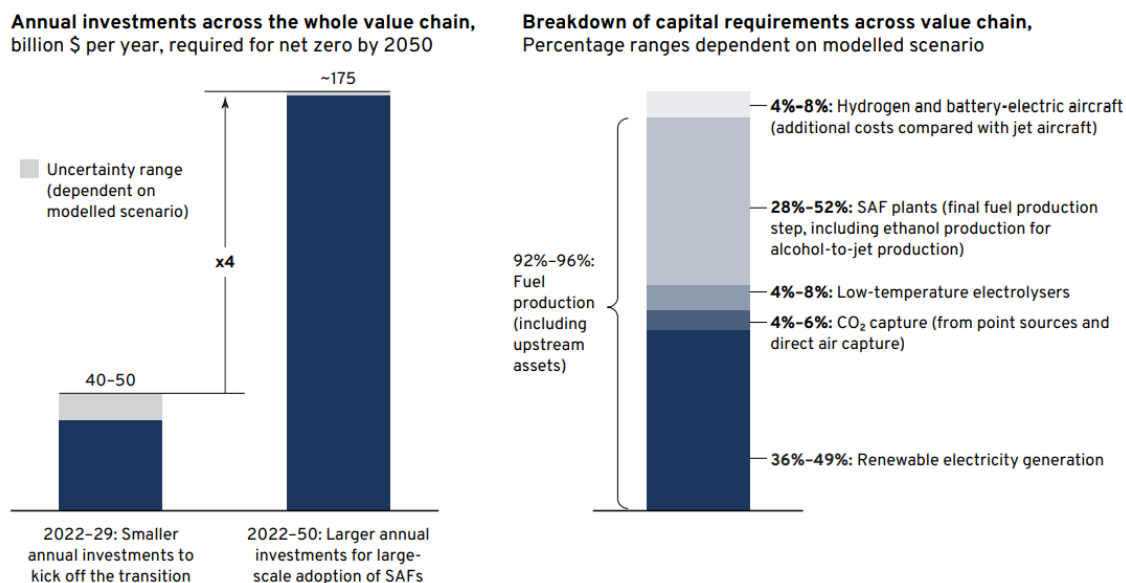


Figura 25 Investimentos aplicados
Fonte: (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022)

Observações:

Para atingir um crescimento *carbon-neutral* (manter os níveis de emissões de 2019) são necessários investimentos anuais médios de cerca de 40 a 50 mil milhões de dólares (38 a 47 mil milhões de euros) entre 2020 e 2030.

Deste investimento, 92% - 96% são aplicados na produção de combustíveis renováveis, incluindo ativos, sendo 28% - 52% para novas centrais de produção de SAF, 36% - 49% para novas capacidades de produção de eletricidade renovável.

Com valores apresentados de 4% - 8% observa-se necessidades de investimento são direcionadas para o desenvolvimento de aeronave elétricas, hidrogénio/elétricas e a hidrogénio e com percentagens idênticas os eletrolisadores¹⁴. Os restantes 4% - 6% direcionam-se para a captura de carbono.

¹⁴ Dispositivo que permite produzir hidrogênio por meio de um processo químico (eletrolise) capaz de quebrar as moléculas da água em hidrogênio e oxigênio através da eletricidade.

g. Cenários

Na visão geral a esta análise, os cenários onde é atingida a neutralidade conseguem manter-se sempre abaixo dos níveis de emissões registados em 2019.

Verifica-se a quota de SAF a aumentar 13% até 2030 no cenário PRU e 15% no cenário ORE.

Até 2040, o objetivo será reduzir metade dos níveis de emissões de 2019. Em ambos os cenários de neutralidade (PRU e ORE), os fornecedores de SAF, hidrogénio e eletricidade vão atingir 50% da quota de mercado da procura final de energia pouco antes de 2040.

Até 2050, o setor da aviação poderá reduzir as suas emissões de GEE em cerca de 95% por meio de medidas de descarbonização no setor, em comparação com os níveis de emissões de 2019, apesar das elevadas taxas de crescimento da procura.

Ambos os cenários mais avançados reduzem para metade as emissões acumuladas de GEE entre 2022 e 2050, em comparação com o cenário BAU, e as emissões residuais colocam a necessidade de sistemas de captura de carbono. Estes sistemas necessitam de obter um rápido desenvolvimento antes de 2050 de forma que sejam atingidas as metas do século.

Tabela 4 Perspetiva geral de cenários
Fonte: (“Making Net-Zero Aviation Possible” 2022)

	Business-as-Usual scenario (BAU)	Prudent scenario (PRU)	Optimistic Renewable Energy scenario (ORE)
Fuel efficiency improvements	Moderate: 1%/y	High: 1.5%/y in 2019, ramping up to 2%/y in 2030, then constant at 2% until 2050	
Renewable electricity costs	Moderate: \$50–\$200/MWh today, \$50–\$120/MWh by 2050		Low: \$30–\$150/MWh today, \$20–\$80/MWh by 2050
Power-to-Liquids technology	Medium cost: Driven by medium hydrogen cost reductions (\$3.5–\$6.5/kg H ₂ today, \$2.25–\$3.75/kg H ₂ by 2050)		Low cost: Driven by high hydrogen cost reductions (\$2–\$4/kg H ₂ today, \$0.7–\$1.3/kg H ₂ by 2050)
Sustainable biomass availability	High: Up to about 14 EJ of sustainable biomass feedstock available for aviation		Medium: Up to about 6 EJ of sustainable biomass feedstock available for aviation
Market entry of hydrogen and battery-electric aircraft	Late: Around 2040		Early: Around 2035
Maximum range of hydrogen fuel cell and battery-electric aircraft	Max. 1,000 km for battery-electric and 2000–2,500 km for hydrogen fuel cell aircraft (100–200 km in the near term)		
Maximum range of hydrogen combustion aircraft	Moderate: ~2,500 km for hydrogen combustion aircraft in the long term		High: No range limitation for hydrogen combustion aircraft in the long term
Maximum green premium before efficiency gains*	0%	37.5%	25%
Model logic	Selects technology with lowest GHG abatement costs among the options that lie within the maximum green premium range, considering a set of constraints		

3.3.2. Análise 2

A análise 2 foi realizada com base Graver et al. (2022), e tem como objetivo avaliar até que ponto as medidas podem reduzir as emissões acumuladas de dióxido de carbono (CO₂) da aviação global.

São desenvolvidos 3 cenários para a neutralidade carbónica em 2050, juntamente com um cenário base, onde são analisados 6 parâmetros relevantes para as metas (tráfego, tecnologia aeronáutica, operações, aeronaves com emissões zero, SAF, e incentivos económicos.

Cenário Base

Consiste na continuação do estado atual e utiliza as previsões de tráfego idênticas aos restantes cenários. Não considera a utilização de SAF e outras fontes de energia, melhorias operacionais, e medidas económicas para diminuir as emissões.

Cenário de Ação

Verifica-se os esforços por parte do governo e da indústria de forma de produzir novas tecnologias que limitem as emissões de CO₂ da aviação, de forma que em 2050 sejam registados valores inferiores a 2019.

Através de normas para a eficiência de novas aeronaves e investimentos em controlo de tráfego aéreo, são obtidos ganhos de eficiência de combustível até 2050, sendo assim reduzida a queima de combustível por RPK em mais de um terço (-36%) abaixo dos valores de 2019.

A partir de 2025 compreende-se um maior apoio aos SAF, o que permite o fornecimento de combustível em 2050. Consequentemente os preços dos combustíveis vão aumentar ligeiramente (+7%) em 2030, com um aumento de 60% acima do cenário Base. Estes preços mais elevados vão moderar ligeiramente o crescimento de tráfego.

Cenário de Transformação

Os esforços dos governos e da indústria afastam a aviação dos combustíveis fósseis a partir de 2035 e reduzem em quase metade o CO₂ da aviação em 2050, estabelecendo comparação com os valores de 2019.

As normas implementadas face à eficiência em novas aeronaves e os impostos sobre o combustível em operações domésticas e intra-UE reduzem em 40% (2019/2050) a queima de combustível.

Os investimentos da indústria em novos modelos de aeronaves a hidrogénio e aeronaves elétricas regionais permitem projetos viáveis de operações para 2035 e 2030, respetivamente. Através de mandatos agressivos, incentivos e impostos sobre os combustíveis espera-se a aceitação generalizada dos SAF, onde irá existir oferta capaz de responder à procura.

Os preços dos combustíveis aumentam de forma moderada (+17%) em 2030, e espera-se que continuem a aumentar até 2040, seguindo-se um decréscimo até 2050 à medida que se alcançam economias de escala para combustíveis a partir de eletricidade renovável (eletrecombustíveis¹⁵).

¹⁵ Utilização de eletricidade limpa para juntar o hidrogénio de água com o carbono de dióxido de carbono, o que resulta em combustível de hidrocarboneto.

Cenário de Inovação

Considera uma intervenção precoce, agressiva e sustentada por parte do governo que conduz a investimentos em aeronaves e fontes de energia zero emissões, atingindo o pico de utilização de combustível fóssil em 2025 e eliminando-o até 2050.

A implementação de padrões máximos de eficiência para novas aeronaves, impostos globais sobre os combustíveis e avanços na gestão do tráfego aéreo reduzem a queima de combustível em 2050 em 45% em comparação a 2019.

Neste cenário as aeronaves a hidrogénio começam a operar em 2035 e vão ser responsáveis por metade das vendas de aeronaves regionais e de *narrowbody* em 2050.

As taxas globais impostas sobre os combustíveis e as proibições de aeronaves alimentadas a combustíveis fósseis vão suportar a alta difusão dos SAF em 2050. Os preços dos combustíveis fósseis vão duplicar em relação ao preço base em 2045 e vão fixar-se num valor superior ao do cenário de Transformação.

a. Eficiência Tecnológica das Aeronaves

A nível de eficiência técnica nas aeronaves verificam-se modelos mais recentes que permitem a redução da queima de combustível.

A tabela 5 apresenta valores médios de melhoria na eficiência tecnológica da frota, tendo em consideração a rotação de frota.

Observa-se uma redução na energia, em megajoules (MJ) por pax/quilómetro, por meio da entrada de novas aeronaves mais recentes e eficientes nas frotas. Até 2035 espera-se uma melhoria significativa devido à rotação de frota, através da substituição de aeronaves mais antigas e menos eficientes por modelos mais recentes a serem desenvolvidos atualmente.

Assim os valores apresentados na tabela 5 assumem a introdução de novos tipos de aeronaves com níveis acelerados de eficiência no consumo de combustível, considerando valores cada vez mais elevados respetivos por cenário conduzindo cada vez mais a aeronaves com menor consumo de combustível e redução da intensidade energética.

É também possível verificar valores referentes a aeronaves de carga, onde as melhorias na eficiência técnica são constantes entre 2019-2050 sem que existam aceleração no ritmo de melhoria, e ligeiramente inferiores às melhorias das aeronaves de passageiros.

Tabela 5 Redução de intensidade de energia nas aeronaves através de melhorias tecnológicas nas aeronaves

Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
Passenger aircraft: -1.08% MJ/RPK p.a., 2019-2034 -1.15% MJ/RPK p.a., 2035-2050	Passenger aircraft: -1.08% MJ/RPK p.a., 2019-2034 -1.83% MJ/RPK p.a., 2035-2050	Passenger aircraft: -1.08% MJ/RPK p.a., 2019-2034 -2.16% MJ/RPK p.a., 2035-2050
Dedicated freight aircraft: -1.00% MJ/FTK p.a., 2019-2050	Dedicated freight aircraft: -1.25% MJ/FTK p.a., 2019-2050	Dedicated freight aircraft: -1.50% MJ/FTK p.a., 2019-2050

Observações:

No primeiro cenário observa-se uma redução de -1.08% MJ/RPK entre 2019-2034 e de -1.15% MJ/RPK entre 2035-2050 para aeronaves de passageiros. A nível de aeronave de carga a redução será de -1.00% MJ/FTK 2019-2050.

