



Rota para a Sustentabilidade na América Latina e o Caribe

Resumo Executivo	3	Anexo 1: Estado atual dos Combustíveis de Aviação Sustentável (SAF) e perspectivas até 2050	25
Introdução		Gráfico 13. Projeção do fornecimento de SAF para a América Latina (2027-2050)	25
Gráfico 1. Crescimento relativo (1970=100) de passageiros 1970-2023	4	Gráfico 14. Participação por país da oferta Total projetada de SAF na ALC (2050)	25
Objetivo	5	Gráfico 15. Fornecimento de SAF para a América Latina por via de produção, previsão (2027-2050)-	26
Mudanças climáticas e suas consequências para a indústria aérea	6	Gráfico 16. Preços de SAF-HEFA no mercado da América Latina (2024-2050)	26
Emissões da indústria aérea e o contexto Latino-Americano	7	Anexo 2: Mercados e mecanismos de redução de carbono	27
Gráfico 2. Emissões da aviação como % do total	8	Gráfico 17. Preços Diários para o mercado de créditos elegíveis para CORSIA	27
Gráfico 3. Top 25 por países de emissões de aviação acumuladas 2013-2023	8	Anexo 3: estado do combustível de aviação na região	28
Gráfico 4. Previsão de emissões da indústria aérea na América Latina (2013-2050)	8	Demanda total de combustível de aviação da América Latina	29
Iniciativas de descarbonização recentes no setor aéreo da América Latina e do Caribe	9	Gráfico 19. Crescimento médio anual do consumo de Jet Fuel por país	29
Gráfico 5. Consumo de combustível por cada 100RPK		Gráfico 18. Consumo histórico e previsão de Jet Fuel para os principais países da ALC (milhares de b/d)	29
Gráfico 6. Participação das companhias aéreas de ALC no tráfego e nas emissões totais (2023 vs. 2013)	9	Produção de combustível de aviação da América Latina	30
Estratégias de descarbonização na aviação	10	Gráfico 20. Capacidade histórica e previsão de produção de combustível de aviação por país	30
Custos para alcançar a descarbonização	14	Balança comercial histórica e perspectiva até 2050, por país	31
Gráfico 7. Custos e investimentos globais de descarbonização		Gráfico 21. Balanço comercial de Jet Fuel na ALC e previsão (2005-2050)	32
Impacto nos preços das passagens aéreas	16	Gráfico 23. Balanço de Jet Fuel—México	32
Gráfico 8. Evolução do CASK (custo por assento-km disponível) e do Yield (rendimento por passageiro-km) das companhias aéreas de ALC, valores ajustados pela inflação	17	Gráfico 22. Balanço de Jet Fuel—Brasil	32
Gráfico 9. Tarifa média como % do PIB per capita (PPP, preços \$ de 2021)	17	Gráfico 25. Balanço de Jet Fuel—Chile	32
Gráfico 10. Distribuição percentual anual do sobrecusto total por adoção de SAF	18	Gráfico 24. Balanço de Jet Fuel—Colômbia	32
Gráfico 11. Comparação de receitas por passageiro quilômetro de acordo com cenários de descarbonização	20	Gráfico 26. Balanço de Jet Fuel—Argentina	33
Gráfico 12. Rentabilidade líquida por passageiro	20	Balanço comercial histórico e perspectivas até 2050, por país	34
Desafios e recomendações para alcançar a descarbonização da indústria e maior competitividade nos preços do SAF	21	Gráfico 21. Balanço comercial de Jet Fuel na ALC e previsão (2005-2050)	34
		Gráfico 23. Balanço de Jet Fuel—México	34
		Gráfico 22. Balanço de Jet Fuel—Brasil	34
		Gráfico 25. Balanço de Jet Fuel—Chile	35
		Gráfico 24. Balanço de Jet Fuel—Colômbia	35
		Referências	36

A transição para uma aviação sustentável na América Latina e no Caribe é um desafio que exige uma abordagem multidisciplinar para reduzir as emissões de CO2 sem comprometer a acessibilidade ao transporte aéreo. Este documento apresenta o estado atual da aviação na região, os passos necessários e os custos associados para alcançar os objetivos de descarbonização.

Mudança Climática e Consequências para a Indústria Aérea: Examina-se o impacto das mudanças climáticas na aviação, como eventos climáticos extremos e suas implicações nas operações e nos custos.

Emissões da Indústria Aérea e o Contexto Latino-Americano: Descreve-se a contribuição da aviação para as emissões totais de CO2, destacando as eficiências alcançadas nos últimos anos.

Iniciativas Recentes de Descarbonização: Apresentam-se as melhorias operacionais e tecnológicas implementadas na América Latina para reduzir a intensidade das emissões, como a renovação de frota.

Custos para Alcançar a Descarbonização: Detalham-se os custos projetados para a transição para uma aviação sustentável, incluindo investimentos globais e regionais necessários.

Impacto nos Preços das Passagens Aéreas: Analisa-se como os custos adicionais associados ao uso de SAF e outras tecnologias podem afetar as tarifas aéreas.

Desafios e Recomendações: Esta seção oferece recomendações essenciais:

- **Promover múltiplos caminhos para a descarbonização:** Enfatiza-se a importância de adotar uma estratégia diversificada que inclua a produção de SAF, melhorias na eficiência operacional e o desenvolvimento de novas tecnologias.
- **Estabelecer um marco regulatório com metas claras e consistentes:** A descarbonização da aviação requer políticas públicas alinhadas com compromissos globais de redução de emissões. Recomenda-se a criação de esquemas de carbono que permitam às companhias aéreas compensar suas emissões e a implementação de incentivos fiscais, ao invés de mandatos que aumentem os custos. Além disso, propõe-se facilitar a transparência no uso de créditos de carbono no programa CORSIA.
- **Garantir um crescimento sustentável que fortaleça a competitividade regional:** A aviação é fundamental para o desenvolvimento econômico e a conectividade da região. Destaca-se o potencial do SAF para gerar empregos e estimular a economia.

Recomendações específicas para o desenvolvimento do SAF:

- o Fundos de investimento colaborativos.
- o Incentivar investimentos em infraestrutura.
- o Desenvolver um ambiente regulatório favorável.
- o Apoiar a inovação em matérias-primas.

Anexos do Documento

Os quatro anexos complementam o relatório principal, fornecendo informações detalhadas sobre aspectos-chave da descarbonização do setor aéreo na América Latina e no Caribe:

- **Anexo 1:** Foca no estado atual dos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) e nas projeções para 2050, abordando a demanda e oferta de SAF na região, métodos de produção e sua evolução.
- **Anexo 2:** Explora mecanismos de redução de carbono, como mercados de créditos de carbono para mitigar emissões residuais que não podem ser eliminadas totalmente com SAF ou melhorias tecnológicas. Discute também os preços diários dos créditos elegíveis sob o esquema CORSIA, ressaltando que atualmente não há créditos elegíveis para o CORSIA na região.
- **Anexo 3:** Apresenta uma análise do estado atual e futuro do combustível de aviação na região, projetando demanda e produção de combustível tradicional até 2050.
- **Anexo 4:** Examina a renovação da frota e a densificação de cabines na região, destacando a incorporação de aeronaves mais modernas e eficientes, além do aumento na capacidade de assentos por aeronave, otimizando o uso de combustível e contribuindo para a redução de emissões.



Alcançando um crescimento perene:

Promovendo a aviação sustentável e garantindo o acesso econômico viável ao transporte aéreo na América Latina e no Caribe



Introdução

Contexto Histórico do Tráfego Aéreo na América Latina e no Caribe

Nas últimas cinco décadas, a indústria da aviação na América Latina e no Caribe (ALC) experimentou um crescimento significativo, com o número de passageiros transportados aumentando 18 vezes, de 18 milhões em 1970 para mais de 324 milhões em 2023. Este avanço superou a média global, que cresceu 14 vezes no mesmo período (Gráfico 1).

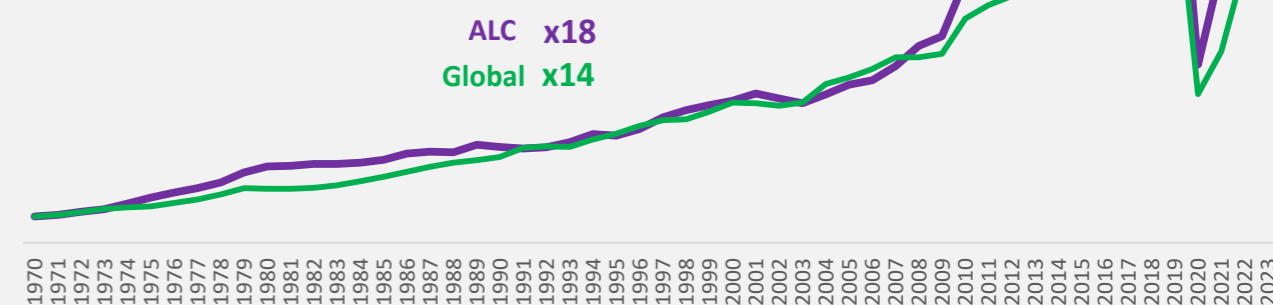
Apesar de enfrentar desafios como a crise da dívida na América Latina nos anos 1980, a crise do peso mexicano em 1994, os atentados de 11 de setembro, o surto de SARS e a pandemia de COVID-19, a região demonstrou resiliência. Após uma queda de 60% no número de passageiros durante a pandemia, o setor aéreo na região apresentou recuperação com um crescimento de 6,2% em 2023 em relação a 2019.

Esse crescimento destaca o papel crucial da aviação na conectividade da região, facilitando o turismo, os negócios e o transporte de carga, elementos fundamentais para o desenvolvimento econômico. No entanto, a penetração do transporte aéreo, medida pela taxa de viagens per capita, ainda é baixa, com 0,64 viagens por pessoa, em comparação com mais de 2 em regiões como os Estados Unidos e a União Europeia. Esse dado evidencia um potencial de crescimento considerável (ALTA).

A aviação contribui significativamente para o PIB e o emprego na América Latina e no Caribe, sustentando 8,3 milhões de empregos e gerando US\$ 240 bilhões, o que representa 2,9% do emprego total e 3,6% do PIB regional. Esses empregos incluem os diretos (722 mil) gerados por companhias aéreas e aeroportos, além dos indiretos (6,9 milhões) provenientes da cadeia de suprimentos e do turismo [1]. Em muitas áreas, o transporte aéreo é essencial para o acesso a serviços básicos, como atendimento médico em regiões urbanas, e, em locais sem alternativas de transporte, a conectividade aérea é fundamental para o desenvolvimento econômico e a inclusão social.

À medida que a região continua crescendo, torna-se crucial abordar os desafios de sustentabilidade associados a esse progresso.

Gráfico 1.
Crescimento relativo
(1970=100)
de Passageiros
1970-2023



O número de passageiros transportados pelas companhias aéreas da América Latina e do Caribe aumentou 18 vezes, passando de 18 milhões de passageiros em 1970 para mais de 324 milhões em 2023. O crescimento superou a média mundial.

Fonte: OACI, ALTA



Objetivo

O objetivo deste documento é fornecer dados verificáveis que apoiem a estratégia integral de descarbonização da indústria da aviação na América Latina e no Caribe.

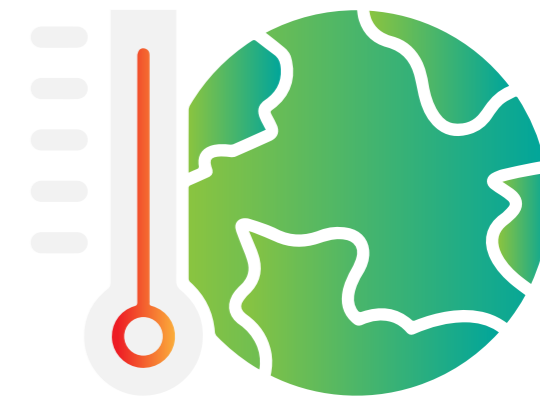
Isso inclui a produção em larga escala e a redução de preços dos Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF), bem como a implementação de eficiências operacionais, o desenvolvimento de novas tecnologias e o uso de compensações de carbono. O esforço busca equilibrar os objetivos ambientais com a necessidade de garantir o acesso ao transporte aéreo em uma região com baixa penetração e poucas alternativas de transporte.

Mudanças Climáticas e Suas Consequências para a Indústria Aérea

A indústria da aviação enfrenta um duplo desafio: avançar na descarbonização enquanto se adapta e constrói resiliência frente aos efeitos das mudanças climáticas. Essas mudanças representam uma ameaça significativa para os ecossistemas, economias e sociedades globais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o aumento contínuo das temperaturas globais resultará em eventos climáticos extremos, elevação do nível do mar e perturbações em sistemas naturais e humanos.

Eventos climáticos extremos, como tempestades, inundações, incêndios florestais e temperaturas extremas, têm impacto direto na sociedade, na infraestrutura e nas operações aéreas. Em 2022, temperaturas de verão extremas no Reino Unido causaram o derretimento de pistas de pouso, levando à suspensão temporária de operações [2]. De maneira semelhante, em abril de 2024, altas temperaturas no Aeroporto Internacional da Cidade do México forçaram algumas companhias aéreas a restringirem o peso das aeronaves devido à menor densidade do ar, comprometendo a capacidade de decolagem [3]. Além disso, inundações severas, como as que atingiram a torre de controle do Aeroporto de Porto Alegre, provocaram seu fechamento temporário [4]. Esses cenários climáticos adversos não apenas interrompem as operações diárias, mas também aumentam os custos operacionais e aceleram o desgaste das infraestruturas aeroportuárias.

Outro efeito das mudanças climáticas é o aumento na frequência e severidade da turbulência em ar claro (CAT, na sigla em inglês). Estudos recentes mostram que a duração anual da CAT aumentou significativamente nas últimas quatro décadas,



especialmente no Atlântico Norte, onde esse fenômeno cresceu 17% entre 1979 e 2020. Isso afeta tanto o conforto dos passageiros quanto o desgaste das aeronaves. [5] As tempestades também causam atrasos, desvios e impactos na eficiência dos voos, elevando o consumo de combustível e as emissões de CO₂. Na região Panamericana, os eventos meteorológicos relacionados à turbulência têm apresentado um aumento nos últimos anos [6]. De acordo com o Grupo Regional de Segurança da Aviação para a Panamérica (RASG-PA), em 2022, os acidentes ligados à turbulência representaram 43% dos incidentes reportados.

As projeções indicam que os impactos das mudanças climáticas continuarão a crescer, afetando diversos setores, incluindo a aviação. Um estudo da EUROCONTROL, de 2021, aponta que condições climáticas severas já causam até 7,5% dos atrasos na gestão do tráfego aéreo na Europa, e esse número pode aumentar com a previsão de 16 milhões de voos anuais até 2050. Além disso, o aumento do nível do mar ameaça mais de dois terços dos aeroportos costeiros de baixa altitude, com custos diários estimados em 18 milhões de euros para grandes aeroportos e 3 milhões para médios.

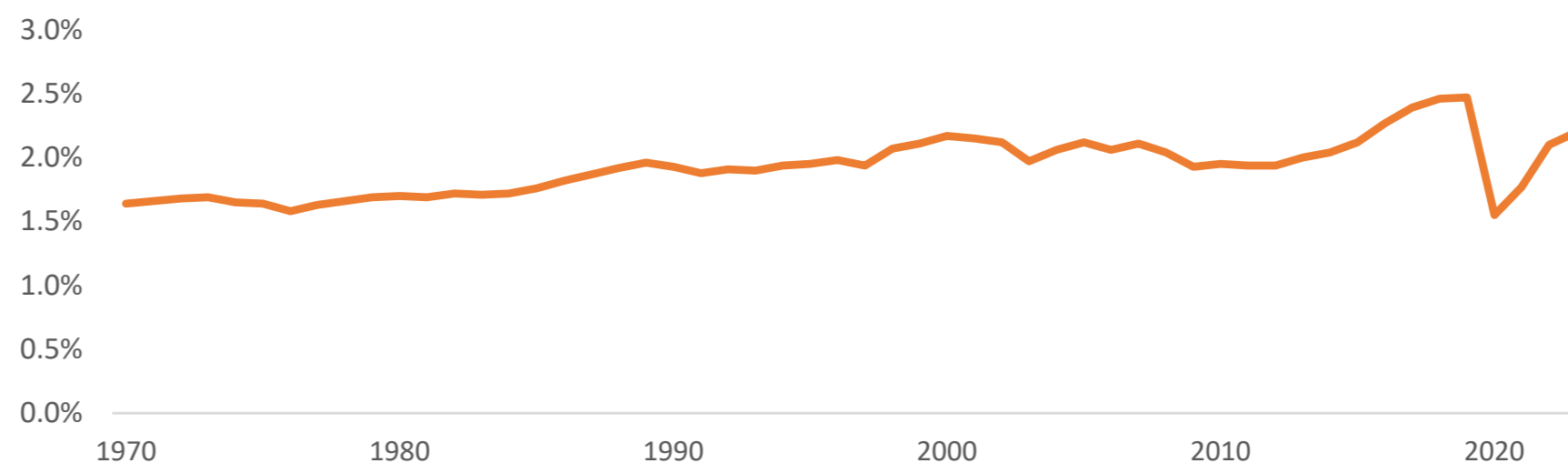
Mudanças nos padrões das correntes de jato (jet streams) também impõem novos desafios, já que variações na velocidade e direção desses ventos de alta altitude podem aumentar o consumo de combustível e o tempo de voo. Em 2019, as companhias aéreas voaram mais de um milhão de quilômetros adicionais para evitar grandes tempestades, consumindo 6 mil toneladas extras de combustível e emitindo mais de 19 mil toneladas de CO₂ [7].

Emissões da Indústria Aérea e o Contexto Latino-Americano

Embora o tráfego aéreo tenha aumentado 14 vezes desde 1970, década marcada pelo início da desregulamentação do transporte aéreo, a contribuição da aviação para o total de emissões de CO₂ cresceu menos de 1 ponto percentual.

Isso reflete os avanços tecnológicos e as eficiências alcançadas. Durante esse período, foram implementadas diversas inovações no design de aeronaves e motores mais eficientes, permitindo um uso mais eficaz do combustível.

Gráfico 2.
Emissões da Aviação como % do total



Fonte: Global Carbon Budget, EIA, Estimativas ALTA

No total, as emissões de CO₂ da indústria da aviação foram de aproximadamente 867 milhões de toneladas em 2023, sendo 43% provenientes de voos domésticos e 57% de voos internacionais. Embora o tráfego, medido em RPK (passageiros-quilômetro), tenha aumentado quase 40%, as emissões totais cresceram apenas 18% entre 2013 e 2023, evidenciando os esforços da indústria em alcançar eficiências operacionais.



