



Aviação com Emissões Líquidas Zero na América Latina e no Caribe: Rotas e Trade-offs

Relatório final

Março de 2026



Agradecimentos

A ICF agradece a contribuição e o apoio da equipe da ALTA, do Comitê Executivo da ALTA, das companhias aéreas associadas e das autoridades do México, Chile e Brasil ao longo da elaboração deste relatório. A ICF também agradece à Cirium, à S&P Global Energy e à Universidade de San Andrés pelo apoio com dados.

Resumo executivo

Introdução e contexto

A aviação é essencial para a conectividade e o desenvolvimento econômico na ALC (América Latina e Caribe), contribuindo com 3,6% do PIB (produto interno bruto) regional e sustentando 2,9% do emprego em 2023¹. A região abrange quase 22 milhões de quilômetros quadrados, com uma geografia caracterizada por cadeias de montanhas, florestas tropicais e desertos. Isso torna o transporte aéreo fundamental para conectar comunidades, empresas e mercados turísticos. No entanto, o mercado de aviação na América Latina e no Caribe continua significativamente menor do que em mercados maduros. Um indicador claro é a propensão a viajar de avião: enquanto os passageiros na América do Norte realizam, em média, cerca de 2,5 viagens aéreas per capita por ano, a média na América Latina e no Caribe é de apenas 0,67 viagens per capita². Essa grande diferença reflete a menor maturidade do mercado e as disparidades de riqueza entre os países. Isso destaca a importância de garantir a acessibilidade econômica do transporte aéreo em uma região onde a conectividade ainda está em desenvolvimento e desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social³.

As companhias aéreas da região têm feito progressos significativos e investimentos para reduzir as emissões. As companhias aéreas da ALC operam uma das frotas mais novas e com maior eficiência de combustível do mundo, permitindo que os benefícios da aviação sejam obtidos com as menores emissões possíveis. Por exemplo, a proporção de assentos-quilômetros disponíveis (ASKs) voados por aeronaves de nova geração na ALC (38%) é maior em comparação com economias mais desenvolvidas, como a Europa (34%), os Estados Unidos e o Canadá (34%) e a Ásia (26%). As companhias aéreas também obtiveram conquistas significativas na implementação de eficiências operacionais (correspondentes a procedimentos sob seu controle).

No entanto, alcançar emissões líquidas zero no setor da aviação na ALC requer mais ações e apoio. Existem muitos obstáculos, incluindo disparidades econômicas e de desenvolvimento, infraestrutura limitada e capacidades regulatórias variáveis. O PIB per capita da região permanece significativamente mais baixo do que na Europa ou na América do Norte, o que pode limitar sua capacidade de absorver os custos mais elevados associados às medidas de aviação sustentável⁴. Isso poderia levar à redução da demanda por transporte aéreo e restringir injustamente o desenvolvimento social e econômico na região.

É necessária uma abordagem adaptada à região da ALC. A região possui muitas vantagens, recursos e desafios únicos para reduzir as emissões da aviação. Reconhecendo o princípio da UNFCCC de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, e respectivas capacidades, este estudo avalia as circunstâncias e a estratégia que a região da ALC precisa para reduzir as emissões da aviação e visa fornecer uma estrutura comum para discussões⁵.

À medida que as economias e as populações crescem, o setor de aviação regional continuará a se expandir, garantindo que um número maior de pessoas tenha acesso aos benefícios que o setor traz. As taxas de viagens per capita na ALC devem crescer de forma constante, aumentando a uma CAGR (taxa composta de crescimento anual) de 2,7% entre 2019 e 2050⁶. Embora esse crescimento seja crucial para as economias em desenvolvimento, ele também agrava os desafios ambientais que devem ser mitigados.

A América Latina e o Caribe (ALC) estão entrando em uma fase crucial na jornada para reduzir as emissões da aviação. Este estudo, encomendado pela ALTA e seus membros e desenvolvido em colaboração com a ICF, fornece uma estrutura regional para apoiar a transição para emissões líquidas zero até 2050. Ele considera a metodologia do objetivo aspiracional de longo prazo (LTAG) da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), que estabelece uma referência global para a ação climática da aviação, enquanto reconhece as diversas circunstâncias da região⁷.

¹ ATAG - Benefícios da aviação além das fronteiras

² América do Norte, incluindo os EUA e o Canadá. Calculado pela análise da ALTA, utilizando dados da IATA Economics

³ ALTA – <https://alta.aero/en/news/trafico-aereo-en-america-latina-y-el-caribe-crecio-38-interanual-en-2025/>, IATA – <https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-08-04-01/>

⁴ Banco de dados do PIB do Banco Mundial

⁵ UNFCCC: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

⁶ ALTA – Route to sustainability in Latin America and the Caribbean

⁷ Relatório da LTAG

Este estudo investiga os quatro mecanismos-chave amplamente considerados para permitir que a aviação alcance emissões líquidas zero: (1) Tecnologia (modernização da frota), (2) melhorias de eficiência operacional, (3) redução das emissões de carbono fóssil e (4) mecanismos de carbono. Os três primeiros desses mecanismos são os mesmos considerados pelo LTAG, garantindo a consistência com as normas internacionais. Embora não incluído no LTAG, este estudo também vai além, explorando a oportunidade de medidas fora do setor, como créditos de carbono, para lidar com as emissões da aviação, devido ao impacto positivo que as companhias aéreas poderiam ter sobre os ecossistemas frágeis e globalmente relevantes localizados na região.

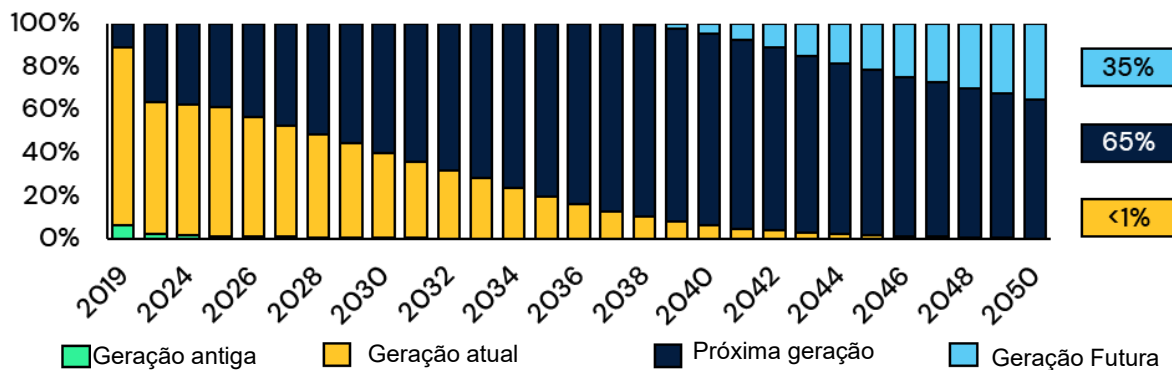
As companhias aéreas na ALC operam uma frota eficiente, com benefícios crescentes à medida que aeronaves eficientes em consumo de combustível continuam a entrar em operação.

A renovação da frota acelerou-se pós-COVID na região, com aeronaves de nova geração representando 19% dos voos, contra 2% em 2019. Como essas aeronaves mais novas também tendem a operar rotas mais longas, isso representa 38% dos ASKs. As companhias aéreas têm retirado ativamente aeronaves mais antigas de serviço após a COVID e as substituído por modelos mais eficientes, como os A320neos e B737MAXs, que oferecem reduções do consumo de combustível de 15 a 20% em relação às gerações anteriores.

As companhias aéreas da região têm mais de 700 aeronaves encomendadas, sendo quase 80% delas de fuselagem estreita⁸. Essas encomendas atenderão tanto às necessidades de crescimento quanto de substituição, com aeronaves de geração futura⁹ previstas para entrarem em serviço a partir de meados da década de 2030, lideradas por aeronaves turboélice, seguidas por jatos regionais e aeronaves narrowbody na segunda metade da década. Até 2050, aeronaves de nova geração e de geração futura dominarão a frota, impulsionando reduções adicionais na queima de combustível por passageiro-quilômetro. No entanto, isso só será possível se as carteiras de pedidos atuais forem cumpridas e as aeronaves forem entregues e colocadas em serviço dentro do prazo. Atrasos na cadeia de suprimentos podem resultar em uma adoção mais lenta dessas novas aeronaves, mesmo que as companhias aéreas tenham investido e se comprometido com a renovação da frota. O gráfico abaixo mostra o perfil projetado de transição da frota na ALC, com base na frota de linha de base de 2024, nas premissas atuais e de idade de retirada de serviço, nas premissas de carteira de pedidos e de entrega, e nas contribuições das principais partes interessadas da região da ALC.

As companhias aéreas da região da América Latina e do Caribe já começaram a transição para aeronaves mais eficientes em termos de consumo de combustível. Espera-se que as aeronaves de geração futura entrem na frota no final da década de 2030.

Composição da frota por ASKs



Fonte: Análise da ICF. ASKs = Assentos-quilômetros disponíveis; a geração futura seguirá os NEOs e os MAXs

Essas tendências destacam o investimento substancial que as companhias aéreas já fizeram na modernização da frota e o papel fundamental do avanço tecnológico contínuo para alcançar as metas de

⁸ Banco de dados de frota CAPA

⁹ Geração que chegará ao mercado após os NEOs, MAXs e a família E-jets E2

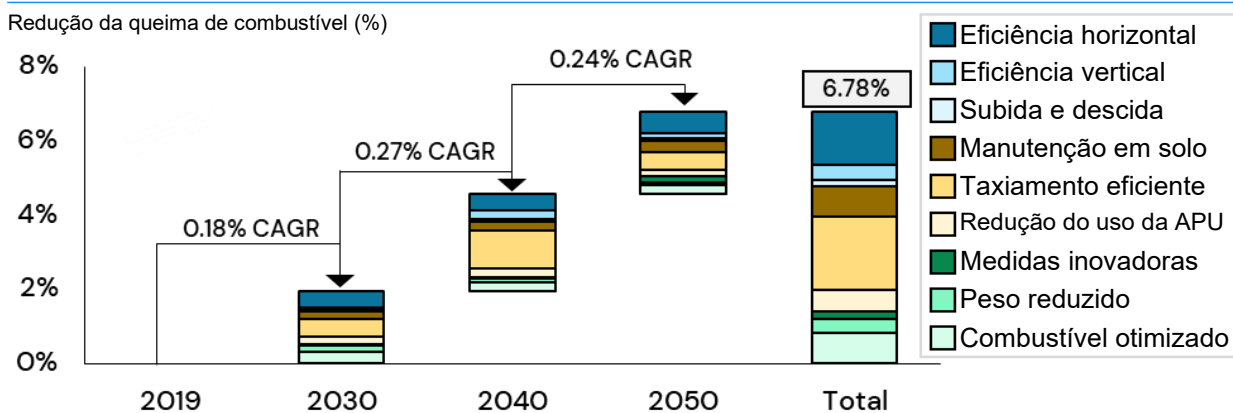
redução de emissões de longo prazo.

A eficiência operacional é uma oportunidade essencial e imediata

Apoiar uma maior eficiência operacional é uma medida imediata e econômica. Melhorias nas aeronaves, nos aeroportos, nas operações em solo e na otimização do perfil de voo oferecem uma oportunidade significativa para reduzir o consumo de combustível e as emissões na ALC, com economias potenciais de 3,3% a 11,3% até 2050. Essas medidas representam uma situação vantajosa para todos, pois reduzem as emissões e os custos operacionais, aumentam a resiliência e melhoram o desempenho de todo o sistema.

As companhias aéreas da região da ALC já obtiveram avanços significativos na redução de suas emissões por meio de melhorias de eficiência operacional. No entanto, alcançar eficiências ainda maiores depende de um envolvimento mais amplo do governo e das partes interessadas, de investimentos por parte dos aeroportos e dos prestadores de serviços de navegação aérea, e de ações coordenadas em todo o ecossistema da aviação.

Melhorias operacionais na ALC poderiam reduzir a queima de combustível das aeronaves em 3,3% a 11,3% até 2050, mas exigem o apoio de outras partes interessadas



Fonte: Análise da ICF.

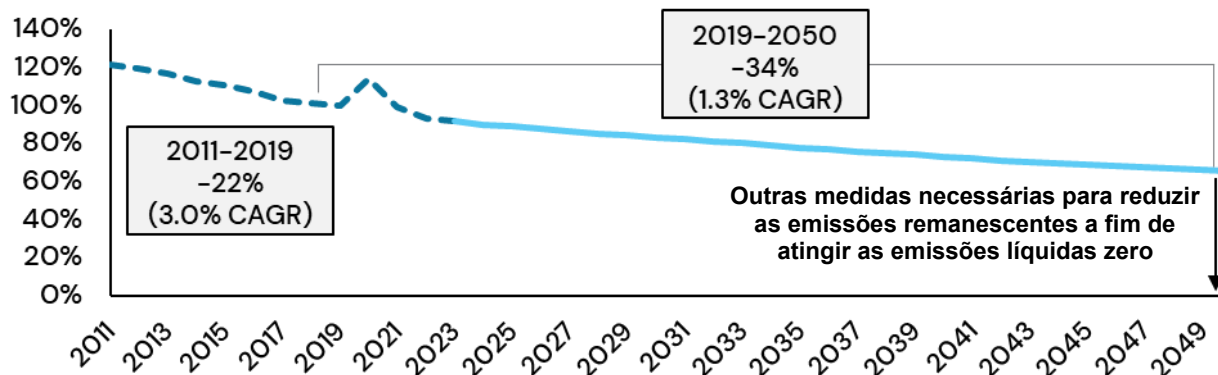
Nota: Cenário central; medidas inovadoras incluem voo em formação

Medidas adicionais poderiam reduzir as emissões de 2050 em 6,8% no cenário central, embora a maior parte da redução dependa de ações de partes interessadas além das companhias aéreas. As medidas em solo representam a maior oportunidade, com potencial para uma economia de emissões de 3,4% por meio do aumento do uso de energia fixa em solo, ar pré-condicionado, maior uso de taxiamento com um único motor e adoção gradual de rebocadores elétricos de solo. Medidas de eficiência e planejamento poderiam proporcionar uma redução de 1,4% até 2050 em relação a 2019 por meio do uso mais amplo de ferramentas avançadas de planejamento de combustível, monitoramento de desempenho e otimização digital integrada de combustível. A otimização do perfil de voo poderia gerar uma redução de 2,0% por meio de rotas diretas, melhor gestão de fluxo e adoção incremental de tecnologia. O sucesso de todas as medidas depende da colaboração entre governos, órgãos reguladores, prestadores de serviços de navegação aérea, companhias aéreas e aeroportos, apoiada por modernização, treinamento e compartilhamento transparente de dados.

A eficiência da frota e operacional é crucial para reduzir a intensidade de emissões, proporcionando reduções significativas e imediatas no consumo de combustível e nos custos associados, mas são necessárias medidas adicionais para lidar com as emissões residuais.

O impacto combinado da eficiência da frota e da eficiência operacional pode reduzir a intensidade de emissões em 34% entre 2019 e 2050

Variação da eficiência de combustível em relação a 2019 (kg por RPK)



Fonte: Dados históricos da ALTA – Caminho para a sustentabilidade na América Latina e no Caribe, análise da ICF

Implantação de combustível de aviação sustentável (SAF) para atingir emissões líquidas zero até 2050

O SAF é uma das principais soluções de redução de emissões de longo prazo disponíveis para o setor. Na linha de base (crescimento da atividade sem medidas de redução de emissões), o consumo total de querosene de aviação na ALC aumentará de 21,2 milhões de toneladas (Mt) em 2019 para 44,5 Mt até 2050, cerca de 10% do aumento global projetado¹⁰. Aeronaves mais eficientes em consumo de combustível e medidas de eficiência operacional reduzem significativamente o consumo de querosene de aviação, em 13,4 Mt e 1,1 Mt, respectivamente, resultando em custos e emissões mais baixos. No entanto, mesmo com essas medidas, 29 Mt de querosene de aviação ainda seriam consumidas na ALC, produzindo emissões de cerca de 111 Mt (WTW¹¹) de CO₂e. O SAF, assim como os créditos de carbono, são cruciais para lidar com essas emissões remanescentes.

Os SAF oferecem um caminho prático para reduzir as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida da aviação, pois podem ser usados como combustível drop-in¹² com aeronaves e infraestrutura existentes. Essa compatibilidade torna os SAF uma opção fundamental para reduzir as emissões da aviação sem exigir grandes mudanças nas aeronaves ou nos sistemas de combustível. Como resultado, muitas estratégias de redução de emissões da aviação têm se concentrado na adoção de SAF como medida-chave para reduzir as emissões do setor.

A região da ALC enfrenta desafios únicos que devem ser superados para liberar todo o potencial do SAF. Embora cada um desses fatores possa ser superado ou mitigado, eles sugerem a necessidade de maior apoio ou de uma implantação mais lenta em comparação com a média global. Os desafios incluem:

- **Capacidade limitada do governo para apoio financeiro.** Há menos recursos governamentais disponíveis para subsidiar o desenvolvimento de uma indústria regional de SAF. Um apoio na escala da IRA nos EUA ou do STIP na UE seria difícil de alcançar na ALC.
- **Custo mais elevado do combustível devido a ineficiências na cadeia de abastecimento.** O custo do querosene de aviação na região é mais elevado do que em outras partes do mundo devido a cadeias de abastecimento ineficientes, oferta monopolística e com preços controlados em alguns países, multiplicidade de regimes tributários sobrepostos e infraestrutura ineficiente e subfinanciada, atingindo 30 a 40%¹³ dos custos operacionais das companhias aéreas regionais. Isso pode limitar os recursos disponíveis para a adoção de combustíveis mais caros.

¹⁰ Com base na modelagem da demanda por querosene de aviação utilizada neste estudo

¹¹ WTW (well-to-wake)

¹² Combustível alternativo, que pode ser utilizado em motores e infraestrutura existentes sem quaisquer modificações, até os limites de mistura da ASTM.

¹³ Em 2022, o querosene de aviação representou 43% dos custos operacionais, enquanto no período de 2022 a 2025 variou geralmente entre 42% e 30%

- **A indústria de biocombustíveis concentra-se no transporte terrestre doméstico.** Devido à química de produção dos biocombustíveis, as instalações de SAF normalmente coproduzem outros biocombustíveis, como nafta e diesel renovável, enquanto as instalações de diesel renovável podem não produzir nenhum SAF. Além disso, a produção de diesel renovável é normalmente mais barata do que a de SAF, pois não são necessários equipamentos de isomerização, produz-se menos nafta de baixo valor e a indústria teve várias décadas para amadurecer as tecnologias. Esses fatores resultam em um cronograma de implantação típico liderado pelo diesel renovável e pelo etanol, com o SAF se expandindo posteriormente com base nessas fundações. Embora o Brasil se destaque com uma indústria de biocombustíveis em larga escala, o uso no restante da região da ALC é muito menor; a porcentagem do consumo de petróleo atendida por biocombustíveis é de 4,4% nos EUA e 2,5% na Europa, em comparação com apenas 1,6% em toda a ALC (excluindo o Brasil)¹⁴. Além disso, os requisitos de sustentabilidade e certificação continuam sendo uma consideração fundamental para a implantação de biocombustíveis. **Isso sugere que uma estratégia de biocombustíveis pode se concentrar inicialmente em combustíveis rodoviários, com o SAF se desenvolvendo sobre essa base posteriormente.**
- **Disponibilidade limitada de energia para a produção de hidrogênio verde.** O hidrogênio verde é um insumo fundamental para a produção de power-to-liquid, mas sua produção é intensiva em energia. Embora países como o Chile e o Brasil tenham forte potencial para o desenvolvimento de hidrogênio verde, há concorrência com outros usos domésticos de energia. Além disso, espera-se que o preço que as companhias aéreas pagam pelo SAF de power-to-liquid permaneça significativamente mais alto do que o de outras rotas, mesmo com o amadurecimento das tecnologias de SAF.
- **A alta sensibilidade dos passageiros ao preço amplifica o impacto da adoção do SAF.** O SAF pode ter um efeito significativo nas estruturas de custos das companhias aéreas e nos preços das passagens. Atualmente, o SAF é de 3 a 12 vezes mais caro do que o querosene de aviação convencional e prevê-se que continue mais caro no horizonte de previsão. Os passageiros na ALC em desenvolvimento são altamente sensíveis aos preços, o que aumenta o impacto de quaisquer custos repassados aos clientes. Como resultado, qualquer aumento nos preços das passagens devido à adoção do SAF poderia reduzir a demanda, afetando potencialmente a conectividade aérea em uma região onde a aviação desempenha um papel crítico na ligação entre comunidades e no apoio ao crescimento econômico.
- **Ambiente de investimento desafiador.** A falta de uma demanda bancável por parte das companhias aéreas domésticas para apoiar o desenvolvimento de projetos de SAF, aliada à incerteza regional em termos de geopolítica, incerteza política doméstica, interferência de outros governos, custo de capital mais elevado para projetos e falta de tecnologias maduras de SAF ou mecanismos de financiamento além de incentivos à produção, além da alta elasticidade da demanda, tudo isso leva a preços mais altos para os passageiros e ameaça um impacto potencial na conectividade maior do que em outras regiões.