No segundo cenário verifica-se valores semelhantes ao cenário anterior entre na evolução até 2034, e reduzindo -1.83% MJ/RPK. Para aeronaves de carga os valores verificam-se em -1.25% MJ/FTK 2019-2050.

No terceiro cenário, a redução entre 2019-2034 mantém-se idêntica aos cenários anteriores, e com -2.16% MJ/RPK 2035-2050 para aeronaves de passageiros. As aeronaves de carga mostram -1.50% MJ/FTK 2019-2050.

b. Eficiência no Payload

O *Payload* refere-se à carga útil máxima transportada em cada voo, em termos de RPK quando mais próximo um voo estiver da sua capacidade máxima melhor será a sua eficiência.

No cenário Breakthrough todas as companhias aéreas atingem a eficiência útil com 90% da carga estrutural máxima, sendo o mais elevado do setor até 2050.

Já os cenários de Action e Transformation mostram-se menos ambiciosos com valores de 70% e 80% de carga útil estrutural máxima, respetivamente.

Em termos de redução de energia, verificam-se valores satisfatórios devido a fatores de carga passageiros mais elevados.

Tabela 6 Redução da intensidade de energia através de melhorias na eficiência de payload

Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
-0.2% MJ/RPK p.a., 2019-2050	-0.35% MJ/RPK p.a., 2019-2050	-0.5% MJ/RPK p.a., 2019-2050

c. Eficiência de Tráfego

Face a melhorias na eficiência do tráfego observam-se várias ferramentas que podem ser utilizadas para reduzir a utilização de combustível fóssil. Estes mecanismos passam por medidas na gestão da operação da aeronave em terra e gestão inteligente do tráfego aéreo.

Algumas destas medidas já estão a ser consideradas e implementadas pelos respetivos responsáveis, enquanto outros mecanismos mais ambiciosos ainda são vistos como realidades distantes, apesar de existirem pesquisas em desenvolvimento para a realização dos mesmos.

O efeito global da implementação e desenvolvimento destes novos métodos reflete-se na melhoria da eficiência de tráfego.

Existe uma redução na energia necessária por RPK derivado de avanços nas operações aeroportuárias, aéreas, e de aeronaves. A tabela 7 regista os valores de redução de energia nos três diferentes cenários.

Tabela 7 Redução de intensidade de energia através de melhorias na eficiência do tráfego

Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
-0.1% MJ/RPK p.a., 2019-2050		
No formation flying		Formation flying: -0.2% MJ/RPK in 2030 -0.7% MJ/RPK in 2040 -1.9% MJ/RPK in 2050

A tabela 7 reflete também dados relativos a voo de formação¹⁶, sendo o processo em que uma aeronave segue outra de modo a realizar poupanças na queima de combustível.

¹⁶ Semelhante ao percurso de dois veículos seguidos numa autoestrada.

Observações:

No primeiro e segundo cenário não são considerados os voos em formação (“formation flying”) e verificam uma redução de -0.1% MJ/RPK 2019-2050. O cenário mais avançado considera situações de formation flying com uma redução de -0.2% MJ/RPK em 2030, -0.7% MJ/RPK em 2040 e -1.9% MJ/RPK em 2050.

A Airbus (2021) encontra-se a explorar este método através do seu programa fello’fly que permite reduzir o combustível utilizado em voo, conduzindo a reduções de CO₂ a variar entre 2% a 9% por voo. Isto é possível através da cooperação entre companhias aéreas e o controlo de tráfego aéreo, estabelecendo uma relação ainda maior de cooperação.

No cenário Breakthrough aplica-se o voo em formação a 5% do tráfego global de passageiros em 2030, com um aumento de 50% em 2050. Este método não é aplicado a voos de carga, devido a um elevado volume de voos não programados. No caso de um possível avanço e inclusão de voos de carga no sistema de voos em formação seria possível aumentar a percentagem de redução de CO₂.

d. Aeronaves zero-emissões (ZEP)

Aviões com emissões zero (ZEP¹⁷) consistem numa tecnologia radical que utiliza como fonte de energia o hidrogénio e eletricidade.

Estes modelos permitem ultrapassar as limitações das aeronaves elétricas que devido ao peso das baterias são limitados a voos de curtas distâncias. Os modelos a hidrogénio (LH2) poderiam potencialmente satisfazer voos de pequeno a médio curso até 3400km numa primeira etapa.

Ainda não pode ser garantido do desenvolvimento e implementação bem-sucedida destes modelos de aeronaves, sendo que são excluídos no cenário Action e introduzidas de forma crescente nos cenários Transformation e Breakthrough. A introdução dos modelos a hidrogénio é representada por percentagens de novas entregas que vão substituir as aeronaves anteriores.

¹⁷ ZEP – Zero-Emission Planes

Pode-se estudar como exemplo o cenário Transformation em 2035 onde 12.5% das novas entregas de aeronaves *narrowbody* e regionais são consideradas movidas a hidrogénio. Este fator corresponde a metade dos fabricantes globais que introduzem um modelo LH2, representando assim um quarto das suas vendas.

Entende-se que os modelos a hidrogénio representam um máximo de 50% das entregas de novas aeronaves em 2050 no cenário mais avançado (Breakthrough).

Tabela 8 Previsões de aeronaves zero emissões
Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
Electric: None	Electric: 2030 entry-into-service 50% of new commuter aircraft, 2030 100% of new commuter aircraft 2050	Electric: 2030 entry-into-service 50% of new commuter aircraft, 2030 100% of new commuter aircraft 2050
Hydrogen: None	Hydrogen: 2035 entry-into-service 12.5% of new regional and narrowbody aircraft, 2035 25% of new regional and narrowbody aircraft, 2050	Hydrogen: 2035 entry-into-service 12.5% of new regional and narrowbody aircraft, 2035 50% of new regional and narrowbody aircraft, 2050
No direct hydrogen use	Hydrogen share (blue/green) 2035: 75% / 25% 2040: 50% / 50% 2050: 0% / 100%	Hydrogen share (blue/green) 2035: 50% / 50% 2040: 33% / 67% 2050: 0% / 100%

Observações:

De forma mais específica, verifica-se que no primeiro cenário não são consideradas aeronave elétricas e sem que exista utilização de hidrogénio.

No Transformation, espera-se a entrada de aeronaves elétricas em 2030, seguidas das aeronaves a hidrogénio em 2035, sendo que em 2050 prevê-se que o hidrogénio represente 25% das frotas regionais e de *narrowbody*.

O cenário Breakthrough considera a entrada de aeronaves elétricas a e hidrogénio ao mesmo tempo que o cenário Transformation, porém verifica a utilização de 50% de hidrogénio nas aeronaves regionais e *narrowbody* para 2050, o dobro comparado ao cenário anterior.

Nota: O impacto das emissões da produção de baterias não foi modelado neste estudo.

e. SAF – Sustainable Aviation Fuels

Em termos de combustíveis sustentáveis (SAF) verifica-se que estes são produzidos a partir biomassa ou fontes de energia renováveis, tendo como objetivo eliminar/reduzir uma parte significativa das emissões de CO₂ do setor.

Os SAF são compatíveis com as estruturas e motores utilizados atualmente, possibilitando uma mistura de 50% ao combustível convencional. Encontra-se em desenvolvimento a certificação para a utilização de SAF a 100% no motores atuais.

No entanto, os progressos na distribuição e difusão de SAF têm sido bastante demorados, sendo que em 2020 representavam cerca de 0.05% do fornecimento de combustível para a aviação. Espera-se que exista uma aceleração na distribuição destes combustíveis de forma a dar resposta às necessidades urgentes do setor.

Esta aceleração irá exigir uma cooperação eficiente entre as companhias aéreas, fornecedores de SAF e infraestruturas aeroportuárias de modo a satisfazer as necessidades de todas as partes envolvidas.

Tabela 9 Previsões de SAF
Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
2030 12 million tonnes biofuels (3% of fuel use) 2050 100 million tonnes biofuels 120 million tonnes e-fuels (50% of fuel use)	2030 23 million tonnes biofuels 2 million tonnes e-fuels (8% of fuel use) 2050 100 million tonnes biofuels 150 million tonnes e-fuels (80% of fuel use)	2030 46 million tonnes biofuels 5 million tonnes e-fuels (17% of fuel use) 2050 100 million tonnes biofuels 215 million tonnes e-fuels (100% of fuel use)
Average costs (avg. biofuel vs. e-fuel, \$/L) 2030: 1.81 / 1.79 2040: 1.98 / 1.59 2050: 2.03 / 1.26	Average costs (avg. biofuel vs. e-fuel, \$/L) 2030: 1.81 / 2.00 2040: 1.98 / 1.65 2050: 1.40 / 1.36	Average costs (avg. biofuel vs. e-fuel, \$/L) 2030: 1.81 / 2.00 2040: 1.36 / 1.72 2050: 1.40 / 1.52
e-fuel carbon (point source vs. DAC) 2030: 100% / 0% 2040: 67% / 33% 2050: 67% / 33%	e-fuel carbon (point source vs. DAC) 2030: 67% / 33% 2040: 58% / 42% 2050: 50% / 50%	e-fuel carbon (point source vs. DAC) 2030: 67% / 33% 2040: 46% / 54% 2050: 25% / 75%
Fuel carbon intensity (all scenarios, all years, g CO₂e/MJ)		
Jet A: 88.5		
Biofuels Used cooking oil HEFA: 14 Agricultural residues gasification-FT: 7.7 Forest residues gasification-FT: 8.3 Municipal solid waste gasification-FT: 39		Synthetic fuels e-kerosene (point source capture): 0.44 e-kerosene (DAC): 4.1

Observações:

Verifica-se no cenário Action a utilização de cerca de 12 milhões de toneladas de SAF (3% do combustível em uso) em 2030, com um aumento para 100 milhões de toneladas

em 2050, considerando a utilização de 120 milhões de toneladas de e-fuels (total de 50% do combustível em utilização).

O cenário Transformation, considera 23 milhões de toneladas de SAF e 2 milhões de toneladas de e-fuels, totalizando 8% do combustível em uso, em 2030. Para 2050 prevê-se uma utilização de 100 milhões de toneladas de SAF e 150 milhões de toneladas de e-fuels, com um valor de 80% do combustível em uso.

No cenário mais avançado considera-se 46 milhões e 5 milhões de toneladas para a utilização de SAF e e-fuels, respetivamente, com 17% o combustível em uso em 2030. Para 2050 observa-se 100 e 215 milhões de toneladas para os SAF e e-fuels, respetivamente, 100% da utilização.

Relativamente, é possível aos custos médios na comparação entre SAF e e-fuels é possível verificar oscilações entre os três cenários, assim como na análise ao e-fuel carbon.

f. Incentivos Económicos

As tecnologias com baixas emissões de carbono, incluindo os SAF e os modelos a registar as zero emissões, representam custos mais elevados em comparação a aeronaves convencionais operadas com combustível fóssil.

Deste modo, são essenciais políticas governamentais que apoiem a difusão de métodos mais sustentáveis, onde potencialmente poderia existir uma redução da diferença de preços entre combustíveis alternativos e fósseis. As taxas aplicadas sobre as emissões de carbono não se mostram ainda como incentivo suficiente para a transição para os SAF com os atuais custos.

É espectável que com o aumento da difusão dos SAF como resposta às políticas implementadas pelas várias entidades dentro do setor, exista uma redução dos custos associados ao SAF, continuando a aumentar o incentivo à sua utilização.

É necessário que as políticas destinadas ao SAF consigam apoiar os seus principais intervenientes, incluindo as companhias aéreas, onde os combustíveis representam uma parte significativa dos custos operacionais, infraestruturas aeroportuárias, responsáveis pela distribuição, e os fornecedores.

g. Mudança intermodal

Quando se trata de viagens aéreas de curta distância o transporte ferroviário de alta velocidade (HSR¹⁸) mostra-se como uma opção viável possibilitando a redução das emissões de CO₂ derivadas da aviação.