Emissões da Indústria Aérea e o Contexto Latino-Americano



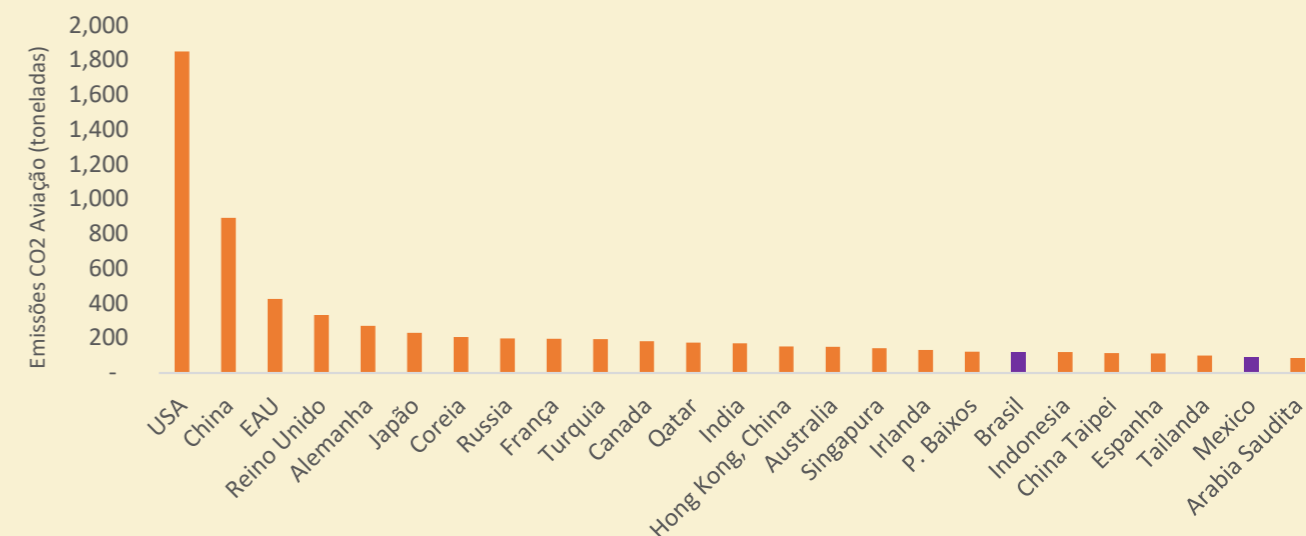
Dos 25 países com maiores emissões de CO₂ derivadas da aviação, apenas dois estão na região da América Latina e Caribe: Brasil e México, cujas emissões totais representam 2,6% das emissões acumuladas da aviação entre 2013 e 2023 (gráfico 3).

No total, as companhias aéreas sediadas na região foram responsáveis por 4,8% das emissões acumuladas de CO₂ no mesmo período. Em contraste, as regiões da Ásia-Pacífico, América do Norte e Europa responderam por 83,4% das emissões totais acumuladas no período. Esses números refletem a disparidade na contribuição das diferentes regiões para as emissões globais da aviação, destacando a necessidade de abordagens regionais específicas para mitigar o impacto ambiental do setor aéreo.

A diferença nas emissões também ressalta a importância de políticas e tecnologias adaptadas às particularidades de cada região, considerando realidades, capacidades e potenciais locais. O objetivo é buscar uma redução equitativa das emissões no setor aéreo global, respeitando as especificidades regionais.

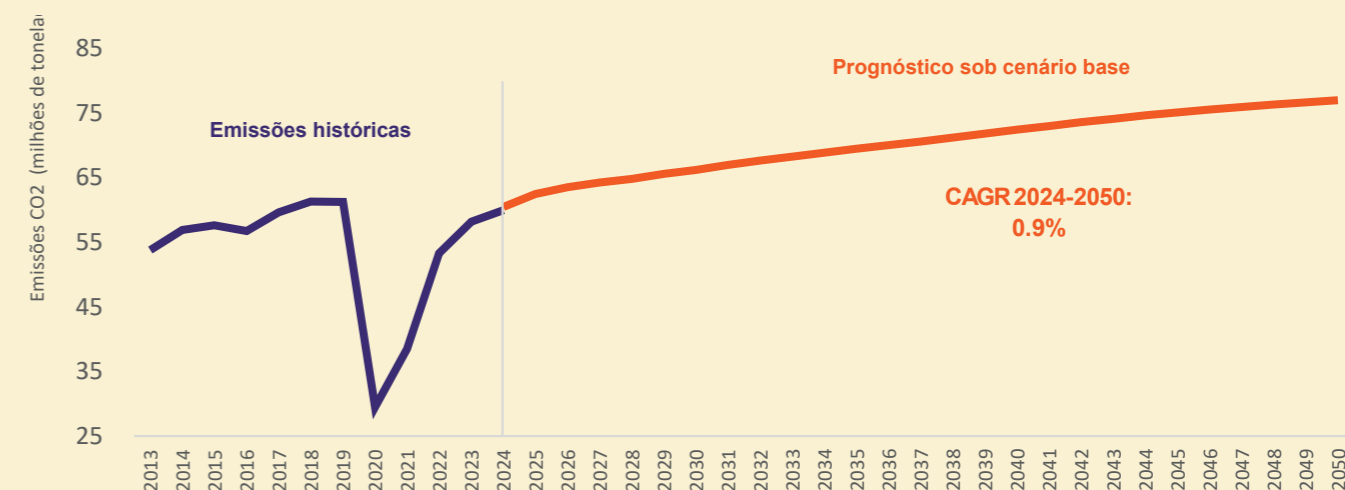
De acordo com estimativas internas fornecidas pela S&P Global para este estudo, prevê-se que, entre 2024 e 2050, as emissões do setor aéreo na América Latina e Caribe tenham um crescimento médio anual de 0,9%, resultando em um aumento de 32% em comparação aos níveis de 2023 (gráfico 4). Essas projeções baseiam-se em um cenário que considera a retomada da demanda energética após a pandemia de COVID-19, dentro de um contexto geopolítico e macroeconômico desafiador.

Gráfico 3. Top 25 por países de Emissões de Aviação Acumuladas 2013-2023



Fonte: OECD

Gráfico 4. Prognóstico de Emissões da indústria aérea na América Latina (2013-2050)



Fonte: S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P Global

Iniciativas Recentes de Descarbonização no Setor Aéreo da América Latina e do Caribe



Por meio de melhorias operacionais, renovação de frota, inovação tecnológica e um forte compromisso com a eficiência, a indústria da aviação na América Latina conseguiu reduzir significativamente sua intensidade de emissões na última década. Como mostrado no gráfico 5, entre 2011 e 2023, o consumo de combustível por cada 100 RPK diminuiu 28%, com uma taxa média anual de eficiência superior a 2%.

A nova geração de aeronaves consome entre 15% e 20% menos combustível em comparação com a frota anterior, contribuindo para uma redução significativa das emissões de CO2. As companhias aéreas membros da Associação Latino - Americana e do Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) reduziram a idade média de suas frotas em 18%. Em comparação com as companhias aéreas de mercados desenvolvidos, como os Estados Unidos e a Europa, as frotas da ALTA são 37% e 22% mais jovens, respectivamente. Para uma análise mais detalhada sobre a renovação de frotas e as iniciativas de densificação de cabines para reduzir a pegada de carbono, consulte o Anexo 4 no final deste documento.*

As melhorias em eficiência alcançadas pelas companhias aéreas da América Latina e do Caribe permitiram que aumentassem sua participação no mercado total, ao mesmo tempo que reduziram sua parcela no percentual de emissões totais (gráfico 6).

Gráfico 5. Consumo de combustível por cada 100RPK

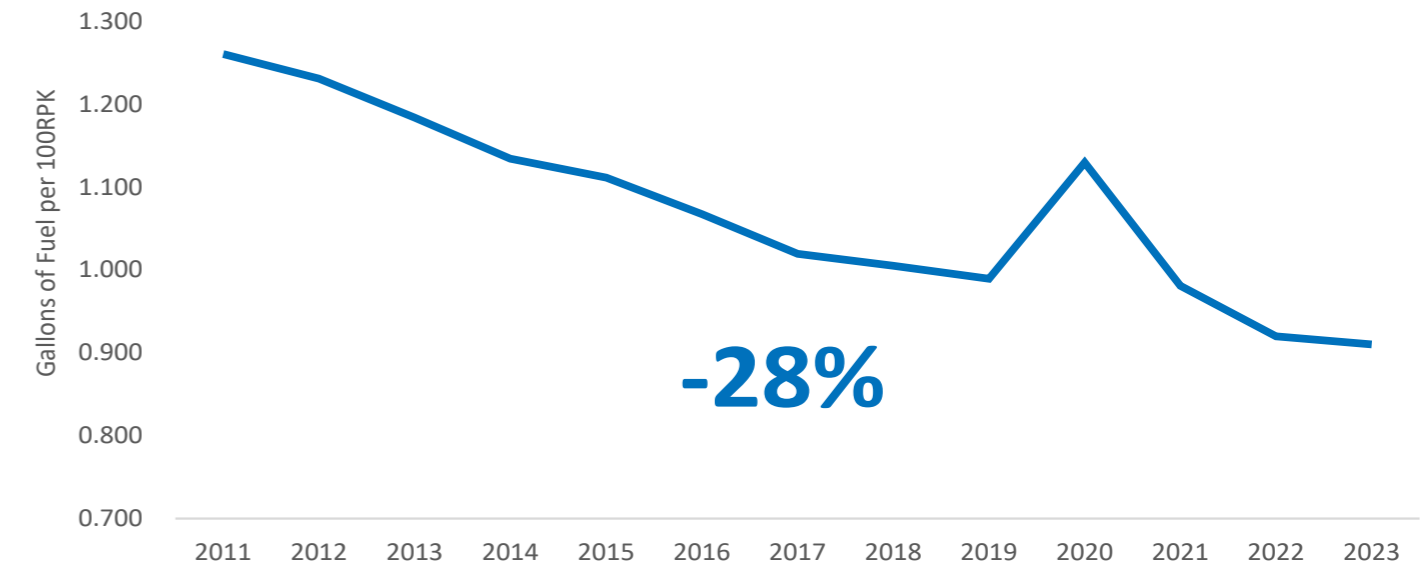
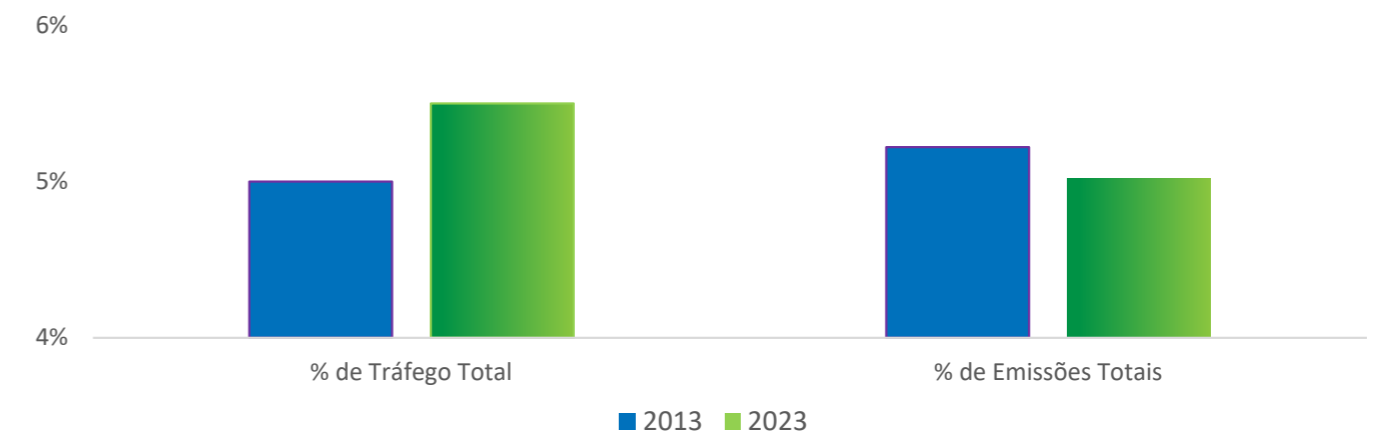


Gráfico 6. Participação das cias aéreas da ALC no tráfego de emissões totais (2023 vs. 2013)



Fonte: OACI, IATA, Análisis de ALTA con dato OECD



Estratégias de descarbonização na aviação



Estratégias de descarbonização na aviação

A indústria da aviação enfrenta o desafio significativo de alcançar emissões líquidas zero até 2050. O documento Waypoint 2050, desenvolvido pelo Air Transport Action Group (ATAG) [8], apresenta uma visão detalhada e cenários possíveis para alcançar esse objetivo. A seguir, estão as estratégias principais e os cenários de descarbonização descritos no relatório:

Estratégias Principais de Descarbonização

Melhorias Operacionais e de Infraestrutura



- Otimização de rotas e gestão do tráfego aéreo: A otimização de rotas e melhorias na gestão do tráfego aéreo podem reduzir significativamente as emissões. Essas melhorias podem ser implementadas mais rapidamente do que inovações tecnológicas em aeronaves.
- Eficiência nos aeroportos: Tecnologias emergentes em aeroportos e sistemas de navegação contribuirão para a eficiência e a redução de emissões. Medidas como pontes de embarque elétricas, redução do tempo de taxiamento e uso de unidades auxiliares de potência também são importantes. Vale destacar que muitas dessas ações dependem de governos e outros atores, e não apenas da indústria.

Medidas de Redução e/ou Compensação de Carbono Fora do Setor



- Compensações de carbono: A curto prazo, compensações de carbono são uma medida complementar enquanto tecnologias e SAFs (Combustíveis de Aviação Sustentáveis) estão em desenvolvimento. A longo prazo, a captura e armazenamento de carbono serão essenciais para alcançar emissões líquidas zero, pois haverá emissões residuais que precisarão ser gerenciadas com medidas de mercado.

Um marco regulatório global importante é o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA), desenvolvido pela OACI. Ele visa limitar o crescimento das emissões líquidas de CO₂ a partir de 2020 por meio da compra de créditos de carbono para compensar emissões que excedem os níveis de referência, estabilizando as emissões enquanto tecnologias de longo prazo são desenvolvidas.

No entanto, na região da América Latina e do Caribe (LAC), o CORSIA enfrenta vários desafios, especialmente a falta de créditos de carbono elegíveis suficientes para a implementação. As companhias aéreas da região estão limitadas quanto às opções disponíveis para compensar suas emissões, o que coloca em risco sua conformidade com os requisitos do esquema. Essa situação ressalta a necessidade de desenvolver projetos locais de geração de créditos de carbono na ALC que sejam reconhecidos pelo CORSIA.

Inovação Tecnológica:



- Desenvolvimento de novas aeronaves: A modernização da frota com aeronaves mais eficientes, motores avançados e materiais mais leves pode reduzir o consumo de combustível em 15-20% por geração.
- Propulsão alternativa: Propulsão elétrica, híbrida e por hidrogênio desempenharão um papel crucial, especialmente em voos de curto e médio alcance. O desenvolvimento e adoção dessas tecnologias exigirão investimentos significativos e coordenação setorial.

Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF)



- Implementação massiva de SAFs: SAFs podem reduzir as emissões de CO₂ em até 80% comparado ao combustível convencional. Estima-se que entre 330 e 445 milhões de toneladas de SAFs serão necessárias anualmente até 2050, demandando até 1,45 trilhões de dólares em investimentos (Waypoint 2050).
- Diversificação de fontes: SAFs podem ser produzidos a partir de cultivos não alimentares, resíduos e combustíveis derivados de CO₂ reciclado e eletricidade de baixo carbono.

Medidas Regulatórias



- Incentivos financeiros e fiscais: Em vez de impor cotas, é necessário criar incentivos que promovam investimentos em tecnologias sustentáveis. Isso inclui subsídios, créditos fiscais e financiamento preferencial para projetos de inovação em combustíveis alternativos. Esses incentivos podem acelerar a transição para uma aviação mais sustentável sem comprometer a competitividade das companhias aéreas.

Estratégias de descarbonização na aviação

Cenários de Descarbonização

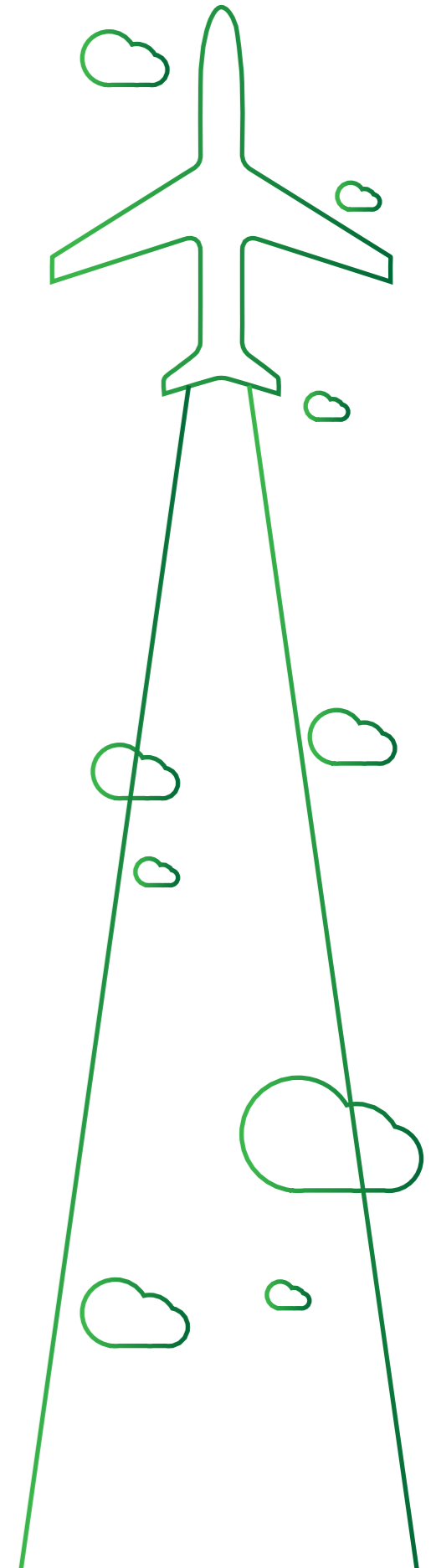
O relatório da OACI sobre a viabilidade de um Objetivo Aspiracional de Longo Prazo (Long-Term Aspirational Goal, LTAG) [10] apresenta três cenários integrados para a redução das emissões de CO₂ na aviação. Abaixo estão os detalhes de cada cenário, incluindo emissões, uso de combustíveis sustentáveis e investimentos necessários:

Cenário IS1:

- **Crescimento do tráfego:** é usada uma previsão de tráfego de base média, desenvolvida a partir das tendências atuais. Até 2050, estima-se que as emissões anuais sejam de 950 MtCO₂ e de 1.420 MtCO₂ até 2070.
- **Desenvolvimentos tecnológicos:** esse cenário inclui aeronaves de configuração convencional (tubo e asa), com melhorias incrementais na eficiência operacional, como a redução do consumo de combustível por meio de tecnologias conhecidas.
- **Melhorias operacionais e de infraestrutura:** são esperadas melhorias limitadas na eficiência operacional, com implementação lenta de tecnologias de otimização, como Aviation System Block Upgrades (ASBUs).
- **Combustíveis:**
 - SAF à base de biomassa: espera-se que cubra 19% do uso total de energia até 2050, com um investimento de aproximadamente US\$ 480 bilhões.
 - Combustíveis à base de gás residual: cobrirão 8% do uso total de energia até 2050, com um investimento de US\$ 710 bilhões.
 - LTAG-LCAF (combustíveis líquidos de baixo carbono): contribuirão com 7% do uso total de energia até 2050, com um investimento de US\$ 50 bilhões.
- **Compensações de carbono:** as emissões cumulativas entre 2021 e 2050 chegarão a 22 GtCO₂. Devido à baixa adoção de tecnologias avançadas e PES, será necessário um uso significativo de compensações de carbono.
- **Investimentos e custos:** Espera-se um investimento relativamente baixo em tecnologias avançadas, mas as compensações de carbono terão um custo considerável, totalizando US\$ 2,3 bilhões durante o período.

Cenário IS2:

- **Crescimento do tráfego:** baseia-se no crescimento médio do tráfego, com emissões anuais projetadas de 495 MtCO₂ até 2050 e 600 MtCO₂ até 2070.
- **Desenvolvimentos tecnológicos:** nesse cenário, são introduzidas aeronaves de conceito avançado, com mudanças significativas na arquitetura da aeronave que melhoram sua eficiência energética.
- **Melhorias operacionais e de infraestrutura:** a implantação de tecnologias operacionais será moderada, com um nível mais alto de otimização operacional em comparação com o cenário IS1.
- **Combustíveis:**
 - SAF à base de biomassa: cobrirá 53% do uso total de energia em 2050, com um investimento de aproximadamente US\$ 1.200 bilhões.
 - Combustíveis à base de gás residual: serão responsáveis por 19% do uso de energia em 2050, com um investimento de US\$ 1.000 bilhões.
 - LTAG-LCAF: fornecerá 28% do uso de energia, com um investimento de US\$ 105 bilhões.
- **Compensações de carbono:** as emissões cumulativas serão de 17 GtCO₂, consideravelmente menores do que no cenário IS1. As compensações de carbono serão reduzidas a um custo estimado de US\$ 230 bilhões.
- **Investimentos e custos:** Esse cenário exige maiores investimentos em tecnologias avançadas e PES, mas os custos relacionados às compensações de carbono serão muito menores.