Para a avaliação dos desafios, foi modelado o impacto do alinhamento com a mistura elevada de SAF do LTAG da OACI. Isso pressupõe a substituição de 96% dos combustíveis fósseis por SAF, com mecanismos de carbono utilizados apenas para emissões residuais. O alto custo do SAF acrescentaria cerca de 43 dólares americanos (USD) por assento ofertado em voos de partida até 2050 (30,6 bilhões de USD em toda a indústria anualmente), e a sensibilidade dos passageiros significa que o aumento nos custos das passagens resultaria em uma redução de cerca de 30% no tráfego aéreo e na conectividade na região¹⁵. A redução projetada da demanda poderia resultar em uma perda econômica total para a aviação de cerca de 156 bilhões de USD¹⁶, afetando significativamente os passageiros regionais, o setor de transporte aéreo, o turismo e o bem-estar econômico e social regional de forma mais ampla.

Esses fatores indicam que é necessária uma abordagem estruturada e colaborativa para ampliar a escala dos SAF na região. Nenhum desses fatores é insuperável, mas significa que as ambições devem ser apoiadas por uma estratégia que reflita as circunstâncias de cada país. É importante ressaltar que esses desafios também

¹⁴ Com base na equivalência energética do petróleo, fonte: El Statistical review of world energy

¹⁵ Fonte de elasticidade utilizada – Estimativa das elasticidades de preço e renda na demanda por transporte aéreo na América Latina (estudo realizado pela Universidade de San Andrés para apoiar este estudo)

¹⁶ Calculado pelo rateio do valor da aviação na ALC calculado pela ATAG: <https://aviationbenefits.org/>

representam oportunidades para inovação e liderança regional. A região da ALC se beneficia de um potencial abundante de matéria-prima de segunda geração, posicionando-a como futura exportadora caso sejam mobilizados investimentos e parcerias. Ações precoces para expandir a produção de biocombustíveis para o transporte rodoviário podem estabelecer a base técnica e econômica para os SAF, possibilitando uma transição gradual e adequada à região.

Mais de 1,9 bilhão de galões de capacidade de produção de SAF foram anunciados na ALC¹⁷, embora nenhum dos projetos anunciados tenha ainda passado pela fase de decisão final de investimento (FID) e muito poucos tenham qualquer investimento material na fase de viabilidade. Isso indica um forte interesse, e a indústria regional tem oportunidades significativas para produzir e exportar SAF se os desafios forem enfrentados com esforços coordenados para resolver as dificuldades econômicas, técnicas e de sustentabilidade. Um planejamento cuidadoso e a compreensão dos impactos potenciais associados à conectividade devem estar em primeiro plano na concepção e implementação de políticas em cada país e na região como um todo.

O papel dos créditos de carbono na redução das emissões da aviação na América Latina e no Caribe

Medidas baseadas no mercado, incluindo compensação de carbono e remoções de carbono, oferecem um caminho crucial para alcançar emissões líquidas zero no setor da aviação na ALC. Esses mecanismos permitem que as companhias aéreas compensem as emissões residuais por meio da compra de créditos de carbono verificados de projetos que reduzem, evitam ou removem gases de efeito estufa fora do setor de aviação.

A região da ALC desempenha um papel fundamental no mercado de carbono. Nos últimos quatro anos, a região emitiu 23% de todos os créditos de carbono globais, demonstrando um papel desproporcionalmente relevante quando comparado às emissões regionais (6,7% das emissões globais de carbono¹⁸). Com ecossistemas naturais extensos e de importância global, florestas tropicais e rica biodiversidade, a região está em uma posição única para liderar a geração de créditos de carbono de alta integridade, embora a maioria das metodologias de soluções baseadas na natureza (NBS) presentes na região esteja atualmente excluída do CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Até o momento, os principais projetos incluem desenvolvimentos por meio do REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal+) e outros projetos relacionados à silvicultura. A Guiana foi o primeiro país a ter créditos autorizados pelo CORSIA emitidos (incluindo a LoA (carta de autorização)), estabelecendo uma referência global para programas jurisdicionais de REDD+.

O mercado voluntário global de carbono se expandiu significativamente, passando de 56 Mt em 2016 para 251 Mt em 2024, representando uma CAGR¹⁹ de aproximadamente 20%. Até 2050, analistas projetam que o mercado de carbono poderá atingir entre 1,8 e 8,2 bilhões de toneladas (Bt) de CO₂ negociadas anualmente, incluindo remoções por captura direta do ar (DAC)²⁰. Este estudo estima o mercado global em cerca de 4,0 Bt até 2050, crescendo cerca de 11% ao ano, com a região da ALC potencialmente representando cerca de 1 Bt desse total. Para a aviação, o número de créditos de alta qualidade que se espera que estejam disponíveis na ALC é de cerca de 0,1 Bt até meados do século.

A robustez do mercado e os cobenefícios são essenciais. O mercado global tem sido alvo de intenso escrutínio nos últimos anos, impulsionando um foco renovado na qualidade, precisão e cobenefícios para as populações locais. Isso deve impulsionar melhorias adicionais na maturidade do mercado e no impacto. Muitas companhias aéreas na ALC se beneficiam ainda mais de sua proximidade e compreensão dos ecossistemas, comunidades e projetos que desenvolvem créditos de carbono na região, permitindo um nível adicional de rigor e alinhamento dos benefícios.

A concretização do potencial dos mercados de carbono na região exigirá processos simplificados de LoA para esquemas internacionais, sistemas reforçados de monitoramento, relatório e verificação (MRV) e colaboração regional para harmonizar padrões e reduzir a fragmentação. Incentivos financeiros, como créditos fiscais e títulos

¹⁷ Análise da ICF de fontes públicas

¹⁸ OCDE, 2023

¹⁹ $CAGR = ((\text{Valor final} / \text{Valor inicial})^{1/\text{Número de anos}}) - 1$

²⁰ BloombergNEF, 2025, Green Earth, 2025

verdes, podem ajudar a mobilizar investimentos em projetos de alta qualidade. **À medida que a demanda por créditos elegíveis para a aviação aumenta, a região da ALC está bem posicionada para atender às necessidades regionais e globais, desde que as principais barreiras regulatórias e institucionais sejam superadas.**

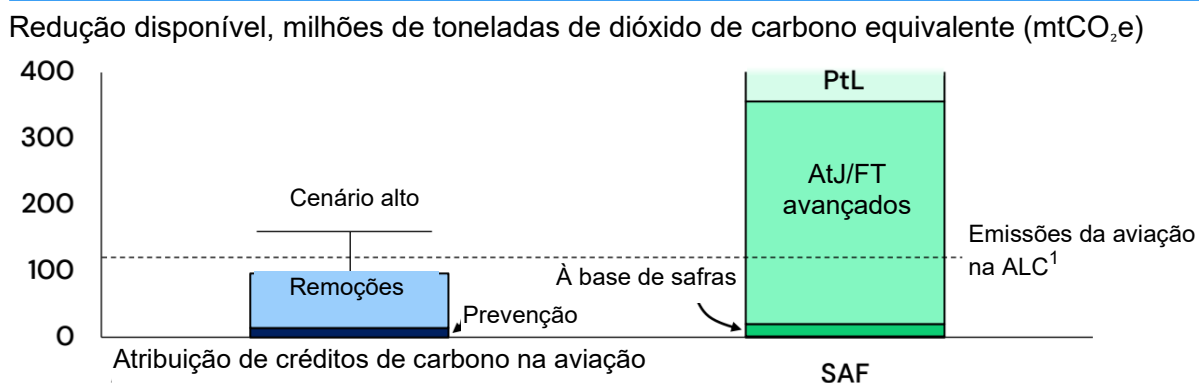
Equilibrando o uso de SAF e créditos de carbono ao considerar preço e disponibilidade

A combinação de SAF e créditos de carbono deve ser adequada aos recursos de cada país. Ambas as abordagens podem ser ambientalmente robustas com salvaguardas apropriadas, e alguma combinação dos dois mecanismos será sempre necessária para atingir as metas globais da aviação. Vários fatores determinam a estratégia ideal para reduzir as emissões da aviação, incluindo a disponibilidade de infraestrutura, expertise, disponibilidade de matéria-prima para SAF e potencial de investimento, oportunidades de compensação e remoção e a força de seus cobenefícios, a capacidade e disposição dos passageiros em pagar, e os recursos dos governos para incentivar o desenvolvimento de novas indústrias, como a de SAF.

A disponibilidade de mecanismos é uma consideração fundamental. Em 2024, os combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) representaram menos de 1% do consumo global de querosene de aviação²¹. Vários estudos destacaram a disponibilidade global de matérias-primas, e esta avaliação identificou o potencial de matéria-prima na ALC. No entanto, quase todos esses volumes de matérias-primas exigem tecnologias avançadas (como a produção de etanol celulósico, álcool para aviação e o processo Fischer-Tropsch), que ainda não foram implantadas em escala comercial. A disponibilidade de matéria-prima para o processo HEFA comprovado e o coprocessamento é limitada e enfrenta forte concorrência para uso como biocombustível não destinado à aviação e em outros setores. O mercado de carbono também é relativamente pequeno hoje, quando comparado às emissões globais. Em 2025, 251 Mt de créditos de carbono foram gerados em todos os setores, o equivalente a menos de um quarto das emissões globais da aviação e apenas 0,7% do total das emissões globais. O aumento do desenvolvimento e do uso de créditos de carbono permite um aumento significativo de escala, mas o mercado deve ser apoiado para dar aos investidores a confiança necessária para investir e para garantir a robustez e a durabilidade das reduções de emissões subjacentes. O gráfico a seguir ilustra a previsão de disponibilidade para 2050 na ALC, com comparação em relação às emissões da aviação.

Isso leva a duas conclusões: é necessária uma combinação de mecanismos, e a região da ALC pode ter uma oportunidade como exportadora de SAF para países onde a demanda supera a disponibilidade de matéria-prima.

Disponibilidade projetada de créditos de carbono e SAF na ALC para 2050, em termos de abatimento de CO₂e



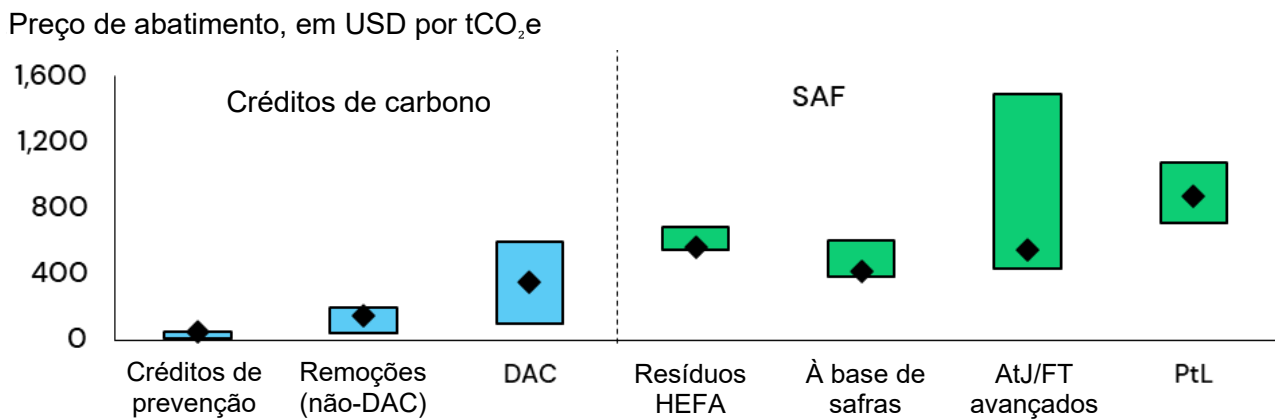
Fonte: Análise da ICF

Notas: 1) Após melhorias na frota e operacionais

²¹ <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03>

Comparando o custo de abatimento em 2050 para SAF e créditos de carbono. A previsão de preço para os créditos de carbono é predominantemente impulsionada pela oferta e pela demanda, enquanto o preço do SAF é impulsionado por fatores tecnológicos. Como resultado, a análise pressupõe um aumento gradual no preço de créditos de carbono robustos, à medida que a demanda supera a oferta, mas uma redução gradual no preço do SAF à medida que as tecnologias maduras de SAF se expandem. No entanto, é necessário levar em consideração o fato de que as matérias-primas do SAF são commodities com seus próprios mercados e, como tal, possuem um preço mínimo. Existem algumas exceções para rotas individuais; por exemplo, o avanço tecnológico reduz o custo de abatimento para DAC de ~1.300 USD/tCO₂e atualmente para entre 100 e 600 USD/tCO₂e até 2050²², e a oferta limitada de óleos residuais (como óleo de cozinha usado e sebo) aumenta o custo da produção baseada em HEFA à base de óleos residuais ao longo do tempo.

Custo de abatimento na ALC em 2050 para trajetórias selecionadas de créditos de carbono e SAF



Fonte: Análise da ICF

Notas: O preço de abatimento do SAF baseia-se no prêmio do SAF

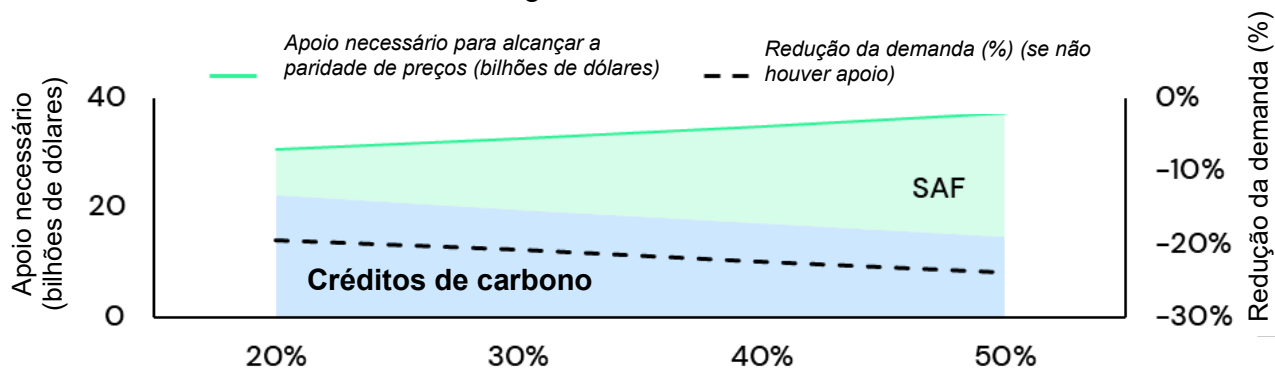
A combinação de créditos de carbono e SAF tem um impacto significativo na escala de apoio necessária

O impacto no custo varia significativamente dependendo da combinação de créditos de carbono e SAF utilizada. Este estudo avaliou o impacto na demanda e a consequente perda de valor econômico para uma variedade de misturas regionais de SAF, de 20% a 100%. O nível de apoio de preço para mitigar a redução na demanda da aviação também foi calculado. Isso mostra que, para uma mistura de 20% até 2050, a demanda da aviação seria reduzida em 19,5%, o que equivale a uma redução de 111 bilhões de dólares em valor econômico potencial. Um apoio governamental de 30,5 bilhões de dólares em 2050, e 224 bilhões de dólares cumulativamente, mitigaria esse impacto sobre o preço e a demanda. Em comparação, uma mistura de 50% de SAF reduziria a demanda em 24%, com um impacto econômico de 131 bilhões de dólares, exigindo 37,3 bilhões de dólares em apoio para mitigar o impacto em 2050 e 284 bilhões de dólares cumulativamente.

²² Elhardt, 2024; Young et al., 2023

Nível de apoio governamental e necessidades de investimento em 2050 e redução da demanda para a mistura de SAF e mecanismos de carbono

Apoio necessário em bilhões de dólares (esquerda) e redução da demanda em % (direita). O eixo horizontal mostra a mistura regional de SAF em 2050.



Fonte: Análise da ICF

Tabela 1: Volume, custo e impacto na demanda por créditos de carbono e SAF em 2050

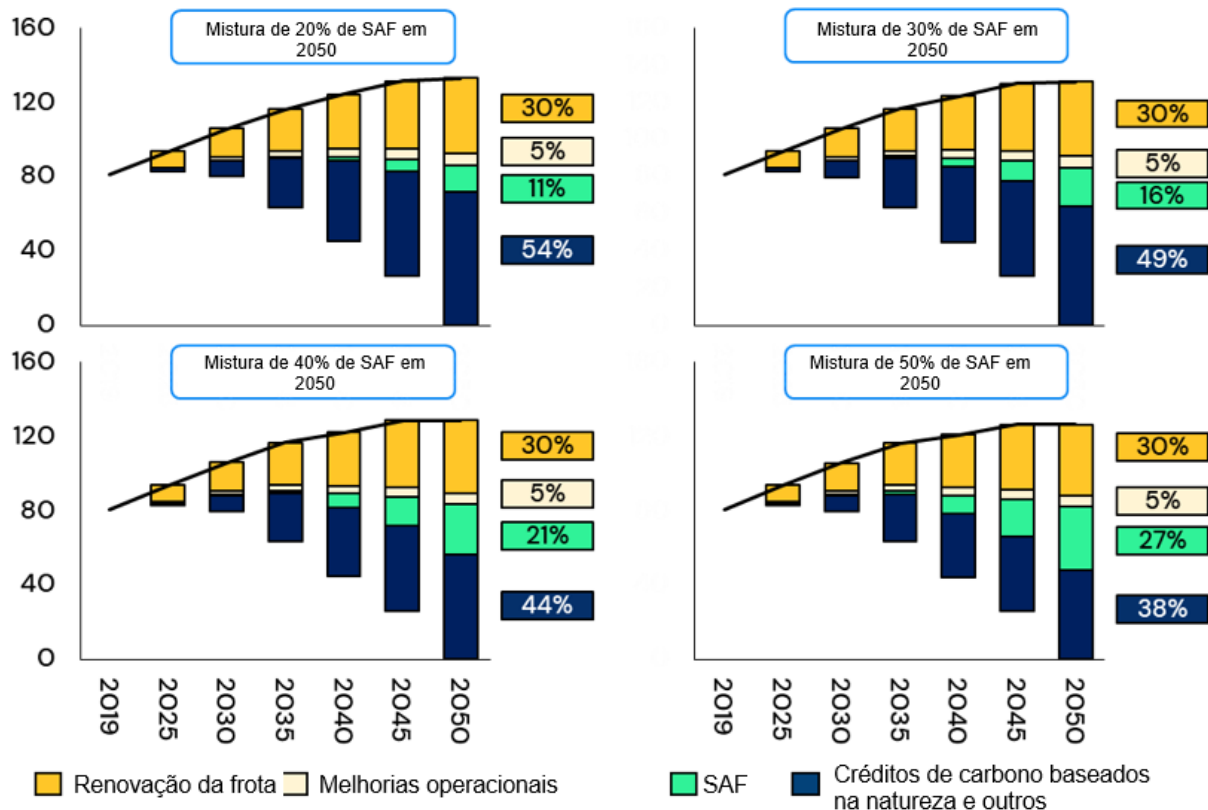
Mistura de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Créditos de carbono necessários (Mt CO ₂ /ano)	92,4	83,4	74,1	64,9
Custo dos créditos de carbono (US\$ bilhões/ano)	22,2	19,7	17,2	14,6
Custo do prêmio do SAF (bilhões de dólares/ano)	8,3	12,9	17,8	22,7
Custo total (bilhões de dólares/ano)	30,5	32,6	34,9	37,3
Impacto de redução da demanda (%/ano) ²³	-19,5	-20,7	-22,4	-24,0

Com foco nas rotas de redução de emissões, com uma mistura de SAF de 20–50% até 2050, a figura abaixo ilustra como as emissões líquidas zero podem ser alcançadas por meio de uma combinação de renovação da frota, melhorias de eficiência operacional, adoção de SAF e créditos de carbono.

²³ Medido em redução de assentos de partida. Observe que isso mostra um caso extremo em que todo o impacto do custo é repassado aos passageiros.

Rotas ilustrativas de descarbonização para o setor de aviação da América Latina e do Caribe atingir as emissões líquidas zero até 2050

Milhões de toneladas de CO₂e



Fonte: Análise da ICF

Nota: A linha de base inclui a redução da demanda

A colaboração entre as partes interessadas do setor, jurisdições e setores, aliada ao apoio governamental, é a única maneira de alcançar as emissões líquidas zero, permitindo ao mesmo tempo que a aviação cresça e continue a oferecer os benefícios sociais e econômicos associados.

Este relatório avalia as implicações das companhias aéreas da América Latina e do Caribe (ALC) atingirem as emissões líquidas zero até 2050, concluindo que medidas imediatas (eficiência operacional e da frota) podem reduzir significativamente as emissões, enquanto lidar com as emissões residuais requer uma estratégia cuidadosa e apoio direcionado devido ao equilíbrio entre garantir a conectividade da região da ALC e a adoção de estratégias mais caras de redução de emissões, como o combustível de aviação sustentável (SAF). Um rápido aumento no uso de SAF não subsidiado e de créditos de carbono elevaria significativamente o custo para os passageiros, resultando em reduções da demanda que restringiriam injustamente o crescimento da aviação e a conectividade em comparação com os países desenvolvidos, tendo um impacto direto no desenvolvimento econômico regional. Isso se traduziria em dezenas de bilhões de dólares em valor econômico perdido até 2050 (incluindo efeitos diretos, indiretos, induzidos e do turismo)²⁴. A aviação é um componente vital da região da América Latina e do Caribe, facilitando as conexões entre regiões e famílias, possibilitando o transporte de mercadorias e sustentando a indústria do turismo e o desenvolvimento econômico em geral. Isso se deve, principalmente, às vastas distâncias, à complexidade geográfica e à falta de infraestrutura de transporte alternativa na região.