Esta opção mostra-se viável para os consumidores quando o tempo e o custo da viagem é comprável ou inferior, e quando o serviço ferroviário é frequente e viável. O desenvolvimento do HSR poderá competir com as viagens aéreas até 1000km, sendo considerado mais competitivo em viagens inferiores a 700/800km (inferior a 3 horas de tempo de viagem).

As estimas apontam que cerca de 7% do tráfego intra-europeu de curta e média distância pode ser substituído pelo HSR sem que exista aumento do tempo de viagem. Esta percentagem sobe para 17% se for considerado um aumento de 20% no tempo de viagem.

Tabela 10 Previsões da mudança intermodal

Fonte: (Graver et al. 2022)

Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
Domestic and intra-European routes of less than 750 km Number of passengers greater than 100,000 annually 20% traffic shift from air to rail, starting in 2030		

Com início em 2030, todos os cenários consideram uma transferência 20% do tráfego aéreo para o HSR, cerca de 100 000 passageiros anualmente, das rotas domésticas e intraeuropeias, ou inferiores a 750km.

A transição da procura para o HSR irá depender do desenvolvimento e melhorias das infraestruturas, sendo que atualmente ainda não existem opções ferroviárias a cobrir muitas das rotas aéreas de curta distância.

Para os percursos que já são viáveis através da via ferroviária, existem países europeu que já implementaram medidas de apoio ao transporte mais sustentáveis através da proibição de rotas de pequeno curso que podem ser substituíveis pelo HSR.

¹⁸ High Speed Rail

h. Observações finais

Após realizada a análise aos vários fatores dos diferentes cenários, é possível definir ideias finais sobre o assunto.

Primeiramente, os SAF verificam-se como um dos elementos-chave onde a sua implementação em grande escala irá conduzir ao contínuo aumento do preço do carbono, continuando a incentivar a transição do combustível fóssil para SAF. Este ponto pode-se observar em diferentes perspetivas de evolução.

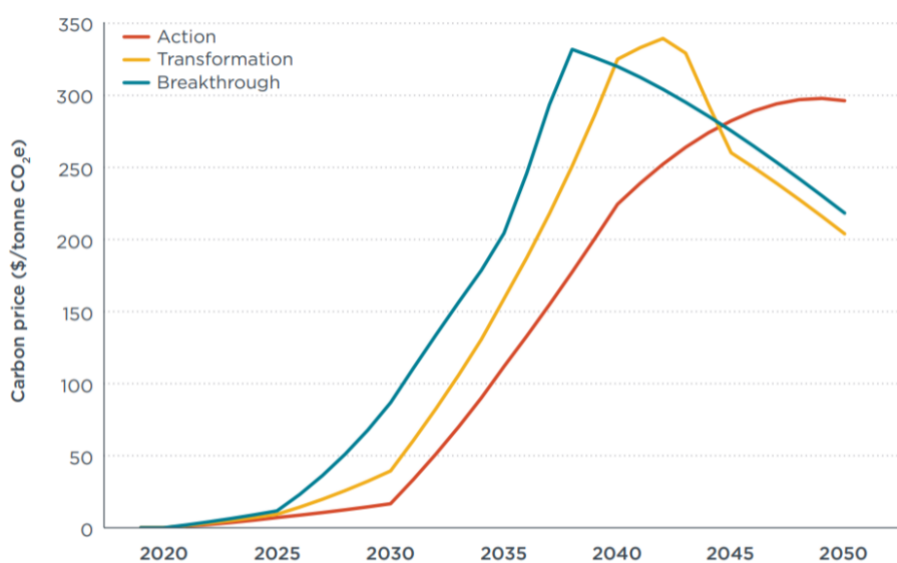


Figura 26 Evolução dos preços do carbono 2020-2050

Fonte: (Graver et al. 2022)

Observações:

No caso do cenário Action os preços do carbono aumentam gradualmente, continuando o seu crescimento até 2050, atingindo o equivalente a 300 dólares por tonelada nesse ano.

Nos cenários Action e Transformation o custo médio do combustível em 2050 é 60-65% mais elevado em comparação ao combustível convencional. No Breakthrough são 70% superiores aos valores do cenário Base. Em todos os casos são considerados os custos do carbono.

A custos mostram-se mais elevados no cenário Breakthrough do que no Action e Transformation devido a maiores volumes de SAF e à maior utilização de sistemas de captura de carbono para a produção de e-fuel.

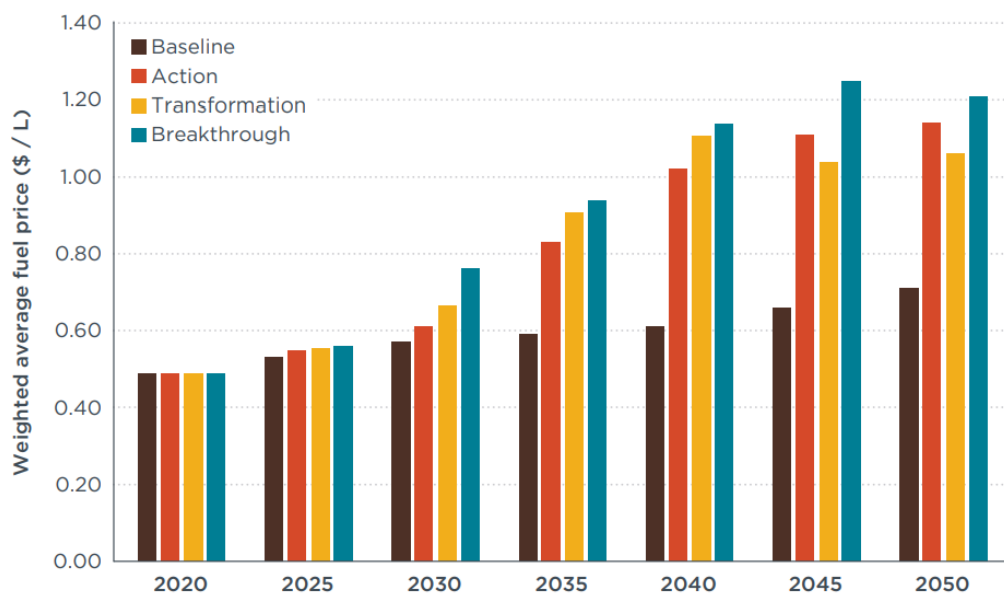


Figura 27 Efeitos do SAF nos preços do carbono e nos preços médios dos combustíveis

Fonte: (Graver et al. 2022)

Nota: A barra castanha representa o custo do Jet A1 (combustível convencional), uma vez que no cenário base não são considerados SAF.

Relativamente ao efeito do carbono no tráfego de passageiros é possível realizar uma análise da sua evolução com dados apresentados na figura 28.

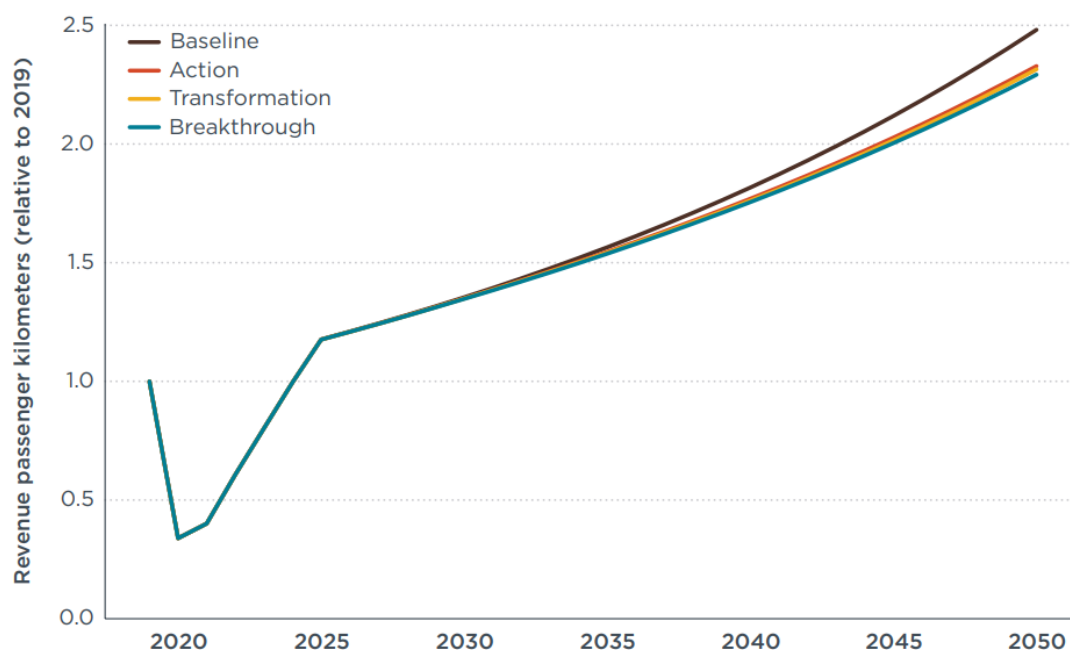


Figura 28 Efeito do preço do carbono no tráfego de passageiros
Fonte: (Graver et al. 2022)

Observações:

No caso Breakthrough para 2050 o tráfego aéreo de passageiros é 7% inferior devido a um aumento de 22% considerado no preço de voar para os passageiros, tendo em consideração um aumento de 70% nos custos com combustível, sendo estes valores comparados ao cenário Base.

Face à taxa de crescimento anual, os valores superiores do SAF incentivaram à redução do tráfego de passageiros de 3,0% por ano para 2,76% ao longo de trinta anos. A redução de RPK entre 2019 e 2050 é considerada de 2,5%.

Também como elemento-chave para a redução de CO₂ surge o desenvolvimento tecnológico, que no caso mais agressivo (Breakthrough) a aviação irá conseguir contribuir para o limite climático de 1,75°C.

Isto exige avanços agressivos nas tecnologias, incluindo a adoção total de SAF, avanços na eficiência de novas aeronaves com novas tecnologias de motores e estruturas de

aeronaves, desenvolvimento de novas tecnologias para aviões zero emissões (ZEP), e reduções significativas nos custos dos sistemas de captura de carbono.

Tabela 11 Necessidades de cada cenário

Fonte: (Graver et al. 2022)

Measure	Metric	Scenario 1: Action	Scenario 2: Transformation	Scenario 3: Breakthrough
Sustainable aviation fuel	2050 supply	220 Mt	250 Mt	315 Mt
	Multiple of 2020 supply ^a	2,800	3,100	3,900
New aircraft	Example technologies ^b	Hybrid laminar flow (empennage)	Natural laminar flow (wing)	Hybrid laminar flow (wing)
		Increased span	Adaptive compliant trailing edge	Active smart wing
		All composite aircraft	High temperature composites for engine components	Adaptive and morphing structures
		Unitized construction	Improved Geared Turbofan*	3D Preforms
		Geared turbofan*		Open rotor engine*
	Change in average fuel burn compared to 2015 starting in 2035	-28%	-38%	-42%
Traffic efficiency	Technologies needed	Satellite navigation		Advanced air traffic management to support formation flying
Zero emission planes	Technologies needed	—	Liquid hydrogen combustion propulsion	Mature manufacturing lines to produce more aircraft
			Lightweight cryogenic storage tanks	
			Infrastructure for hydrogen production, delivery, storage, and refueling	Scaling up of hydrogen infrastructure worldwide
			Electric charging infrastructure	Higher battery specific energy
	ZEP aircraft fleet share, 2050	—	10%	19%
Direct air capture	CO ₂ captured	120 Mt	190 Mt	470 Mt
	Cost reduction relative to 2020 ^c	-50%		

[a] 100 million L in 2020, per Mukhopadhyaya & Rutherford (2022).

[b] Source: Kharina et al., (2016), for single aisle aircraft. Technologies are cumulative across scenarios except where asterisked.

[c] Source: IEA, 2022.