Decarbonization strategies in aviation

Decarbonization Scenarios

Cenário IS3

- **Crescimento do tráfego:** apesar do crescimento projetado do tráfego, as emissões serão drasticamente reduzidas, com emissões anuais de apenas 200 MtCO₂ até 2050 e 210 MtCO₂ até 2070.
- **Desenvolvimentos tecnológicos:** a implantação de aeronaves movidas a hidrogênio será fundamental, juntamente com outras inovações radicais que mudarão a configuração das infraestruturas aeroportuárias e de energia.
- **Melhorias operacionais e de infraestrutura:** espera-se uma implantação agressiva de tecnologias avançadas em operações terrestres e aéreas, otimizando a eficiência das operações de voo.
- **Combustíveis:**
 - SAF à base de biomassa: cobrirá 42% do uso total de energia até 2050, com um investimento de US\$ 950 bilhões.

- Combustíveis à base de gás residual: Serão responsáveis por 46% do uso de energia, com um investimento de US\$ 1.700 bilhões.
- CO₂ atmosférico FFS: fornecerá 10% do uso de energia até 2050, com um investimento de US\$ 460 bilhões.
- Hidrogênio: fornecerá 2% do uso de energia até 2050, com um investimento de US\$ 55 bilhões, além de investimentos adicionais em infraestrutura aeroportuária de hidrogênio estimados em US\$ 125 bilhões.
- **Compensações de carbono:** as emissões cumulativas entre 2021 e 2050 serão de 12 GtCO₂, com a menor dependência de compensações de carbono devido à adoção maciça de tecnologias limpas e combustíveis alternativos.
- **Investimentos e custos:** Esse cenário exige o maior investimento (até US\$ 4 trilhões até 2050), mas as compensações de carbono necessárias serão mínimas, reduzindo significativamente os custos operacionais.



Custos para alcançar a Descarbonização

A transição para uma aviação com emissões líquidas zero envolverá custos significativos em nível global.

Custos Globais de Descarbonização

De acordo com o relatório Waypoint 2050 da ATAG [9] e a análise do LTAG da ICAO [10], os custos globais para a transição para uma aviação com emissões líquidas zero são distribuídos em várias categorias principais:

Custos para os Operadores de Aeronaves:

- Investimento Global no Cenário S2 do Waypoint 2050: Até \$5,3 trilhões de 2020 a 2050.

- Investimento Global no Cenário IS3 do ICAO LTAG: Até \$4 trilhões de 2020 a 2050.

- Média Anual Global: \$170 bilhões (Waypoint 2050) e \$130 bilhões (ICAO LTAG).

Investimento por Fornecedores (OEMs e Fornecedores de Combustível):

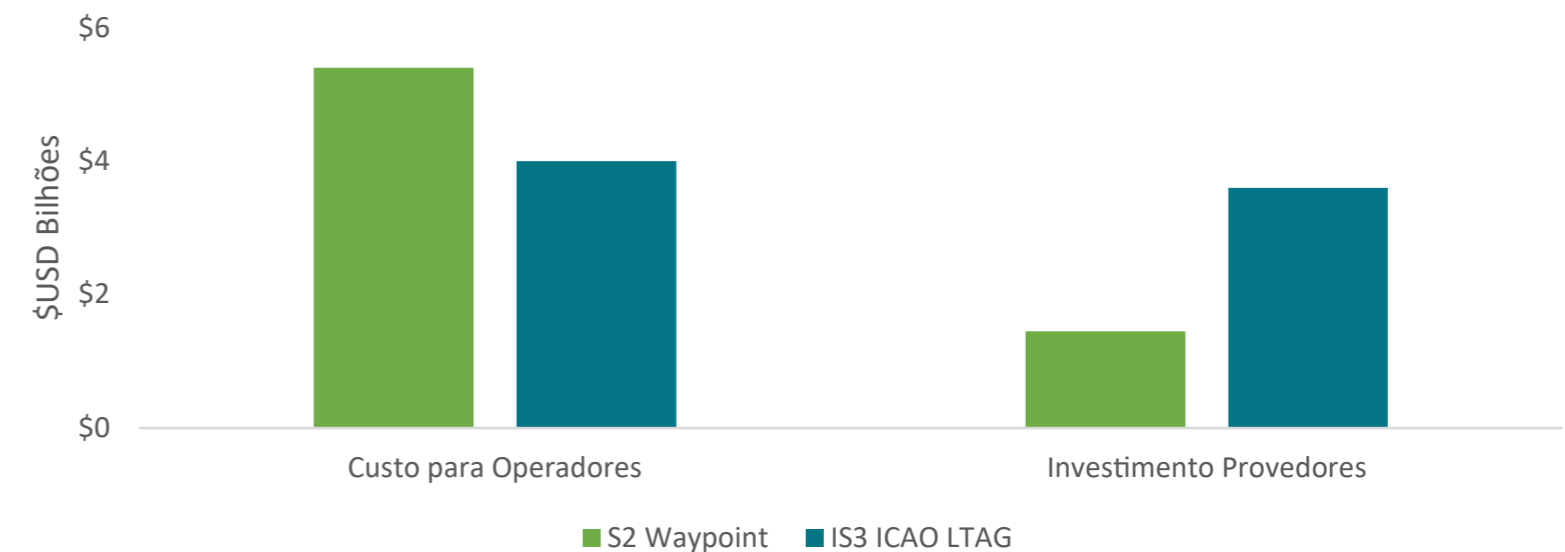
- Investimento Global no Cenário S2 do Waypoint 2050: Até \$1,45 trilhões de 2020 a 2050.

- Investimento Global no Cenário IS3 do ICAO LTAG: Até \$3,6 trilhões de 2020 a 2050.

- Média Anual Global: \$50 bilhões (Waypoint 2050) e \$120 bilhões (ICAO LTAG). (Gráfico 7)

Gráfico 7.

Custos e Investimentos Globais de Descarbonização



Outros Custos ou Investimentos:

- Waypoint 2050: Inclui custos não recorrentes dos OEMs (novos investimentos em programas de aeronaves), investimentos em pesquisa e desenvolvimento governamental, investimentos relacionados aos aeroportos (operações e infraestrutura de hidrogênio), e custos de implementação de medidas operacionais pelos fornecedores de serviços de navegação aérea (ANSP).

- ICAO LTAG: Similar ao Waypoint 2050, mas com maior inclusão de medidas fora do setor para fechar a lacuna até o objetivo de emissões líquidas zero.

Custos Proporcionais para América Latina e Caribe

Assumindo que América Latina e Caribe (ALC) representem aproximadamente 6% do tráfego aéreo mundial, e que essa participação se mantenha até 2050, é possível estimar os custos proporcionais para a região com base nos cenários de Waypoint 2050 e na análise do ICAO CAEP LTAG. No entanto, esse enfoque é conservador, pois a falta de infraestrutura na região aumenta significativamente os custos de implementação do SAF.

Um exemplo claro é o caso da Colômbia, onde a Ecopetrol produzirá SAF na refinaria de Reficar. Transportar o SAF até Bogotá não apenas adiciona custos significativos devido ao transporte, mas também gera emissões adicionais. Além disso, a falta de infraestrutura e a necessidade de importar tecnologia avançada na região elevam os custos. Somam-se a isso as altas taxas tributárias em diversos países da região, que dificultam o desenvolvimento de projetos de SAF e agravam os custos operacionais.

Portanto, apesar do cálculo ser baseado na premissa de que os custos serão proporcionais a 6% do tráfego global, é importante ressaltar que este é um cenário conservador. A realidade é que a América Latina provavelmente enfrentará custos mais elevados devido à infraestrutura limitada, custos de transporte e barreiras fiscais que afetam a competitividade da região.

Custos para os Operadores de Aeronaves:

- Custo Proporcional ao Custo Global de Waypoint 2050 (S2): US\$318 bilhões de 2020 a 2050.
- Custo Proporcional ao Custo Global de ICAO LTAG (IS3): US\$240 bilhões de 2020 a 2050.
- Média Anual Proporcional: US\$10,2 bilhões (Waypoint 2050) e US\$7,8 bilhões (ICAO LTAG).

Esses custos incluem investimentos na produção de SAF, no desenvolvimento de novas tecnologias para aeronaves, em melhorias operacionais e infraestruturais, e em medidas de compensação de carbono. Vale destacar que os custos anuais médios serão menores nos primeiros anos, aumentando posteriormente com o crescimento do tráfego e do uso de combustível.

A colaboração entre governos, companhias aéreas, fornecedores de energia e outros atores-chave será crucial para financiar e implementar essa transição para uma aviação sustentável e com emissões líquidas zero na região.

O foco do análise está no cenário 2 de Waypoint 2050, que prioriza a adoção massiva de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e inclui os custos de descarbonização da aviação doméstica. Isso é especialmente relevante, pois aproximadamente 55% do tráfego na América Latina e Caribe é doméstico. A escolha de focar no SAF se deve à dificuldade de isolar e quantificar os custos incrementais das melhorias tecnológicas nas aeronaves.

Supostos Preços de SAF:

Com base nas projeções e cenários da ICAO/CAEP, o estudo Waypoint 2050 se baseia nas seguintes suposições para os preços unitários de SAF:

- Combustíveis derivados de resíduos e biomassa:
 - o Em 2020: aproximadamente \$1.220 por tonelada.
 - o Em 2050: aproximadamente \$1.460 por tonelada.
- Combustíveis baseados em gases residuais:
 - o Em 2020: aproximadamente \$3.650 por tonelada.
 - o Em 2050: aproximadamente \$1.700 por tonelada.
- Combustíveis power-to-liquid derivados de CO₂ atmosférico:
 - o Em 2020: aproximadamente \$4.250 por tonelada.
 - o Em 2050: aproximadamente \$1.280 por tonelada.

É importante notar que assume-se o máximo apoio estatal e governamental possível para alcançar esses preços projetados. Essas projeções de preços são usadas para estimar os custos da transição para o SAF e seu impacto nos custos operacionais das companhias aéreas. Comparando com os preços atuais, o custo médio por tonelada de combustível de aviação na América Latina e Caribe foi de US\$890 no último ano, significando que, dependendo do tipo de SAF utilizado, o preço do SAF pode ser de 40% a 350% mais caro do que o combustível convencional.

Impacto nos preços das passagens aéreas:

A adoção do SAF é essencial para reduzir as emissões de CO₂, mas também resultará em custos adicionais que podem impactar os preços das passagens aéreas e a conectividade. O preço de uma passagem depende de muitos fatores, como a concorrência, os custos operacionais, a demanda e as políticas governamentais. Embora as tarifas tenham diminuído desde a desregulação nos anos 70, essa redução não foi uniforme em todas as rotas. Historicamente, novas tecnologias e maior eficiência ajudaram a reduzir os custos operacionais, e conseqüentemente, os preços das passagens.

No contexto competitivo e com margens apertadas, as companhias aéreas da América Latina e Caribe conseguiram reduzir seu CASK (custo por assento quilômetro disponível) em 46,6% desde 2011, enquanto o Yield (ingresso gerado por passageiro por quilômetro voado) caiu 47,72% em termos reais (Gráfico 8). Essa relação quase linear entre CASK e Yield pode ajudar a prever como as tarifas poderiam evoluir com aumentos futuros nos custos operacionais.

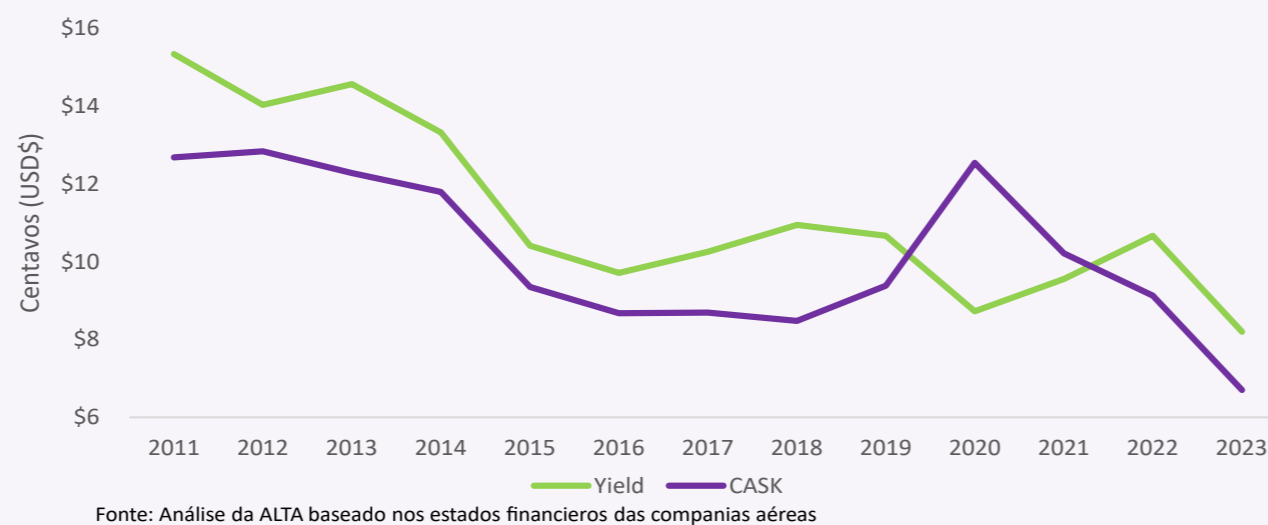


Impacto nos preços das passagens aéreas:



Impacto nos preços das passagens aéreas:

Gráfico 8. Evolução do CASK (custo por assento-km disponível) e do Yield (receita por passageiro-km) das cias aéreas da ALC, valores ajustados com a inflação.



Esta tendência não se limita à América Latina e ao Caribe, mas também é observada globalmente. De acordo com dados da IATA, nas últimas cinco décadas, a indústria aérea mundial experimentou uma redução notável nos custos unitários reais, que diminuíram mais de quatro vezes, junto com uma queda quase seis vezes nos Yields reais.

Essa redução foi impulsionada por avanços tecnológicos, como a introdução de motores a jato e sistemas digitais, assim como por mudanças regulatórias significativas. Apesar de diversos choques macroeconômicos, a melhoria contínua na eficiência operacional e a intensa concorrência mantiveram essa redução de custos, e espera-se que ela continue no futuro.

Graças à redução de custos e às melhorias na eficiência operacional, voar na América Latina é mais acessível hoje do que em 2011 (gráfico 9). Para medir essa acessibilidade, foi utilizada a proporção da tarifa média de cada ano em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) per capita ajustado pela Paridade de Poder de Compra (PPC). Essa relação mostra a parte da renda dos passageiros destinada a voar, e sua redução sugere que voar se tornou mais acessível em termos relativos, seja pelo aumento da renda, pela diminuição das tarifas em termos reais, ou ambos. No caso da América Latina, a renda per capita aumentou 7,2% desde 2011, enquanto a tarifa média em termos reais diminuiu mais de 40%.

É importante destacar que, embora a acessibilidade tenha melhorado a nível regional, o impacto dessa redução nas tarifas varia entre os países devido a diferenças nos níveis de renda, distribuição da riqueza e custos associados ao transporte aéreo. Essa variabilidade influencia a capacidade dos passageiros de acessar o transporte aéreo em diferentes mercados.

O gráfico a seguir mostra a tarifa média por voo para a região da América Latina e do Caribe, calculada utilizando o Yield de cada ano e a distância média por etapa de 1.500 quilômetros. Em 2011, o Yield ajustado para os preços de 2021 era de 13,26 centavos, enquanto em 2023 caiu para 7,29 centavos. Essa redução demonstra que, apesar dos custos operacionais, o custo de voar diminuiu em termos reais, melhorando a acessibilidade e incentivando a conectividade.

Gráfico 9. Tarifa média como % do PIB per capita (PPP, preços \$ de 2021)

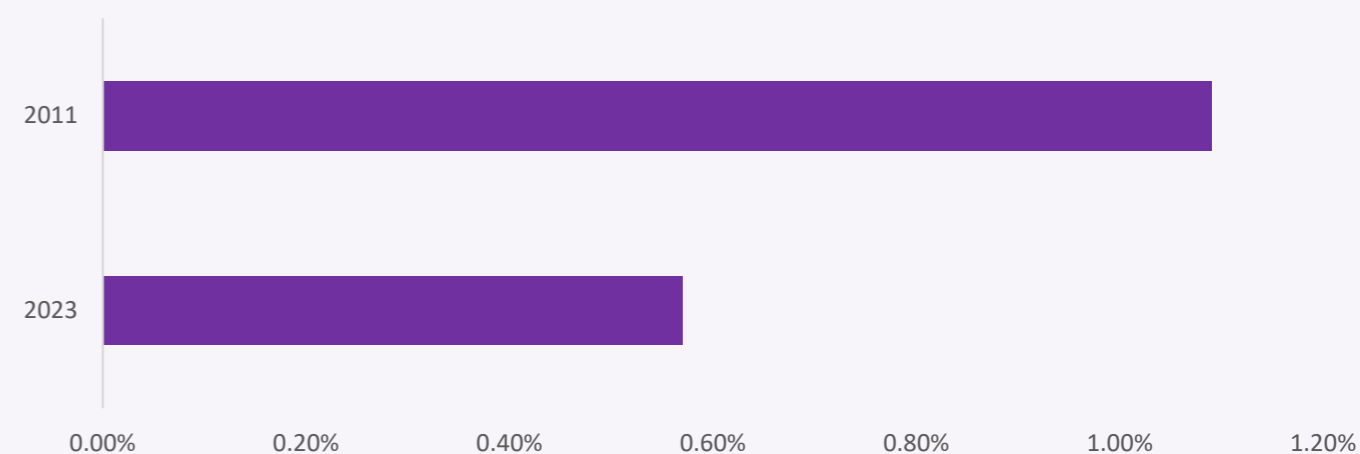
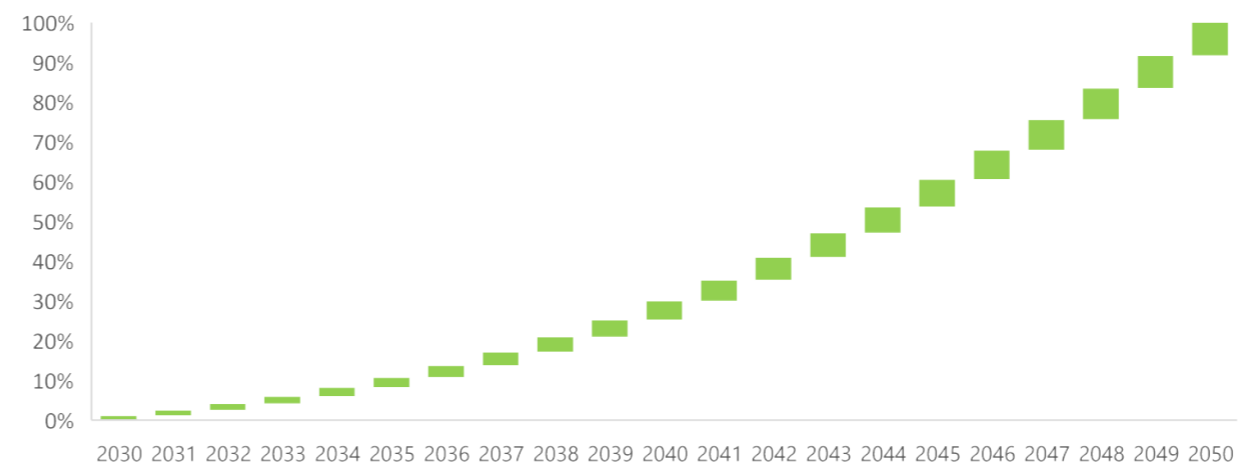


Gráfico 10.
Distribuição do percentual anual de sobrecusto total por adoção de SAF



A transição de combustíveis fósseis para SAF (Combustíveis Sustentáveis de Aviação) implica um aumento nos custos operacionais. Utilizando os dados do estudo Waypoint 2050 do Air Transport Action Group (ATAG), descritos nas seções anteriores, estima-se um custo adicional total para a América Latina e o Caribe de 318 bilhões de USD no período de 2030 a 2050, no cenário S2 (aplicando os custos proporcionais de acordo com a porcentagem de tráfego).