²⁴ Com base no valor agregado da aviação em 2023 em toda a região e normalizado pelos ASKs (assentos-quilômetros disponíveis) projetados: Benefícios da Aviação Além das Fronteiras

Para lidar com os custos da redução de emissões, os governos devem implementar incentivos econômicos e regulatórios concretos que impulsionem a eficiência, a inovação e a competitividade em toda a cadeia de valor da aviação — desde os produtores de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) até as companhias aéreas. Pacotes de políticas podem permitir que as companhias aéreas acelerem a redução de emissões por meio da combinação de medidas direcionadas, tais como isenções fiscais na compra de SAF, descontos ou reembolsos nas taxas aeroportuárias e de navegação aérea vinculados ao uso de SAF, e regimes fiscais diferenciados que recompensem a adoção comprovada de SAF. Dado o custo relativo do querosene de aviação (~40% dos custos operacionais) e o preço do SAF (3 a 12 vezes o do querosene de aviação), serão necessárias múltiplas medidas combinadas que abordem a enorme diferença de preço. Serão necessárias contribuições de países desenvolvidos e organizações multilaterais, bem como a implementação de soluções técnicas, como leilões duplos ou mecanismos de garantia de receita, que já provaram ser eficazes para impulsionar outras indústrias de energia renovável, como a do hidrogênio. Um elemento significativo desse apoio poderia vir de governos estrangeiros, seja indiretamente (por exemplo, governos de países desenvolvidos financiando a P&D para novas tecnologias de produção de SAF) ou diretamente (por exemplo, apoiando o desenvolvimento de projetos de créditos de carbono e a produção de SAF na ALC por meio da oferta de mercados de exportação, ou por meio de investimentos diretos e novos mecanismos de financiamento climático). Dentro da região, as intervenções governamentais também devem incluir processos regulatórios simplificados e estruturas colaborativas que incentivem o investimento em tecnologias mais limpas.

Além disso, o engajamento de múltiplas partes interessadas pode ajudar a equilibrar os objetivos climáticos com as prioridades econômicas, garantindo que o setor de aviação permaneça resiliente enquanto avança em direção às metas de emissões líquidas zero. O alinhamento regulatório em toda a região da ALC é um requisito fundamental para a redução de emissões no setor de aviação. Regulamentações harmonizadas facilitarão a implementação eficaz de várias medidas necessárias para apoiar a transição do setor para emissões mais baixas. Com base nisso, as prioridades estratégicas a seguir delineiam as áreas-chave nas quais ações coordenadas e apoio direcionado serão essenciais para possibilitar a transição do setor para emissões mais baixas.

- **Apoiar a renovação da frota:** a modernização da frota é a pedra angular para alcançar as emissões líquidas zero, dado seu impacto significativo tanto nos custos de combustível quanto nas emissões. As companhias aéreas já investiram bilhões em novas aeronaves, e esse investimento contínuo em aeronaves de geração futura e tecnologias futuras de propulsão impulsionará reduções contínuas na queima de combustível por passageiro-quilômetro. O apoio direcionado de governos e instituições financeiras, incluindo depreciação acelerada e financiamento preferencial, ajuda a sustentar o investimento das companhias aéreas.
- **Acelerar ganhos de eficiência operacional:** melhorias de eficiência oferecem uma maneira imediata e custo-efetiva de reduzir as emissões, muitas vezes com benefícios colaterais para o tempo de viagem e a qualidade do ar local nos aeroportos. Muitas medidas sob o controle das companhias aéreas já foram implementadas, incluindo iniciativas de redução de peso e programas de treinamento para incentivar o taxiamento com um único motor, com ganhos adicionais dependendo de ações coordenadas com governos, aeroportos e prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs).
- **Possibilitar a ampliação do uso de SAF por meio de uma abordagem em fases:** o SAF é uma medida necessária de redução de emissões a longo prazo, mas os altos custos e as restrições de infraestrutura significam que as metas regionais devem refletir as realidades locais. Uma estratégia em fases deve começar pela compreensão das compensações e pelo alinhamento das necessidades da economia como um todo, fortalecendo a indústria de combustíveis renováveis para o transporte rodoviário e compreendendo o potencial de cada país para encontrar um mercado de exportação adequado para o SAF, a fim de alcançar a escala necessária e a sustentabilidade de longo prazo do mercado de SAF, além de elaborar políticas para apoiar a criação de uma demanda suficientemente sólida para viabilizar o financiamento, com foco no apoio ao passageiro à adoção do SAF. Isso pode criar a base para a produção de SAF. Governos, companhias aéreas e a indústria devem trabalhar juntos para atrair investimentos, simplificar licenças e desenvolver cadeias de abastecimento regionais, garantindo ao mesmo tempo que a conectividade e o desenvolvimento econômico em nível de sistema sejam protegidos. É necessária uma abordagem regulatória unificada e cooperativa para promover o desenvolvimento de SAF, garantindo volumes de produção suficientes, preços competitivos e certificação CORSIA, incluindo normas harmonizadas e processos transfronteiriços simplificados para a distribuição de matéria-prima e combustível. Paralelamente, viabilizar a comercialização de atributos

ambientais, como sistemas book-and-claim, será importante para ajudar a compensar custos e garantir um mercado de exportação de SAF para a ALC.

- **Fortalecimento e promoção da interoperabilidade do mercado de créditos de carbono:** A região da ALC tem um potencial considerável para expandir seu mercado de créditos de carbono, ao mesmo tempo em que proporciona benefícios colaterais significativos em termos de natureza, água e biodiversidade e apoia a redução de emissões em outros setores, como a agricultura, que representam uma grande proporção das emissões na região. Os governos e as partes interessadas devem colaborar para estabelecer regras transparentes, metodologias padronizadas e estruturas confiáveis de MRV. Isso inclui esclarecer os direitos de propriedade do carbono, facilitar a emissão e a transferência de créditos de carbono e garantir a compatibilidade com normas internacionais para atrair tanto a demanda regional quanto a global. Além de reduzir as emissões, um mercado de créditos de carbono eficaz pode gerar benefícios colaterais substanciais para a conservação e a biodiversidade, incentivando a preservação e a restauração de florestas, áreas úmidas e outros ecossistemas críticos, protegendo espécies ameaçadas de extinção e promovendo práticas sustentáveis de uso da terra que aprimorem os serviços ecossistêmicos e fortaleçam a resiliência climática em toda a região, ao mesmo tempo em que proporcionam benefícios sociais por meio da criação de empregos rurais, da melhoria dos meios de subsistência das comunidades locais e do desenvolvimento comunitário.
- **Facilitar o compartilhamento contínuo de conhecimento:** É crucial que todas as partes interessadas, incluindo companhias aéreas, órgãos governamentais, parceiros do setor e órgãos reguladores, trabalhem em colaboração para lidar com restrições, compartilhar conhecimentos técnicos e insights sobre políticas. Ao manter canais de comunicação transparentes e contínuos, as partes interessadas podem identificar e resolver ineficiências, implementar soluções comprovadas e evitar a duplicação de esforços.

Ao priorizar ações coordenadas e políticas de apoio, a região da ALC pode criar um ambiente que promova o investimento, impulse a inovação e remova barreiras de implementação. Alcançar as emissões líquidas zero exigirá compromisso sustentado, responsabilidade compartilhada e uma abordagem equilibrada que alinhe os objetivos climáticos com as prioridades econômicas e sociais.

Índice

Resumo executivo.....	3
1. Introdução.....	17
1.1 Introdução.....	18
1.2 O contexto global.....	18
1.3 Contexto da América Latina e do Caribe.....	18
1.4 Avaliação do trabalho existente.....	21
2 Atividades de voo na América Latina e no Caribe.....	33
2.1 Atividade da aviação na região da América Latina e do Caribe.....	34
2.2 Metodologia, fontes de dados e premissas.....	34
2.3 Perspectiva econômica para a América Latina e o Caribe.....	40
2.4 Atividade regional total.....	40
2.5 Previsões em nível de país.....	44
3 O papel da renovação da frota.....	56
3.1 Modernização e substituição da frota.....	57
4 Melhorias operacionais e previsão de emissões.....	65
4.1 Introdução.....	66
4.2 Âmbito e metodologia.....	69
4.3 Medidas de eficiência e planejamento de aeronaves.....	70
4.4 Operações aeroportuárias e em solo.....	73
4.5 Otimização do perfil de voo.....	79
4.6 Resultados e discussão.....	89
4.7 Previsão de linha de base para o querosene de aviação.....	90
5 Avaliação das oportunidades e obstáculos para os combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) na América Latina e no Caribe.....	93
5.1 Oportunidades e desafios para o SAF na América Latina e no Caribe.....	94
5.2 Arcabouço de políticas públicas global de SAF: ICAO e CORSIA.....	95
5.3 Indústria e políticas de SAF na América Latina e no Caribe.....	99
5.4 Infraestrutura energética e implicações para a produção de SAF.....	106
5.5 Sustentabilidade e o mercado global de SAF.....	108
5.6 Disponibilidade de matéria-prima biogênica para a produção de SAF.....	111
5.7 Metodologia de cálculo do preço do SAF e premissas das projeções.....	128
6 Oportunidades de compensações e remoções na América Latina e no Caribe.....	151
6.1 Oportunidade para medidas baseadas no mercado.....	153

6.2	Mercado global de compensações de carbono.....	154
6.3	Projeções de preços e volume	157
6.4	Créditos de carbono na América Latina e no Caribe	162
6.5	Estratégia e recomendações	165
7	Por que é necessária uma abordagem regional para a América Latina e o Caribe?	168
7.1	Escopo e metodologia	169
7.2	Referências globais.....	170
7.3	Cenários para a América Latina e o Caribe.....	171
8	Conclusões	179
Apêndice		183
Apêndice A: O papel do coprocessamento		183
Apêndice B: Panorama da eletricidade renovável e potencial para PtL na região.....		185
Apêndice C: Análise de elasticidade		187

1. Introdução



1.1 Introdução

Este projeto explora as rotas e o papel da aviação na América Latina e no Caribe para reduzir as emissões, mantendo a conectividade. A aviação se comprometeu a atingir emissões líquidas zero até 2050, e várias análises globais, incluindo o LTAG da OACI, fornecem uma estrutura abrangente para alcançar esse objetivo. No entanto, a rota, o mecanismo e o papel de cada região devem ser adaptados aos recursos e desafios de cada país. A natureza diversificada das nações da América Latina e do Caribe torna especialmente importante adaptar a rota regional. O objetivo deste projeto é esclarecer os desafios e oportunidades das rotas para emissões líquidas zero e fornecer um ponto de partida para rotas de aviação adequadas à região.

1.2 O contexto global

O setor de aviação está passando por uma rápida transformação para reduzir sua pegada de carbono. Em 2022, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu um objetivo aspiracional de longo prazo (LTAG) de alcançar emissões líquidas zero até 2050²⁵. O LTAG representa um compromisso coletivo dos Estados-membros da OACI de alcançar emissões líquidas zero na aviação internacional, em consonância com o objetivo mais amplo do Acordo de Paris da UNFCCC de limitar o aumento da temperatura média global. A LTAG é uma meta não juridicamente vinculante que não impõe metas específicas a países individuais — reconhecendo, em vez disso, que cada Estado possui capacidades e circunstâncias próprias, tais como diferentes níveis de desenvolvimento, maturidade do mercado e prioridades nacionais.

O LTAG foi elaborado com base em uma abordagem de cenários, para determinar as trajetórias potenciais com base em níveis alto, médio e baixo de prontidão, viabilidade e aspiração. A análise da LTAG inclui cenários parciais para tecnologia, combustível e operações. Devido aos desafios de abater as emissões da aviação, apesar da ambição, nenhum dos cenários atinge as emissões líquidas zero sem medidas fora do setor, reconhecendo também o papel fundamental dos créditos de carbono para alcançar as emissões líquidas zero. Cada cenário também inclui um nível definido dessas medidas.

Reconhecendo a relevância e o trabalho altamente especializado que sustenta o estudo de viabilidade do LTAG, este estudo reflete a metodologia de desenvolvimento de cenários do LTAG, uma vez que fornece um padrão reconhecido pelo setor para o desenvolvimento de rotas de redução de emissões.

Nesse contexto, os países estão cada vez mais estabelecendo planos de redução de emissões para a aviação a fim de cumprir a LTAG, geralmente como parte de estratégias mais amplas de descarbonização. Ao utilizar essa metodologia e desenvolver cenários para a região da América Latina e do Caribe, este estudo está contribuindo para a discussão mais ampla sobre a redução das emissões da aviação e fornecendo um exemplo robusto para a definição de políticas nacionais/regionais e estratégias do setor, em consonância com o conceito de responsabilidade comum, mas diferenciada, da UNFCCC.

1.3 Contexto da América Latina e do Caribe

A Aviação desempenha um papel vital na ALC, contribuindo com 3,6% do PIB regional (equivalente a US\$ 240 bilhões) e gerando de 7 a 8 milhões de empregos (2,9% do emprego)²⁶. Dada a geografia extensa da região e a infraestrutura terrestre limitada, o transporte aéreo é essencial para a conectividade e continua insubstituível devido à falta de alternativas, especialmente para áreas remotas, facilitando o acesso a serviços como saúde e educação, além de atuar como um agente de desenvolvimento econômico.

²⁵ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>

²⁶ <https://alta.aero/wp-content/uploads/2025/01/Route-to-Sustainability-in-LATAM-and-Caribbean.pdf>

Apesar disso, o transporte aéreo continua subutilizado na região, com apenas 0,5 viagem per capita por ano, em comparação com mais de duas nos EUA e na Europa. A demanda está crescendo rapidamente — o número de passageiros aumentou 18 vezes desde 1970, atingindo 324 milhões em 2023, com 40% desse crescimento ocorrendo na última década. Prevê-se que esse tráfego continue crescendo, com as taxas de passageiros domésticos aumentando de 2,7% a 4,3% ao ano entre 2027 e 2043²⁶. As rotas internacionais de e para essas duas regiões estão registrando o maior crescimento, com África, Oriente Médio, Índia, China e outras partes da Ásia devendo apresentar um crescimento substancial. A Declaração de Lima, emitida em 2023 pelos ministérios e autoridades de aviação da Latin American Civil Aviation Commission (ALCAC), visa aumentar o tráfego aéreo em 50% entre 2023 e 2033²⁷.

Esse crescimento, embora globalmente positivo do ponto de vista econômico e social, também traz desafios ambientais. A região foi responsável por 4,8% das emissões globais de CO₂ da aviação de 2013 a 2023, sendo o México e o Brasil os dois maiores emissores²⁸. Espera-se que as emissões da aviação aumentem 0,9% ao ano até 2050, sem quaisquer esforços de redução²⁹. Portanto, apesar dos ganhos contínuos em eficiência energética e de eficiência operacional, e embora se reconheça que ainda há espaço significativo em todo o ecossistema da aviação para melhorar ainda mais a eficiência do sistema, atingir as emissões líquidas zero exigirá grandes investimentos em todos os níveis do ambiente da aviação. Esses custos adicionais elevarão os preços das passagens e limitarão o acesso de viajantes de baixa renda ou sensíveis ao preço, especialmente considerando que o combustível de aviação sustentável (SAF) pode ser de 3 a 12 vezes mais caro do que o querosene de aviação convencional, que já representa 35–40% dos custos operacionais das companhias aéreas. Considerando também a capacidade governamental de apoio e a disposição de indivíduos e empresas em pagar, as disparidades econômicas representam desafios adicionais para as iniciativas de redução de emissões. Por exemplo, em 2024, a região terá um PIB per capita de US\$ 11.045, em comparação com US\$ 43.145 na Europa e US\$ 85.810 nos EUA³⁰.

Os países da América Latina, América Central e Caribe (ALC) endossaram o LTAG da OACI, juntamente com outros acordos que promovem o uso de combustíveis alternativos (por exemplo, o acordo alcançado na CAAF/3 da ICAO)³¹. Como prova desse endosso, a ALC tem se envolvido ativamente com o LTAG da OACI por meio de esforços de capacitação, com exemplos tanto da Cooperação UE-América Latina em Aviação Civil (EU-ALC) quanto dos escritórios regionais da OACI na América do Sul (SAM) e na América do Norte (NACC). **É fundamental que os países da América Latina e do Caribe adotem uma abordagem regionalmente adequada e alinhada para reduzir as emissões, a fim de garantir coerência e uma abordagem integrada em toda a região, mas com abordagens razoavelmente diferenciadas que atendam às necessidades e realidades de cada país da região. Em particular, deve-se evitar a implementação do uso obrigatório de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) devido ao seu impacto esperado na conectividade. Isso criaria um mercado mais unificado, simplificando o desenvolvimento de infraestrutura, criando vínculos cruciais de pesquisa e inovação e reunindo recursos para atrair potencialmente investimentos maiores. As oportunidades decorrentes de uma abordagem unificada também incluem o potencial de criar um hub de SAF na região. Garantir a harmonização das regulamentações tanto entre os países da região quanto com as globais permitirá um comércio mais fácil de SAF e matérias-primas essenciais, mesmo além das fronteiras, ou, mais notavelmente, facilitaria a adoção pelas companhias aéreas, independentemente de suas rotas ou base. Isso permitirá que a região aproveite as matérias-primas abundantes em alguns países, em sinergia**

²⁷ Declaração de Lima https://clac-lacac.org/wp-content/uploads/2023/12/RE-AsaExt7_NE02_engRev.pdf

²⁸ A aviação é responsável por cerca de 2% das emissões globais; Fonte: https://atag.org/media/gw5cgzjh/fact-sheet_2_aviation-and-climate-change.pdf

²⁹ Waypoint2050 <https://atag.org/resources/waypoint-2050-2nd-edition-september-2021/>

³⁰ <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

³¹ <https://atag.org/news/agreement-reached-on-aviation-clean-energy/>

com a infraestrutura necessária, ou mesmo a demanda, em outros.

Os países da ALC também dispõem de um conjunto de ferramentas único para reduzir as emissões. Soluções baseadas na natureza (NBS), como o reflorestamento, podem sequestrar até 2 gigatoneladas de CO₂ anualmente até 2050, especialmente considerando o papel da Amazônia na absorção de quase um quarto do carbono florestal global e o fato de que a agricultura, florestas e uso da terra representam a maior parte das emissões da região da ALC³². O uso de NBS e créditos de carbono é um cenário ganha-ganha para todos, pois apoia a proteção vital da biodiversidade, reduz os passivos ambientais e valoriza o capital natural dos países. A inclusão de NBS e de créditos de carbono na redução das emissões da aviação demonstra forte intenção de sustentabilidade e tem potencial significativo para que o setor contribua para proteger e regenerar ecossistemas críticos na região; no entanto, sua exclusão dos cenários centrais do LTAG da OACI, devido ao foco em medidas internas de redução de emissões em oposição a medidas fora do setor, limita seu uso atual. Ao mesmo tempo, metodologias proeminentes de NBS na região, como o REDD+ autônomo, entre outras, também são extremamente limitadas ou excluídas do CORSIA, dificultando ainda mais a capacidade da região de contribuir tanto para proteger seus ecossistemas quanto, ao mesmo tempo, contribuir para os esquemas CORSIA da aviação internacional com suas soluções de alto potencial.

1.3.1 CORSIA

Os voos entre os Estados participantes do CORSIA contam para os requisitos de compensação. Os voos envolvendo países não participantes estão excluídos das obrigações do CORSIA, exceto no que diz respeito ao monitoramento e reporte, que abrangem todos os voos internacionais. A situação regional está descrita no mapa abaixo. Apenas o Brasil e o México estão sujeitos às obrigações do CORSIA devido ao seu tráfego aéreo (RTK internacional em 2018³³), com o México já participando da fase voluntária. Embora não sejam obrigados, outros 16 países da região estão participando da fase voluntária e presume-se que continuarão mesmo após esta fase voluntária³⁴. A Guiana tornou-se pioneira ao autorizar um total de 7,14 milhões de créditos como elegíveis ao CORSIA para uso pelas companhias aéreas na Fase 1 do CORSIA³⁵.

³² <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax0848> ; <https://sigmaearth.com/how-reforestation-helps-reduce-carbon-emissions/> ; <https://publications.iadb.org/en/benefits-and-costs-reaching-net-zero-emissions-in-latin-america-and-the-caribbean>

³³ [International-RTK-rankings_2018_SIDS_LDC_LLDC.pdf](#)

³⁴ https://www.icao.int/sites/default/files/2025-06/CORSIA-States-for-Chapter-3-State-Pairs_5Ed_Rev_web.pdf

³⁵ <https://lcds.gov.gy/Guyana-announces-worlds-first-carbon-credits-for-use-in-un-airline-compliance-programme-corsia/>

Participação dos países no CORSIA na ALC



Fonte: ICAO

Nota: Presume-se que os países que optaram pela fase voluntária, a partir de 2023, permanecerão na fase obrigatória a partir de 2027

1.4 Avaliação do trabalho existente

Como a região vem intensificando seus esforços de redução de emissões em linha com o LTAG, nove dos onze países avaliados neste estudo publicaram um plano de ação estatal para a aviação. As seções a seguir exploram o contexto da aviação em cada um dos 11 países abrangidos. O PIB total e o número de empregos criados por meio da aviação são apresentados de forma e para cada um, com base no benefício total da aviação, tanto diretamente quanto da cadeia de suprimentos mais ampla, dos gastos dos funcionários e das atividades turísticas.