Observações:

No Action são necessárias 220 Mt de SAF e melhorias tecnológicas da aeronaves, permitindo uma redução de 28% do consumo de combustível em 2050 (comparação aos valores de 2015). Este cenário considera a navegação por satélite e exclui a propulsão a hidrogénio. Através de sistema de captura direta do ar será possível capturar 120 Mt de CO₂.

No cenário intermédio considera-se 250 Mt de SAF e melhorias tecnologias, reduzindo 38% do combustível. Assim como o cenário anterior considera a navegação satélite. Verifica a entrada de aeronaves a registar as zero emissões com propulsão a hidrogénio. Os sistemas de captura apresentam valores de 190 Mt de CO₂ capturado.

O cenário mais avançado regista 315 Mt de SAF também com melhorias tecnológicas, que conduz a uma redução de 42% do consumo de combustível. Considera sistemas avançados de gestão de tráfego aéreo. Verifica também a entrada de aeronave zero emissões a hidrogénio. A captura de carbono regista valores de 470 Mt.

A figura 29 reflete a utilização total de energia por tipo de combustível, incluindo a energia necessária para produzir hidrogénio e para a captura de carbono, estabelecendo uma comparação com a energia do combustível (linha contínua) e produção de energia renovável de 2020 a 2050 (linha não contínua).

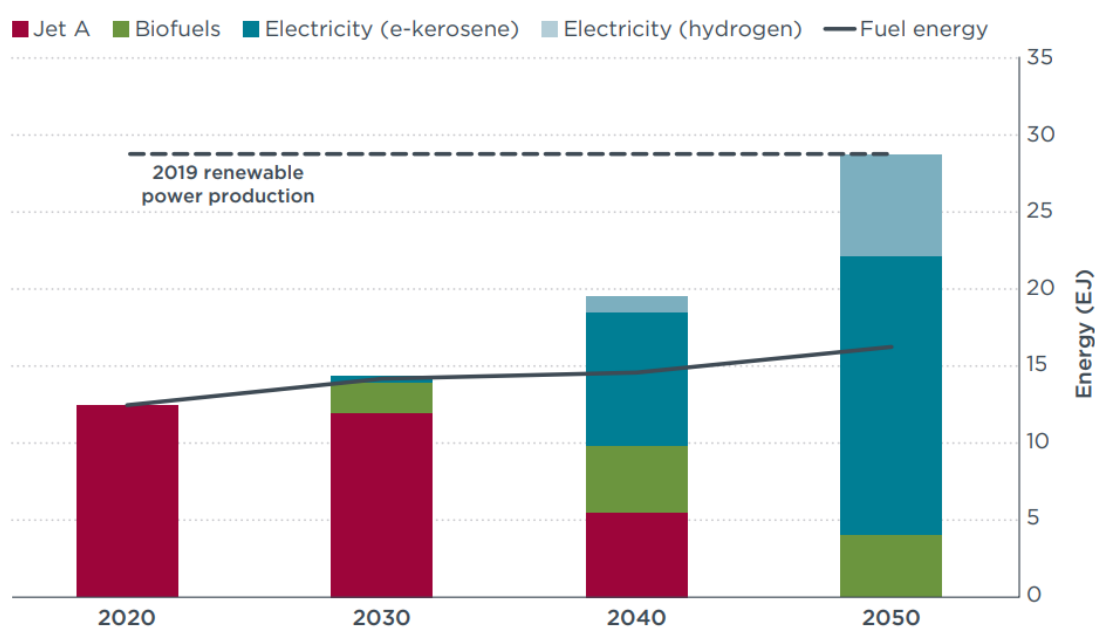


Figura 29 Energia do combustível e ciclo de vida energético por tipo sobre o cenário Breakthrough 2019 vs. Produção de energia renovável, 2020-2050

Fonte: (Graver et al. 2022)

Nota: a linha contínua representa a energia do combustível.

Observações:

Verifica-se que o caso mais avançado (Breakthrough) prevê um aumento substancial na utilização de energia primária e eletricidade renovável em relação à linha base.

Relativamente à eletricidade estimada utilizada para gerar combustíveis para a aviação verifica-se um aumento de zero em 2020 para 25 EJ 2050, aproximando-se da produção global de energia hidráulica, eólica, solar, e geotérmica em 2019.

Quando a energia dos combustíveis para a aviação atingir 16 EJ em 2050, será necessário adicionar 12,5 EJ de energia para produzir hidrogénio e carbono para os combustíveis sintéticos, sendo este valor considerado após perdas.

i. Comparação com outros estudos

De forma a estabelecer uma análise objetiva é possível comparar os valores obtidos por Graver et al. (2022) e pela ATAG (2021) (Anexo 1).

Tabela 12 Comparação Cenário Breakthrough vs ATAG Cenário 1

Fonte: (Graver et al. 2022)

	This analysis: Breakthrough^a	Waypoint 2050: Scenario 1^b
2050 annual emissions	70 Mt	With offsets: 0 Mt Without offsets: 140 Mt
2050 energy use	16 EJ	25 EJ
Total reduction from Baseline, 2050 annual emissions	97%	With offsets: 100% Without offsets: 93%
2020-2050 cumulative emissions	22.7 Gt	With offsets: 19.6 Gt
Cumulative emissions temperature pathway	1.75°C	With offsets: 1.78°C (ICCT estimate)
Share of emission reductions, 2050	Technology: 18% Operations: 17% Fuels: 62% Demand change: 4%	Technology: 22% Operations: 10% Fuels: 61% Offsets: 7%
Zero-emission plane energy share, 2050	Hydrogen: 22% Electricity: 0.01%	Hydrogen: 20% Electricity: 2%

[a] WTW basis. [b] Modified TTW basis.

Observações:

A nível de emissões anuais para 2050 o cenário Breakthrough regista 70 Mt, já a ATAG, num cenário equivalente, mostra 0 Mt considerando sistema de compensação (offsets) e 140 Mt sem offsets. Face à energia utilizada, Breakthrough regista 16 EJ e ATAG 25 EJ.

Observando a redução total de emissões para 2050 a partir de um cenário base, o Breakthrough verifica uma redução de 95% enquanto a ATAG refere 100% de redução com offsets e 93% sem offsets.

Nas emissões cumulativas 2020-2050, observa-se 22.7 Gt e 19.6 Gt (com offsets) do Breakthrough e da ATAG, respetivamente.

Em valores de temperatura, a ATAG mostra valores mais elevados (1.78°C) em comparação ao Breakthrough (1.75 °C), porém bastante semelhantes, assim como nos restantes fatores em estudo.

Nos vários elementos para a redução das emissões, o Breakthrough identifica uma redução de 18% por meio de tecnologias, 17% nas operações, 62% nos combustíveis e 4% em alterações na procura. A ATAG considera 22% em tecnologias, 10% nas operações, 61% nos combustíveis e 7% através de offsets.

No último elemento em comparação, no Breakthrough as aeronaves zero emissões a hidrogénio representam 22% e as elétricas apenas 0.01%; a ATAG regista 20% para os modelos a hidrogénio e 2% para as elétricas.

Esta comparação permite compreender que existe um percurso singular que a neutralidade carbónica da aviação, sendo que diferentes proporções na redução de emissões a nível tecnológico, operações e combustível permitem alcançar resultados semelhantes e significativos para a indústria.

A tabela 13 estabelece uma comparação entre os valores Breakthrough e do Cenário Integrado LTAG IS3¹⁹ (Anexo 2) da ICAO (n.d.).

Tabela 13 Comparação Cenário Breakthrough vs ICAO IS3
Fonte: (Graver et al. 2022)

	This analysis: Breakthrough^a	ICAO LTAG: IS3^b
2050 annual emissions	42 Mt	203 Mt
2050 energy use	10 EJ	17 EJ
Total reduction from Baseline, 2050 annual emissions	97%	87%
2021-2050 cumulative emissions	13.6 Gt	12 Gt
Cumulative emissions temperature pathway	1.75°C	1.75°C (ICCT estimate)
Share of emission reductions, 2050	Technology: 15% Operations: 17% Fuels: 65% Demand Change: 3%	Technology: 21% Operations: 11% SAFs: 55%

[a] WTW basis. [b] Modified TTW basis.

¹⁹ Mais avançado, permitindo uma comparação viável.

Observações:

A nível de emissões anuais em 2050, o Breakthrough regista 42 Mt, já o cenário da ICAO regista valores de 203 Mt. Na energia utilizada observa-se 10 EJ para o Breakthrough e 17 EJ na ICAO. Nas emissões cumulativas 2021-2050 verifica-se 13.6 Gt e 12 Gt, respetivamente. Face à temperatura tanto o Breakthrough como a ICAO registam 1.75°C.

Relativamente à redução nas emissões para 2050, a ICAO (n.d.) mostra 21% de redução nas tecnologias, 11% nas operações e 55% através da utilização de SAF, em comparação ao Breakthrough com 15% nas tecnologias, 17% nas operações, 65% pela utilização de SAF e 3% com alteração na procura.

Esta comparação permite compreender a semelhança nas emissões cumulativas emergentes das duas análises, porém sobressai também a diferença acentuada nas emissões em 2050. Em parte, este fator pode ser explicado pela mistura de combustíveis, mas com diferentes suposições sobre as melhorias na eficiência.

No cenário mais avançado da ICAO (Breakthrough), o hidrogénio surge como uma fonte de energia significativa, podendo atingir até os 18% como fonte de alimentação em 2050. Simultaneamente o Jet A1 será gradualmente eliminado até 2040 na análise da ICAO, enquanto no Breakthrough permanecerá no sistema até 2049.

O cenário desenvolvido pela ICAO não consegue atingir o seu objetivo de 2% da melhoria anual da eficiência do combustível. No caso mais avançado (inclui o hidrogénio), as melhorias anuais da eficiência energética são de 1.55% a 1.76% até 2050.

Por outro lado, o cenário Breakthrough atinge uma melhoria de eficiência energética de 2% por ano até 2050.

3.4. Conclusão do desenvolvimento

Segundo a (ATAG 2015a) a indústria tem implementadas medidas significativas face às necessidades ambientais. Assim, já foi possível evitar 8.5 mil milhões de toneladas de

emissões de CO₂ (à data de publicação) desde 1990 e reduzir para metade o consumo de combustível por tonelada-quilómetro.

Já foram desenvolvidos diversos novos tipos de aeronaves e respetivos motores eficientes em termos de combustível, mantendo-se vários novos modelos em desenvolvimento para entrada em futuras rotas.

As companhias aéreas aplicam grandes investimentos sobre o seu desenvolvimento sustentável, com as empresas de gestão de tráfego aéreo e as empresas aeroportuárias a desenvolverem ações de colaboração. Isto permite estabelecer objetivos ambiciosos de forma a continuar a implementar medidas com resultados a longo prazo.

Porém trata-se de um setor fortemente regulamentado, criando limitações e dificuldades a algumas das entidades constituintes. Para contrariar este fator é essencial acelerar a implementação de ações de colaboração, construindo um ambiente de apoio a nível de decisões políticas. Deste modo será possível desenvolver uma regulamentação inteligente através da ponderação rigorosa de custos e benefícios.

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resposta ANA Aeroportos de Portugal (VINCI Group)

As políticas e objetivos definidos pela ANA, assim como a sua estratégia interna, apresentam foco no desenvolvimento sustentável? Quais as metas internas definidas?

“Em 2023, a ANA deu um passo essencial no estabelecimento do novo ciclo para a sustentabilidade da Empresa, em linha com a política do grupo VINCI. A nossa visão do setor aeroportuário em Portugal é ligar e posicionar Portugal como um destino de qualidade, para turismo e negócios, promovendo o desenvolvimento nacional e local de forma sustentável. Nesse sentido, assumimos que a nossa missão é promover uma gestão aeroportuária de excelência, gerindo de forma eficiente as infraestruturas aeroportuárias, ligando Portugal ao mundo e contribuindo para o desenvolvimento económico, social e cultural das regiões onde operamos; oferecer aos clientes um serviço de qualidade, criando valor para o acionista e garantindo elevados níveis de qualificação profissional e motivação dos seus colaboradores, ligados ao ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestruturas.