Para distribuir esse custo adicional de forma realista ao longo do tempo, foi utilizada uma curva logística, um modelo matemático comumente usado para representar a adoção gradual de novas tecnologias [11][12]. Este modelo permite capturar como o aumento nos custos se acelerará à medida que a adoção do SAF avança, atingindo seu pico por volta de 2050. A curva logística garante que os custos anuais sejam distribuídos de forma progressiva, começando de forma modesta em 2030 e aumentando gradualmente, refletindo uma adoção escalonada e realista dessa nova tecnologia.

A seguir, é apresentada no Gráfico 10 a distribuição percentual do custo adicional total de US\$ 318 bilhões durante o período de

2030 a 2050, calculada por meio da curva logística:

Para os efeitos deste documento, busca-se quantificar o quanto as tarifas aéreas poderiam aumentar como resultado da descarbonização, em comparação com o cenário atual. Alguns dos pressupostos incluem a taxa de crescimento do tráfego aéreo e uma redução média de 2% ao ano tanto no CASK não relacionado com combustível quanto no CASK relacionado com combustível. Dado que quantificar com precisão o impacto futuro é inerentemente complexo, foi adotado um modelo baseado em referências de trabalhos e estudos anteriores realizados no campo da economia do transporte aéreo.

O estudo de Wang et al. [13] explora como os custos operacionais, especificamente o Custo por Assento-Kilômetro Disponível (CASK), influenciam as tarifas aéreas. Os autores destacam que um aumento no CASK total tende a elevar as tarifas aéreas, particularmente em mercados onde as companhias aéreas podem repassar esses custos para os passageiros. O CASK de combustível tem uma influência significativa no Yield, já que o combustível representa uma parte importante dos custos operacionais, enquanto o CASK não relacionado com combustível tem um impacto mais limitado.

Wang et al. concluem que as tarifas aéreas são particularmente sensíveis às mudanças no custo do combustível, com variações regionais que refletem as diferenças na estrutura de mercado e a elasticidade da demanda em diferentes regiões. Esses achados destacam a importância de considerar o contexto regional ao analisar como os custos operacionais poderiam influenciar as tarifas.

Utilizando uma metodologia similar, foi implementado um modelo de regressão linear múltipla para analisar a relação entre o Yield e os diferentes componentes do CASK no contexto da América Latina e do Caribe. Este modelo permite explorar como os custos operacionais adicionais devido à descarbonização poderiam se traduzir em aumentos nas tarifas aéreas. O modelo desenvolvido neste documento se baseia em dados históricos de CASK e Yield correspondentes ao período de 2004 a 2023. Esses dados foram coletados pela Associação Latino-Americana e do Caribe de Transporte Aéreo (ALTA) a partir dos relatórios financeiros publicados pelas companhias aéreas membros, complementados com análises próprias realizadas pela ALTA.

Estimativa de aumento nas tarifas aéreas

Metodologia do modelo

Para analisar a relação entre os custos operacionais e o Yield, foi implementado um modelo de regressão linear múltipla. Esse tipo de modelo permite quantificar o impacto de múltiplas variáveis independentes em uma variável dependente, neste caso, o Yield (receita por passageiro-quilômetro). A fórmula do modelo é a seguinte:

$$\text{Yield} = \alpha + \beta_1 \times \text{CASK} + \beta_2 \times \text{CASK (ex-combustible)} + \beta_3 \times \text{CASK (combustible)} + \epsilon$$

Onde:

- α é a constante do modelo, que representa o valor do Yield quando todas as variáveis independentes são zero.
- β_1 , β_2 e β_3 são os coeficientes de regressão que indicam a mudança esperada no Yield para cada unidade de mudança em CASK, CASK (ex - combustível) e CASK (combustível), respectivamente.
- ϵ é o termo de erro, que captura a variabilidade do Yield não explicada pelas variáveis incluídas no modelo.

Resultados do modelo:

O modelo de regressão linear múltipla gerou os seguintes resultados:

- CASK total: Coeficiente de 1,0583 ($p < 0,001$), indicando que um aumento no CASK está associado a um aumento significativo no Yield. Para cada unidade adicional de CASK, o Yield aumenta aproximadamente 1,06 unidades.
- CASK de combustível: Coeficiente de 0,7045 ($p = 0,037$), o que sugere que um aumento no custo do combustível tem um impacto considerável no Yield. Este resultado destaca a importância do combustível como componente crítico do CASK.
- CASK não relacionado com combustível: Coeficiente de 0,3538 ($p = 0,157$). Embora o efeito seja positivo, ele não é estatisticamente significativo neste modelo, indicando que os aumentos nos custos não relacionados ao combustível podem ter um impacto menor ou

menos direto nas tarifas aéreas.

O modelo apresenta um R-quadrado de 0,923, o que significa que 92,3% da variabilidade no Yield pode ser explicada pelas mudanças no CASK total, no CASK de combustível e no CASK não relacionado com combustível.

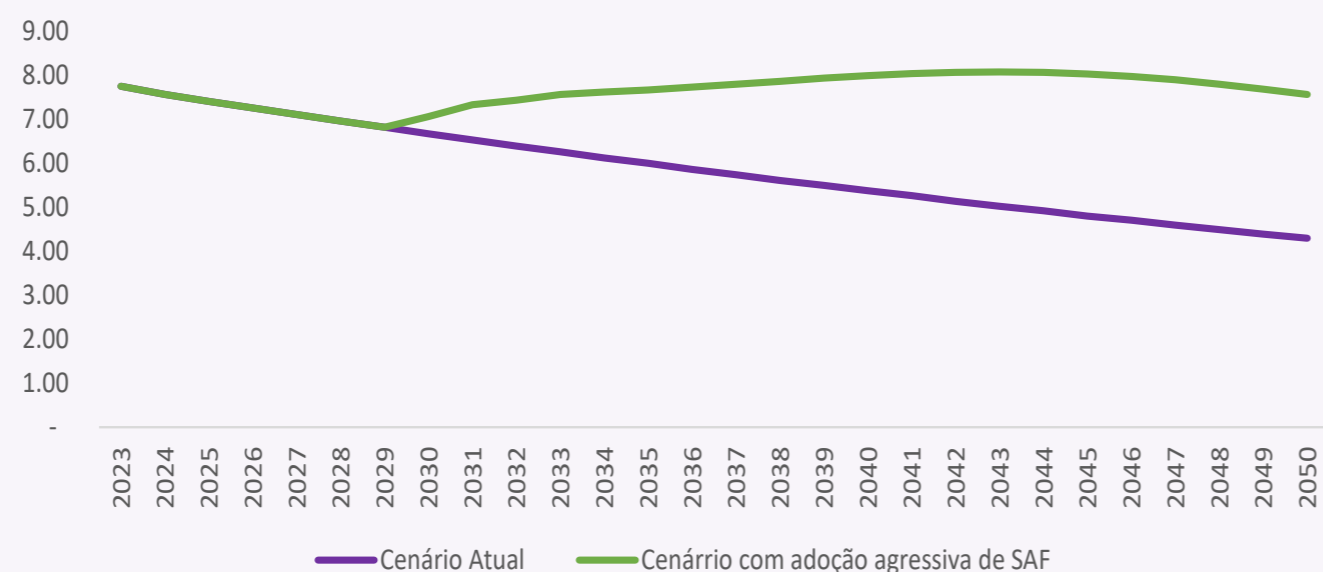
Projeção do Yield Sob Cenários de Descarbonização

Para entender como a adoção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) poderia impactar as tarifas aéreas, foram comparados dois cenários utilizando o modelo de regressão desenvolvido: um sem a adoção de SAF e outro com a adoção progressiva do SAF, ajustando os valores do CASK conforme necessário (gráfico 11). Para os custos adicionais do SAF, foram utilizados os valores obtidos pela curva logística (% proporcional ao custo total do estudo Waypoint 2050 da ATAG) para cada ano a partir de 2030.

Cenário atual: Neste cenário, foi utilizado o CASK projetado sem considerar os custos adicionais associados ao SAF. Os resultados indicam que, sob condições operacionais padrão, o Yield experimentaria uma redução gradual ao longo do período de 2023 a 2050. Esse declínio é explicado pela esperada melhoria na eficiência operacional e pela redução dos custos operacionais não relacionados ao combustível. Os pressupostos assumidos nesse cenário incluem uma redução de 2% ao ano tanto no CASK não relacionado com combustível quanto no CASK relacionado com combustível. Além disso, assume-se que o preço do combustível convencional seja estável no futuro e que a capacidade aumente 3% ao ano.

Cenário com adoção agressiva de SAF: O segundo cenário integra o impacto do SAF no CASK. Ao incluir os custos adicionais do SAF (baseado no aumento anual a partir de 2030, conforme os custos obtidos do estudo Waypoint 2050), observa-se que o Yield projetado é consistentemente mais alto em comparação com o cenário atual. Essa diferença reflete a transferência dos custos adicionais de descarbonização para os passageiros. Os resultados mostram que, à medida que a adoção do SAF aumenta, especialmente após 2030, o Yield aumenta proporcionalmente. Esse achado destaca a sensibilidade das tarifas aéreas ao aumento nos custos operacionais relacionados à adoção de combustíveis sustentáveis.

Gráfico 11.
Comparação de receitas por passageiro-kilômetro de acordo com cenários de descarbonização

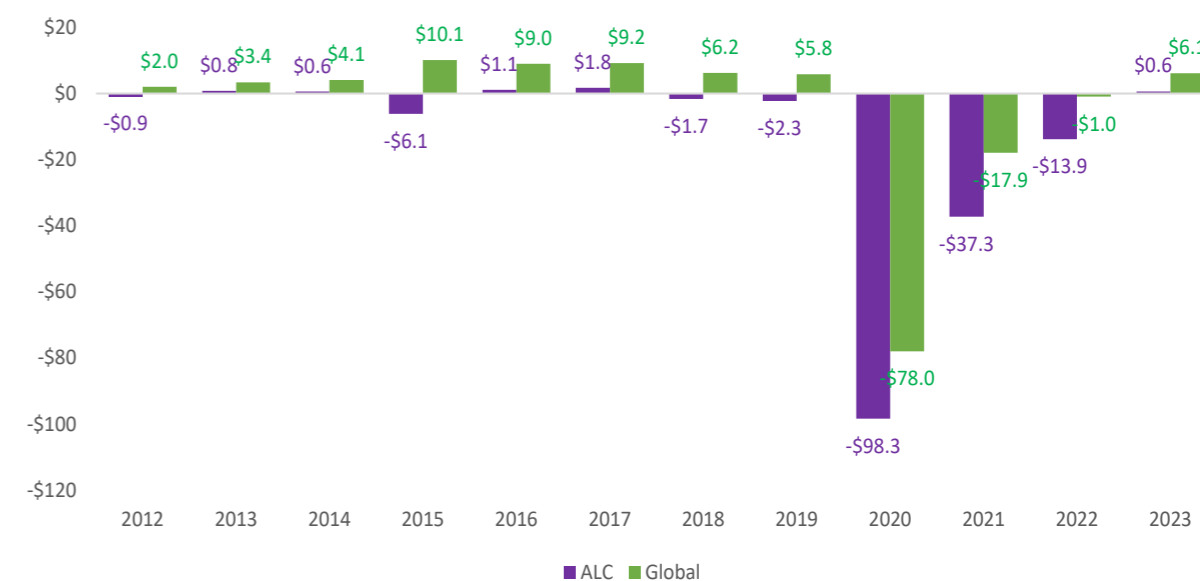


A diferença entre ambos os cenários destaca o impacto econômico que a descarbonização pode ter nas tarifas aéreas. Vale ressaltar que essas projeções se baseiam nas premissas e variáveis descritas anteriormente. Além disso, é importante mencionar que essas premissas não incluem um possível aumento no preço do carbono nos próximos anos, instabilidade no preço do combustível Jet devido a conflitos geopolíticos, custos adicionais com compensações de carbono (como os associados ao CORSIA ou outros esquemas de compensação), ou os custos financeiros e operacionais relacionados aos riscos climáticos. Todos esses fatores podem afetar significativamente as margens operacionais das companhias aéreas, mesmo sem a adoção de SAF. Este modelo foi simplificado para comparar um cenário sem variáveis de descarbonização — exceto pelas melhorias na eficiência do combustível — com um cenário de adoção do SAF, mas não considera os custos potenciais pela não ação climática.

Também é importante observar que as companhias aéreas na América Latina e no Caribe já enfrentam uma situação de rentabilidade limitada, como pode ser visto na evolução do lucro/prejuízo líquido por passageiro em comparação com a média mundial (gráfico 12). Isso evidencia que qualquer aumento nos custos operacionais, como os relacionados à descarbonização, teria um impacto considerável na capacidade das companhias aéreas de manter sua competitividade e acessibilidade na região.



Gráfico 12.
Rentabilidade líquida por passageiro



Nos últimos anos, as companhias aéreas da região têm registrado margens de lucro baixas, e até mesmo perdas mais pronunciadas do que seus pares globalmente. Nesse contexto, qualquer aumento nos custos, como os associados à adoção de SAF (Combustíveis Sustentáveis para Aviação), não apenas representaria um desafio adicional, mas também seria inevitável transferir esses custos extras para os passageiros para manter a viabilidade econômica. A comparação com a média global mostra que, em muitos casos, as companhias aéreas da região têm menos margem para absorver custos adicionais sem ajustar as tarifas, o que reforça a necessidade de uma estratégia de preços que reflita adequadamente os custos operacionais crescentes.

Desafios e recomendações para alcançar a descarbonização da indústria e maior competitividade nos preços do SAF

Em linha com o objetivo deste documento de promover uma abordagem colaborativa para alcançar os objetivos de aviação sustentável, enquanto se mantém a acessibilidade e a viabilidade do transporte aéreo na América Latina, esta última seção visa apresentar uma série de recomendações e ações que facilitem a realização desse objetivo.

O desafio de descarbonizar a aviação na América Latina e no Caribe é considerável, especialmente considerando as

características geográficas e socioeconômicas únicas da região. No entanto, essas características também apresentam oportunidades significativas. A vasta biodiversidade, a abundância de recursos naturais e a crescente necessidade de melhorar a conectividade regional fornecem uma base sólida para impulsionar uma transição para uma aviação mais sustentável.

A seguir, estão detalhadas algumas recomendações de ações que apoiariam a descarbonização do setor na região:



Desafios e recomendações para alcançar a descarbonização da indústria e maior competitividade nos preços do SAF

1. Fomentar múltiplos caminhos para a descarbonização:

Atingir as emissões líquidas zero de carbono na aviação é um desafio complexo que exige uma abordagem diversificada. Na América Latina, é essencial adotar uma estratégia que permita explorar e potencializar todas as vias disponíveis para reduzir as emissões do setor. Isso inclui a promoção ativa de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), que têm o potencial de reduzir drasticamente as emissões de CO₂. A região possui uma abundância de recursos naturais que a posiciona favoravelmente para liderar a produção mundial de SAF, especialmente em países como o Brasil, que é um dos maiores produtores de óleo de palma do mundo e pode abastecer 34% da demanda global de SAF até 2030, além de sua experiência no uso e produção de biodiesel com cana-de-açúcar [14]. O México tem acesso a matérias-primas como jatropha [15], algas e óleos usados, o que lhe confere um alto potencial para escalar a produção de SAF, enquanto a Colômbia, com sua robusta produção de óleo de palma e cana-de-açúcar, está bem-posicionada para aproveitar esses recursos na geração de biocombustíveis avançados [16]. O Chile tem o potencial de se tornar um produtor de hidrogênio verde e um dos principais exportadores globais até 2040 [14]. O Peru e o Equador possuem ampla disponibilidade de resíduos agrícolas.

Além disso, devem ser promovidas melhorias na eficiência operacional, tanto nas companhias aéreas quanto nos aeroportos e na gestão do tráfego aéreo. Essas melhorias, como a otimização de rotas, podem oferecer reduções imediatas nas emissões. Finalmente, é crucial fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias, como aeronaves elétricas ou híbridas, e mecanismos de mercado, como as compensações, para lidar com as emissões que não possam ser eliminadas por outros meios.

2. Estabelecer um marco regulatório com metas claras e consistentes:

A transição para uma aviação sustentável na América Latina exige um marco regulatório robusto que ofereça segurança jurídica e promova investimentos a longo prazo. As políticas públicas devem ser coerentes e alinhadas com os compromissos globais associados à redução das emissões de gases de efeito estufa. É importante que essas políticas não se concentrem apenas na descarbonização, mas também considerem o impacto no crescimento econômico e na acessibilidade do transporte aéreo.

Para alcançar isso, é essencial que os governos promovam a criação de esquemas de carbono que incluam a certificação de créditos de carbono. Esses créditos devem fazer parte de uma abordagem mais ampla, permitindo que as companhias aéreas compensem suas emissões de maneira eficaz enquanto desenvolvem novas tecnologias e escalonam a produção de SAF. Nesse sentido, os governos devem emitir cartas de autorização que certifiquem que os créditos de carbono podem ser usados em programas como o CORSIA, garantindo que não haja duplicação na contabilização dessas reduções de emissões. Além disso, seria benéfico que as companhias aéreas pudessem retirar os créditos aprovados no programa CORSIA, garantindo transparência e alinhamento com compromissos internacionais como o Acordo de Paris e os princípios do Artigo 6.

Finalmente, em vez de impor mandatos que aumentariam os custos, seria preferível que as políticas públicas incluíssem incentivos que tornassem mais economicamente viável a adoção dessas tecnologias. Isso permitiria uma transição mais gradual e menos disruptiva para a indústria, fomentando uma adoção sustentável das medidas necessárias.

3. Assegurar um crescimento sustentável que potencie a competitividade regional:

O desenvolvimento de uma aviação sustentável na América Latina deve ser visto não apenas como uma necessidade ambiental, mas também como uma oportunidade para impulsionar o crescimento econômico e melhorar a competitividade regional. A aviação é um motor-chave para a economia da região, e seu crescimento sustentável é essencial para maximizar os benefícios socioeconômicos, como a criação de empregos e a melhoria da conectividade.

O desenvolvimento do SAF na região representa uma oportunidade significativa para criar empregos e estimular o crescimento econômico ao longo da cadeia de suprimentos. De acordo com o estudo "ICF Fueling Net Zero" (2021), os investimentos em bioenergia são altamente eficazes para gerar empregos. Entre 2010 e 2019, foram investidos 151 bilhões de dólares em capacidade de bioenergia e biocombustíveis, o que gerou 3,58 milhões de empregos em 2020, ou seja, mais de 23 empregos por milhão de dólares investido. Isso é significativamente superior a outros setores, como a energia solar (2,7 empregos por milhão) e a energia eólica (1,1 empregos por milhão). Esses dados destacam o enorme potencial econômico que a produção e expansão do SAF podem ter na América Latina, tanto em termos de descarbonização quanto de desenvolvimento econômico.