Tabela 2: Situação dos Planos de Ação Estatais da OACI dos países da região (apenas 11 países em foco)

Medidas propostas no plano de ação	ARG	BHS	BRA	CHL	COL	DOM	ECU	GLS	MEX*	PAN	PER*
Plano de Ação Nacional apresentado à OACI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Data da publicação mais recente	2021	2022	2022	2022	2021	2021	2021	2020	2018	2018	2023
Infraestrutura aeroportuária	✓	✓		✓	✓	✓					
Gestão operacional (<i>tráfego aéreo</i>)	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Pesquisa e desenvolvimento				✓							
Medidas fora do setor			✓	✓	✓	✓		✓		✓	
SAF		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
Eficiência da frota	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	

Eficiência energética					✓					
Outras medidas baseadas no mercado	✓					✓		✓		

* Os planos de ação do México e do Peru não estão disponíveis ao público

1.4.1 Argentina

Tabela 3: Contribuição econômica da aviação na Argentina

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
9,1 bilhões de dólares (1,4 %) ³⁶	147.000 ³⁶

Em 2024, a Argentina lançou uma reforma de sua política de aviação, buscando liberalizar o setor. O pacote de medidas incluiu a desregulamentação tarifária, o acesso aberto ao mercado e um aumento dos direitos das companhias aéreas estrangeiras. Também houve mudanças no código aeronáutico, nas parcerias e investimentos das companhias aéreas, bem como na infraestrutura e nos serviços em solo³⁷.

Paralelamente a essa reforma, a Argentina tem trabalhado ativamente para reduzir as emissões em seu setor de aviação. Em 2021, o país atualizou sua estratégia nacional por meio de seu plano de ação estatal para a aviação, coordenado pela Administração Nacional de Aviação Civil (ANAC)³⁸. Esse plano se baseia em esforços anteriores publicados em 2014, que se concentraram principalmente na melhoria da eficiência energética da companhia aérea nacional do país (Aerolíneas Argentinas), resultando no desenvolvimento de um Plano de Eficiência de Combustível em andamento.

O foco central da abordagem da Argentina continua sendo a melhoria da eficiência operacional. A Aerolíneas Argentinas já empreendeu iniciativas como a modernização da frota e a redução do peso das aeronaves para diminuir o consumo de combustível³⁹. Ao mesmo tempo, o país investiu na modernização dos sistemas de navegação aérea; na instalação de estações meteorológicas automáticas, na modernização dos sistemas de pouso por instrumentos e na otimização das rotas de voo para reduzir a queima de combustível desnecessária⁴⁰. Os aeroportos também passaram por melhorias, incluindo a instalação de iluminação LED com eficiência energética, reformas nas pistas e a implementação de inventários de emissões e sistemas de separação de resíduos. Paralelamente, a Argentina está trabalhando para regionalizar as operações aeroportuárias, a fim de ajudar a distribuir o tráfego aéreo de forma mais eficiente e reduzir as emissões relacionadas ao congestionamento.

O combustível de aviação sustentável (SAF) é reconhecido como um componente-chave da estratégia de redução de emissões da Argentina, embora seu desenvolvimento ainda esteja em estágios iniciais. A Argentina está em uma posição privilegiada para explorar a oportunidade de produção de SAF devido à biomassa prontamente disponível, que fornece uma matéria-prima sólida para o SAF produzido pelo processo Fischer-Tropsch, e à produção existente de biocombustíveis⁴¹. Nestas fases iniciais de desenvolvimento, parcerias estão sendo aproveitadas para gerar insights essenciais; por exemplo, instituições como o Instituto Nacional de Tecnologia Industrial (INTI) estão explorando oportunidades de produção de SAF. Enquanto isso, a Airbus e a ICAO anunciaram, no início de 2025, financiamento por meio do programa ACT-SAF (Assistência, Capacitação e

³⁶ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-argentina/>

³⁷ <https://www.iata.org/contentassets/0b6d1c34ebb24fa390b6030be3327751/240712-arg-aviation-reforms-eng-final.pdf/>

³⁸ https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_de_accion_del_estado_argentino_para_la_reduccion_de_emisiones_de_co2_en_la_aviacion.pdf

³⁹ <https://ria.utn.edu.ar/server/api/core/bitstreams/eed56cf2-dbc4-4e66-893a-6c150130fc8b/content/>

⁴⁰ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

⁴¹ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

Treinamento em SAF) para um estudo de viabilidade de SAF no país⁴². Investimentos iniciais foram realizados com uma colaboração notável entre a GreenSinnery e a Axens em Chubut, que visa produzir SAF utilizando energia eólica e o processo Fischer-Tropsch⁴³. O objetivo é produzir 100.000 toneladas de SAF anualmente a partir de 2030, com planos de ampliar para 500.000 toneladas.

A Argentina também está comprometida com os esforços internacionais de monitoramento de carbono. Desde 2019, todas as operadoras aéreas registradas na Argentina são obrigadas a relatar suas emissões de CO₂ anualmente à ANAC, em conformidade com a estrutura global do CORSIA. Além disso, o país implementou um imposto sobre carbono no combustível de aviação (apenas doméstico) e lançou programas de treinamento para aumentar a conscientização sobre as mudanças climáticas no setor de aviação^{44 45}.

1.4.2 Bahamas

Tabela 4: Contribuição econômica da aviação nas Bahamas

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
N/A ⁴⁶	N/A

O setor de aviação nas Bahamas desempenha um papel vital na conexão das ilhas do arquipélago e no apoio à sua economia impulsionada pelo turismo. Em 2019, antes da pandemia da COVID-19, as Bahamas registraram um número anual de passageiros superior a 1,6 milhão e receitas de quase US\$ 4 milhões⁴⁷. O setor é regulado principalmente pela Autoridade de Aviação Civil e Autoridade de Navegação Aérea das Bahamas (CAAB) e pelo Departamento de Aviação, que faz parte do Ministério dos Transportes⁴⁸. A CAAB é responsável pela supervisão dos serviços de tráfego aéreo, licenciamento e fiscalização de segurança operacional aérea, enquanto a Bahamas Air Navigation Services Authority (BANSAs) gerencia a navegação aérea. A Lei de Aviação Civil e a Lei da Autoridade de Serviços de Navegação Aérea fornecem um arcabouço jurídico abrangente para o setor de aviação no país.

As Bahamas lançaram seu Plano Estratégico Nacional de Aviação em 2023, projetado para posicionar o país como líder regional na aviação. O plano de oito pontos delineou pilares-chave, desde a modernização da infraestrutura até serviços de transporte aéreo sustentáveis, a serem implementados entre 2023 e 2026⁴⁹. O plano estabeleceu metas e próximos passos concretos a serem implementados pelo setor de aviação, como o lançamento da Semana Nacional da Aviação das Bahamas, o aumento da capacidade e a realização de avaliações de impacto ambiental para apoiar as expansões aeroportuárias. Como parte disso, as Bahamas se comprometeram a formar uma Força-Tarefa de Aviação Sustentável para desenvolver um Plano de Aviação Sustentável.

Esse plano provavelmente se baseará no plano de ação do país para a redução de emissões da aviação civil, publicado em 2022. O plano delineou ações iniciais para o setor, incluindo modernização da frota, melhoria da gestão do tráfego aéreo e do uso da infraestrutura, além de medidas de conservação de energia. Embora o SAF não tenha sido abordado no plano de ação do país, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) já iniciou alguns estudos de viabilidade iniciais mediante um projeto de cooperação técnica financiado⁵⁰.

⁴² <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru/>

⁴³ <https://www.axens.net/resources-events/news/greensinnery-and-axens-sign-memorandum-understanding-advance-saf-project-argentina-latin-america/>

⁴⁴ <https://www.iea.org/policies/19277-law-27430-on-taxing-liquid-fuels-and-carbon-dioxide/>

⁴⁵ <https://www.argentina.gob.ar/anac/cipe/>

⁴⁶ Não há informações públicas disponíveis sobre as Bahamas

⁴⁷ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/The-Bahamas-Action-Plan-for-Emissions-Reduction-APER-v1.pdf>

⁴⁸ <https://www.doabahamas.com/about>

⁴⁹ <https://www.doabahamas.com/plans-and-projects>

⁵⁰ <https://www.iadb.org/en/project/BH-T1130>

O governo também havia se concentrado na modernização do setor de aviação por meio de investimentos em infraestrutura aeroportuária no âmbito do Family Islands Airport Renaissance Program, que tinha como objetivo modernizar 14 aeroportos para melhorar a segurança e a eficiência. O programa foi posteriormente cancelado⁵¹. Desde então, o governo anunciou um novo orçamento para a aviação no ano fiscal de 2025/2026⁵². Isso inclui recursos para fortalecer a infraestrutura, especialmente para modernizar o Aeroporto Internacional Lynden Pindling e outros planos para o Aeroporto Internacional de Grand Bahama. Acompanham-no planos iniciais para uma aviação sustentável, por meio de estudos de viabilidade sobre energia renovável nos aeroportos e incentivos às companhias aéreas para melhorar a eficiência de combustível. Há também recursos para melhorar a conectividade e o turismo, a segurança operacional aérea e o treinamento, além da criação de empregos.

1.4.3 Brasil

Tabela 5: Contribuição econômica da aviação no Brasil

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
46,4 bilhões de dólares (2,1 %) ⁵³	1,9 milhão ⁵³

O principal órgão responsável pela aviação no Brasil é a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que supervisiona áreas como certificação e inspeção de aeronaves, operadores e organizações de manutenção, regulamentação dos aeroportos e fiscalização das normas de segurança e padrões operacionais. No início deste ano, o Brasil anunciou o Fundo Nacional de Aviação, oferecendo 5 bilhões de BRL (aproximadamente 890 milhões de USD) em empréstimos e garantias para apoiar a expansão das companhias aéreas, o desenvolvimento de rotas internacionais e projetos de sustentabilidade⁵⁴.

O Brasil é o único país da América Latina e do Caribe com uma meta de aviação sustentável ratificada, exigindo reduções nas emissões de CO₂ das companhias aéreas, em vez de um percentual fixo de mistura de combustível de aviação sustentável (SAF). O Projeto de Lei 528/20, conhecido como lei do “Combustível do Futuro”, estabelece o Programa Nacional de Combustível de Aviação Sustentável (ProBioQAV). A lei exige que as operadoras aéreas reduzam suas emissões domésticas, começando com uma redução de 1% em 2027, chegando a 10% até 2037⁵⁵. Essa abordagem deve incentivar rotas de produção de SAF eficientes em carbono, mas pode induzir consequências indesejadas, levando a encargos financeiros adicionais para as operadoras, com, atualmente, incerteza quanto à capacidade do país de fornecer a quantidade esperada de SAF de maneira competitiva em um mercado livre.

O Brasil possui um potencial significativo para se tornar um dos principais produtores de SAF para exportação para os mercados internacionais, devido à abundância de matérias-primas para uma variedade de rotas de produção de SAF. Isso oferece uma oportunidade para o Brasil se tornar um hub de matérias-primas para SAF na região e globalmente, utilizando a infraestrutura e as capacidades existentes para construir o mercado de SAF. O Brasil possui um ambiente propício para o SAF, apoiado pela produção existente de biocombustíveis. Isso é impulsionado pela Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil, a RenovaBio, que apoia os produtores de biocombustíveis na certificação e comercialização de seus produtos, além de estabelecer metas de redução de emissões⁵⁶. Os produtores de SAF estão começando a explorar o mercado brasileiro, investindo em matérias-primas inovadoras

⁵¹ <https://www.doabahamas.com/plans-and-projects>

⁵² <https://bahamasnational.com/bahamas-government-unveils-ambitious-aviation-plans-in-2025-2026-budget-communication/>

⁵³ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-brazil/>

⁵⁴ <https://www.aviacionline.com/brazilian-congress-approves-usd-890-million-financing-for-airlines>

⁵⁵ <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/10/lula-enacts-fuel-of-the-future-law-201cbrazil-will-drive-the-worlds-largest-energy-revolution201d>

⁵⁶ <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/renovabio-ingles>

e tecnologias, refletindo as oportunidades únicas oferecidas. A Acelen está desenvolvendo uma usina de SAF à base de palma com o objetivo de produzir 20.000 barris/dia de SAF e diesel renovável até 2028⁵⁷.

Em agosto de 2024, o governo brasileiro anunciou um pacote de financiamento de US\$ 1,09 bilhão para apoiar o desenvolvimento de SAF e biocombustíveis marítimos⁵⁸. Essa iniciativa, financiada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e pela Fundação Nacional de Estudos e Projetos (FNEP), está alocando recursos por meio de editais que visam:

- Construção de biorrefinarias
- Pesquisa e desenvolvimento
- Projetos de engenharia e projetos-piloto
- Aquisição de equipamentos e capital de giro

O Brasil também está desenvolvendo seu próprio mercado de carbono, no qual os SAF e os créditos de carbono são medidas complementares, mas que atendem a prioridades diferentes. Os SAF são muito relevantes para o setor agrícola no Brasil e são estratégicos do ponto de vista industrial. O Brasil busca a coordenação desses mercados na região, particularmente com a Colômbia e o Chile, para reforçar sinergias e remover barreiras de mercado⁵⁹. O Brasil, no entanto, ainda não conseguiu enfrentar os desafios impostos pelos custos adicionais do SAF para os passageiros e o consequente impacto na conectividade, especialmente para regiões remotas, mas com impacto esperado em todo o mercado.

1.4.4 Chile

Tabela 6: Contribuição econômica da aviação no Chile

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
7,9 bilhões de dólares (2,3 %) ⁶⁰	212.000 ⁶⁰

Os voos internacionais representaram apenas 25% das partidas de origem e destino do Chile, com oito dos dez principais destinos internacionais do país localizados na América Latina. No geral, o Chile representa 5,1% do tráfego aéreo regional, e 65% de suas partidas de passageiros internacionais são para outros países da América Latina⁶¹. O setor de aviação no Chile é supervisionado pela DGAC (Direção Geral de Aviação Civil) e pelo Conselho de Aviação Civil (JAC) do Ministério dos Transportes e Telecomunicações.

Em termos de sustentabilidade da aviação, o Chile apresentou seu plano de ação estatal para a aviação à ICAO em 2022⁶². No centro dos esforços do Chile está o programa Vuelo Limpio, uma iniciativa público-privada que promove a eficiência energética, melhorias operacionais e a adoção de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF). O programa colabora com as principais companhias aéreas, aeroportos e distribuidoras de combustível para monitorar as emissões, implementar as melhores práticas e desenvolver um Roteiro SAF 2050. Esse roteiro inclui a meta de atender a pelo menos 50% da demanda por combustível de aviação com SAF até 2050. O Chile está explorando alternativas de produção e matérias-primas para SAF, incluindo óleos, gorduras e resíduos biológicos e municipais, bem como e-fuels⁶³.

⁵⁷ <https://bioenergyinternational.com/acelen-renewables-discloses-brazilian-biorefinery-details/>

⁵⁸ [https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-finep-disponibilizam-6-bilhoes-de-reais- para-investimentos-em-combustivel-verde-para-aviacao-e-navegacao](https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-finep-disponibilizam-6-bilhoes-de-reais-para-investimentos-em-combustivel-verde-para-aviacao-e-navegacao)

⁵⁹ Comunicações pessoais durante reuniões de engajamento no Brasil (ANAC, CONAMA, Ministério da Fazenda)

⁶⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-chile/>

⁶¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-chile/>

⁶² https://www.icao.int/environmental-protection/Lists/States_Action_Plans/Attachments/160/Plan%20de%20Acción%20de%20Chile%202022.pdf

⁶³ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_70.pdf

O Chile também está investindo em tecnologias avançadas de navegação aérea, infraestrutura aeroportuária sustentável e modernização da frota para reduzir as emissões. O país está explorando o hidrogênio verde como ferramenta de redução de emissões, com projetos liderados pela CORFO (Agência de Desenvolvimento da Produção) e parcerias internacionais, particularmente com a Holanda. O Chile atualizou seu Plano de Ação Nacional para 2025, quantificou as reduções de CO₂ e planeja desenvolver um marco regulatório para apoiar a produção e a adoção de combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF)⁶³.

1.4.5 Colômbia

Tabela 7: Contribuição econômica da aviação na Colômbia

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
15,5 bilhões de dólares (4,3 %) ⁶⁴	921.000 ⁶⁴

As operações regionais são fundamentais para a Colômbia, com 60% dos 10 principais destinos a partir da Colômbia situados na região da América Latina e do Caribe. O tráfego aéreo internacional representou apenas 23% do total de partidas em 2023⁶⁵. Nesse contexto, a Colômbia mantém políticas de céus abertos com a Argentina e os Estados Unidos e anunciou 110 novas rotas internacionais entre 2023 e 2024 para aumentar a conectividade internacional e impulsionar o turismo⁶⁶. Em 2023, o turismo apoiado pela indústria da aviação gerou 7,6 bilhões de dólares para a economia do país. A Autoridade de Aviação Civil da Colômbia (Aerocivil) é o órgão regulador nacional da aviação, subordinado ao Ministério dos Transportes⁶⁷. Nessa função, aprovou a criação das novas rotas, como parte de sua atribuição de supervisionar a gestão do espaço aéreo e as operações aeroportuárias, além do licenciamento de companhias aéreas, pilotos e pessoal de manutenção, inspeções de segurança e investigações de acidentes, e garantir a conformidade da aviação internacional.

Em janeiro de 2025, a Colômbia assinou a Resolução 00090, estabelecendo um roteiro para o SAF. Isso define metas para que a Colômbia se torne líder regional na produção de SAF, produzindo 100 milhões de galões de SAF até 2035, com expansão para até 450 milhões de galões até 2050⁶⁸. O roteiro gira em torno de três pilares: redução de emissões do setor; desenvolvimento de uma indústria produtiva e sustentável; e transformação social e inclusão. Estes são apoiados por cinco pilares transversais: facilitadores legais e regulatórios; promoção da oferta e da demanda; implantação da cadeia de suprimentos; desenvolvimento tecnológico, educacional e industrial; e financiamento e investimentos. A Ecopetrol, empresa estatal de petróleo da Colômbia, está liderando a inovação em SAF no país. Em 2024, a empresa realizou com sucesso testes industriais em sua refinaria de Cartagena, produzindo 32.000 barris de querosene de aviação coprocessado com óleos vegetais. Embora ainda não seja um SAF totalmente certificado pela ICAO, esse combustível marca um primeiro passo rumo à produção contínua de SAF, prevista para 2028⁶⁹.

Além do SAF, a Colômbia também vem buscando descarbonizar seus aeroportos. O Projeto Dorado Max, em Bogotá, é um dos maiores esforços de modernização aeroportuária da região, buscando integrar design e operações sustentáveis no aeroporto El Dorado. O aeroporto alcançou o Nível 4 no programa de acreditação de carbono aeroportuário da ACI, por meio de métodos como a instalação de 11.000 painéis solares⁷⁰.

⁶⁴ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-colombia/>

⁶⁵ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-colombia/>

⁶⁶ <https://aviacionaldia.com/en/2025/01/colombia-civil-aeronautics-authorized-110-international-air-routes-between-2023-and2024.html>

⁶⁷ <https://www.aerocivil.gov.co/>

⁶⁸ <https://aviacionaldia.com/en/2025/01/green-future-of-aviation-in-colombia-roadmap-to-sustainable-fuels.html>

⁶⁹ https://www.icao.int/SAM/Documents/2025-RAAC18/RAAC18_WP34_Environment_SAF.pdf

⁷⁰ <https://ala.aero/2023/09/el-dorado-international-airport-attains-milestone-as-the-first-airport-in-latin-america-and-the-caribbean-to-achieve-level-4-transformation-in-aca-program/>

O setor de aviação na Colômbia opera no contexto de um mercado de carbono nacional. O país possui um imposto sobre carbono em vigor desde 2016, que atualmente está em cerca de US\$ 5,5 por tonelada de CO₂e e se aplica aos combustíveis de aviação. As empresas têm podido adquirir créditos de carbono domésticos desde 2017 para compensar suas emissões. Além disso, a Colômbia está atualmente desenvolvendo um sistema de comércio de emissões. O sistema encontra-se atualmente em sua primeira fase, que consiste em testar e aperfeiçoar as regras operacionais, antes de ser gradualmente expandido para a implementação total até 2030, conforme determinado pela Lei de Ação Climática⁷¹.