Na esfera da nossa responsabilidade direta e no âmbito da mobilidade positiva, a ANA assume como ambições prioritárias:

- GARANTIR A EXCELÊNCIA AMBIENTAL

Reduzir as emissões diretas e indiretas de Gases com Efeito de Estufa, promover a economia circular, o uso sustentável da água, a mobilidade sustentável, monitorar e minimizar o ruído inerentes à operação e preservar a biodiversidade, ODS 13 - Ação Climática.

- Ser UM EMPREGADOR DE REFERÊNCIA

Atrair, reter e promover o desenvolvimento e a formação dos colaboradores, gerando oportunidades para todos, incentivando a intergeração e a partilha de conhecimentos e garantindo as melhores condições de saúde, segurança e bem-estar, ODS 8 – Trabalho digno e crescimento económico.

- DESEMPENHAR UM PAPEL RELEVANTE NO SUCESSO DOS TERRITÓRIOS

Contribuir para a prosperidade do país, regiões e comunidades onde se localizam as nossas infraestruturas aeroportuárias, por meio de um desempenho financeiro consolidado e incentivando cadeias de valor resilientes, ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis.

- *Por outro lado, e no domínio da cooperação e porque conscientes que só em articulação estreita com os nossos stakeholders podemos almejar contribuir efetivamente para o desenvolvimento sustentável das nossas comunidades, adotamos o objetivo de ACELERAR A TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA DE TRANSPORTE AÉREO - promovendo colaborações no setor da aviação e na comunidade aeroportuária com vista à recuperação económica e transição ambiental, ODS 17 – Parcerias para a implementação dos objetivos.*

Assim, e para cada ambição definida foram concluídos os planos de ação, onde foram definidos objetivos, metas, medidas e KPI. Foram criadas Task Forces, definidos Team Leaders e foi dado início à implementação das medidas constantes nos referidos Planos de Ação.

Foi ainda publicado o primeiro relatório do novo ciclo de sustentabilidade da atividade ANA para 2022, de acordo com o referencial Global Reporting Initiative (GRI), tendo este sido objeto de verificação externa. Este documento pode ser consultado em:

<https://www.ana.pt/pt/institucional/publicacoes-e-relatorios/relatorios-de-desempenho-ambiental>.

Adicionalmente, ver o Plano de Ação do Clima 2021-2030, publicado no site da ANA: www.ana.pt/sites/default/files/2023-10/Plano%20de%20A%C3%A7%C3%A3o%20Clima%202021_2030.pdf

**A ANA tem implementados projetos de cooperação com outras entidades do setor?
Quais as entidades integradas nestes projetos e qual o seu papel?**

- *“Planos de Parceria com Stakeholders, no âmbito da estratégia de neutralidade carbónica (ver ANA’s Decarbonization Roadmap publicado na pasta da ACI*

Europe

–

[https://www.aci-](https://www.aci-europe.org/downloads/content/Roadmap_NETZERO_ANA_2030.pdf)[europe.org/downloads/content/Roadmap_NETZERO ANA 2030.pdf](https://www.aci-europe.org/downloads/content/Roadmap_NETZERO_ANA_2030.pdf)).

- No site da ANA são indicados alguma parcerias para a Biodiversidade: <https://www.ana.pt/pt/institucional/ambiente-e-sustentabilidade/os-nossos-compromissos> e <https://www.ana.pt/pt/institucional/ambiente-e-sustentabilidade/biodiversidade>.
- Protocolo de cooperação estratégica com a QUERCUS – Associação Nacional de Conservação da Natureza, que visa aumentar o compromisso da ANA para com a proteção da natureza, do ambiente e da biodiversidade, através do desenvolvimento e implementação de um plano anual de atividades colaborativas.
- Atendendo à importância das abelhas enquanto polinizadores, foi instalado um Apiário Sentinela no Aeroporto da Madeira (2023) e no Aeroporto de Ponta Delgada (2022), em colaboração com os Serviços Regionais de Agricultura. Durante o período de junho a outubro de 2023, foi ainda desenvolvido, nas proximidades do Aeroporto de Ponta Delgada, um trabalho de prospeção do escaravelho da palmeira pelos Serviços de Agricultura em colaboração com a ANA. Esta ação visou proteger as palmeiras desta espécie invasora e salvaguardar o ecossistema e a agricultura na região.
- Na procura pelo desenvolvimento de novos projetos, no âmbito da estratégia ambiental da VINCI Airports, e dos compromissos assumidos no Act4Nature, a par com a minimização do risco de ocorrência de birdstrikes, dos serviços eco sistémicos e, simultaneamente, com foco na captação de carbono para compensação das emissões ANA, foi estabelecida uma parceria com o CCMAR/UAlg, entidade que integra um consórcio de instituições de investigação científica, líder na investigação das pradarias marinhas na europa. Esta parceria tem como objetivo desenvolver o projeto "RestoreSeagrass", onde se pretende restaurar uma área da Ria Formosa com pradaria marinha (168ha), com o apoio da ANA.
- O Aeroporto Gago Coutinho (em Faro) participa no Projeto CED (Capturar – Esterilizar – Devolver), em parceria com a PRAVI.org, com o intuito de minimizar e controlar a população de gatos assilvestrados no perímetro do aeroporto.

- *Os aeroportos dos Açores participam todos os anos na campanha SOS Cagarro, onde os seus colaboradores participam de forma ativa no resgate dos cagarros encontrados caídos nos Aeroportos, entregando-os aos Serviços de Ambiente, para posterior libertação durante o dia, junto ao mar, onde vão iniciar a sua primeira grande migração anual para os mares do Atlântico Sul ou para as zonas produtivas do Atlântico Noroeste.”*

Quais os assuntos onde a ANA sente que poderia apresentar uma maior abertura para cooperação com outras entidades no sentido do desenvolvimento sustentável global do setor?

“A ANA está a equacionar alargar os âmbitos das Parcerias com Stakeholders (incluindo fornecedores) para as restantes áreas ambientais, por forma a aumentar sinergias e oportunidades e alargar as boas práticas ambientais preconizadas a todo o universo aeroportuário.”

Nomeando cada elemento de intervenção direta com a ANA, como poderiam estas entidades ajustar-se de modo a contribuir para os objetivos da ANA, sem que sejam comprometidos interesses individuais e tendo em consideração as limitações de mercado?

“A ANA, no âmbito das Parcerias com Stakeholders, já desenvolveu Planos de Parceria e assinou Commitment Statements para a redução da sua pegada de carbono. Estes Planos não envolvem metas de redução específicas para as terceiras partes, mas envolvem compromissos com um conjunto de ações contantes nos referidos Planos de Parceria. A melhor forma de envolver os terceiros nos compromissos ambientais da empresa, consiste em envolver diretamente os stakeholders na construção dos Planos de Parceria e dar-lhes a liberdade de selecionarem as medidas com as quais se querem comprometer. Foi esta metodologia de processos participativos, que permitiu ter Commitment Statements com mais de 35 entidades.”

Quais as principais dificuldades que a ANA enfrenta no desenvolvimento sustentável do setor? O que já se encontra implementado para ultrapassar estes desafios e o que ainda pode ser desenvolvido nesta vertente?

“Este caminho do aprofundamento da integração plena da sustentabilidade no ADN empresarial, não é isento de desafios. A concretização deste objetivo defronta-se com um contexto multifacetado: o pós-pandemia e seus efeitos no setor da aviação, a instabilidade decorrente do confronto entre a Rússia e a Ucrânia, o crescimento económico (ou a falta deste e a eventual recessão a curto prazo), a globalização da produção e do consumo que hoje se reflete nos problemas das cadeias de abastecimento e logísticas, entre outros. Em paralelo, temos uma sociedade super conectada e integrada nos media sociais o que se traduz num mundo cada vez mais transparente e em que o papel e atuação efetiva de cada um, sejam cidadãos, comunidades, empresas, etc. é visto e avaliado por todos de forma imediata.

Por isso, é de todo o interesse que a ANA esteja envolvida num movimento global de trazer a temática da sustentabilidade para a ordem do dia. Assim, consciente dos desafios atuais e futuros e da inevitável transformação do setor aeroportuário, o nosso papel e propósito é, como “Facilitador”, trabalharmos e coordenarmos os esforços da comunidade aeroportuária para um melhor desempenho coletivo em sustentabilidade, indo além de nossos impactos diretos e participando ativamente da ação coletiva necessária hoje: juntos para uma mobilidade positiva. É por isso que definimos como uma das nossas ambições do novo ciclo da estratégia de sustentabilidade, apoiar a transição do setor da aviação, só possível através do estabelecimento de parceiras e ações conjuntas com os vários intervenientes e stakeholders do universo da aviação.”

A ANA considera que as várias entidades intervenientes do setor funcionam como uma sinergia para as metas sustentáveis?

“Dos contactos que têm vindo a ser desenvolvidos junto dos stakeholders, verifica-se que existem diferentes estágios de maturidade relativamente às estratégias de sustentabilidade das diversas empresas da área aeroportuária e aviação. Assim, e embora um número muito alargado de entidades se mostre disponível e, de alguma

forma, sensibilizadas, para colaborar com a ANA no alcance das suas metas de redução de carbono e de sustentabilidade, o seu contributo real ainda é diferenciado.”

A ANA considera que os interesses individuais de uma entidade (ex: Aeroportos; Controlo de Tráfego Aéreo) podem colocar limitações ao desenvolvimento sustentável de outra (ex: Companhias Aéreas)? Se sim, como podem ser ultrapassadas as limitações/barreiras de interesses?

“De alguma forma, não são diretamente os interesses individuais que podem dificultar ou limitar o caminho do desenvolvimento sustentável. A maior dificuldade encontra-se na capacidade de abrir cada uma das empresas para o exterior e de trabalhar de forma mais próxima e colaborativa com os seus stakeholders, limitando, desta forma, o atingir de resultados mais impactantes para o desenvolvimento sustentável de cada uma das entidades em particular e da aviação em geral. Olhando para os processos colaborativos que a ANA tem tentado desenvolver com os seus parceiros, a maior limitação para potenciar estes processos colaborativos, centram-se grandemente na escassez de recursos humanos, estando os mesmos mais centrados nas tarefas internas e nos resultados individuais de cada empresa.”

Quais os fatores que a aviação deve ter como foco de investimento de modo a promover um desenvolvimento sustentável?

“A descarbonização da aviação é um dos grandes desafios que atualmente o sector enfrenta. A necessidade de investimento em novas tecnologias e a procura de novas formas de energia, tais como o Sustainable Aviation Fuel (SAF) ou o hidrogénio, é significativa. A própria União Europeia encontra-se, atualmente, a definir estratégias e legislação que aposte numa transferência de boas práticas, para obrigações legais.

Só mediante a aposta na inovação ambiental, na sua mais ampla e variada abordagem (focada em novos processos, novos materiais, novas tecnologias) é que o setor da aviação pode efetivamente contribuir para o desenvolvimento sustentável e enfrentar com sucessos os desafios que o futuro coloca, por exemplo na área das alterações climáticas. E esta inovação ambiental só pode efetivamente dar frutos de resultar de uma procura forma articulada, entre todos os stakeholders deste setor. De facto, para

uma difusão alargada, por exemplo, do uso de SAF nas aeronaves será necessária uma correta articulação entre produtores de SAF, criação de modalidades de disponibilização do mesmo por parte dos aeroportos às aeronaves, e do seu consumo efetivo nas várias deslocações aéreas. De igual modo, a desmaterialização dos processos de processamento dos passageiros só é possível com a integração de novas tecnologias, mas também de partilha e articulação entre as várias autoridades envolvidas (AIMA, Aeroporto, Companhias Aéreas), para dar outro exemplo.”