Desafios e recomendações para alcançar a descarbonização da indústria e maior competitividade nos preços do SAF

É fundamental que as medidas de descarbonização não limitem o acesso ao transporte aéreo nem aumentem os custos a ponto de restringir a conectividade. Com uma colaboração adequada entre o setor público e privado, a América Latina pode liderar a adoção de novas tecnologias e a produção de SAF, posicionando-se como um modelo global de aviação sustentável, enquanto mantém a acessibilidade econômica do transporte aéreo.

Essa colaboração deve focar em criar um ambiente favorável à inovação e ao desenvolvimento de soluções que não apenas contribuam para a redução das emissões, mas também promovam o crescimento econômico e a segurança energética na região.

A seguir, são apresentadas recomendações essenciais direcionadas às companhias aéreas, governos e demais atores do ecossistema envolvidos na adoção do SAF, com o objetivo de garantir que seu preço seja competitivo até 2050:

• Fundos de investimento colaborativos

Criar fundos de investimento por meio da colaboração entre companhias aéreas, aeroportos, investidores, arrendadores, fabricantes de aeronaves e motores e grandes empresas comprometidas com a redução de emissões, para financiar projetos inovadores nas primeiras etapas da produção de SAF.

Por ejemplo:

- Schiphol oferece até €500 por tonelada de SAF e até €1000 por tonelada de combustíveis sintéticos, com um limite de €2,5 milhões em subsídios, exigindo previsões de uso de SAF para o próximo ano (Schiphol Airport - Charges and Conditions 2022).
- Heathrow tem um esquema de subsídios de €533 por tonelada de SAF, com um limite de €11. 11,6 milhões,

incentivando as companhias aéreas por meio de reduções nas taxas de emissão de NOx (Heathrow SAF Incentive, 2021).

- O Milan Airports oferece até 500 euros por tonelada de SAF com um limite de 450 mil euros até 2023 (SEA Milan Airports, 2023).
- O Dusseldorf Airport oferece um subsídio de 250 euros por tonelada de SAF, sem limite superior, com um máximo de 1.000 toneladas por reabastecimento (Dusseldorf Airport - Tariff Regulations).

• Impulsionar o investimento em infraestrutura

Promover a participação de investidores em infraestrutura de longo prazo para a produção, armazenamento e distribuição de SAF na América Latina, além de implementar projetos piloto.

• Desenvolver um ambiente regulatório favorável

Os governos da América Latina devem criar um ambiente regulatório que facilite o desenvolvimento da infraestrutura de SAF por meio de normas que agilizem investimentos, licenças aceleradas, incentivos fiscais e marcos legais claros.

Não deve ser desenvolvida uma política em que as companhias aéreas sejam obrigadas a comprar ou usar uma determinada quantidade desses SAF (mandatos),

• Incluir matérias-primas e medições regionais em esquemas internacionais

Os países da região devem trabalhar para garantir que as matérias-primas e as medições de Análise do Ciclo de Vida (LCA) da região sejam reconhecidas em esquemas internacionais, como o CORSIA.

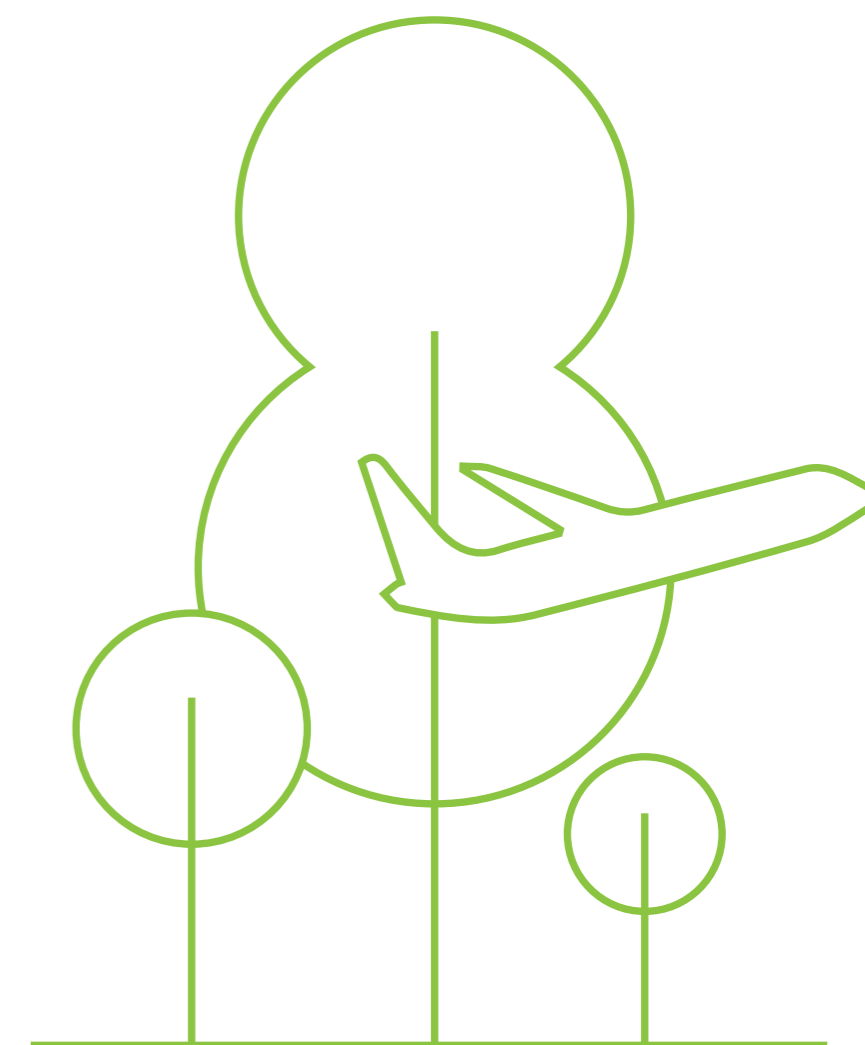
• Apoiar a inovação em matérias-primas

Estabelecer programas de apoio e incentivos para a

produção, pesquisa e desenvolvimento de novas fontes de matérias-primas para SAF que sejam mais abundantes e sustentáveis na região, como resíduos agrícolas e florestais.

• Integração de energias renováveis

Aumentar a integração de energias renováveis nos processos de produção de SAF, utilizando eletricidade de fontes renováveis para reduzir os custos energéticos e diminuir as emissões associadas à produção.



Anexo 1

Estado atual dos combustíveis de aviação sustentável (SAF) e perspectivas para 2050

- Alcançar os objetivos de descarbonização do setor aéreo até 2050 dependerá de uma combinação de medidas, incluindo a adoção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), novas tecnologias energéticas, otimização operacional e o uso de compensações de carbono, entre outras.

- É importante considerar que as características e o contexto de desenvolvimento variam de país para país, e por isso as soluções devem ser adaptadas às necessidades específicas de cada mercado. As compensações de carbono, por exemplo, podem oferecer uma ferramenta a curto prazo em regiões onde a adoção de tecnologias mais limpas seja mais lenta, permitindo a mitigação das emissões por meio de projetos como a reflorestação.

- Embora o SAF seja um componente importante da estratégia de descarbonização, é necessário combiná-lo com outras soluções tecnológicas e operacionais, levando em conta os diferentes contextos de desenvolvimento nos países da região. De acordo com os cenários do Long-Term Aspirational Goal (LTAG) da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), as reduções de emissões variam conforme as estratégias combinadas. No cenário IS1, projeta-se uma redução de 20% nas emissões por meio de tecnologias de aeronaves, 4% por melhorias operacionais e 15% com combustíveis mais limpos até 2050. No cenário IS2, as reduções podem chegar a 21% com novas tecnologias, 6% com operações mais eficientes e 41% por meio de combustíveis alternativos. Finalmente, o cenário mais ambicioso, IS3, projeta uma redução de 21% nas emissões devido às tecnologias de aeronaves, 11% por eficiência operacional e 55% com o uso de combustíveis alternativos como o hidrogênio.

- Este anexo foca em apresentar o estado atual do SAF na região e o panorama futuro, utilizando dados da S&P Global. De acordo com suas projeções, sob as tendências atuais, a oferta total de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) na América Latina e no Caribe atingirá 118.000 barris/dia em 2050, com uma taxa de crescimento composta anual (CAGR) de 18% nos próximos 25 anos (gráfico 13). Estima-se que o Brasil será responsável por pelo menos 60% do total dessa oferta regional (gráfico 14).



Anexo 1

Estado atual dos combustíveis de aviação sustentável (SAF) e perspectivas para 2050

De acordo com a S&P Global, as projeções sobre a oferta de SAF na região (gráfico 13) preveem um crescimento contínuo na produção até 2050. O método de produção por Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) continuará sendo o mais relevante, representando mais de 50% do fornecimento total nesse ano.

Gráfico 13. Projeção do fornecimento de SAF para América Latina (2027-2050)

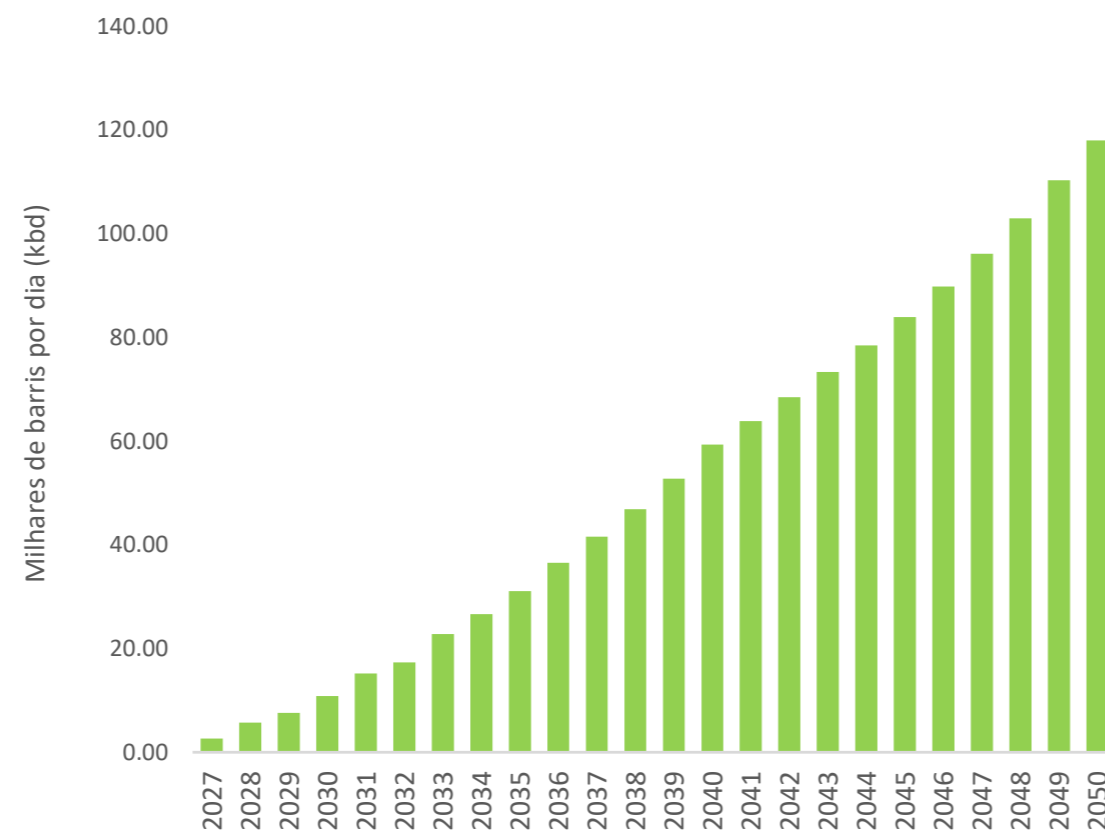
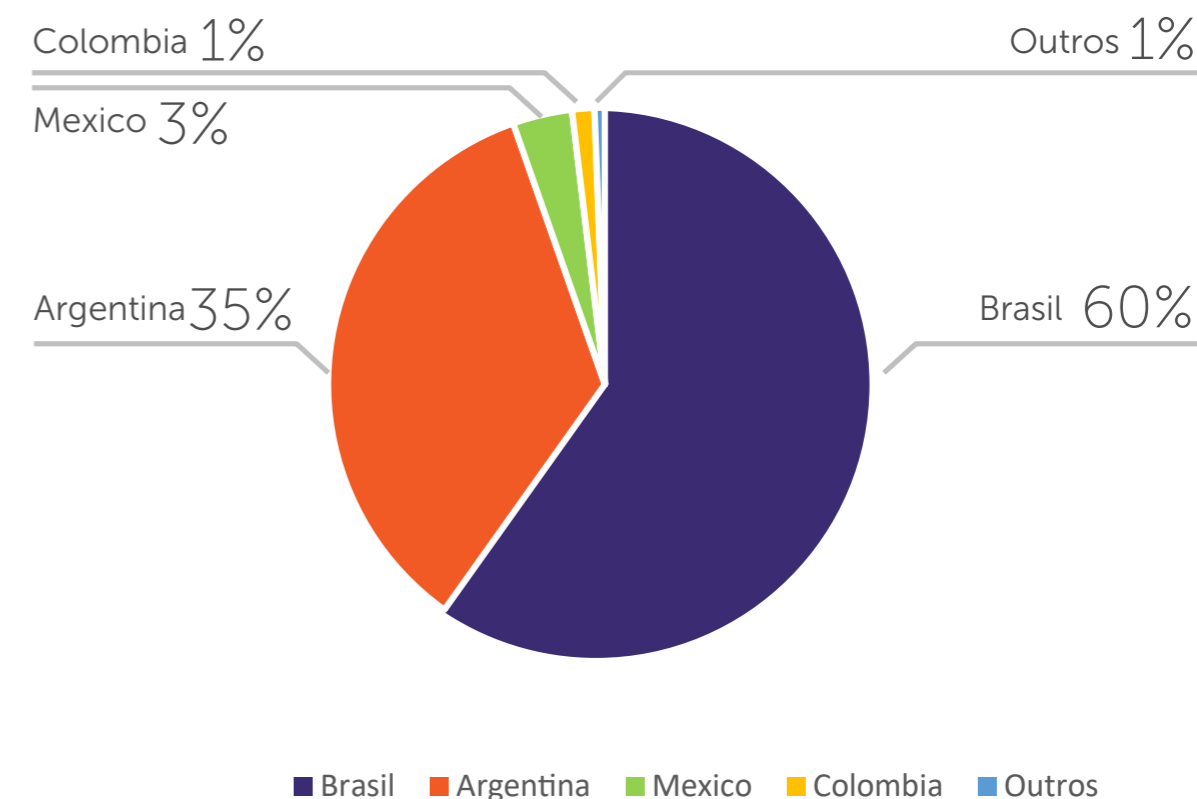


Gráfico 14. Participação por país da oferta total projetada de SAF na ALC (2050)



Fonte: Análise da ALTA baseada no S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.

No entanto, a partir de 2030, espera-se um aumento considerável na participação da tecnologia Alcohol-to-Jet (AtJ), que atingirá 39,6 mil barris diários em 2050, impulsionada pela maior disponibilidade de matérias-primas de baixa intensidade de carbono, como o etanol, em países como o Brasil, onde a indústria a partir da cana-de-açúcar será crucial nessa transição. Isso sugere que a América Latina começará a diversificar suas fontes de produção de SAF, reduzindo sua dependência do HEFA. A diversificação das tecnologias de produção será essencial para atender à crescente demanda, aproveitando os abundantes recursos agrícolas e energéticos da região. À medida que essas tecnologias evoluírem, elas se tornarão mais acessíveis e eficientes.



Anexo 1

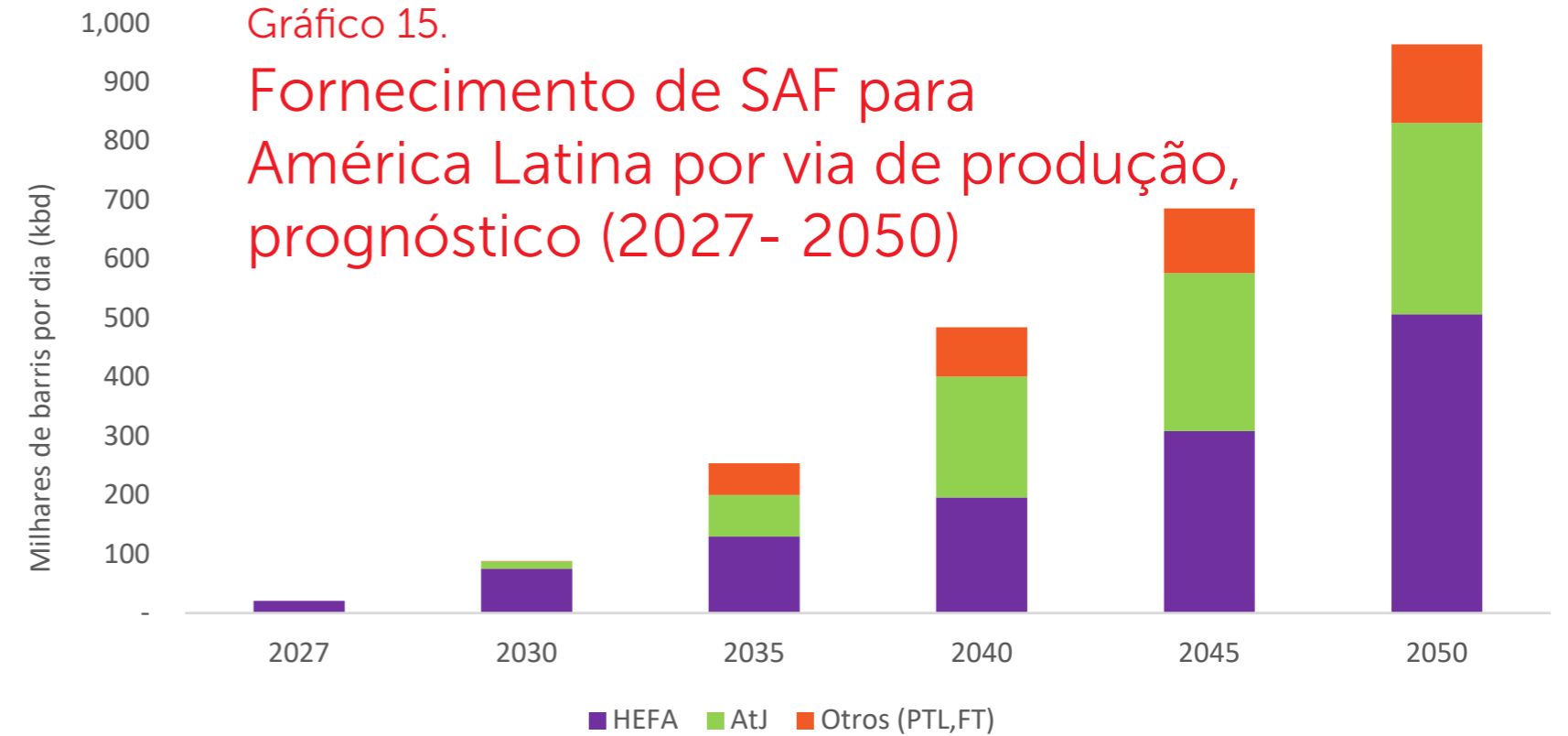
Estado atual dos combustíveis de aviação sustentável (SAF) e perspectivas para 2050



Atualmente, o SAF produzido através da via HEFA (Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados) tem um custo entre 2 a 5 vezes maior que o combustível fóssil convencional (gráfico 16). Embora se espere que os preços diminuam com inovações tecnológicas e economias de escala, esses custos dependem em grande parte do método de produção e da matéria-prima utilizada. O processo HEFA é apenas uma das várias rotas para a produção de SAF, e nem todas enfrentam as mesmas condições. Outras rotas, como a gaseificação de biomassa ou os combustíveis sintéticos, podem ter custos diferentes e enfrentar desafios específicos, dependendo dos recursos e capacidades disponíveis em cada região.