1.4.6 República Dominicana

Tabela 8: Contribuição econômica da aviação na República Dominicana

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
12,9 bilhões de dólares (10,6 %) ⁷²	550.000 ⁷²

A maioria das partidas da República Dominicana em 2023 foi para a América do Norte (66%), com as partidas intrarregionais para outros países da América Latina representando 21% do total. A República Dominicana registrou um aumento de 62,7% nas partidas de passageiros na última década, representando agora pouco mais de 10% do tráfego internacional de passageiros. O país possui sete aeroportos com voos comerciais regulares e está conectado a 45 países por voos diretos⁷³. Isso é viabilizado por uma política de céus abertos com países como os EUA. O setor de aviação na República Dominicana é regulado por três órgãos principais⁷⁴:

- Junta de Aviação Civil (JAC) – órgão governamental responsável pela regulamentação dos aspectos econômicos da aviação civil, incluindo a concessão de acesso ao mercado e a negociação de acordos de serviços aéreos.
- Instituto Dominicano de Aviação Civil (IDAC) – supervisiona os aspectos técnicos e operacionais da aviação, tais como serviços de navegação aérea, supervisão de segurança e emissão de certificados de operador aéreo (AOC).
- Corpo Especializado para a Segurança dos Aeroportos e da Aviação Civil (CESAC) – responsável pela implementação e fiscalização das medidas de segurança da aviação, incluindo o Programa Nacional de Segurança da Aviação Civil.

O Plano de Ação da República Dominicana para a Redução das Emissões de CO₂ (DRAPER) traça um roteiro para reduzir as emissões do setor de aviação por meio de um conjunto de medidas⁷⁵. O país está incentivando as companhias aéreas a modernizar suas frotas e atualizar os motores para atender às mais recentes normas ambientais da ICAO. Enquanto isso, também estão sendo promovidas iniciativas de sustentabilidade em aeroportos, alinhadas com o Kit de Ferramentas Eco-Aeroporto da ICAO. Os aeroportos são obrigados a implementar um Sistema de Gestão Ambiental em conformidade com o Regulamento Aeronáutico Dominicano nº 14⁷⁶. Por meio disso, os aeroportos estão implementando medidas de gestão de resíduos e desenvolvendo geração de eletricidade a partir de energia limpa, particularmente por meio do uso de painéis solares.

⁷¹ https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-92.pdf

⁷² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-dominican-republic/>

⁷³ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-dominican-republic/>

⁷⁴ <https://www.mesalex.com/blog-en/regulation-of-civil-aviation-in-the-dominican-republic>

⁷⁵ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy_DomRep_ENG_Web.pdf

⁷⁶ www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_106.pdf

Além disso, o país realizou um estudo de viabilidade no âmbito do projeto ICAO-UE para avaliar o potencial de produção de SAF. O estudo considerou a cana-de-açúcar como a matéria-prima mais promissora, dada a sua abundância no país e o atual nível de abandono de muitas das áreas adequadas, que poderiam ser utilizadas para criar SAF por meio de AtJ (álcool para combustível de aviação) ou Iso-parafinas Sintéticas (SIP)⁷⁵. Atualmente, a República Dominicana já está apoiando a ampliação do uso de SAF, oferecendo incentivos para combustíveis alternativos por meio da Lei 57-07, que prevê isenções fiscais para projetos de energia renovável⁷⁸. Esses esforços são respaldados pela Declaração de Santo Domingo, que se compromete com o desenvolvimento e o uso de combustíveis alternativos de aviação, assinada em 2023 por uma variedade de partes interessadas importantes, desde ministérios até instituições⁷⁹.

1.4.7 Equador

Tabela 9: Contribuição econômica da aviação no Equador

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
4,6 bilhões de dólares (3,9 %) ⁸⁰	330.000 ⁸⁰

A maioria das partidas no Equador em 2023 foi para destinos domésticos, representando 60% das partidas⁸¹. Internacionalmente, a América do Norte foi o principal destino dos passageiros em partida do Equador em 2023, com essas rotas representando 45% do total de viagens. Outros países da América Latina representaram 39% dos destinos. O Equador registrou um crescimento de 11,4% nas partidas nos últimos dez anos.

A DGAC (Direção Geral de Aviação Civil) é o principal órgão governamental responsável pela política de aviação no Equador. Ela opera sob o marco legal estabelecido pela Lei de Aviação Civil do Equador e faz parte da estrutura governamental mais ampla que supervisiona o transporte e a infraestrutura. Nos últimos anos, o Equador tem se empenhado em melhorar a conectividade, reduzir custos e atrair mais companhias aéreas como parte de sua Agenda de Estado, que reconhece a aviação e o turismo como cruciais para o desenvolvimento do país. Um método fundamental para alcançar isso tem sido por meio de reduções de impostos. Impostos como o *EcoDelta* (para partidas internacionais) e a *Potência Turística* (para chegadas internacionais) foram reduzidos em 2023. Ambos os impostos aplicavam anteriormente uma taxa fixa por bilhete, que agora foi substituída por um sistema escalonado com um valor máximo⁸². Isso resultou em uma redução nos preços para os passageiros. O Equador também começou a reconhecer certificados de operador aéreo (AOCs) de outros países da região para incentivar a entrada de novas companhias aéreas no país⁸³.

A DGAC é responsável por minimizar os impactos ambientais da aviação no Equador e supervisiona a certificação de conformidade ambiental e as aprovações para o setor⁸⁴. O Equador está nos estágios iniciais de sua jornada de redução das emissões da aviação, sem nenhuma legislação específica em vigor. O SAF foi identificado como uma oportunidade para o país, que faz parte da iniciativa com potencial de matéria-prima incluindo cana-de-açúcar, óleo de palma e de soja, e resíduos sólidos urbanos⁸⁵.

⁷⁷ Comunicações pessoais durante reuniões de engajamento na República Dominicana (Segunda reunião sobre combustível de aviação sustentável no âmbito do projeto ASCENT93, 28/03/2025)

⁷⁸ <https://www.iea.org/policies/5290-law-57-07-on-incentives-for-development-of-renewable-energy-sources-and-its-special-regimes>

⁷⁹ <https://dominantoday.com/dr/local/2023/04/25/dominican-republic-launches-action-plan-to-reduce-co2-emissions-in-aviation/>

⁸⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-ecuador/>

⁸¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-ecuador/>

⁸² <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gobierno-tasas-aereas-ecodelta-potencia-turistica/>

⁸³ <https://aviationweek.com/air-transport/safety-ops-regulation/ecuador-accelerates-airline-entry-process-expand-market-access>

⁸⁴ <https://www.gob.ec/dgac>

⁸⁵ <https://news.mit.edu/2025/toward-sustainable-decarbonization-aviation-latin-america-0121>

1.4.8 El Salvador

Tabela 10: Contribuição econômica da aviação em El Salvador

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
1,5 bilhão de dólares (4,4%) ⁸⁶	118.000 ⁸⁶

O número de passageiros em El Salvador cresceu 98,9% nos últimos dez anos. 100% das partidas são internacionais, já que o país possui apenas um aeroporto com voos comerciais regulares. A maioria dos passageiros (74%) viajou para a América do Norte em 2023, sendo que os cinco principais destinos para os passageiros de El Salvador incluem Los Angeles, Washington, Houston, Nova York e Miami⁸⁷. A Autoridade de Aviación Civil (AAC), Autoridade de Aviação Civil, é responsável pela regulamentação da aviação civil no país⁸⁸. Ela supervisiona a implementação do marco legal, a *Lei Orgânica de Aviação Civil*. El Salvador também se alinha estreitamente a muitas políticas da ICAO, como o Plano Global de Navegação Aérea, que define metas para a modernização de equipamentos, procedimentos e infraestrutura, com foco em segurança, eficiência e sustentabilidade⁸⁹. O plano define atualizações de equipamentos e procedimentos, navegação baseada em desempenho e sistemas de monitoramento e reporte para acompanhar as melhorias.

El Salvador está nos estágios iniciais da descarbonização de seu setor de aviação. Em seu plano de ação estatal, o país destacou que medidas para melhorar a eficiência e a modernização da frota estão em vigor há vários anos⁹⁰. Há também esforços para melhorar a gestão do tráfego aéreo, os processos de rolagem e o uso de combustível. El Salvador observa no Plano que, embora o SAF seja reconhecido como uma alavanca fundamental para a redução de emissões, o principal desafio é obter um compromisso de múltiplas partes interessadas para o desenvolvimento desses combustíveis.

Em 2024, o Banco de Desenvolvimento da América Latina e do Caribe (CAF) concordou em fornecer US\$ 320 milhões ao programa de desenvolvimento do setor de aviação de El Salvador, “El Salvador Vuela”⁹¹. Esse montante será destinado a três projetos voltados para aeroportos no país, incluindo o único aeroporto comercial, que também está em fase de expansão. Esses recursos apoiarão a modernização do setor, juntamente com melhorias para aumentar a resiliência a desastres naturais e esforços para melhorar a eficiência de custos e reduzir os tempos de transporte aéreo.

Como parte dos esforços internacionais de redução de emissões, El Salvador aderiu à fase voluntária do esquema CORSIA. El Salvador também é membro da Coalizão pelo Clima e Ar Limpo (CCAC), comprometendo-se a: reduzir gases de efeito estufa e poluentes climáticos de vida curta, implementar o Plano Nacional de Mudanças Climáticas (2022–2026) e a Política Nacional de Meio Ambiente (2022).

1.4.9 México

Tabela 11: Contribuição econômica da aviação no México

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
88,3 bilhões de dólares (4,9 %) ⁹²	1.800.000 ⁹²

⁸⁶ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-el-salvador/>

⁸⁷ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-el-salvador/>

⁸⁸ <https://www.aac.gob.sv/>

⁸⁹ <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2018/ASBU18/ANP06-EISalvador.pdf>

⁹⁰ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/State_Action_Plans/PLAN-DE-ACCION-DE-REDUCCION-DE-CO2-DEL-ESTADO-ECUATORIANO-2021-2024-signed.pdf

⁹¹ <https://www.caf.com/en/currently/news/caf-supports-the-leap-in-air-and-digital-connectivity-in-el-salvador-with-usd-465-million-in-loans/>

⁹² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-mexico/>

A maioria das partidas dos aeroportos mexicanos em 2023 foi para destinos domésticos (66%), com 57 aeroportos no país com voos comerciais regulares. Os 10 principais destinos internacionais a partir do México em 2023 foram todos para aeroportos na América do Norte, com apenas 10% dos passageiros em partida para aeroportos fora das Américas⁹². O setor de aviação no México é supervisionado pela AFAC (Agência Federal de Aviação Civil), que opera sob a Secretaria de Infraestrutura, Comunicações e Transportes (SICT)⁹³.

O México foi um dos primeiros países a apresentar seu Plano de Ação Nacional para a redução das emissões da aviação à ICAO em 2012 e o atualizou em 2018; embora o documento não seja público, o país está explorando oportunidades para expandir seu ecossistema de Combustíveis Sustentáveis para a Aviação (SAF), com base em uma longa tradição de iniciativas e pesquisas sobre o tema⁹⁴. Em junho de 2025, a Airbus assinou um acordo com a companhia aérea mexicana Volaris para apoiar o Fundo Ambiental Voluntário da ICAO, com o objetivo de financiar um estudo de viabilidade de SAF por meio do programa ACT-SAF da ICAO⁹⁵. Paralelamente, o México busca iniciar a produção doméstica de SAF até 2030. O México possui a estatal Airports and Auxiliary Services (ASA), principal fornecedora de querosene de aviação do país, que está trabalhando em estreita colaboração com a AFAC em grupos de trabalho técnicos sobre SAF. A ASA lançou um projeto-piloto que mistura SAF importado dos EUA com querosene de aviação convencional⁹⁶.

O Plano México (publicado em janeiro de 2025) inclui o SAF como prioridade nacional. A Lei de Biocombustíveis, promulgada em março de 2025, juntamente com seus futuros regulamentos de implementação (em fase de elaboração no momento da redação deste relatório), representa uma oportunidade fundamental para estabelecer critérios claros e inclusivos, alinhados com as normas internacionais para a produção e certificação de SAF. Grupos de trabalho interinstitucionais (AFAC, ASA, SEMARNAT, SENER, CONADESUCA, SADER, SICT) foram criados para harmonizar políticas, validar dados e definir critérios de sustentabilidade e certificação⁹⁴. O México também foi reeleito como membro do Conselho da OACI e reafirmou seu compromisso de continuar trabalhando em prol dos objetivos estratégicos da OACI⁹⁷.

O México vem participando voluntariamente no esquema CORSIA e buscando a redução de emissões aeroportuárias por meio da acreditação de carbono aeroportuário (ACA). Atualmente, 45 aeroportos no México estão inscritos no ACA e avançam na redução de suas emissões de carbono⁹⁸. O Grupo Aeroportuario del Sureste (ASUR) é um importante operador aeroportuário no México e possui um plano de ação climática alinhado à iniciativa Science-Based Targets (SBTi). Em consonância com isso, mais de 50% de seus aeroportos no México instalaram painéis solares, enquanto alguns instalaram baterias para melhorar o armazenamento de energia. Dois aeroportos também introduziram veículos elétricos para operações em solo^{99 100}.

1.4.10 Panamá

Tabela 12: Contribuição econômica da aviação no Panamá

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
6,8 bilhões de dólares (8,2 %) ¹⁰¹	194.000 ¹⁰¹

⁹³ <https://centreforaviation.com/data/profiles/government-bodies/federal-civil-aviation-agency-afac-mexico/>

⁹⁴ Comunicações pessoais durante reuniões de engajamento no México (ASA, CONADESUCA)

⁹⁵ <https://mexicobusiness.news/aerospace/news/airbus-volaris-sign-agreement-back-icao-saf-study-mexico>

⁹⁶ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2697517-mexico-s-asa-to-play-key-role-in-saf-expansion>

⁹⁷ <https://www.icao.int/news/all-incoming-icao-council-member-states-elected>

⁹⁸ <https://www.airportcarbonaccreditation.org/accredited-airports/>

⁹⁹ <https://www.airportcarbonaccreditation.org/nine-asur-airports-in-mexico-achieve-level-3-in-airport-carbon-accreditation/>

¹⁰⁰ <https://www.asur.com.mx/responsabilidad-social-O>

¹⁰¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-panama/>

90% das partidas do Panamá em 2023 foram para destinos internacionais, com a maioria voando para outro país da América Latina (57%)¹⁰². As partidas de passageiros do Panamá aumentaram 38,5% na última década, apoiadas por 26 companhias aéreas em operação, oito aeroportos comerciais e 23 novas rotas internacionais nos últimos cinco anos. O principal órgão regulador da aviação civil do Panamá, a Autoridade de Aviação Civil, supervisiona a implementação das principais regulamentações da aviação no país¹⁰³.

O Panamá delineou a “Missão Panamá”, uma estratégia governamental para a descarbonização da economia. Isso inclui metas para utilizar 70% de energia renovável até 2050, com foco na energia solar e eólica. Para apoiar isso, o governo introduziu um incentivo fiscal de 25% para empresas que investem em novos projetos de energia limpa, com base nos níveis de redução de carbono¹⁰⁴. O Panamá lançou uma Aliança Carbono Negativo com o Butão e o Suriname e está colaborando com a Costa Rica, a Colômbia e o Equador para promover a proteção da biodiversidade.

Nesse contexto, o Panamá publicou um Plano de Ação Estatal para a redução das emissões da aviação em 2018, delineando ações em uma variedade de medidas para a descarbonização do setor de aviação. O país busca melhorar a eficiência operacional por meio de atualizações na gestão do tráfego aéreo, melhorando a eficiência da frota e introduzindo fontes de energia renovável para serviços em terra¹⁰⁵. O principal aeroporto do país, o Aeroporto Internacional de Tocumen, está atualmente estudando uma expansão que envolveria uma terceira pista, com foco principal no aumento da distribuição de carga a partir do aeroporto¹⁰⁶. A expansão anterior do aeroporto foi incorporada ao plano de ação do país, incluindo medidas para melhorar a acessibilidade do aeroporto, reduzir o congestionamento na pista e melhorar o apoio em solo para reabastecimento. Nenhum plano específico de sustentabilidade para esta próxima expansão foi anunciado.

A Estratégia Nacional do Panamá para Hidrogênio Verde e Derivados estabeleceu metas tanto para derivados de hidrogênio renovável quanto para SAF, visando que 30% do abastecimento energético da aviação seja proveniente de hidrogênio, seus derivados ou SAF até 2050¹⁰⁷. A estratégia traça objetivos gerais fundamentais, como tornar-se um centro de energia sustentável por meio da facilitação do uso de H2V no transporte aéreo e marítimo, e da criação de um marco legal e regulatório para apoiar o investimento e o desenvolvimento de infraestrutura. Paralelamente ao aumento do hidrogênio, o Panamá planeja iniciar a produção de SAF em 2027 a partir da Biorefineria Ciudad Dorada¹⁰⁸. A usina tem uma capacidade planejada de 2,6 bilhões de galões por ano, o que a torna uma das maiores instalações de produção de SAF planejadas globalmente. Convertendo óleos cultivados para esse fim, gorduras e graxas residuais em SAF, o projeto está sendo liderado pela SGP BioEnergy, em parceria com a Topsoe e a Fluor.

1.4.11 Peru

Tabela 13: Contribuição econômica da aviação no Peru

PIB proveniente da aviação	Número de empregos gerados pela aviação
6,2 bilhões de dólares (2,3%) ¹⁰⁹	364.000 ¹⁰⁹

¹⁰² <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-panama/>

¹⁰³ <https://aeronautica.gob.pa/>

¹⁰⁴ <https://missionpanama.gob.pa/boldly-sustainable/>

¹⁰⁵ [https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/SAP-PTY-\(ES\)-compressed.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ActionPlan/SAP-PTY-(ES)-compressed.pdf)

¹⁰⁶ <https://en.tocumenpanama.aero/index.php/futuro>

¹⁰⁷ https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/29771_B/98196.pdf

¹⁰⁸ <https://www.safinvestor.com/project/142197/sgp-bioenergy-golden-city-biorefinery-panama/>

¹⁰⁹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-peru/>

A maioria das partidas no Peru em 2023 foi para destinos domésticos (78%), utilizando os 23 aeroportos do país com voos comerciais programados¹¹⁰. Dos 22% de partidas internacionais, a maioria dos passageiros viajou para outro país da América Latina (46%), seguido de perto pela América do Norte (35%). O setor de aviação civil do Peru é regulado pela Direção-Geral de Aviação Civil, subordinada ao Ministério dos Transportes e Comunicações. A Diretoria supervisionou o desenvolvimento do Plano Nacional de Aviação Civil, que está alinhado com a metodologia NASP da OACI. O plano envolve ações estratégicas para lidar com a duplicação do tráfego aéreo prevista na América do Sul nos próximos 15 anos¹¹¹. Nesse contexto, as partidas de passageiros do Peru cresceram 8,7% nos últimos dez anos¹¹⁰.

O Peru está nos estágios iniciais de sua estratégia de redução de emissões e seu Plano de Ação Estatal para a descarbonização da aviação não está disponível ao público. Apesar disso, o país está explorando opções para a redução das emissões da aviação. Por exemplo, a Airbus está trabalhando com a ICAO para realizar estudos de viabilidade de SAF no Peru como parte do programa ACT-SAF¹¹². Isso está explorando a disponibilidade de matéria-prima, as necessidades de infraestrutura e a viabilidade econômica do SAF no país. Enquanto isso, o Aeroporto Jorge Chávez concluiu uma nova instalação de armazenamento de combustível de aviação¹¹³. A instalação é totalmente automatizada e, com o tempo, introduzirá uma nova frota de veículos de reabastecimento, alguns dos quais totalmente elétricos.

¹¹⁰ <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-value-of-air-transport-to-peru/>

¹¹¹ <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Heightening-cooperation-to-support-aviation-recovery-and-development-in-Peru.aspx>

¹¹² <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ACT-SAF.aspx>

¹¹³ <https://exolum.com/en/noticia/exolum-begins-operations-at-limas-new-airport-following-completion-of-latin-americas-most-advanced-fuel-storage-facility/>

2 Atividades de voo na América Latina e no Caribe



O objetivo desta seção é detalhar a previsão de atividade para a região, incluindo a projeção da demanda futura por passageiros, carga, voos e ATMs (movimentos de transporte aéreo). Esta seção apresentará os métodos utilizados antes de analisar os resultados tanto em nível específico por país quanto internacional.

Principais resultados

Previsão de atividade:

- Prevê-se que a região da ALC tenha 815 milhões de passageiros em partida até 2050, representando uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 2,7% em relação a 2019, num cenário de linha de base em que não são implementadas medidas de redução de carbono.
- Brasil, México e Colômbia continuam sendo os três principais países em termos de volume de passageiros.
- Os volumes de carga dedicada crescerão a uma CAGR de 3,1% a partir de 2019, atingindo 3,3 Mt até 2050.
- O número de movimentos de aeronaves (ATM) chegará a 5,9 milhões, o que se traduz em uma CAGR de 1,8% entre 2019 e 2050.

2.1 Atividade da aviação na região da América Latina e do Caribe

Em 2024, os aeroportos da região da ALC atenderam 385 milhões¹¹⁴ de passageiros em partida, representando 8% do tráfego aéreo mundial de passageiros. Esse número é 9% superior ao de 2019, o que indica uma recuperação robusta da COVID. A região registrou um crescimento relativamente forte no tráfego de passageiros entre 2009 e 2019, com uma CAGR (taxa composta de crescimento anual) de 6,4%, impulsionado pelo aumento no nível de renda e pela entrada de companhias aéreas de baixo custo (LCCs), que estimularam ainda mais a demanda.