Qual a opinião da ANA face à utilização de SAF em larga escala para um futuro próximo, seguido de novas tecnologias radicais (aeronaves elétricas e propulsão a hidrogénio) a longo prazo? O que é viável e quais as barreiras à sua implementação? Como outras entidades podem contribuir para aumentar estas vantagens e reduzir limitações existentes?

“Tal como referido acima, a única forma de caminharmos para a descarbonização do setor, consiste na procura de tecnologias que permitam a utilização de combustíveis alternativos ao JET. A ANA, ao assumir uma ambiciosa estratégia de descarbonização, não apenas das suas emissões diretas, mas também das suas emissões de âmbito 3, e tendo como ambição a acreditação de todos os seus aeroportos no nível 5 do Airport Carbon Accreditation (os Aeroportos de Ponta Delgada, da Madeira e de Beja já se encontram neste nível), deve preocupar-se e acompanhar a evolução destas soluções junto de várias entidades. Essa estratégia tem vindo a ser assumida pela empresa, tendo, inclusivamente, vindo a participar em vários projetos de inovação nestas áreas, como por exemplo, os projetos GOLIAT, IMGHyNE, H2 Vector.”

A regulamentação/legislação poderá constituir um fator impulsionador ou uma barreira ao desenvolvimento sustentável do setor aeronáutico?

“A legislação, quando bem definida e estruturada, poderá ser um motor acelerador de práticas sustentáveis, principalmente quando se verifica que o caminho das boas práticas não estão a ser suficientes para a obtenção dos resultados nacionais/ europeus definidos.”

A regulamentação/legislação poderá criar barreiras ao desenvolvimento de estratégias de cooperação entre diferentes entidades?

“Não existe experiência interna que permita aferir que a regulamentação/legislação cria barreiras ao desenvolvimento de processos participativos e estratégias de cooperação entre stakeholders.”

A aviação será capaz de aplicar investimentos sobre os fatores essenciais (desenvolvimento tecnológico, sistemas de captura de carbono, melhorias nas operações e infraestruturas (incluindo otimização da gestão de tráfego aéreo e operações aeroportuárias), e utilização de SAF em larga escala) de forma a reduzir as emissões de CO₂ enquanto se assiste a um contínuo aumento do tráfego aéreo?

“O sector da aviação está a ser cada vez mais pressionado por várias entidades (governamentais, associações do setor, entre outros), a reconhecer a inevitabilidade da importância da descarbonização do sector e a tomar medidas concretas que contribuam para esse caminho global.”

Podem ser desenvolvidas melhorias entre entidades (companhias aéreas; aeroportos; gestão de tráfego aéreo; reguladores; entidades internacionais; governos) de forma a desenvolver uma estratégia única de cooperação interna da aviação comercial, eliminando barreiras e lacunas, de modo a impulsionar uma evolução eficiente para as metas sustentáveis?

“O caminho será sempre a construção de processos participativos. Contudo, ainda temos um longo caminho a percorrer, por forma a tornar estas metodologias uma realidade generalizada, quer no setor da aviação, quer a nível global.”

Na visão da ANA, quais as principais vantagens, desvantagens e limitações no desenvolvimento de uma estratégia única de desenvolvimento sustentável para 2050?

“As estratégias não são, necessariamente comuns. As metas devem ser as mesmas (ex: Netzero até 2050), mas a forma como lá se chega pode ser diferenciado. Contudo, dentro de um determinado sector, o conjunto de medidas disponíveis acaba sempre por ser limitado, sendo as soluções encontradas muito próximas entre as diferentes empresas. A diferenciação é conseguida de forma global, quando cada sector implementa a sua própria estratégia, alcançando, idealmente, o objetivo comum.”

Na perspetiva da ANA a aviação comercial tem a capacidade de atingir a neutralidade carbónica (igualar as emissões de CO₂ produzidas às que o setor é capaz de eliminar) até 2050 pelos países desenvolvidos, e nos anos seguintes pelos países em desenvolvimento?

“A ANA já é neutra em carbono, e tem como objetivo ser Netzero até 2030. A estratégia para ser neutro em carbono, passa por eliminar as emissões desnecessárias, reduzir as emissões associadas à atividade, através da implementação de uma estratégia e plano de atuação estruturados e compensar as emissões residuais, i.e., as emissões que, num determinado ano, não conseguiu evitar. Tal como a ANA, o setor da aviação nos países desenvolvidos, são capazes de chegar à neutralidade carbónica, desde que assuma essa estratégia e esteja disposto a investir neste sentido, quer com recursos financeiros, mas também com recursos humanos. Nos países em vias de desenvolvimento, em que as carências financeiras são significativas, tal como já foi grandemente defendido e, de alguma forma reconhecido nas últimas COPs pelos países desenvolvidos, tal só será possível concretizar com o apoio (financeiro) destes últimos.”

Observações à resposta da ANA Aeroportos de Portugal (Grupo VINCI)

A ANA Aeroportos de Portugal refere que apenas é possível contribuir efetivamente para o desenvolvimento sustentável através da colaboração estreita com os seus stakeholders. Deste modo promove parcerias de dentro do setor e com a comunidade aeroportuária para a recuperação económica e transição energética, permitindo isto acelerar a transição energética da indústria do transporte aéreo. Assim apresenta vários objetivos e uma estratégia que inclui a colaboração com o setor.

Assim, verificam-se várias parcerias com os seus stakeholders com os objetivos direcionados para a neutralidade carbónica. Estes resultados são observados ao longo dos vários aeroportos sobre a sua gestão e com várias entidades regiões e nacionais.

De forma a aumentar ainda mais os seus horizontes a nível de cooperação a ANA refere que considera alargar as suas parcerias com os stakeholders, incluindo os seus fornecedores, para aumentar sinergias e aproveitar possíveis oportunidades, alargando as boas práticas no desenvolvimento sustentável.

Deste modo, desenvolveu Planos de Parceria para a redução de carbono e através da inclusão dos stakeholders nestes planos, oferece-lhes a liberdade de selecionarem onde querem participar. Este método utilizado já permitiu à ANA estabelecer parcerias com mais de 35 entidades.

A nível de desafios no desenvolvimento sustentável a ANA refere dificuldades num contexto multifacetado, considerando o pós-pandemia, instabilidade provenientes do confronto entre a Rússia e a Ucrânia, instabilidade no crescimento económico enfrentando um possível período de recessão a curto prazo, e outras questões derivadas da produção globalizada. Por outro lado, refere o mundo globalizado como um vantagem que permite, de certo modo, contrabalançar estes desafios.

Neste assunto, refere também a necessidade de colaboração dentro do setor para ultrapassar os desafios apresentados, mostrando a ANA um papel de “agente facilitador” no desenvolvimento.

Face ao setor como uma sinergia, é referida a existência de diferentes estágios de maturidade nas estratégias de sustentabilidade entre as entidades constituintes do

setor. Apesar de existir um número significativo de entidades dispostas a estabelecer estratégias de cooperação com a ANA, ainda existe um número resistente.

Relativamente às limitações colocadas por determinadas entidades a outras com diferentes interesses, a ANA refere que a maior dificuldade está na abertura das entidades para trabalhar de forma mais próxima e colaborativa, o que limita resultados ao desenvolvimento sustentável. Sobre si, refere que a sua maior limitação como gestor aeroportuário na cooperação com entidades com diferentes interesses, está na falta de recursos humanos, sendo que os recursos existentes encontram-se focados nos resultados individuais.

Face ao foco de investimento da aviação, a ANA refere as novas tecnologias e a procura por novas fontes de energia, incluindo os SAF e o hidrogénio. Refere também o peso significativo do papel da União Europeia na transição de boas práticas para obrigações legais.

Entende-se, portanto, que será através da inovação que será possível aplicar um desenvolvimento sustentável, exigindo isto uma cooperação entre os vários membros.

Verifica-se o interesse no acompanhamento das entidades diretamente relacionadas à utilização de SAF a curto prazo e outras fontes de energia (hidrogénio e elétrico) a longo prazo, referindo ser este o caminho para a descarbonização, apresentando ela própria uma ambiciosa estratégia para este objetivo.

É também visível a pressão colocada sobre a aviação no sentido do desenvolvimento sustentável, sendo inevitável o reconhecimento da importância da descarbonização.

Assim, as estratégias das entidades constituintes do setor variam entre si, porém os objetivos mostram bastante próximas entre diferentes empresas do setor.

A nível de regulamentação, refere que esta poderá ser fator essencial ao desenvolvimento, sendo um motor acelerador de práticas sustentáveis, não considerando a regulamentação como uma barreira ou limitação.

A ANA afirma já ser neutra em carbono, com o objetivo Net Zero em 2030. Deste modo, acredita que os países desenvolvidos atinjam a neutralidade através da aplicação de esforços e investimentos financeiros nesse sentido. Já os países em desenvolvimento, por demonstrarem uma maior carência financeira, apresentam uma maior dificuldades

nas metas sustentáveis, sendo necessário um apoio de recursos financeiros a estes países.

5. CONCLUSÕES

Foram identificados vários desafios, começando pela atual dependência aos combustíveis fósseis, que coloca a aviação numa posição delicada devido às flutuações nos preços do petróleo. A verdade é que é inevitável que a indústria continue a ser alimentada por combustível convencional nos próximos anos. A falta de soluções prontas impede as rápidas melhorias na redução de CO₂.

Entendendo que a solução para o desenvolvimento sustentável do setor está nos investimentos em SAF e em novas formas de propulsão (transição energética), neste sentido são visíveis barreiras relacionadas aos elevados custos associados, limitações de alcance, riscos associados ao desenvolvimento tecnológico, e face aos períodos de entrada no mercado.

Ainda a nível de limitações, observam-se questões relacionadas ao baixo investimento em recursos humanos dedicados à área do desenvolvimento sustentável, entende-se o crescimento da consciencialização, no entanto ainda não é suficiente, assim como as limitações de investimento nas soluções de evolução para a neutralidade, incluindo SAF, novas fontes de propulsão com renovação de frota, melhorias nas operações e infraestruturas, e ATM.

Devem também ser tidas em consideração as discrepâncias no desenvolvimento económico dos vários países, sendo que os países desenvolvidos mostram uma capacidade maior de investimento em soluções quando comparados a países com um menor nível de desenvolvimento.

O setor precisa de investigar as várias soluções e seguir as mais realistas, sendo essencial ultrapassar as limitações impostas pela lacuna de financiamento.

Relativamente às parcerias dentro do setor, as entidades mostram já vários projetos de cooperação implementados e com resultados significativos para a evolução no sentido das metas sustentáveis. Não obstante, observa-se ainda a existência de abertura suficiente para o desenvolvimento de novas estratégias.

Apesar das parcerias, as entidades mantêm o foco nos resultados individuais, verificando-se limitações a nível da proximidade de trabalho entre as empresas limitando os resultados. Neste assunto, a maturidade das entidades mostra-se

relevante, verificando-se a existência de várias entidades com interesse e disponibilidade para estabelecer estratégias de cooperação, porém é também encontrada uma resistência significativa.

Face aos desafios identificados, é possível analisar soluções viáveis ao nível do desenvolvimento sustentável do setor de forma a reduzir as emissões de CO₂, enquanto se observa um aumento simultâneo do número de passageiros, sendo isto possível através do equilíbrio entre a velocidade de desenvolvimento na redução de carbono e o aumento constante do volume de tráfego aéreo.

Na vertente de uma evolução equilibrada, prevê-se para 2050 cerca de um terço das toneladas de CO₂ e o dobro do número de passageiros (comparação aos valores registados em 2019), estes valores mostram-se possíveis por meio da entrada de soluções a nível de desenvolvimento tecnológico na estrutura e propulsão das aeronaves, renovação de frota, produção e distribuição em larga escala de SAF, e melhorias nas operações e infraestruturas, assim como na eficiência de ATM.

Após aplicadas as várias soluções não é possível eliminar a 100% as emissões, permanecem na atmosfera emissões residuais que exigem sistemas eficazes de captura de carbono.