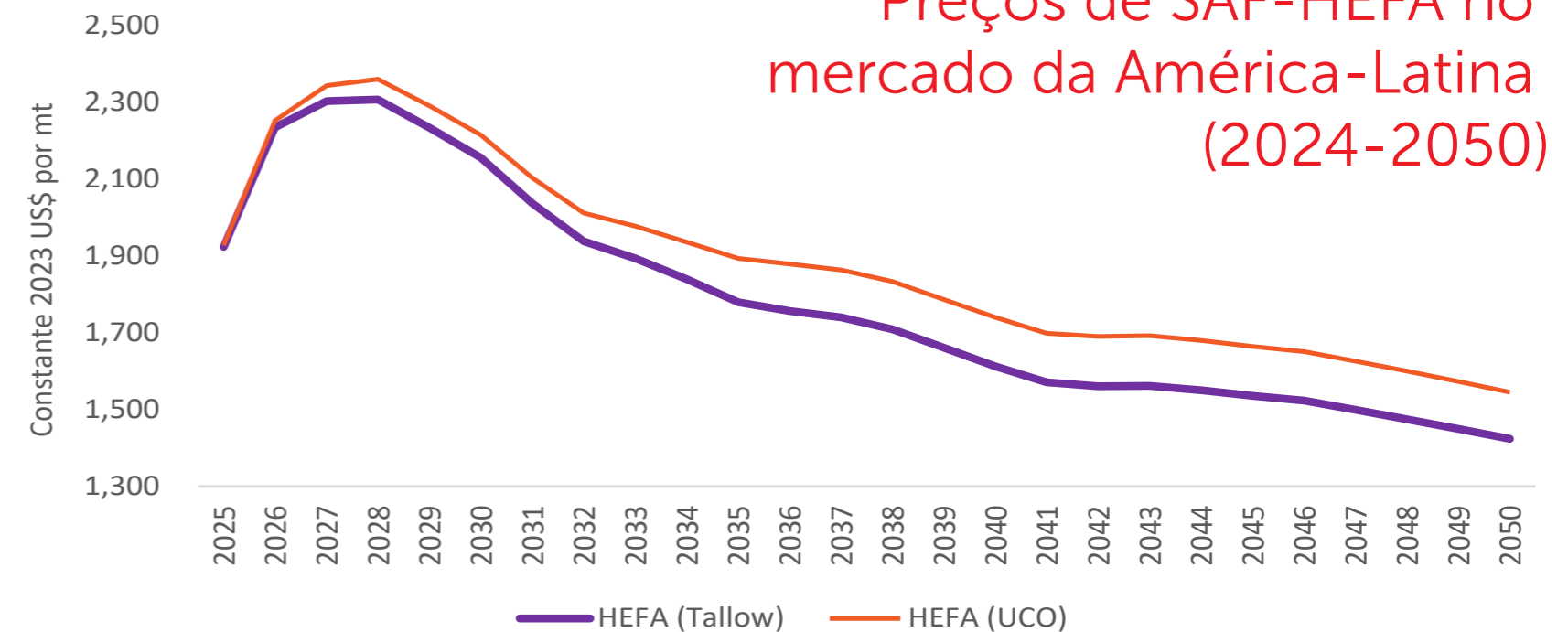
À medida que a produção se expanda e as tecnologias se aperfeiçoem, alguns insumos, como a eletricidade renovável, se tornarão mais acessíveis. No entanto, é fundamental destacar que não existe uma matéria-prima ou método de produção universalmente viável para satisfazer a demanda global de SAF, e as características e contextos regionais desempenharão um papel fundamental no desenvolvimento das diferentes vias de produção.

Gráfico 15.
Fornecimento de SAF para América Latina por via de produção, prognóstico (2027- 2050)



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P. Notas: HEFA: Hydroprocessed Ester Fatty Acids, ATJ: Alcohol-to-Jet, FT: Fischer Tropsch, PTL: Power-to-liquid.

Gráfico 16.
Preços de SAF-HEFA no mercado da América-Latina (2024-2050)



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P .
Nota: Os preços apresentados são calculados utilizando o método net-back desde os EE. UU.



Anexo 2

Mercados e mecanismos de redução de carbono

Apesar dos avanços em tecnologia, melhorias operacionais e infraestrutura, e do crescente uso de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF) no futuro, ainda existirão emissões residuais que não poderão ser completamente eliminadas até 2050. Para mitigar essas emissões, será crucial investir em medidas de redução de carbono fora do setor. O Anexo 2 explora brevemente o papel dos mercados de créditos de carbono e destaca a necessidade de investimentos em energias renováveis como estratégias complementares para atingir os objetivos de redução de emissões. Essas estratégias incluem:

- **Compensação de carbono:** Aquisição de créditos de carbono provenientes de projetos que reduzem, capturam ou evitam emissões fora da aviação. Exemplos incluem reflorestamento, projetos de energias renováveis e captura de metano.
- **Captura e armazenamento de carbono (CCS):** Investimento ou apoio em tecnologias que capturam CO₂ de processos industriais ou diretamente da atmosfera, armazenando-o em depósitos subterrâneos ou reutilizando-o em outros setores.
- **Investimento em energias renováveis:** Financiar o desenvolvimento de infraestruturas de energias limpas, como solar, eólica ou geotérmica, para reduzir a dependência de combustíveis fósseis em outros setores.

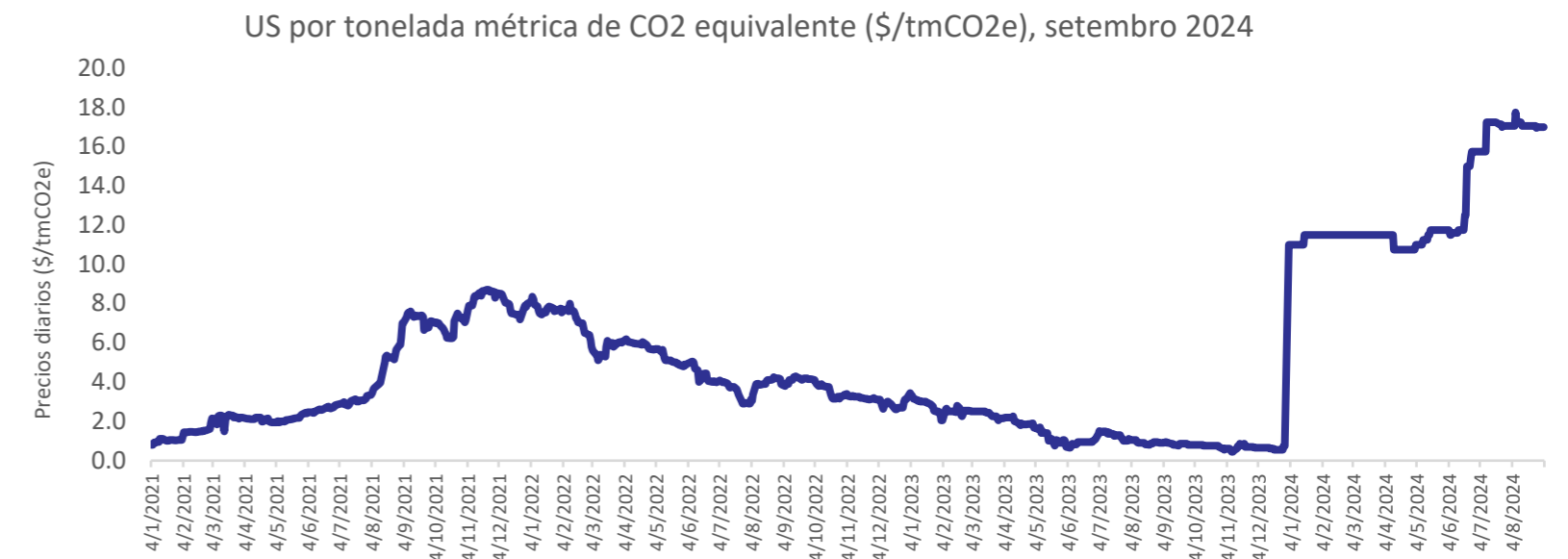
O uso da compensação de carbono, seja por meio de mecanismos de mercado ou reduções fora do setor, pode fazer parte da estratégia para atingir os objetivos da indústria, dependendo do custo disponível no momento (gráfico 17), em comparação com a oferta de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF) e a diferença de preço entre estes e o combustível convencional para aviões. Espera-se que o mercado voluntário de créditos de carbono cresça significativamente nos próximos anos, embora haja poucas previsões e incertezas sobre a disponibilidade e os tipos de compensações que existirão em 2050.

A Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, na sigla em inglês), com o objetivo de limitar as emissões do setor a partir de 2021. Embora se espere que as companhias aéreas invistam em diversas opções para reduzir suas emissões, grande parte dessas reduções será alcançada por meio da aquisição de créditos de carbono voluntários.



Gráfico 17.

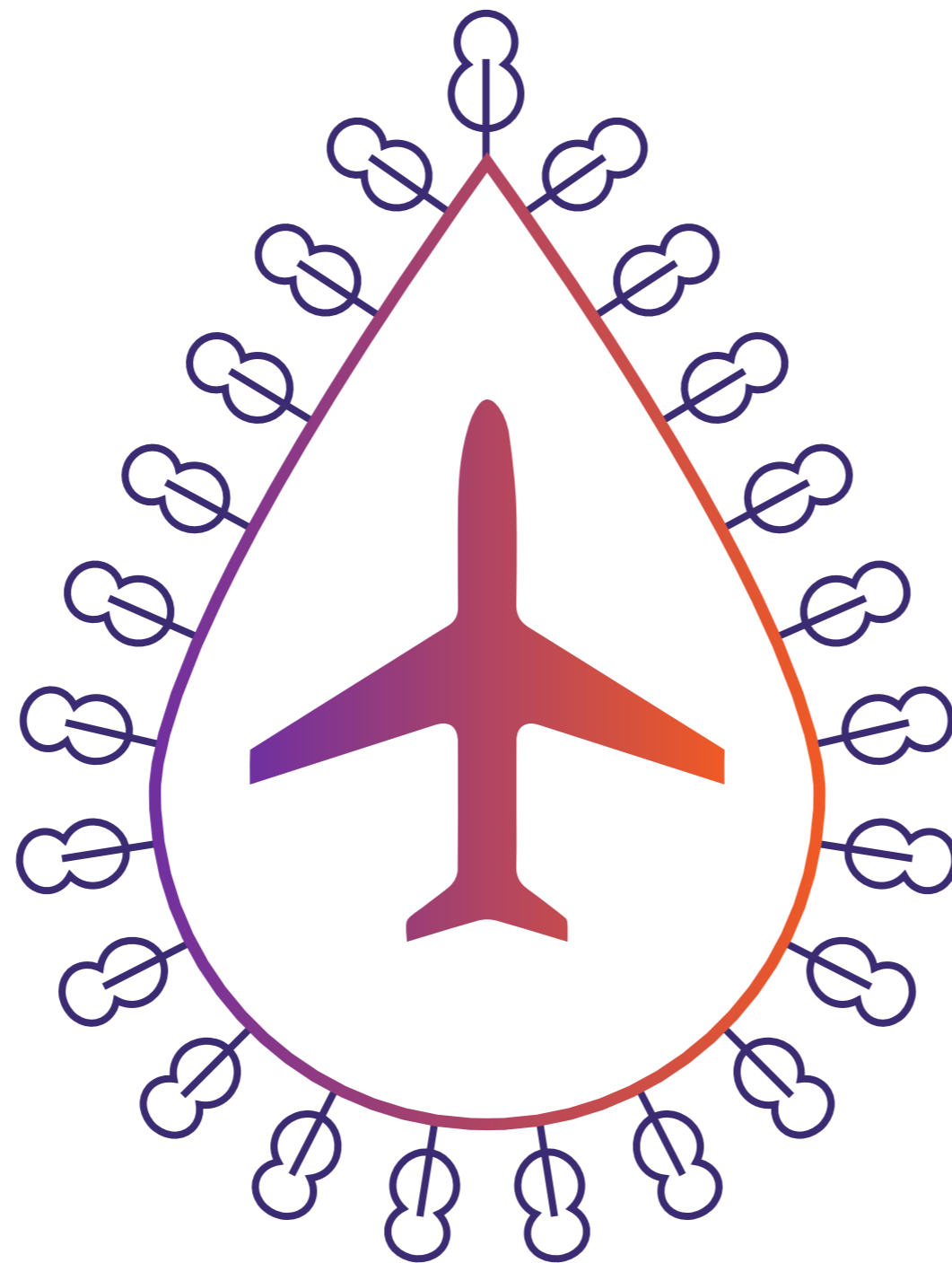
Preços diários para o mercado de créditos elegíveis para CORSIA



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P. Nota: Platts (CORSIA Eligible Credit) publica um preço diário em (\$/mtCO₂e) e representa um mínimo de um lote de 20,000 unidades de tmCO₂e cada uma e um volume máximo de 100 lotes de 1,000 unidades de tmCO₂e cada uma.

Anexo 3

Estado do combustível de aviação na região



A América Latina continua sendo uma região em crescimento para a demanda de produtos refinados. Projeta-se que a demanda por combustíveis tradicionais, como gasolina, diesel e combustível para aviões, aumente nas próximas décadas, embora de forma moderada devido à transição energética e às melhorias na eficiência. A demanda por combustível de aviação ainda não atingiu os níveis pré-pandemia, mas espera-se que o faça em 2024.

Este anexo oferece uma breve análise sobre as perspectivas da demanda total de combustível de aviação convencional, assim como da capacidade de produção, consumo e balanço comercial de combustível de aviação (jet fuel) nos principais países da América Latina e do Caribe, com o objetivo de compreender os desafios e as oportunidades que esses países enfrentam em sua transição para a produção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF). Esta informação é relevante para identificar as lacunas existentes entre a produção local e a crescente demanda por jet fuel, o que destaca a importância de desenvolver fontes alternativas como o SAF, melhorar o balanço comercial e fortalecer a autossuficiência energética a longo prazo.

Anexo 3

Estado do combustível de aviação na região

Demanda total de combustível de aviação da América Latina

Projeta-se que a demanda por combustíveis de aviação na região da América Latina e do Caribe alcance 583.000 barris/dia (b/d) até 2050. A demanda projetada nos 5 principais mercados (Brasil, México, Colômbia, Argentina e Chile) terá uma taxa de crescimento composta anual (CAGR) de 1,38% desde 2023, atingindo um total próximo a 421.000 b/d até 2050 (gráficas 18 e 19).

Em 2023, de acordo com dados da S&P Global, o consumo de combustível de aviação nos principais países da região foi o seguinte:

- Brasil: 113.000 b/d, com um CAGR de 1,7%.
- México: 90.000 b/d, com um CAGR de 1,2%.
- Colômbia: 31.000 b/d, com um CAGR de 0,7%.
- Argentina: 31.000 b/d, com um CAGR de 1,2%.
- Chile: 27.000 b/d, com um CAGR de 1,5%.

Essa análise oferece uma visão clara sobre o panorama da demanda por combustível de aviação na região, fundamental para entender as oportunidades de desenvolvimento do SAF e o fortalecimento da segurança energética na América Latina.

Gráfico 18.
Consumo histórico e prognóstico de jet fuel para principais países na ALC (milhares de b/d)

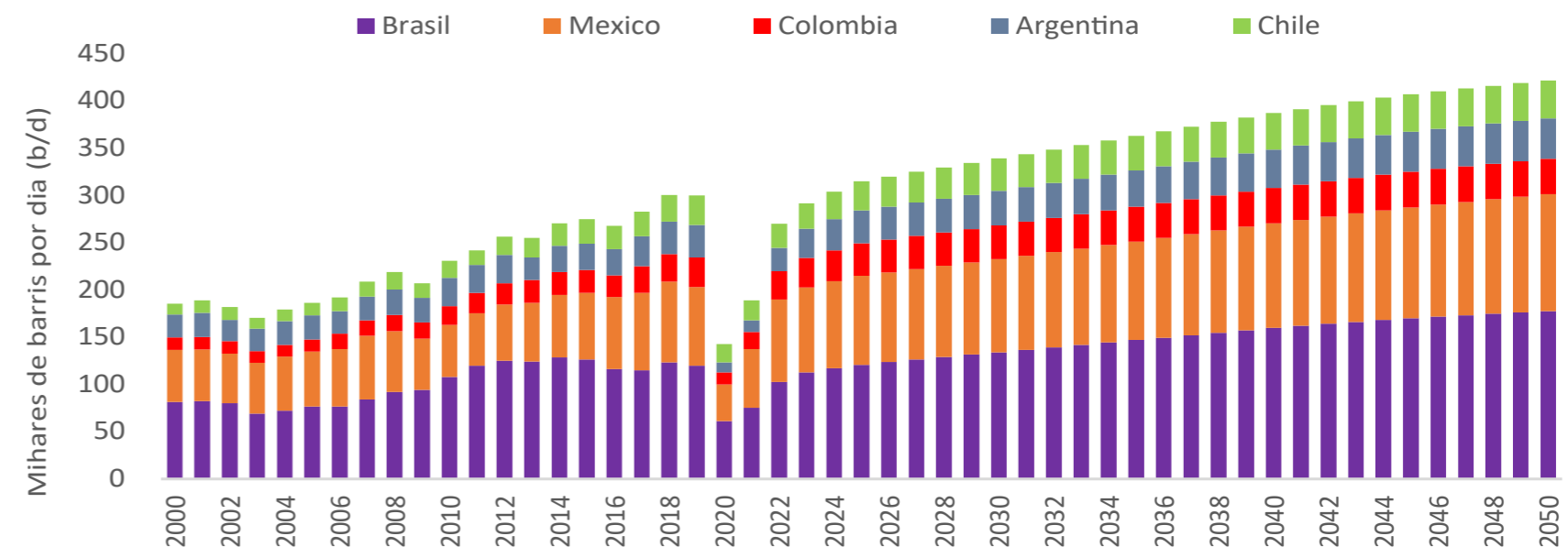
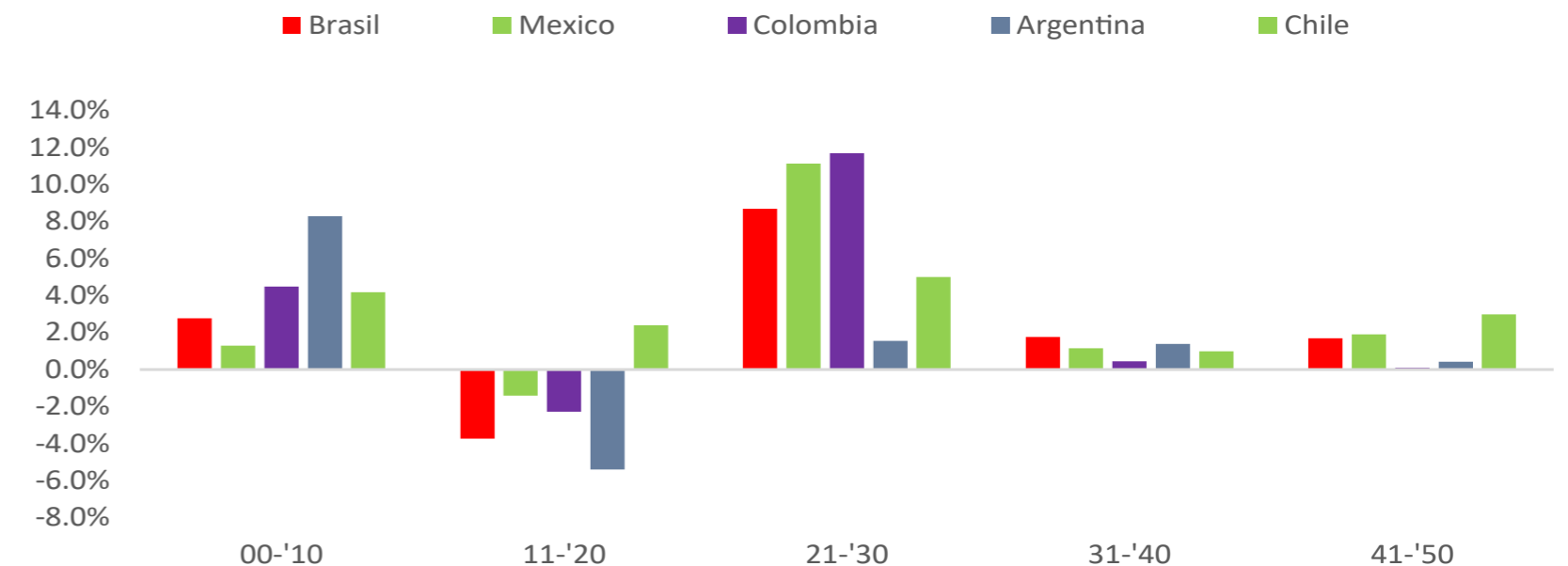


Gráfico 19.
Crescimento médio anual do consumo de jet fuel por país



Anexo 3

Estado do combustível de aviação na região

Produção de combustível de aviação na América Latina

A capacidade de produção de combustível para aviação na região atingirá 319.000 barris/dia (b/d) até 2050, com uma taxa de crescimento composta anual (CAGR) de 1,1% a partir de 2023 (gráfica 20).