Em termos de movimentos de aeronaves, 2024 registrou 3,2 milhões¹¹⁴ de movimentos de partida da região da ALC, representando 8% do total mundial. No entanto, isso representa apenas 98% do nível de 2019, o que implica que o número de passageiros por movimento aumentou em comparação com o período pré-COVID. Ao contrário do tráfego de passageiros, os movimentos de transporte aéreo (ATMs) registraram apenas uma CAGR de 1,0% entre 2009 e 2019, o que sugere uma melhoria contínua no fator de ocupação e no aumento do porte das aeronaves.

Em relação à carga, estima-se que os aeroportos da região tenham processado cerca de 1,8 Mt de carga dedicada em 2024 com partida da região. Isso representa um aumento de 40% em relação ao nível de 2019.

2.2 Metodologia, fontes de dados e premissas

Esta seção descreve a abordagem da ICF, os fluxos de passageiros e carga considerados no escopo e as principais fontes de dados e premissas utilizadas para calcular as previsões de atividade.

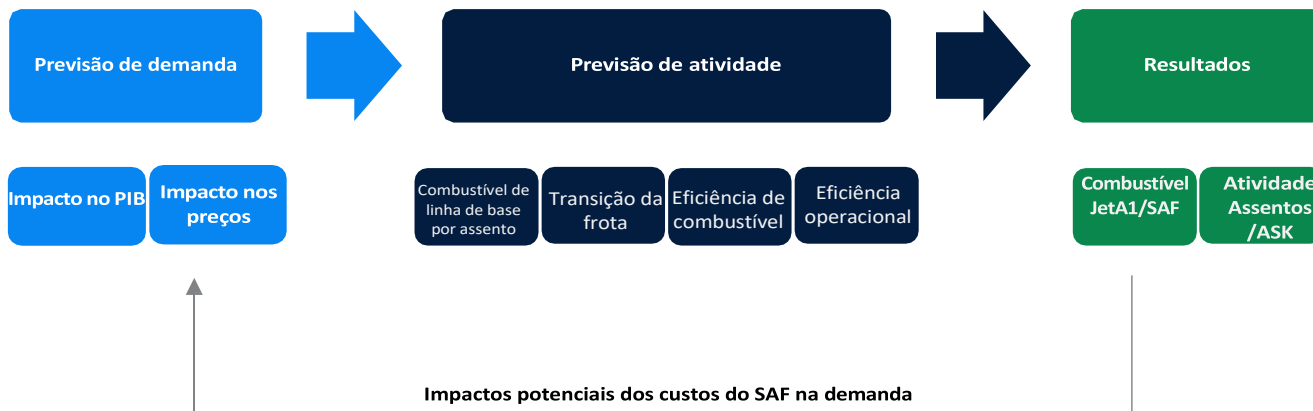
2.2.1 Metodologia

A atividade de voo e o consumo de combustível dependem dos volumes de passageiros e carga; portanto, as previsões de combustível e CO₂ baseiam-se nas previsões de demanda de passageiros e carga para a região. Essas previsões se tornaram em previsões de atividade de voo e de previsão de consumo de combustível.

A figura a seguir apresenta um resumo geral da abordagem de previsão. Primeiramente, foram elaboradas previsões para a demanda de passageiros e a demanda de cargueiros dedicados. Essas previsões de demanda foram então convertidas em previsões de atividade, considerando os tipos de frota, tamanhos das aeronaves, taxas de ocupação e distâncias setoriais. Essas métricas de atividade também foram convertidas em consumo de combustível com base nas taxas de consumo de combustível atuais e esperadas para cada segmento e mercado em análise. Os resultados sustentam o restante do estudo, ajudando a dimensionar a oportunidade de SAF, estimar a demanda e determinar o nível de compensação necessário em todos os países deste estudo.

¹¹⁴ Partindo apenas de países da ALTA; consulte a seção 2.2.2 para mais detalhes

Processo da metodologia de previsão de demanda, atividade e necessidades de combustível



Fonte: Análise da ICF

Para prever a demanda de passageiros, foi utilizada uma abordagem bottom-up para a previsão de curto prazo e uma abordagem top-down para a previsão de longo prazo. Ambas utilizaram os dados de 2019 como linha de base. O módulo bottom-up de curto prazo concentra-se no período 2025-2026, levando em consideração as tendências de recuperação do mercado, a capacidade futura de assentos declarada pelas companhias aéreas e o desempenho do fator de ocupação.

O modelo passa então para a abordagem macroeconômica top-down de longo prazo, cobrindo o período entre 2027 e 2050. Como a demanda de tráfego tem forte correlação com a atividade econômica, a ALTA contratou uma universidade sediada na Argentina (UdeSA - Universidade de San Andrés) para determinar esse fator (fator de elasticidade-renda da demanda). O estudo adotou um modelo econométrico de painel em nível de rota (especificação log-log) para estimar o fator de elasticidade-renda da demanda.

A análise começou com a coleta de dados históricos de transporte aéreo entre 2014 e 2024, fornecidos pela ALTA e complementados por dados de capacidade da Cirium, abrangendo todas as atividades de/para a região. A configuração abrangente do conjunto de dados inclui informações-chave, como número de passageiros, tarifas médias, RPKs, ASKs, capacidade de assentos, divisão por ponto de origem e tipo de aeronave, divididos por companhias aéreas, meses e pares de cidades. O estudo define os mercados no nível origem-destino-mês; portanto, o conjunto de dados está estruturado como um painel mensal no nível de rota (O-D-mês). Além disso, para garantir que o resultado reflita as condições de mercado típicas, os dados do ano de 2020 foram excluídos, uma vez que o transporte aéreo foi amplamente afetado pela COVID-19. No que diz respeito aos dados macroeconômicos, o PIB per capita e a população foram coletados da base de dados World Economic Outlook (WEO) do Fundo Monetário Internacional (FMI) para garantir a comparabilidade entre diferentes países. Além disso, os preços do querosene de aviação fornecidos pela S&P Global Energy por meio da ALTA são incorporados como fatores exógenos de transferência de custos, essenciais para abordar quaisquer preocupações com a endogeneidade das tarifas. O estudo utiliza os preços do querosene de aviação como parte da estratégia de variável instrumental, mas, mais especificamente, interage os preços do combustível com a distância da rota (com defasagens) e emprega um instrumento baseado em rede.

Para estimar a elasticidade, o preço e a renda de origem e destino foram considerados separadamente, e uma elasticidade de renda efetiva no nível da rota é calculada após a estimativa usando as participações de passageiros no ponto de origem (POO). Os pesos do POO não fazem parte da etapa de estimativa em si e são aplicados após a combinação de coeficientes. Fatores externos, como recessões, foram ajustados para rotas com características semelhantes, mas o relatório leva em conta principalmente os choques macroeconômicos por meio de efeitos fixos no tempo e controles adicionais (por exemplo, indicadores sazonais, variáveis relacionadas à COVID), em vez de ajustar diretamente os efeitos da recessão por tipo de rota. Por exemplo, a rota de São Paulo para Miami foi categorizada como um mercado internacional de negócios de longo curso e ajustada para choques comuns a esse tipo de mercado. O modelo também passou por verificações de robustez com a introdução de covariáveis exógenas

adicionais, como taxas de câmbio bilaterais, índices de inflação e medidas da estrutura competitiva (por exemplo, Índice de Herfindahl–Hirschman, número de companhias aéreas ativas e participação de voos diretos).

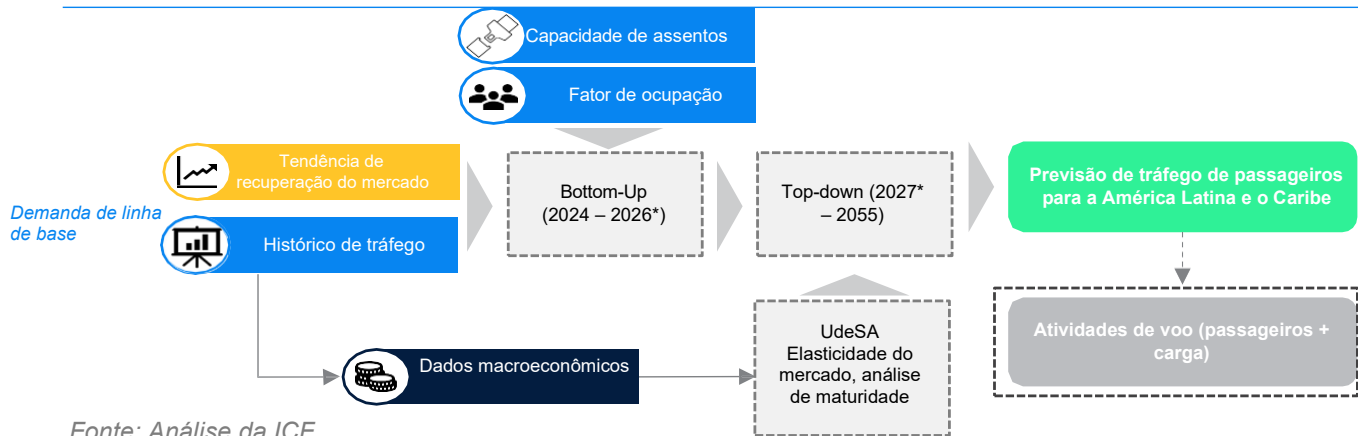
A IATA também fornece uma estimativa de alto nível da elasticidade da renda em um documento publicado em 2008¹¹⁵ que correlaciona o transporte aéreo per capita com a renda per capita de diversos países. A análise revelou uma relação forte e positiva entre os dois parâmetros.

Tabela 14: Elasticidade da renda por fonte e fluxo de tráfego

Segmentos de mercado	UdeSA Elasticidade da renda	Erros-padrão	IATA Elasticidade-renda
Voos de curta distância	0,623	0,106	1,3 a 1,8
Médio curso	0,909	0,104	1,4 a 1,8
Longo curso	0,939	0,168	1,5 a 2,0

Esse multiplicador de elasticidade de renda fornecido pela UdeSA foi então aplicado à previsão do PIB para obter uma previsão de passageiros de longo prazo para a região. A figura a seguir ilustra a metodologia de previsão de passageiros.

A previsão de demanda de passageiros combina abordagens bottom-up e top-down



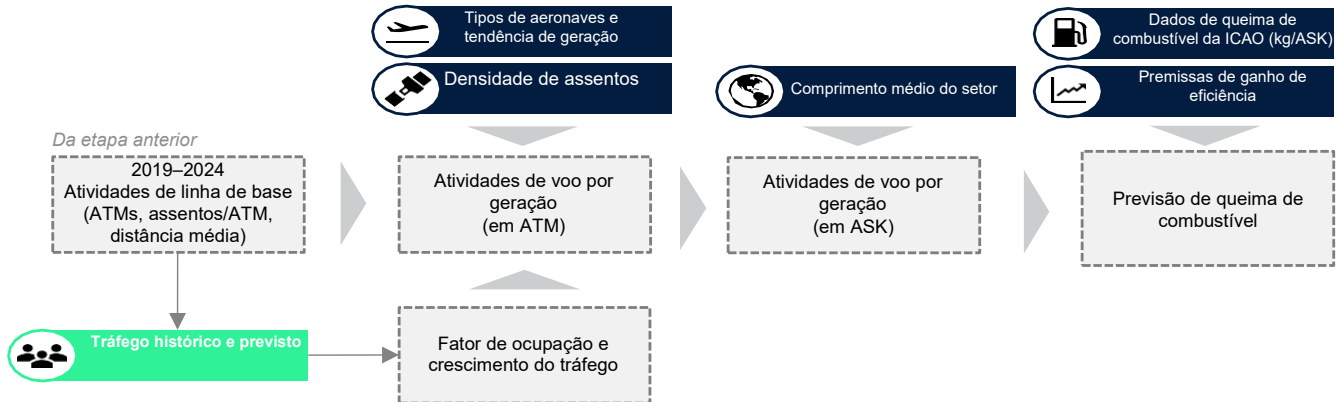
A previsão de tráfego de passageiros foi então transformada em uma previsão de atividade e de consumo de combustível, convertendo o número de passageiros em ASKs (assentos-quilômetros disponíveis) e, em seguida, incorporando um valor de consumo de combustível por ASK por tipo de aeronave, utilizando o banco de dados de queima de combustível da OACI.

Para converter o número de passageiros em ASK, assume-se um fator de ocupação no nível de par de países com base em tendências históricas, e presume-se um pequeno crescimento no fator de ocupação à medida que as companhias aéreas continuam a otimizar a capacidade para aumentar a rentabilidade. O número de assentos é então alocado a diferentes categorias de aeronaves. Isso levou em consideração tanto os tipos de aeronaves da geração atual quanto das aeronaves de geração futura, e a transição é alocada utilizando um conjunto de dados de frota de propriedade da ICF. O total de assentos por categoria de aeronave foi então combinado com um comprimento médio de setor no nível de par de países para obter o ASK por categoria de aeronave. Isso foi então combinado com os dados de queima de combustível por ASK da ICAO para fornecer uma estimativa de queima de combustível.

¹¹⁵ Demanda por transporte aéreo, IATA, abril de 2008

Melhorias de eficiência também foram consideradas, incluindo economia de combustível proveniente de trocas de aeronaves dentro da mesma geração, trocas entre gerações, bem como melhorias na eficiência operacional. Estas são descritas com mais detalhes nas seções a seguir. A figura abaixo descreve a metodologia de previsão de atividade e de queima de combustível.

Metodologia de previsão de atividade e de queima de combustível

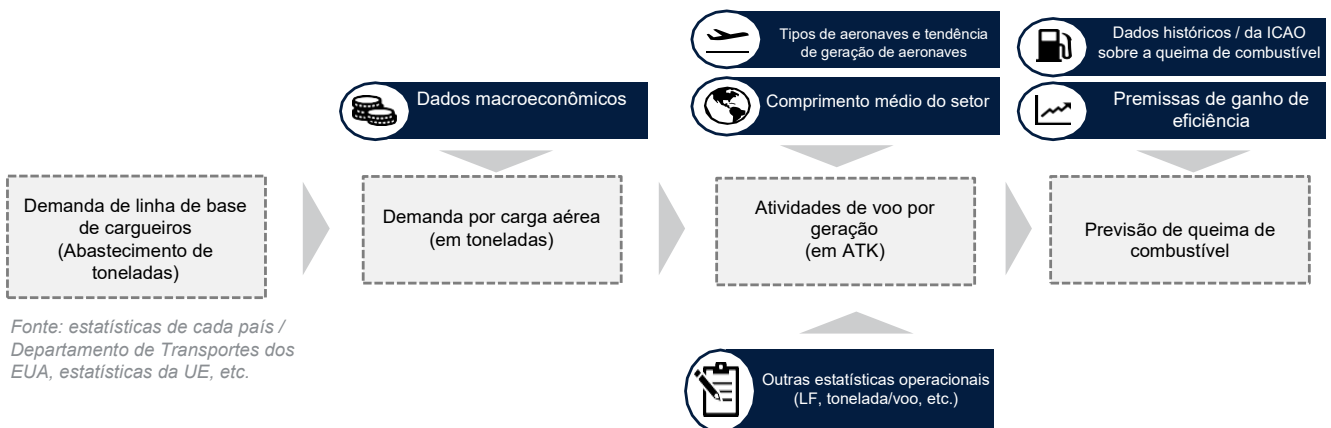


Fonte: Análise da ICF

A previsão para a carga (cargueiro dedicado) é elaborada separadamente, mas de forma semelhante à demanda de passageiros. Para esta previsão, foi imprescindível segmentar a atividade de carga entre a atividade de aeronaves com carga no porão (que é capturada na previsão de passageiros) e as aeronaves que operam exclusivamente no transporte de carga.

A demanda total por cargueiros (toneladas transportadas, excluindo a carga de porão) é determinada por insumos econométricos, que são então convertidos em atividades em termos de Toneladas-Quilômetros Disponíveis (ATKs) antes de serem multiplicados pelo consumo de combustível correspondente por ATK, por tipo de aeronave, conforme o banco de dados da OACI. O gráfico abaixo resume a abordagem da previsão de carga.

Metodologia de previsão da atividade de carga



Fonte: estatísticas de cada país / Departamento de Transportes dos EUA, estatísticas da UE, etc.

Fonte: Análise da ICF

2.2.2 Âmbito

A previsão abrange 49 países da região da ALC (países da ALTA). Toda a modelagem foi realizada com base em voos de ida e volta (ou seja, considerando ambas as direções). Em relação ao abastecimento de combustível, serão considerados apenas os voos de partida desses 49 países, e o abastecimento para voos de chegada de fora da região está excluído. Além disso, este estudo considera apenas atividades de passageiros e cargueiros (jatos executivos, aviação geral, voos militares e outros estão excluídos). Com base na experiência em outros mercados, essas categorias representam normalmente menos de 2% do abastecimento total de combustível, o que corresponde a uma pequena fração das emissões totais de carbono. No entanto, é importante mencionar o mercado de jatos executivos do Brasil, que é o segundo maior do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, e pode merecer atenção especial em avaliações futuras mais detalhadas. A tabela a seguir apresenta alguns exemplos para ilustrar o escopo regional deste estudo.

Tabela 15: Ilustração do escopo do estudo (exemplos de fluxos)

Exemplo de fluxo de tráfego	Tipo de mercado	Previsão de tráfego/atividade	Previsão de abastecimento de combustível
Brasil - Brasil	Doméstico	Incluído	Incluído
Brasil - México	Regional	Incluído	Incluído
México - Brasil	Regional	Incluído	Incluído
Brasil - EUA	Internacional	Incluído	Incluído
EUA – Brasil	Internacional	Excluído	Excluído

Em 2019, 352 milhões de passageiros partiram dos países da ALTA. Em 2024, esse número cresceu para mais de 385 milhões de passageiros, destacando o forte desempenho da região após a COVID. Esses números são calculados com base em pares de países e eliminam a contagem dupla dos dados regionais de nível superior da ACI. Por exemplo, um passageiro que viaja do Brasil para o México é incluído tanto nos aeroportos do Brasil (como passageiro de partida) quanto nos do México (como passageiro de chegada) nos dados da ACI. A tabela a seguir apresenta o resumo de passageiros e a queima de combustível para 2024.

Tabela 16: Linha de base de passageiros e combustível para 2024

Segmento	Incluído no escopo?	Passageiros (milhões), 2024	Abastecimento de combustível (milhões de toneladas), 2024
Doméstico	Incluído	251	7,9
Regional	Incluído	56	3,1
Internacional (partidas)	Incluído	78,5	8,6
Internacional (chegada)	Excluído	78,5	8,6
Total	Total	464	28,2
Total (no escopo)	Incluído	385,5	19,6

2.2.3 Fontes de dados

Para estabelecer a linha de base e as previsões futuras de atividades/emissões, foi utilizada uma variedade de conjuntos de dados. Estes foram selecionados para garantir robustez e comparados para assegurar precisão e consistência. Essas fontes de dados podem ser segmentadas em cinco categorias principais

1. A demanda **histórica** foi considerada para passageiros, movimentos de transporte aéreo (ATMs) e tonelagem de carga, que são métricas-chave da aviação. Essas fontes de dados serviram de base para o estudo, fornecendo uma linha de base robusta e uma visão geral dos padrões históricos de demanda na

ALC.

2. Dados **da frota atual** foram coletados para detalhar ainda mais os padrões subjacentes de demanda e oferta. Utilizou-se uma combinação de horários publicados e dados de vários órgãos da aviação.
3. Os dados **futuros de frota** e premissas se basearam nas últimas perspectivas de horários publicadas pelas companhias aéreas e na ferramenta interna de previsão de frota da ICF. Esta última captura as carteiras de pedidos e as taxas de produção dos fabricantes OEM de aeronaves (ou seja, Boeing, Airbus, etc.) até meados da década de 2030. As premissas de longo prazo relativas a 1) tipos de aeronaves de geração futura com base em pesquisas e nos planos atuais dos fabricantes, e 2) as taxas de transição para os tipos de frota futuros conforme as tendências históricas do setor e na capacidade de produção.
4. **O consumo de combustível** foi calculado por tipo de aeronave utilizando as tabelas de consumo de combustível mais recentes da OACI (v13.1). Os ganhos de eficiência futuros decorrentes de novos tipos de aeronaves e medidas operacionais foram apreciados com base em pesquisas e discussões com um importante fabricante de equipamentos originais (OEM) e com os membros da ALTA.
5. Foram utilizadas **premissas econométricas** para fornecer previsões do PIB e do PIB per capita em nível de país, que sustentam a previsão de demanda de longo prazo. O conjunto de dados AirportIS da IATA fornece um banco de dados global dos níveis de tarifas do setor, utilizado para influenciar as premissas de custo de voo.

A tabela a seguir apresenta um resumo das principais fontes de dados utilizadas.