Apresentados os fatores, verificam-se também soluções ao nível das parcerias, sendo verificada a necessidade das mesmas de modo a acelerar a transição energética de toda a indústria aeronáutica. O aumento de parcerias surge como uma forma de criar sinergias que permitem alimentar tanto os interesses mútuos como os individuais.

Após a observação de soluções, é possível expor determinadas recomendações para implementação distribuídas pelos diferentes fatores e possíveis através da cooperação no setor.

Como visto acima, os SAF e a renovação de frota mostram-se como a opção mais realista e imediata. O hidrogénio irá constituir uma forte ferramenta na evolução, no entanto exige um elevado desenvolvimento tecnológico na alimentação de aeronaves e infraestruturas associadas.

Assim, são necessários investimentos significativos na produção e distribuição de SAF, sendo quimicamente semelhantes ao combustível convencional mostram-se compatíveis com as aeronaves em frota e com as atuais infraestruturas aeroportuárias. Entende-se, portanto, que os SAF são a solução imediata, e mesmo no futuro vão constituir o meio utilizado para a longa distância devido à dificuldade para substitutos para longa distância a registarem zero emissões.

Apesar de as empresas partilharem estratégias distintas, verificam-se objetivos semelhantes. As entidades que compõem o setor respondem mutuamente ao interesse no SAF, sendo este o elemento-chave para a neutralidade, juntamente com a entrada de novas fontes de propulsão a longo prazo, confirmando de forma conjunta que as oscilações de mercado/flutuações do preço do petróleo são uma motivação para a transição energética.

Relativamente a voos de curta distância, observam-se substitutos viáveis a registar as zero emissões com propulsão elétrica, sendo o hidrogénio a resposta para distâncias ligeiramente maiores.

Sendo a aviação um setor fortemente regulamentado, são criadas limitações e dificuldades para as entidades constituintes. É necessário implementar ações de colaboração, sendo essencial o apoio político. Assim é preciso aplicar uma regulamentação inteligente com ponderação entre o custo/benefício.

É essencial o papel da UE para a transição energética através de obrigações legais e implementação de boas práticas. A regulamentação mostra-se como um fator fundamental para a aceleração das boas práticas por parte das várias entidades intervenientes.

Relativamente às discrepâncias regionais, espera-se que os países desenvolvidos atinjam os objetivos através de investimentos, já os países em desenvolvimento devido a uma maior carência financeira apresentam também uma maior dificuldade no seu desenvolvimento sustentável, verifica-se assim a necessidade de apoios financeiros a estes países.

Para além da aviação, é necessário que os restantes setores envolventes apliquem esforços de modo a ser possível um desenvolvimento de toda a indústria. A indústria de certo modo já trabalha de forma conjunta, porém ainda não suficiente. É essencial uma aceleração dos esforços, com foco nas políticas para o desenvolvimento sustentável.

Alguns setores exteriores apresentam uma maior facilidade na transição energética, podendo atingir os seus objetivos sustentáveis mais cedo, podendo isto servir de mecanismo impulsionador para a aviação. Existe ainda um longo caminho a percorrer de forma a tornar as metodologias de cooperação uma realidade generalizada tanto na aviação como a nível global.

Assim, entende-se a necessidade de as entidades funcionarem como agentes facilitadores, de modo a ultrapassar as barreiras e limitações existentes, de forma que sejam atingidas as melhorias necessárias para os valores de redução estudados e previstos pelas entidades internacionais que exercem pressão sobre todo o setor para a obtenção de resultados significativos para a neutralidade.

Finalmente, é compreendida a relevância o desenvolvimento de estratégias de cooperação dentro do setor para um desenvolvimento equilibrado e com resultados significativos.

Sendo profissional do setor aeroportuário, o desenvolvimento deste estudo permitiu clarificar as metas implementadas, os sistemas de cooperação existentes e as barreiras aos mesmo, assim como será possível ultrapassá-las.

Este estudo permite aos vários intervenientes da indústria da aviação compreender a relevância da criação de sinergias entre diferentes entidades, alimentando interesses mútuos de forma eficiente. Permite compreender a importância ao desenvolvimento sustentável, e como este pode ser atingido através de estratégias onde existe relações diretas de entreajuda dentro do setor.

Oferece também uma perspetiva clara das limitações aos objetivos sustentáveis e quais as soluções a desenvolver para as ultrapassar dentro das metas mais realistas, tendo em consideração as desigualdades verificadas.

Entende-se a aviação como uma indústria em rápido crescimento que precisa de soluções imediatas de forma a cumprir as pressões que lhe são impostas, sendo isto possível através do desenvolvimento estratégico de um sistema de cooperação entre os vários elementos que a constituem, cumprindo interesses tanto individuais como coletivos do setor.

6. REFERÊNCIAS

- Airbus. 2021. "Fello'fly." Exploring the Possibilities of Wake Energy Retrieval. 2021.
- . 2024. "ZEROe the World's First Hydrogen-Powered Commercial Aircraft." ZEROe Towards the World's First Hydrogen-Powered Commercial Aircraft. 2024. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>.
- ATAG. 2015a. "Aviation Climate Solutions."
- . 2015b. "The Aviation Sector's Climate Action Framework." www.atag.org.
- . 2020. "Aviation Benefits Beyond Borders."
- . 2021. "Waypoint 2050." *Waypoint 2050 ATAG*. Vol. Second Edi. https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf.
- ATAG, and Climate Action Takes Flight. 2017. "Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel." *Air Transport Action Group*. Vol. Edition 3.
- Boeing. 2023. "EcoDemonstrator." EcoDemonstrator. 2023. <https://www.boeing.com/sustainability/environment/ecodemonstrator#photos>.
- EASA, European Environmental Agency, and EUROCONTROL. 2022. "European Aviation Environmental Report 2022."
- Graver, Brandon. 2022. "Polishing My Crystal Ball: Airline Traffic in 2050 - International Council on Clean Transportation." <https://theicct.org/global-aviation-airline-traffic-jan22/>.
- Graver, Brandon, Sola Zheng, Daniel Rutherford, Jayant Mukhopadhyaya, and Erik Pronk. 2022. "Vision 2050 Aligning Aviation with the Paris Agreement." https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/Aviation-2050_report_final_v2.pdf.
- IATA. 2022. "Annual Review 2022."
- . 2023a. "Annual Review 2023."
- . 2023b. "Net Zero 2050: New Aircraft Technology." www.iata.org/flynetzero.
- . 2023c. "Net Zero 2050: Offsetting and Carbon Capture."

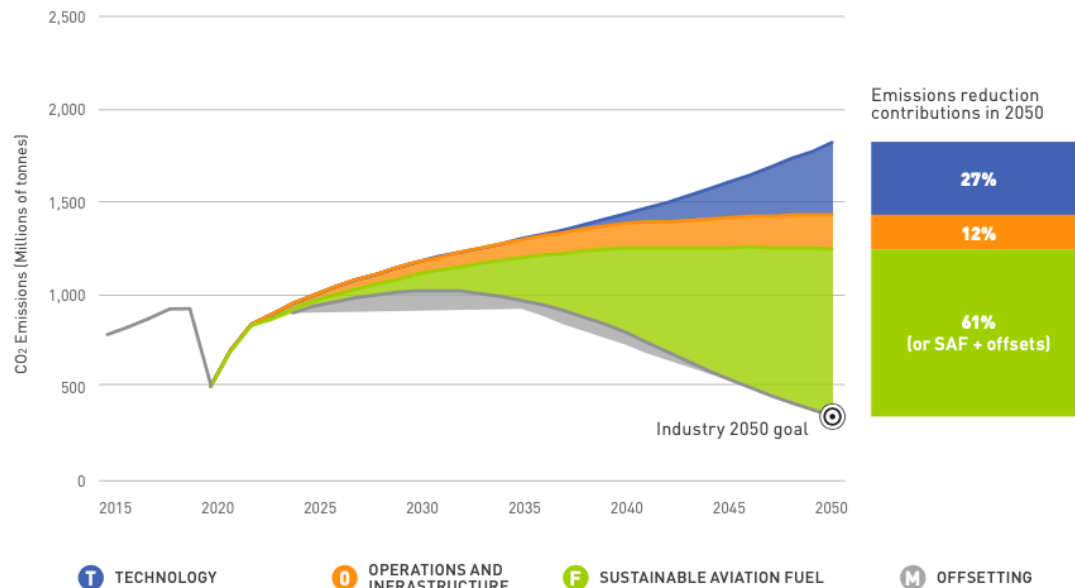
- . 2023d. “Net Zero 2050: Operational and Infrastructure Improvements.” www.iata.org/flynetzero.
- . 2023e. “Net Zero 2050: Progress Tracking Methodology.” <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf>.
- . 2023f. “Net Zero 2050: Sustainable Aviation Fuels.” www.iata.org/flynetzero.
- . 2023g. “Net Zero Carbon 2050 Resolution.”
- . 2023h. “Our Commitment to Fly Net Zero by 2050.” Our Commitment to Fly Net Zero by 2050. 2023. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>.
- ICAO. n.d. “Long-Term Aspirational Goal.” <https://aviationbenefits.org/FlyNetZero>.
- “Making Net-Zero Aviation Possible.” 2022.
- NASA. 2018. “X-57 Maxwell Overview.” *X-57 Maxwell Overview*.
- OpenAirlines. 2022. “Corporate Social Responsibility Report - OpenAirlines 2022.”
- Shparberg, Stan, and Bob Lange. 2022. “Global Market Forecast 2022.”

Scenario 1: pushing technology and operations

Under this scenario, technology improvements are prioritised and ambitious with the expectation of the emergence of unconventional airframes and a transition of the fleet towards hybrid/electric aircraft from 2035/40. Significant investments in operations and infrastructure improvements result in substantial improvements and CO₂ reductions. The gap between CO₂ emissions after technology and operations and infrastructure improvements and the 2050 carbon goal

is fulfilled with the use of sustainable aviation fuels. This will require significant quantities of SAF with high emissions reduction factor over their lifecycle. Under this scenario, offsets are not expected to play a central role in 2050 but may be required during 2035-2050 as a transition mechanism and will need to be used to make up any remaining shortfall in emissions above the goal.