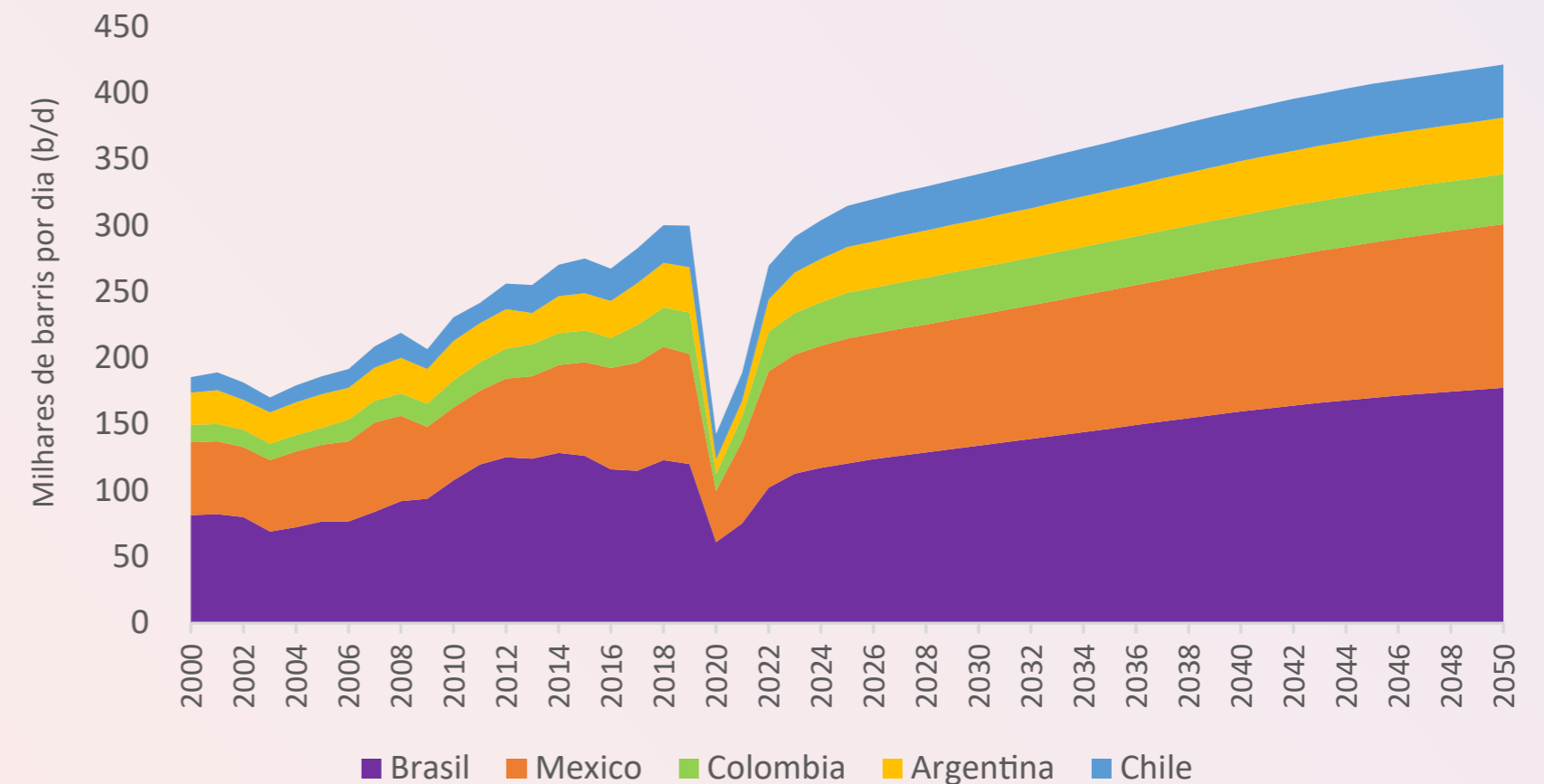
Em 2023, de acordo com a mesma fonte, os principais países da região registraram a seguinte produção de combustível para aviação:

- Brasil: 92.000 b/d, com um CAGR de 1,5%.
- México: 36.000 b/d, com um CAGR de 2,6%.
- Colômbia: 27.000 b/d, com um CAGR de -0,1%.
- Argentina: 31.000 b/d, com um CAGR de -0,8%.
- Chile: 13.000 b/d, com um CAGR de -0,3%.

Como a capacidade de produção de jet fuel na maioria desses países não é suficiente para atender à demanda futura, a região continuará dependendo de importações. Isso impacta diretamente na segurança energética da região, expondo-a a variações nos preços internacionais e possíveis interrupções no fornecimento.

Gráfico 20.

Capacidade histórica e prognóstico de produção de combustível de aviação por país



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



Anexo 3

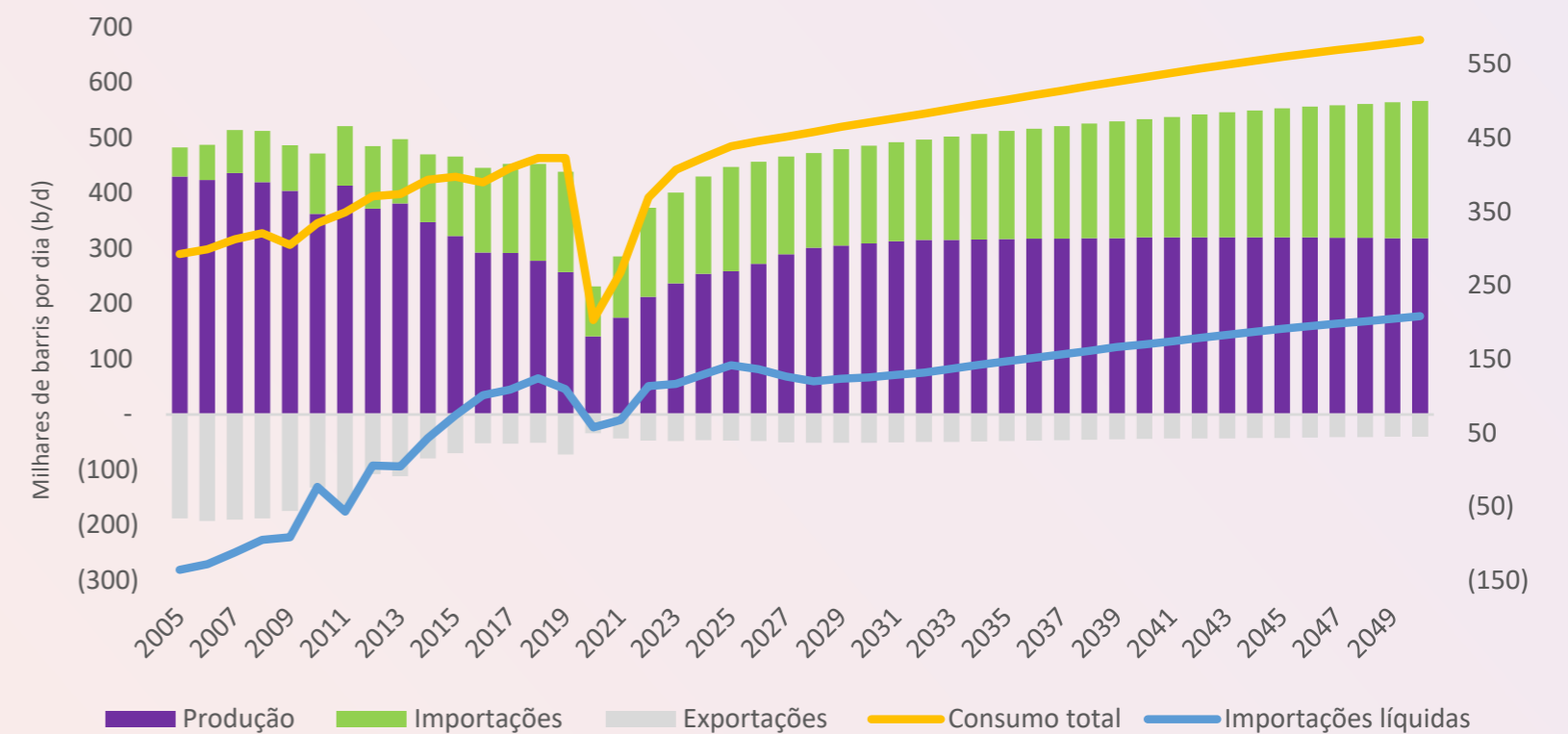
Estado do combustível de aviação na região

Balanço comercial histórico e perspectivas até 2050, por país

O consumo de jet fuel na América Latina e no Caribe continuará com uma tendência crescente ao longo das próximas décadas, superando a produção local de forma sustentada, o que evidencia uma crescente dependência das importações. Essa lacuna entre produção e demanda reflete uma vulnerabilidade na segurança energética, já que a região precisará se abastecer externamente para cobrir suas necessidades (gráfica 21).

Embora as importações líquidas comecem a se estabilizar e diminuir em direção a 2040, isso sugere que há uma projeção de alguma melhoria na produção local, mas ainda haverá uma forte dependência de fontes externas para atender à crescente demanda.

Gráfico 21.
Balanço comercial de jet fuel na ALC e prognóstico (2005-2050)



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



Anexo 3

Estado do combustível de aviação na região

A seguir, é apresentado o balanço comercial e a produção do combustível de aviação histórico e a previsão até 2050, para a região e os principais países da região (gráficos 22-26).

Gráfico 22.
Balanço de jet fuel - Brasil

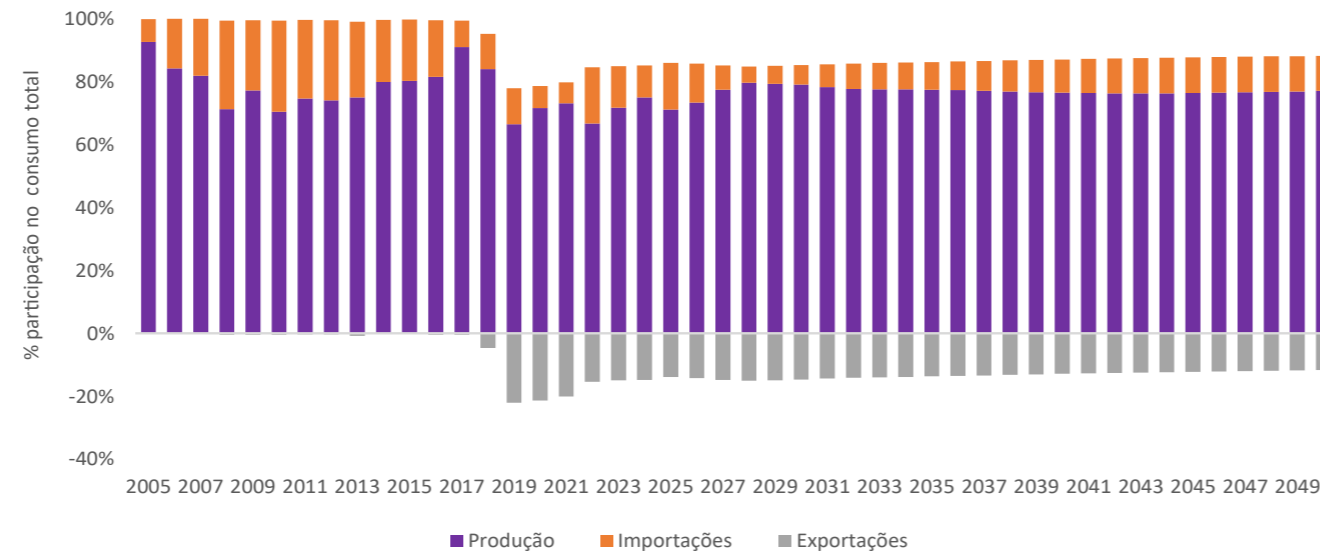


Gráfico 23.
Balanço de jet fuel - México

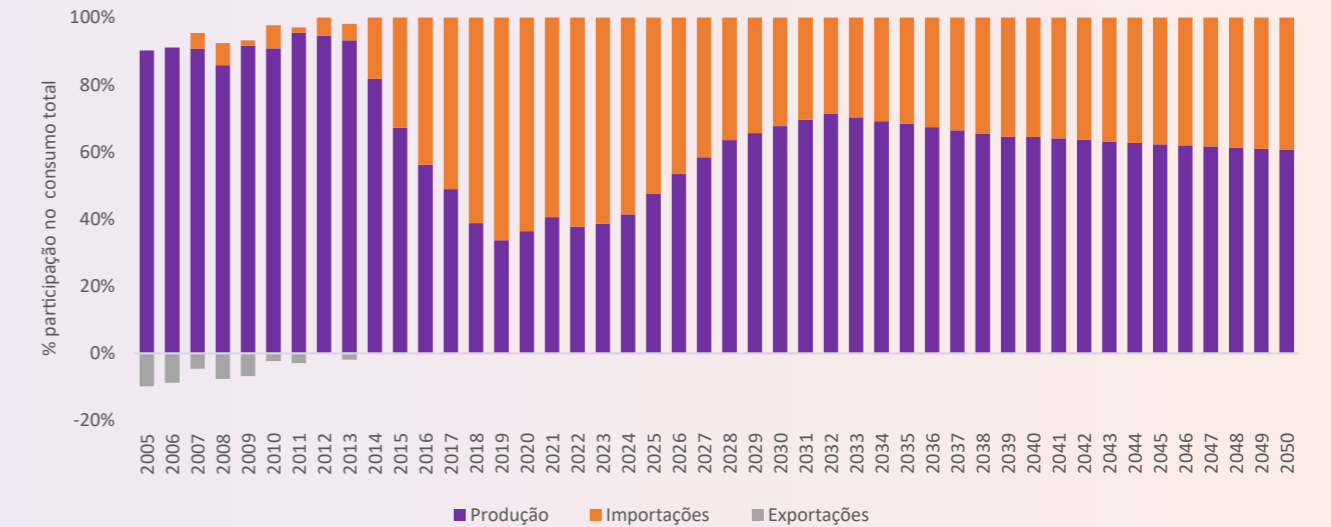


Gráfico 24.
Balanço de jet fuel - Colombia

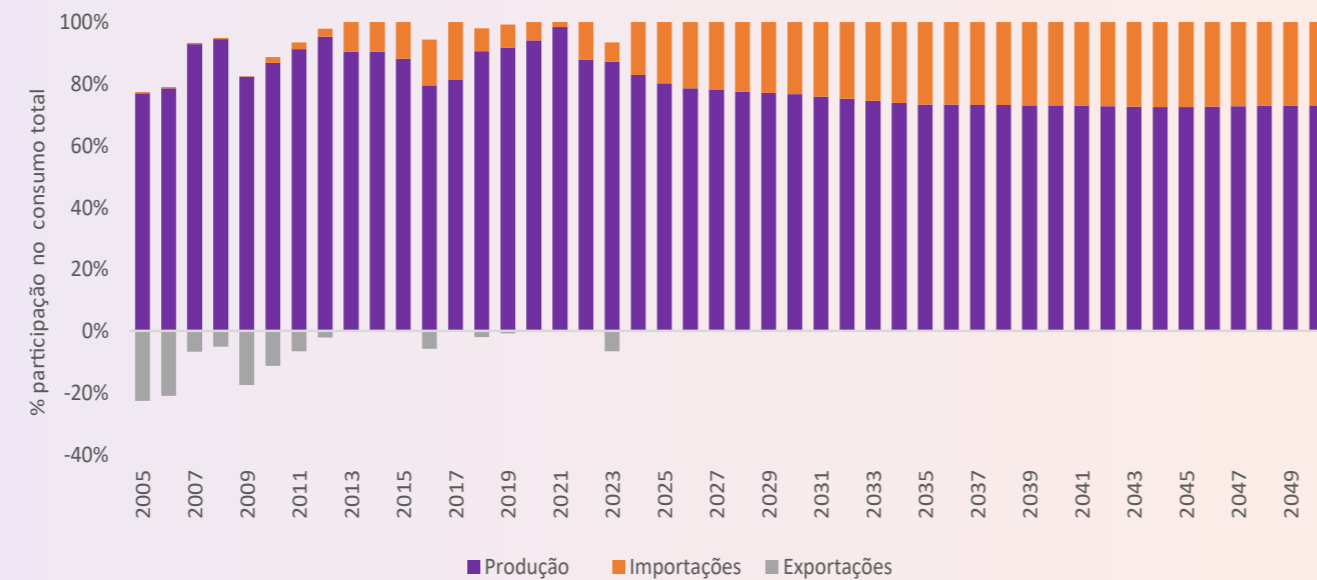
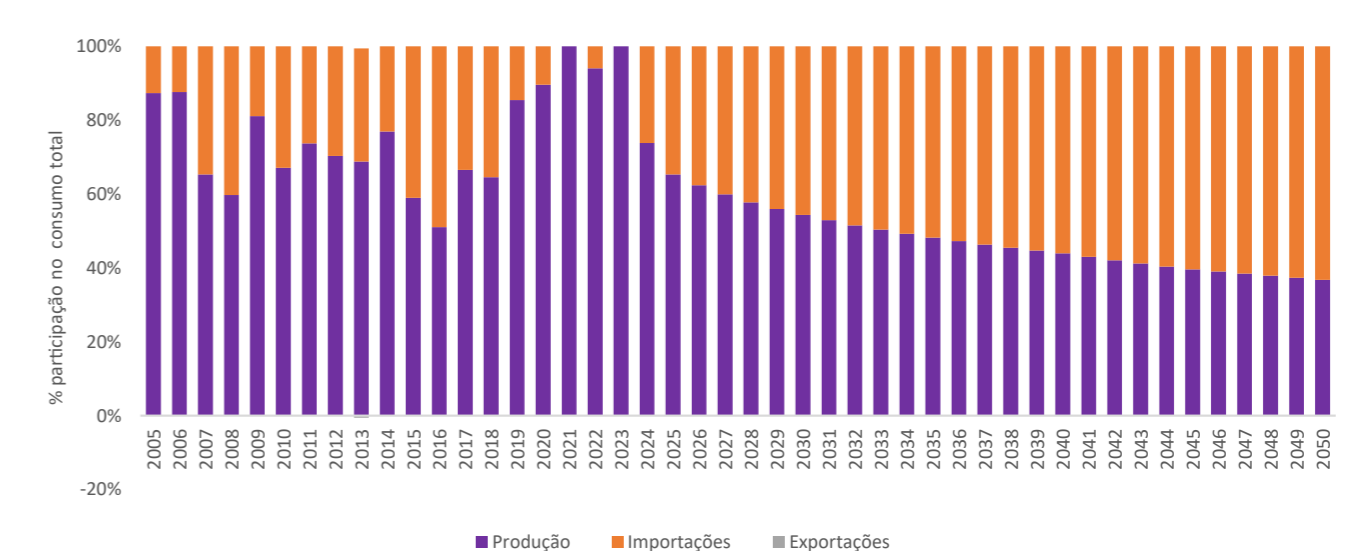