Tabela 17: Resumo das fontes de dados

Tópico	Fontes
Atividade histórica	<ul style="list-style-type: none">▪ Airports Council International (ACI) Atividade de passageiros, movimentos de transporte aéreo (ATMs) e carga▪ IATA AirportIS: demanda de passageiros▪ OAG Schedules (Official Airline Guide)▪ Dados específicos por país fornecidos pelos membros da ALTA▪ Dados das autoridades de aviação (por exemplo, US FAA T-100, outras autoridades nacionais relevantes de aviação civil)
Frotas atuais	<ul style="list-style-type: none">▪ OAG Schedules▪ Dados da aviação (por exemplo, FAA T-100 dos EUA)
Frotas futuras	<ul style="list-style-type: none">▪ OAG Schedules (para curto prazo)▪ Ferramenta de Previsão de Frota da ICF (incorpora dados da Airbus/Boeing relativos a taxas de produção e premissas de liquidação)▪ Boeing CASCADE▪ Pesquisas do setor (várias)
Queima de combustível/carbono	<ul style="list-style-type: none">▪ Tabela de Consumo de Combustível da OACI (v13.1, agosto de 2024)▪ Boeing CASCADE▪ Pesquisas do setor (várias)
Dados econômicos	<ul style="list-style-type: none">▪ Fontes combinadas (por exemplo, FMI, Oxford Economics) — previsões históricas e futuras (1996-2050) de crescimento do PIB real▪ IATA AirportIS forneceu curvas tarifárias para o preço pago▪ Suposições da IATA/ICF para elasticidades de preço e renda e taxas de maturidade do mercado▪ Suposições da ICF para custos operacionais das companhias aéreas

2.3 Perspectiva econômica para a América Latina e o Caribe

Esta seção resume a previsão de crescimento econômico para a ALC. Conforme descrito na Seção 2.2.1, o crescimento econômico é um dos principais fatores para o aumento do transporte aéreo. A ICF analisou as projeções de crescimento econômico, particularmente as previsões do PIB, de várias fontes confiáveis e desenvolveu uma perspectiva consensual consolidada

Prevê-se que o PIB médio da região da ALC cresça a uma taxa composta anual de 2,2% entre 2019 e 2050, impulsionado por grandes economias como Brasil, México e Argentina. Esperam-se taxas de crescimento mais elevadas em economias menores, como República Dominicana e Panamá. Regiões vizinhas, como a América do Norte, que é uma das principais fontes de turismo receptivo para a ALC, esperam um crescimento do PIB de 1,9% para o mesmo período. A tabela a seguir resume a previsão do PIB para as principais economias e países em foco.

Tabela 18: Previsão do PIB¹¹⁶

Região / país	CAGR 2000-2019	CAGR 2019-2050	CAGR 2024-2050
Região da ALC	2,3%	2,2%	2,3%
América do Norte	2,1%	1,9%	1,9%
Mundo	2,9%	2,4%	2,4%
Argentina	1,7%	1,8%	2,3%
Bahamas	0,7%	1,2%	1,3%
Brasil	2,3%	2,0%	2,0%
Chile	3,7%	2,2%	2,3%
Colômbia	3,8%	2,8%	2,8%
República Dominicana	5,1%	3,9%	3,9%
Equador	3,9%	1,8%	1,9%
El Salvador	2,0%	2,2%	2,1%
México	1,6%	1,7%	1,9%
Panamá	6,0%	3,1%	3,1%
Peru	4,9%	2,7%	3,0%

2.4 Atividade regional total

Esta seção apresenta as previsões da atividade regional total para todos os 49 países da região da ALC. Em 2019, 352 milhões de passageiros voaram em voos dentro da região da ALC ou com partida da região, sendo que um terço voou em voos domésticos, enquanto os voos intrarregionais e inter-regionais representaram 14% e 19%, respectivamente. Brasil, México, Colômbia, Argentina e Chile foram os cinco principais mercados de aviação em termos de volume de passageiros, representando 75% do tráfego de passageiros em partida da região. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e superou os níveis de 2019 em 9% em 2024, atingindo 385 milhões de passageiros anuais. Em 2019, a região também registrou um total de 3,3 milhões de voos de partida e 1,3 milhão de toneladas em voos exclusivamente cargueiros.

A região se recuperou totalmente da COVID nos três segmentos de mercado (mercado doméstico, intrarregional e inter-regional) e deve retomar suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico e turístico de cada país membro. No entanto, prevê-se que a economia da região cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,3% entre 2025 e 2050. Isso resultará em uma economia da região 95% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,1% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação da região cresça, e que o total de passageiros em partida atinja 815 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 130% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,7%, apoiado por uma economia em crescimento e uma população maior (+0,5% de CAGR

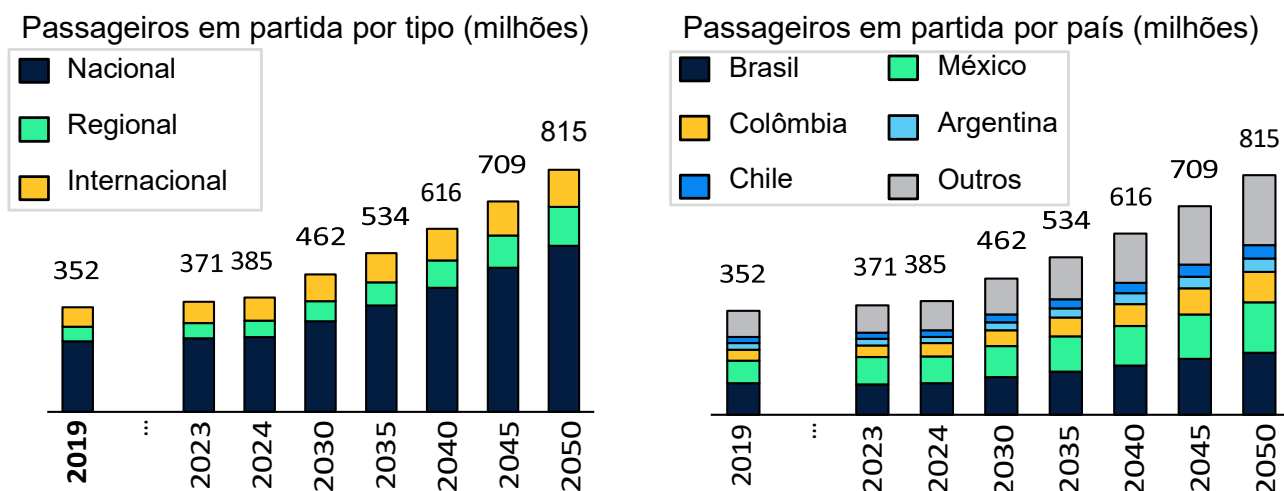
¹¹⁶ FMI, Oxford Economics, análise da ICF

entre 2019 e 2050). A viagem per capita, um indicador que mede quantas viagens são geradas por habitante, aumentará de 0,53 em 2019 para 1,07 em 2050.

Prevê-se que o tráfego doméstico cresça de 238 milhões de passageiros em partida em 2019 para 559 milhões em 2050, o que equivale a uma CAGR de 2,8%; o tráfego intrarregional deve aumentar de 50 milhões de passageiros em partida para 131 milhões, o que se traduz em uma CAGR de 3,2%, enquanto o tráfego internacional crescerá de 65 milhões de passageiros em partida em 2019 para 125 milhões em 2050, o que equivale a uma CAGR de 2,1%.

Prevê-se que Brasil, México, Colômbia, Argentina e Chile continuem sendo os cinco principais mercados de aviação da região até 2050. O gráfico e a tabela a seguir resumem os resultados da previsão de passageiros para a região.

Previsão da demanda de passageiros na ALC por tipo (esquerda) e mercado (direita)



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

Tabela 19: Resumo da previsão do tráfego de passageiros na ALC para 2050

País em foco	2019 passageiros (milhões)	2035 passageiros (milhões)	2050 passageiros (mil)	2019 passageiro participação	2050 passageiros participação	2019-2050 CAGR
Brasil	106,4	146,8	210,3	30%	26%	2,2%
México	77,3	118,9	170,9	22%	21%	2,6%
Colômbia	37,2	63,6	104,5	11%	13%	3,4%
Argentina	22,8	32,2	44,8	6%	5%	2,2%
Chile	20,2	30,9	46,3	6%	6%	2,7%
Peru	19,6	30,8	52,5	6%	6%	3,2%
Panamá	8,4	15,1	30,2	2%	4%	4,2%
República Dominicana	7,2	16,2	33,3	2%	4%	5,1%
Equador	5,0	7,8	10,5	1%	1%	2,4%
Bahamas	3,2	4,4	5,9	1%	1%	2,0%
El Salvador	2,6	4,5	7,1	1%	1%	3,3%
Outros	42,3	63,0	98,3	12%	12%	2,8%
Total ALTA	352,3	534,4	814,6	100%	100%	2,7%

Tabela 20: Ilustração da propensão a voar (exemplo de fluxos do Brasil)

Exemplo de fluxo de tráfego	Mercado	2019 Passageiros (par+cheg, m)	Com origem no Brasil*	2019 População (milhões)	2019 viagens/habitante
Brasil - Brasil	Nacional	94,9	94,9	207	0,46
Brasil - EUA	Internacional	4,6	3,3	207	0,02
Brasil - Argentina	Regional	3,8	1,6	207	0,01
...
Total do Brasil		118	108	207	0,52

*O primeiro trecho parte do Brasil (um passageiro residente nos EUA que faz um voo de ida e volta do Brasil para os EUA não é contabilizado)

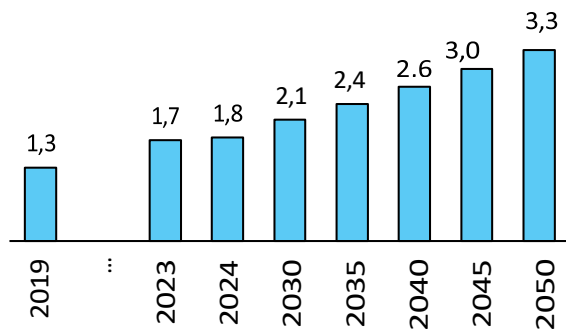
Tabela 21: Propensão a voar na ALC em 2019 (histórico) e 2050 (previsão)

País em foco	2019 Viagens domésticas/capita	2019 Viagens internacionais/capita	2019 Total de viagens/habitante	2050 Viagens domésticas/habitante	2050 Viagens internacionais por habitante	2050 Total de viagens/habitante
Brasil	0,46	0,06	0,52	0,89	0,09	0,98
México	0,43	0,11	0,54	0,81	0,22	1,03
Colômbia	0,60	0,15	0,75	1,51	0,26	1,77
Argentina	0,36	0,16	0,51	0,73	0,21	0,93
Chile	0,77	0,30	1,07	1,81	0,44	2,25
Peru	0,43	0,17	0,59	1,08	0,20	1,28
Panamá	0,10	1,88	1,97	0,22	5,19	5,41
República Dominicana	0,01	0,46	0,46	0,02	2,12	2,14
Equador	0,16	0,13	0,29	0,34	0,15	0,49
Bahamas	2,97	3,01	5,97	4,09	6,11	10,21
El Salvador	n/a	0,36	0,36	n/a	0,94	0,94
Outros	0,08	0,23	0,32	0,19	0,41	0,61
Média ALTA	0,37	0,16	0,53	0,76	0,31	1,07

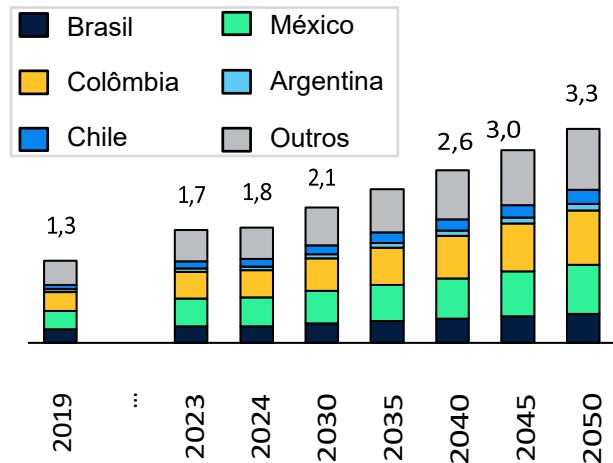
Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 5,9 milhões de voos de partida e 3,3 Mt de carga dedicada, representando uma CAGR de 1,9% e 3,1%, respectivamente. Os cinco principais mercados de aviação serão responsáveis por 64% dos voos de carga com partida na região. A previsão de taxa de crescimento mais baixa para a carga em relação à demanda de passageiros destaca a tendência contínua de aumento do tamanho das aeronaves observada no setor. Os gráficos a seguir resumem os resultados das previsões de carga e voos de carga para os países em foco, bem como para toda a região.

Previsão de demanda por carga aérea na ALC por total (esquerda) e por mercado (direita)

Carga de frete em partida, exceto carga de porão (em milhões de toneladas)



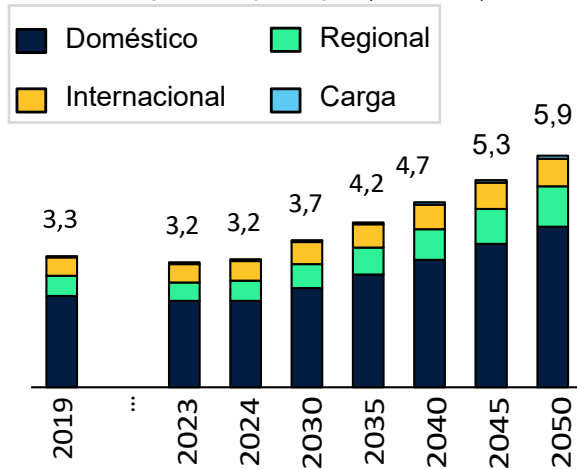
Carga de frete em partida, exceto carga de porão, por país (em milhões de toneladas)



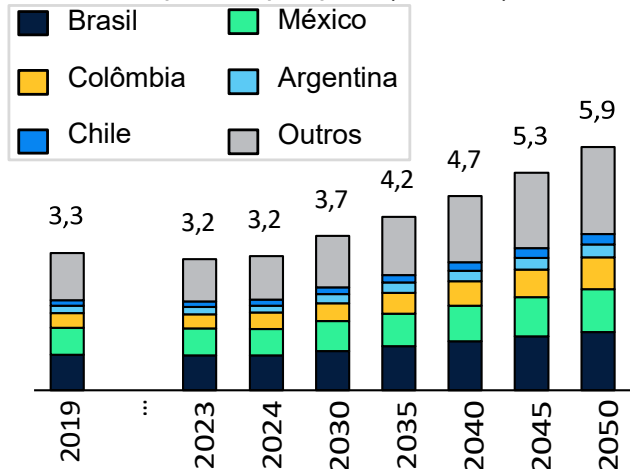
Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

ATMs em partida por tipo (esquerda) e mercado (direita)

ATMs em partida por tipo (milhões)



ATMs em partida por país (milhões)



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF
ATM = Movimentos de transporte aéreo

Tabela 22: Resumo da previsão de carga e atividade da ALTA

País em foco	Carga em 2019 ('000 toneladas)	Carga em 2050 ('000 toneladas)	2019-2050 carga CAGR	2019 ATM (mil)	2050 ATM (mil)	2019-2050 CAGR do ATM
Brasil	209	446	2,5%	868	1.411	1,6%
México	281	755	3,2%	651	1.041	1,5%
Colômbia	294	836	3,4%	348	769	2,6%
Argentina	40	93	2,8%	185	307	1,7%
Chile	68	217	3,8%	136	247	2,0%
Peru	52	122	2,8%	159	314	2,2%
Panamá	41	126	3,7%	78	210	3,3%
República Dominicana	40	111	3,4%	50	200	4,5%
Equador	89	254	3,5%	53	76	1,2%
Bahamas	0,4	1,8	5,1%	70	64	-0,3%*
El Salvador	8	20	2,9%	23	45	2,2%
Outros	142	303	2,5%	704	1.189	1,7%
Total ALTA	1.264	3.283	3,1%	3.323	5.874	1,9%

*Crescimento negativo nas Bahamas devido à redução no número de ATMs registrados em 2024 em comparação com 2019 (-15%)

2.5 Previsões em nível de país

Esta subseção oferece uma análise aprofundada das previsões de atividade e combustível para cada um dos países em foco avaliados na ALC, que inclui Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, República Dominicana, Equador, El Salvador, México, Panamá, Peru e Bahamas.

2.5.1 Argentina

Em 2019, a Argentina registrou 184 mil voos de partida e 40 mil toneladas de carga dedicada. 23 milhões de passageiros voaram em voos dentro da Argentina ou com partida do país, classificando-o como o 4º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 16 milhões de passageiros, o equivalente a 70% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 4,8 milhões e 2,1 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou para 97% dos níveis de 2019 em 2024.

Prevê-se que o mercado de aviação da Argentina conclua sua recuperação da COVID e retome as tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e pelo aumento do turismo receptivo. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia da Argentina cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,3%. Isso resultará em uma economia 74% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 1,8% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação da Argentina amadureça gradualmente e que a demanda total de passageiros cresça para 45 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 96% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,2%.

Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 307 mil voos de partida e 93 mil toneladas de carga dedicada, representando um CAGR de 1,7% e 2,7%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para a Argentina.

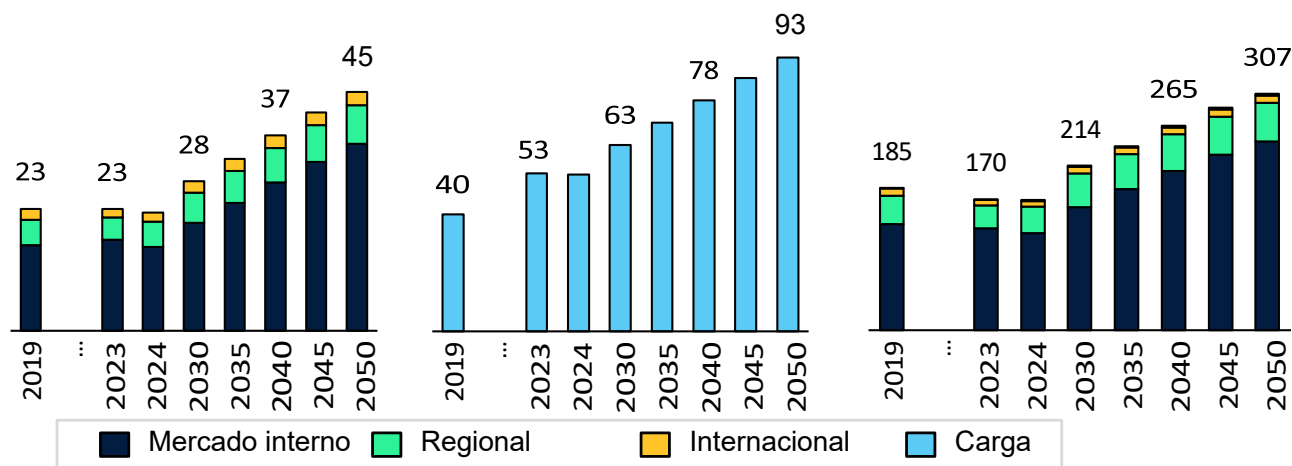
¹¹⁷ Considerando o volume de passageiros em partida

Previsão de demanda e atividade na Argentina

Passageiros em partida
(milhões)

Carga de frete em partida, exceto
carga de porão (milhares de
toneladas)

ATMs em partida (em milhares)



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.2 Bahamas

Em 2019, as Bahamas registraram 70 mil voos de partida e 0,4 mil toneladas de carga dedicada. 3,2 milhões de passageiros voaram em voos dentro das Bahamas ou com partida do país, classificando-o como o 14º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 1,2 milhão de passageiros, o equivalente a 37% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 119 mil e 1,9 milhão de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 11% em 2024.

O mercado de aviação das Bahamas se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país, o que leva a uma maior demanda entre as ilhas e ao crescimento contínuo do turismo receptivo proveniente da América do Norte e da Europa. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia das Bahamas cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 1,3%. Isso resultará em uma economia 44% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 1,2% para o período de 2019 a 2050.

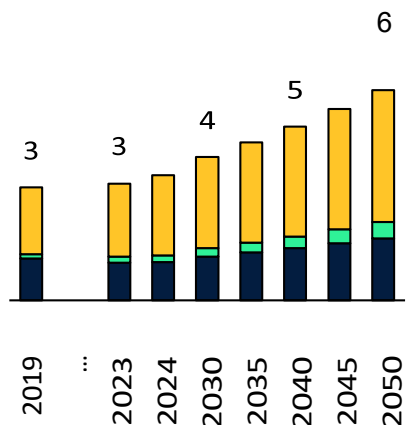
No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação das Bahamas atinja uma demanda de passageiros de 5,9 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 86% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,0%.

Prevê-se que os movimentos de aeronaves (ATMs) atinjam 64 mil voos de partida, representando um declínio de -0,3% na CAGR em comparação com o nível de 2019. Isso é impulsionado por uma combinação de menor nível de atividade em 2025 (apenas 55 mil voos de partida relatados pela OAG), juntamente com um crescimento lento da demanda e a tendência contínua de aumento do porte das aeronaves observada em todo o setor.

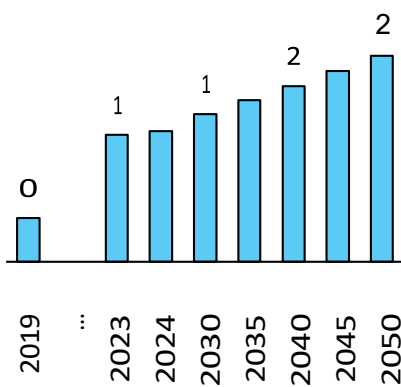
Prevê-se que o transporte de carga aumente para 2 mil toneladas de carga dedicada, representando uma CAGR de 5,1%. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para as Bahamas.