Traffic growth	C	Central scenario: 3.0% CAGR 2019-2050
Technology developments	T₄	Prioritised development of electric and hybrid electric aircraft in the short-range and <100 seat category with entry into service from 2035/2040
Operations and infrastructure improvements	O₃	High-range improvements and airline load factor improvements
Sustainable aviation fuel	F₂	Backcast of what is required (around 900 Mt CO ₂ reduction) to meet the goal: a range of 290 – 390 Mt (360 – 490 billion litres) of SAF with a 74-100% emissions reduction factor by 2050
Offsets (or other carbon mitigation options)	IF NEEDED	If required to address any remaining emissions above the 2050 goal



(ATAG 2021)

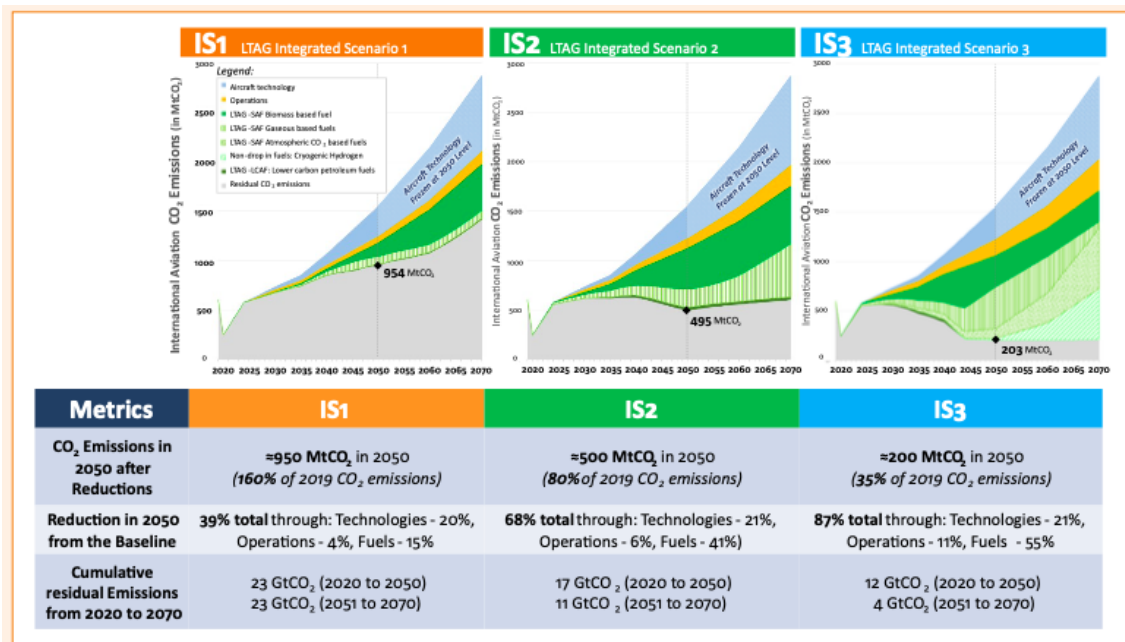


FIGURE 3: Reductions in CO₂ emissions from international aviation through in-sector measures through 2050 and beyond

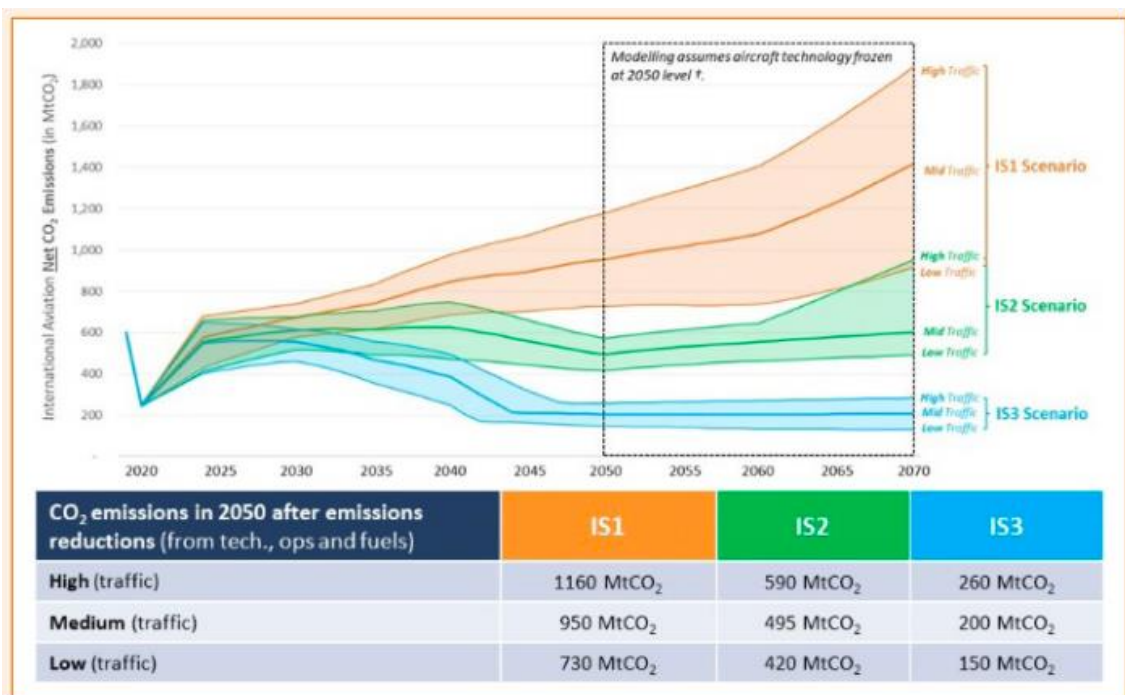


FIGURE 4: Impact of Aviation Traffic Forecast

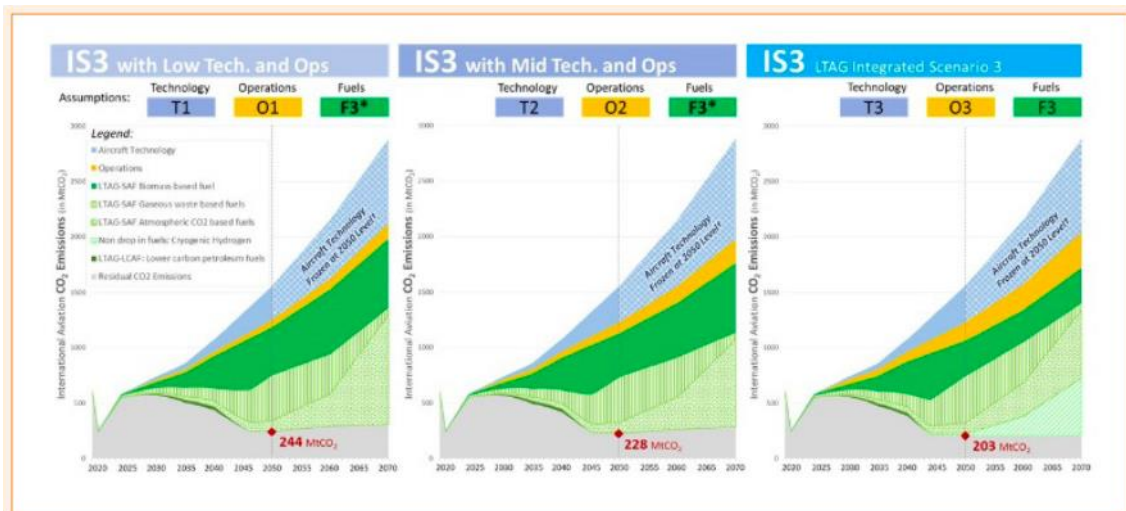


FIGURE 5: Sensitivity analysis of IS3 Scenario demonstrates the importance of fuels

LTAG-TG Scenarios			
Baseline	O1 Scenario Low CO ₂ reduction from Operations	O2 Scenario Mid CO ₂ reduction from Operations	O3 Scenario High CO ₂ reduction from Operations
No emissions reductions from operations after 2025 (Implementation of ASBU blocks 0 and 1)	Conservative assumptions about rate and extent of implementation of operational measures, based on reduced/slower investment in ground and airborne systems and technologies. Low rate of ASBU element deployment to optimize HFE, VFE and GFE.	Emissions reductions and operational efficiencies in line with existing "Rules of Thumb" developed by WG2 and new "Rules of Thumb" developed by LTAG OPS for new measures. Medium rate of ASBU element deployment to optimize HFE, VFE and GFE. Low rate of operational measure deployment to optimize IFE and AFE.	Aggressive assumptions about rate and extent of implementation of operational measures, based on higher/accelerated investment in ground and airborne systems and technologies. High rate of ASBU element deployment to optimize HFE, VFE and GFE. Medium rate of operational measure deployment to optimize IFE and AFE.

FIGURE 1: Summary of LTAG-TG operations scenarios

	LTAG-TG Scenarios		
	Fuel Scenario 1 (F1) Low GHG reduction from Fuels (LTAG-SAF and LTAG-LCAF)	Fuel Scenario 2 (F2) Mid GHG reduction from Fuels (LTAG-SAF and LTAG-LCAF)	Fuel Scenario 3 (F3) High GHG reduction from Fuels (LTAG-SAF, LTAG-LCAF and non-drop-in fuels)
Scenario Development	Emphasize low cost GHG reduction → select fuels by Minimum Selling Price	Prioritize cost effective GHG reduction → select fuels by Marginal Abatement Cost	Maximize CO ₂ reduction → select fuels by Lifecycle Value
Approved Fuel Use	ASTM Intl approves use of alternative jet fuels at blend levels above 50%.	ASTM Intl approve use of 100% Synthesized Jet Fuel in existing aircraft and engines without any modification.	
Ground Transportation and Electrification	Ground transportation and aviation have level playing field with respect to alternative fuel use.	Electrification of ground transportation leads to increased availability of SAF.	Economy-wide deep decarbonisation. Extensive electrification of ground transportation and widespread availability of renewable energy.
Incentives	Low incentives for LTAG-SAF/LTAG-LCAF production.	Increased incentives lead to reduced LTAG-SAF/LTAG-LCAF fuel cost for users.	Large incentives lead to widespread use of low GHG fuels for aviation.
Fuel Availability	Using waste gases (CO/CO ₂) and variety of feedstocks (e.g., oilseed cover crops) for LTAG-SAF.	Widespread use of waste gases and increased feedstock availability for LTAG-SAF. SAF production exceeds jet fuel demand	Widespread use of atmospheric CO ₂ for LTAG-SAF and maximum LTAG-SAF feedstock availability. SAF production exceeds jet fuel demand
			Sufficient H ₂ exists to enable use of cryogenic H ₂ fuel in aircraft. Infrastructure developed to enable use of non-drop-in fuels at airports around globe.

TABLE 2: LTAG Fuels scenario descriptions

MDG/FESG Baseline (for context)	LTAG-TG Scenarios		
Integrated Scenario 0 (IS0)	Integrated Scenario 1 (IS1)	Integrated Scenario 2 (IS2)	Integrated Scenario 3 (IS3)
'Frozen' scenario - Projection of current technologies available in the base year (through fleet renewal) - No additional improvements from technology, operations and no emissions reductions from fuels (SAF) - No systemic change – e.g. infrastructure changes to accommodate growth only	'Low / nominal' scenario - Current (c. 2021) expectation of future available technologies, operational efficiencies and fuel availability - Expected policy enablers for technology, ops and fuels - Low systemic change – e.g. no substantial infrastructure changes	'Increased / further ambition' scenario - Faster rollout of future technologies, increased operational efficiencies and higher fuel availability - Increased policy enablers for technology, ops and fuels - Increased systemic change – e.g. limited infrastructure changes	'Aggressive / speculative' scenario - Maximum possible effort in terms of future technology rollout, operational efficiencies, fuel availability - Maximum policy enablers for technology, ops and fuels. - High, internationally aligned systemic change - e.g. significant and broad change to airport and energy infrastructure

Decreasing readiness and attainability. Increasing aspiration.

FIGURE 1: LTAG integrated scenarios

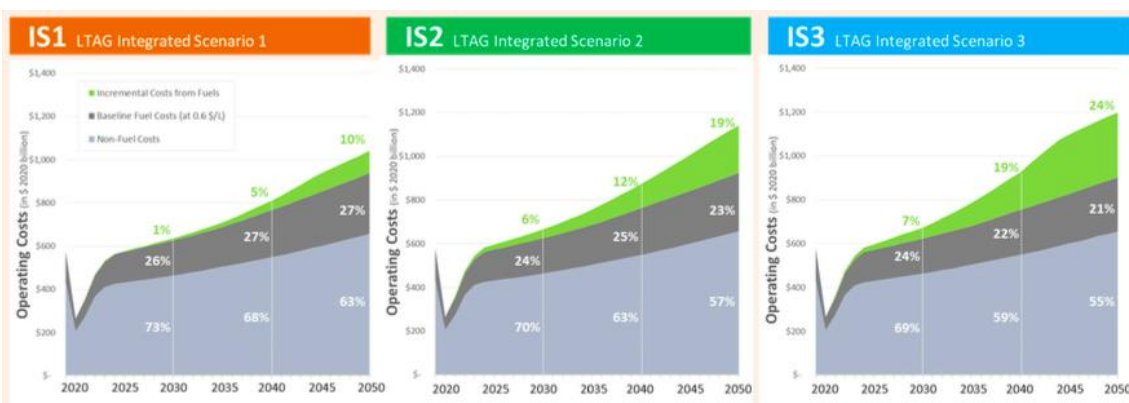


FIGURE 3: Incremental costs from LTAG scenarios in context of operating costs from international aviation