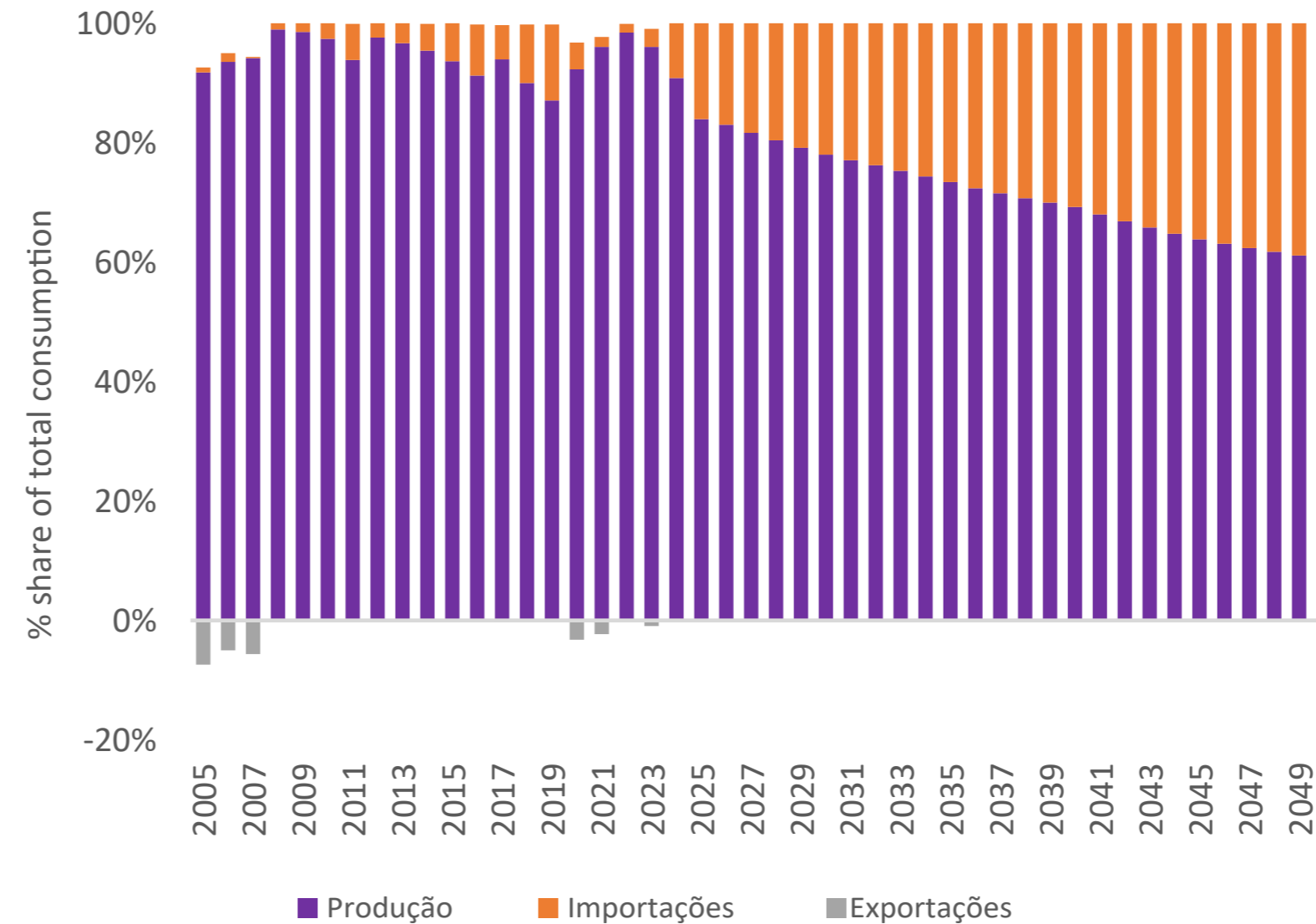
Gráfico 25.
Balanço de jet fuel - Chile



Anexo 3

Estado do combustível de aviação na região

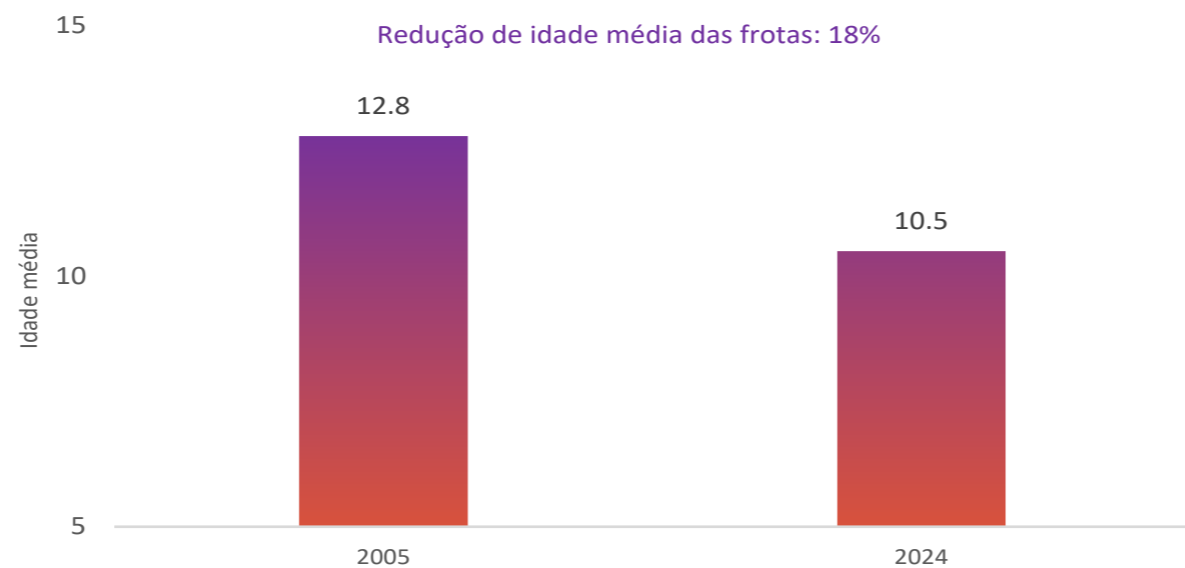
Gráfico 26.
Balanço de jet fuel - Argentina



Fonte: Análise da ALTA baseado nos dados de S&P Global Commodity Insights. © 2024 S&P.



Gráfico 27.
Idade média das frotas (Cias Aérea ALTA)



Fonte: CIRIUM

Gráfica 28.
Comparação de Idade média das frotas (2023)

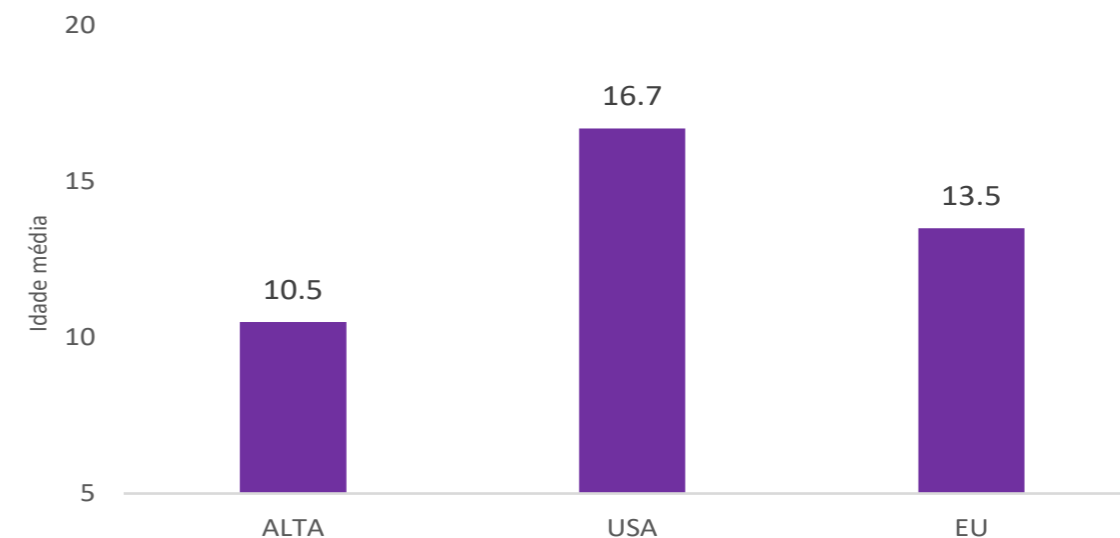
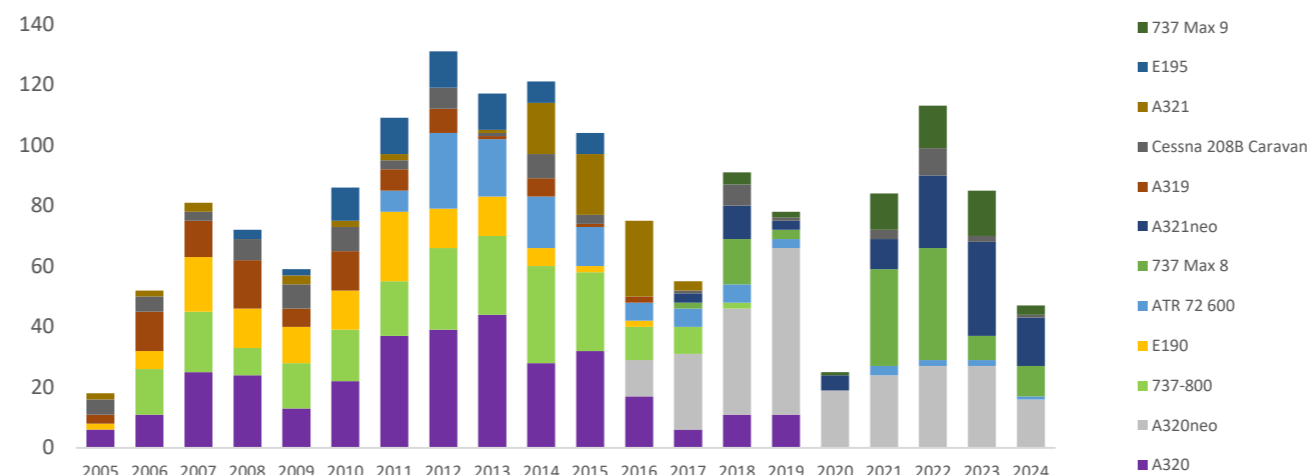


Gráfico 29.
Novos aviões em serviço na ALC, por tipo de avião



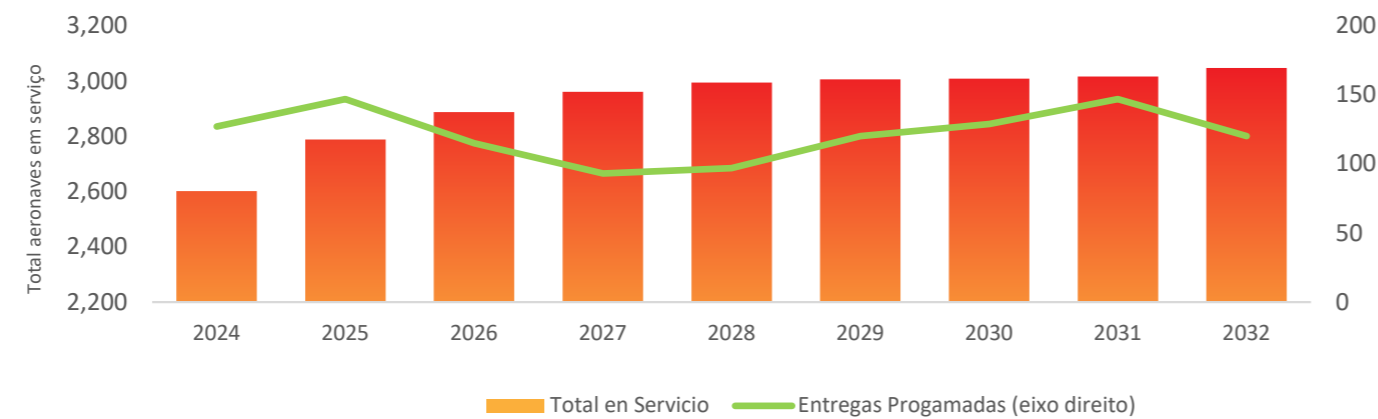
Fonte: CIRIUM



Anexo 4: Renovação de frota e densificação de cabine na região

Desde 2005, as companhias aéreas membros da ALTA incorporaram quase 1.300 aviões à sua frota (gráfico 29). Nos últimos anos, a maioria das novas aquisições corresponde às versões mais modernas e eficientes oferecidas pelos fabricantes, como o Boeing 737 MAX e a família Airbus A320neo, que começaram a ser integradas a partir de 2016. Nos próximos anos, as companhias aéreas da ALTA planejam colocar em operação mais de 1.000 novas aeronaves, garantindo assim uma frota ainda mais moderna e eficiente (gráfico 30).

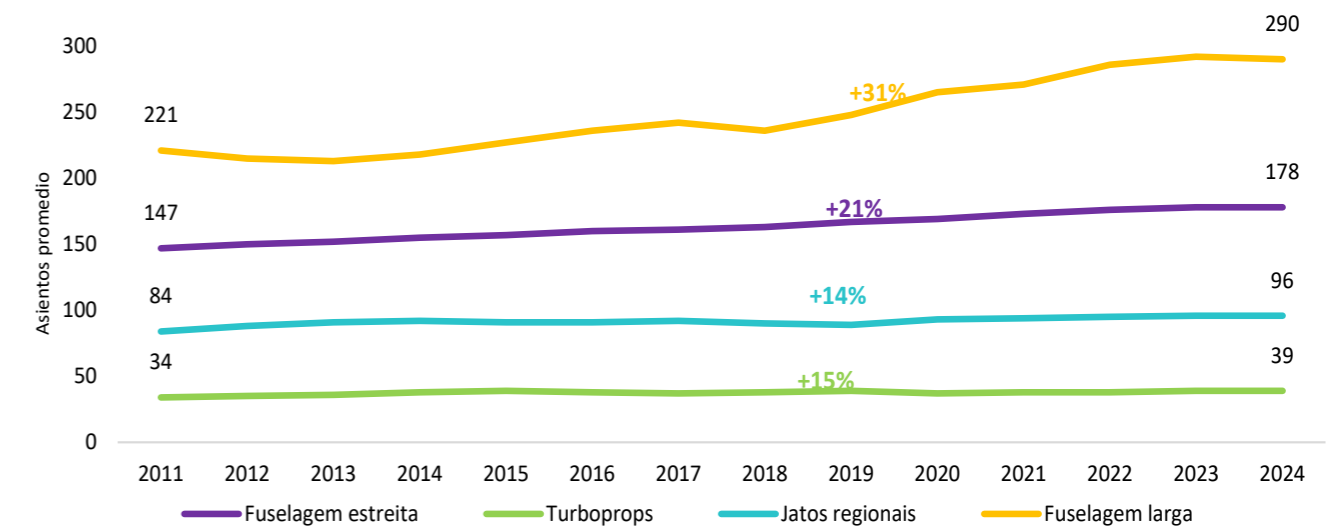
Gráfico 30.
Entregas de aeronaves programadas na ALC



Source: CIRIUM

Da mesma forma, foram implementadas medidas de densificação de cabine em todos os tipos de aeronaves das companhias aéreas da ALC, o que permitiu aumentar a eficiência por passageiro (gráfico 31).

Gráfico 31.
Densificação de cabines
(assentos médios por tipo de avião)



Fonte: Análise da ALTA baseado no CIRIUM



Referências

1. Air Transport Action Group. (2021). Aviation Benefits Beyond Borders. Air Transport Action Group, Geneva, Switzerland. Disponible en <https://aviationbenefits.org/>.
2. CBS News. (2022). Extreme heat in the UK disrupts air travel, melts airport runway. Recuperado de: <https://www.cbsnews.com/news/extreme-heat-in-uk-disrupts-air-travel-melts-airport-runway/>
3. Infobae. (2024). ¿Cómo afecta el calor a los aviones? Aeroméxico restringe peso en sus vuelos por altas temperaturas en CDMX. Recuperado de: <https://www.infobae.com/mexico/2024/04/18/como-afecta-el-calor-a-los-aviones-aeromexico-restringe-peso-en-sus-vuelos-por-altas-temperaturas-en-cdmx/>
4. Swissinfo.ch. (2024). El aeropuerto de Porto Alegre puede seguir cerrado hasta fin de mes por las inundaciones. Disponible en <https://www.swissinfo.ch/spa/el-aeropuerto-de-porto-alegre-puede-seguir-cerrado-hasta-fin-de-mes-por-las-inundaciones/77046520>.
5. Prosser, M. C., Williams, P. D., Marlton, G. J., & Harrison, R. G. (2023). Evidence for large increases in clear-air turbulence over the past four decades. Geophysical Research Letters.
6. Grupo Regional de Seguridad de la Aviación para Panamérica (RASG-PA). Informe Anual de Seguridad Operacional 2023. Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), 2023. Disponible en: <https://www.icao.int/RASGPA/RASGPADocuments/ASR2023-13-SE.pdf>
7. EUROCONTROL. (2021). Climate Change Risks for European Aviation: Summary Report. Retrieved from <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-09/euro-control-study-climate-change-risk-european-aviation-summary-report-2021.pdf>
8. OECD (2024), Air and climate: Air Transport CO2 Emissions (Edition 2023), OECD Environment Statistics (database), <https://doi.org/10.1787/74a7d106-en> (consultado el 12 de septiembre de 2024).
9. Air Transport Action Group (ATAG). (2020). Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport sustainability strategy. Air Transport Action Group. Obtenido de <https://atag.org/resources/waypoint-2050-2nd-edition-september-2021/>
10. ICAO. (2022). Report on the feasibility of a long-term aspirational goal for international civil aviation CO2 emissions reductions. International Civil Aviation Organization. Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/LTAGreport.aspx>
11. Griliches, Z. "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change." *Econometrica*, 1957, 25(4), 501-522.
12. Rogers, E. M. *Diffusion of Innovations* (5th ed.). New York: Free Press, 2003
13. Wang, B., O'Sullivan, A., Dray, L., Al Zayat, K., & Schäfer, A. (2017). Modelling the pass-through of airline operating costs on average fares in the global aviation market. Air Transportation Systems Laboratory, UCL Energy Institute, University College London, London, UK.
14. Aviacion News. (2023). SAF: La mina de oro que Latinoamérica parece estar dispuesta a desperdiciar. Recuperado de <https://aviacionnews.com>
15. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. (s.f.). *Jatrofa*: Una alternativa para generar biocombustibles. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx>
16. El Colombiano. (2024.). Colombia busca ser pionera en los vuelos de cero emisiones con el uso de SAF, ¿cómo lo hará con caña y palma?. Recuperado de <https://www.el-colombiano.com>
17. Banco Mundial. (s.f.). Hidrógeno verde, clave para la transición energética en Chile. Recuperado de <https://www.bancomundial.org>




Contato

José Ricardo Botelho
CEO ALTA


Juan Sarmiento
Head of Economics and User Charges
Jsarmiento@alta.aero


Milena Fajardo
Head of Fuel and Sustainability
mfajardo@alta.aero



 ALTA Latin American and Caribbean
Air Transport Association

 ALTA_aero

 aeroalta

 www.alta.aero