Previsão de demanda e atividade nas Bahamas

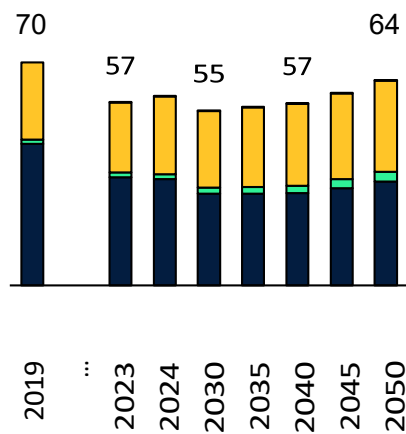
Passageiros em partida (milhões)



Carga de frete em partida, exceto carga de porão (milhares de toneladas)



ATMs em partida (em milhares)



Nacional
 Regional
 Internacional
 Carga

Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.3 Brasil

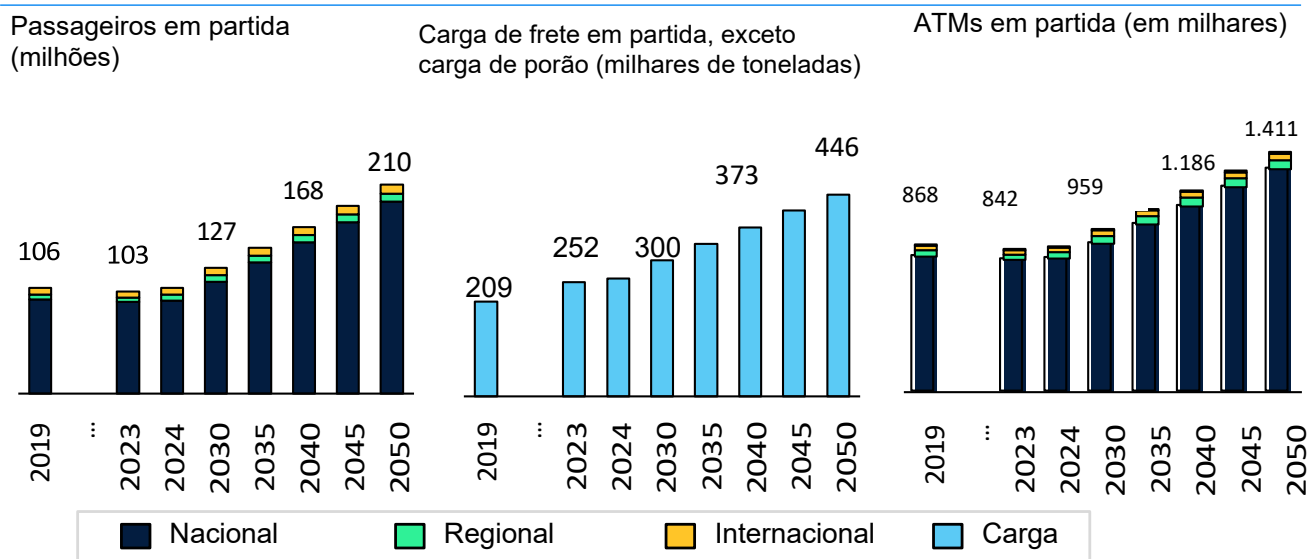
Em 2019, o Brasil registrou 868 mil voos de partida e 209 mil toneladas de carga dedicada. 106 milhões de passageiros voaram em voos dentro do país ou com partida do Brasil, classificando o país como o maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 95 milhões de passageiros, o equivalente a 89% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 4,9 milhões e 6,6 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou para 100% dos níveis de 2019 em 2024.

O mercado de aviação do Brasil retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e por laços mais estreitos com outros países da região. Como a maior economia da região, prevê-se que a economia do Brasil cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,0% entre 2025 e 2050. Isso resultará em uma economia 87% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,0% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do Brasil amadureça ainda mais e que a demanda de passageiros cresça para 210 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 98% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,2%.

Prevê-se que o número de voos de passageiros e de carga aumente para 1,4 milhão de voos de partida e 446 mil toneladas de carga dedicada, representando uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) de 1,6% e 2,5%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o Brasil.

Previsão de demanda e atividade no Brasil



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.4 Chile

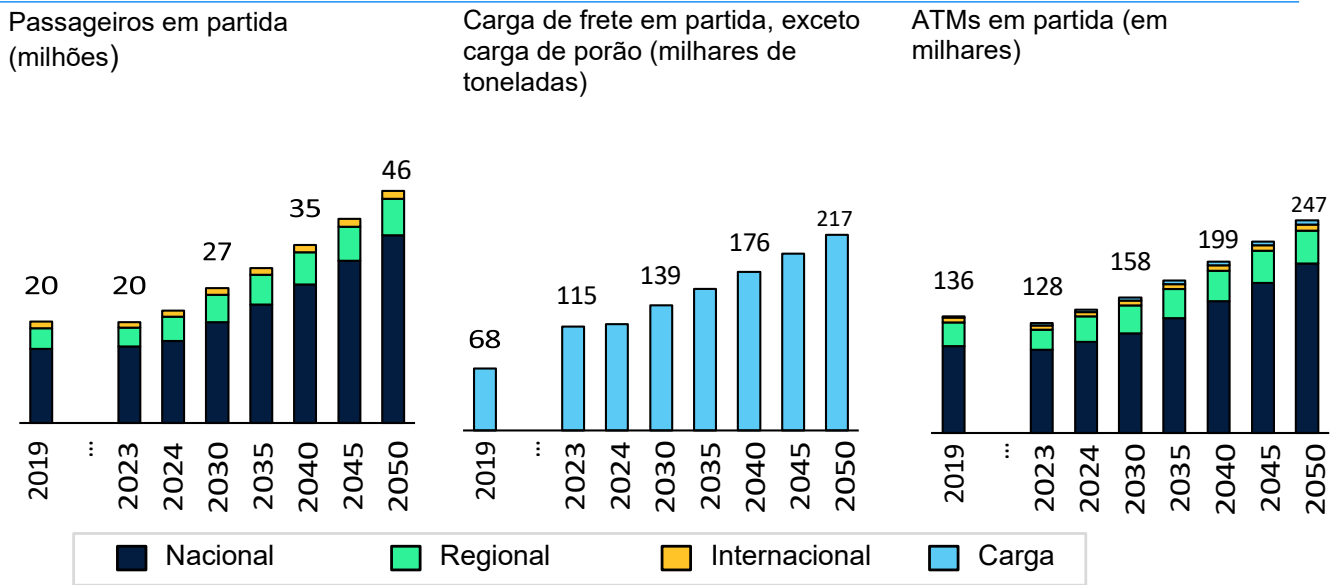
Em 2019, o Chile registrou 136 mil voos de partida e 68 mil toneladas de carga dedicada. 20 milhões de passageiros voaram em voos dentro do país ou com partida do Chile, o que colocou o país na 5ª posição entre os maiores mercados de aviação da região da ALC em termos de volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 15 milhões de passageiros, o equivalente a 73% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 4,1 milhões e 1,3 milhão de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou para 111% dos níveis de 2019 em 2024.

O mercado de aviação do Chile se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e em toda a região. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia do Chile cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,3%. Isso resultará em uma economia 96% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,2% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do Chile cresça e amadureça, e que a demanda total de passageiros alcance 46 milhões até 2050. Isso representará um mercado de aviação 129% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,7%.

Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 247 mil voos de partida e 217 mil toneladas de carga dedicada, representando um CAGR de 2,0% e 3,8%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o Chile.

Previsão de demanda e atividade no Chile



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.5 Colômbia

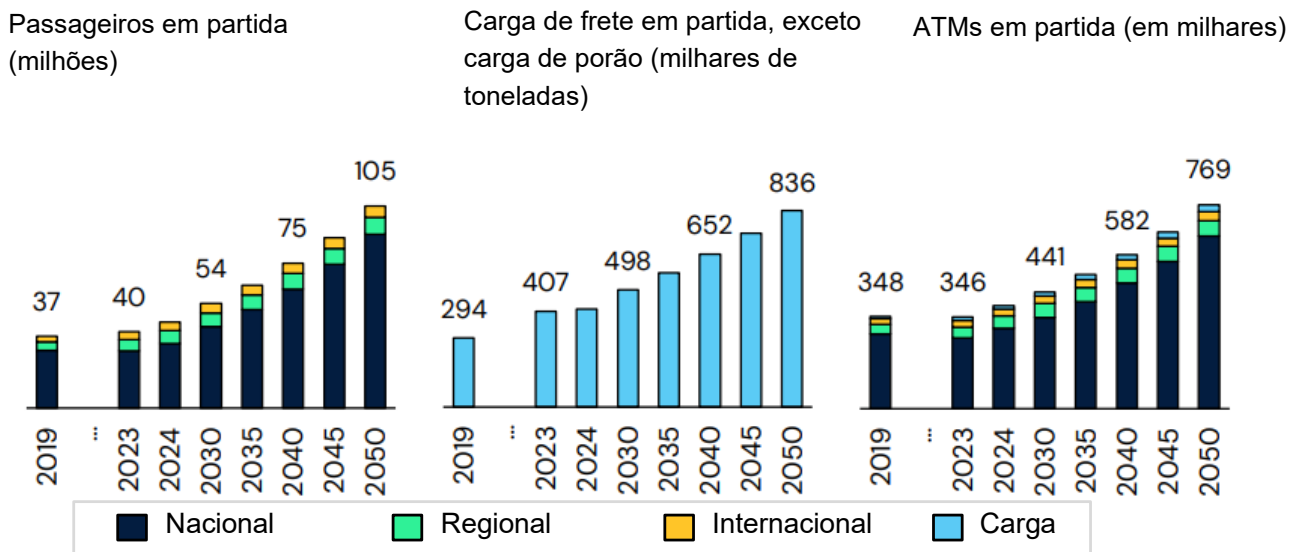
Em 2019, a Colômbia registrou 348 mil voos de partida e 294 mil toneladas de carga dedicada. 37 milhões de passageiros voaram em voos dentro da Colômbia ou com partida do país, classificando-o como o terceiro maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 30 milhões de passageiros, o equivalente a 80% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 4,3 milhões e 3,0 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 20% em 2024.

O mercado de aviação da Colômbia se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e em toda a região. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia da Colômbia cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,8%. Isso resultará em uma economia 132% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,7% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação da Colômbia cresça e amadureça gradualmente. A demanda total de passageiros crescerá para 105 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 181% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 3,4%.

Prevê-se que os movimentos de transporte aéreo (ATMs) e de carga aumentem para 769 mil voos de partida e 836 mil toneladas de carga dedicada, representando um CAGR de 2,6% e 3,4%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para a Colômbia.

Previsão de demanda e atividade na Colômbia



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.6 República Dominicana

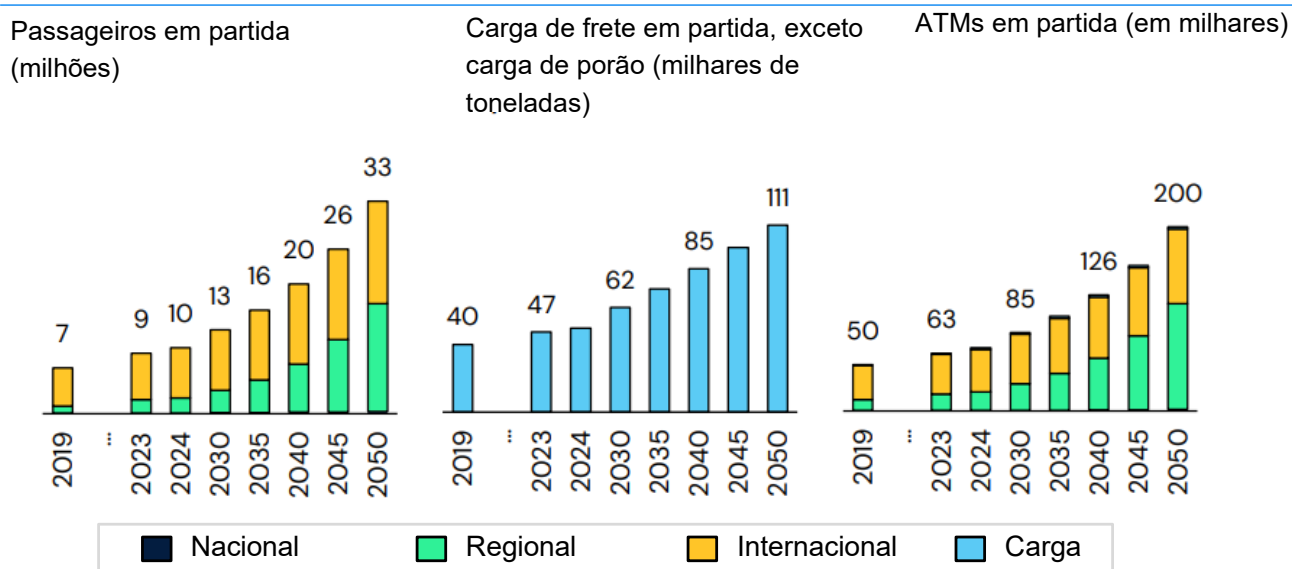
Em 2019, a República Dominicana registrou 50 mil voos de partida e 40 mil toneladas de carga dedicada. 7 milhões de passageiros voaram em voos dentro da República Dominicana ou com partida do país, classificando-o como o 8º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico é insignificante, representando apenas 58 mil passageiros (equivalente a 1% da demanda), enquanto os passageiros intrarregionais e internacionais representam 1,1 milhão e 6,0 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 43% em 2024.

O mercado de aviação da República Dominicana se recuperou fortemente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiado pela crescente demanda de lazer, especialmente dos EUA e do Canadá. No período de 2025 a 2050, a economia da República Dominicana deve crescer a uma taxa composta anual (CAGR) de 3,9%. Isso resultará em uma economia 223% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 3,7% para o período de 2019 a 2050. Prevê-se também que os principais mercados emissores de regiões como os EUA apresentem um crescimento do PIB de 1,9% para o mesmo período.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação da República Dominicana continue a crescer, e a ICF prevê que a demanda de passageiros cresça para 33 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 364% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 5,1%.

Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 200 mil voos de partida e 111 mil toneladas de carga dedicada, representando uma CAGR de 4,5% e 3,4%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para a República Dominicana.

Previsão de demanda e atividade na República Dominicana



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.7 Equador

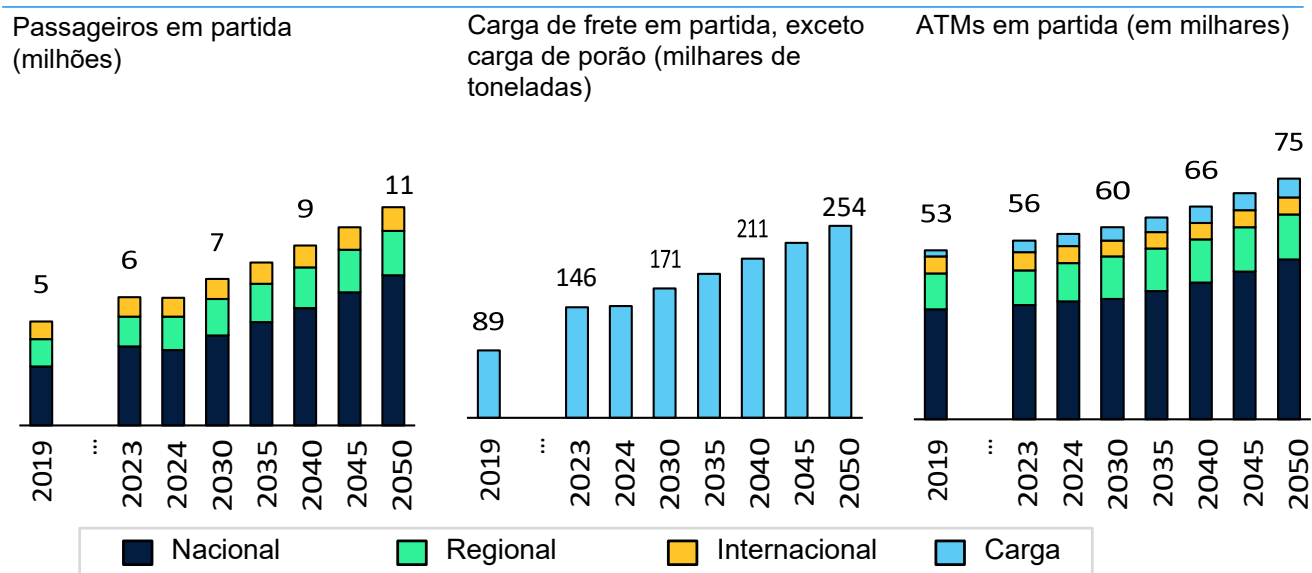
Em 2019, o Equador registrou 53 mil voos de partida e 89 mil toneladas de carga dedicada. 5 milhões de passageiros voaram em voos dentro do país ou com partida do Equador, classificando o país como o 10º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 2,8 milhões de passageiros, o equivalente a 56% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 1,3 milhão e 868 mil passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 22% em 2024.

O mercado de aviação do Equador se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e em toda a região. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia do Equador cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 1,9%. Isso resultará em uma economia 75% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 1,8% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do Equador cresça e que a demanda de passageiros atinja 11 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 110% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,4%.

Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 76 mil voos de partida e 254 mil toneladas de carga dedicada, representando uma CAGR de 1,2% e 3,5%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o Equador.

Previsão de demanda e atividade no Equador



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2,5,8 El Salvador

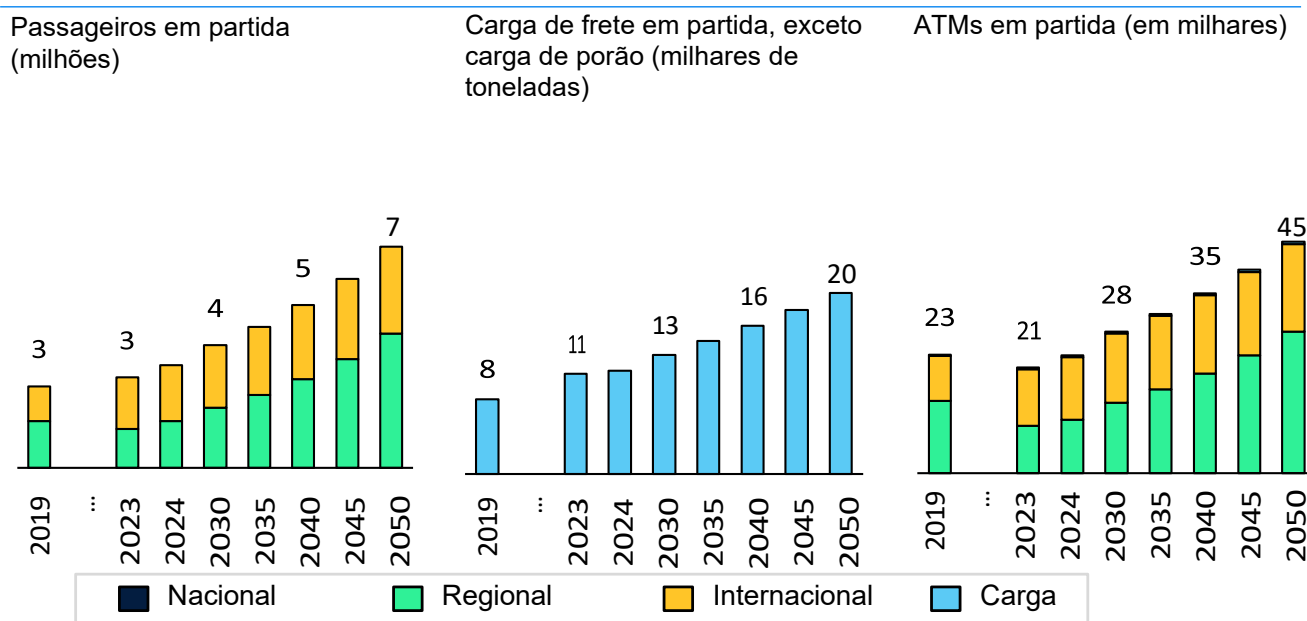
Em 2019, El Salvador registrou 23 mil voos de partida e 8 mil toneladas de carga dedicada. 2,6 milhões de passageiros voaram em voos com partida de El Salvador, classificando o país como o 16º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. Atualmente, não há mercado doméstico, enquanto os passageiros intrarregionais e internacionais representaram 1,5 milhão e 1,1 milhão de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 26% em 2024.

O mercado de aviação de El Salvador se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e em toda a região. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia de El Salvador cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 2,1%. Isso resultará em uma economia 95% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,2% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação de El Salvador cresça e que a demanda de passageiros atinja 7,1 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 171% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 3,3%.

Prevê-se que o número de voos de passageiros e de carga aumente para 45 mil voos de partida e 20 mil toneladas de carga dedicada, representando uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) de 2,2% e 2,9%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para El Salvador.

Previsão de demanda e atividade em El Salvador



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.9 México

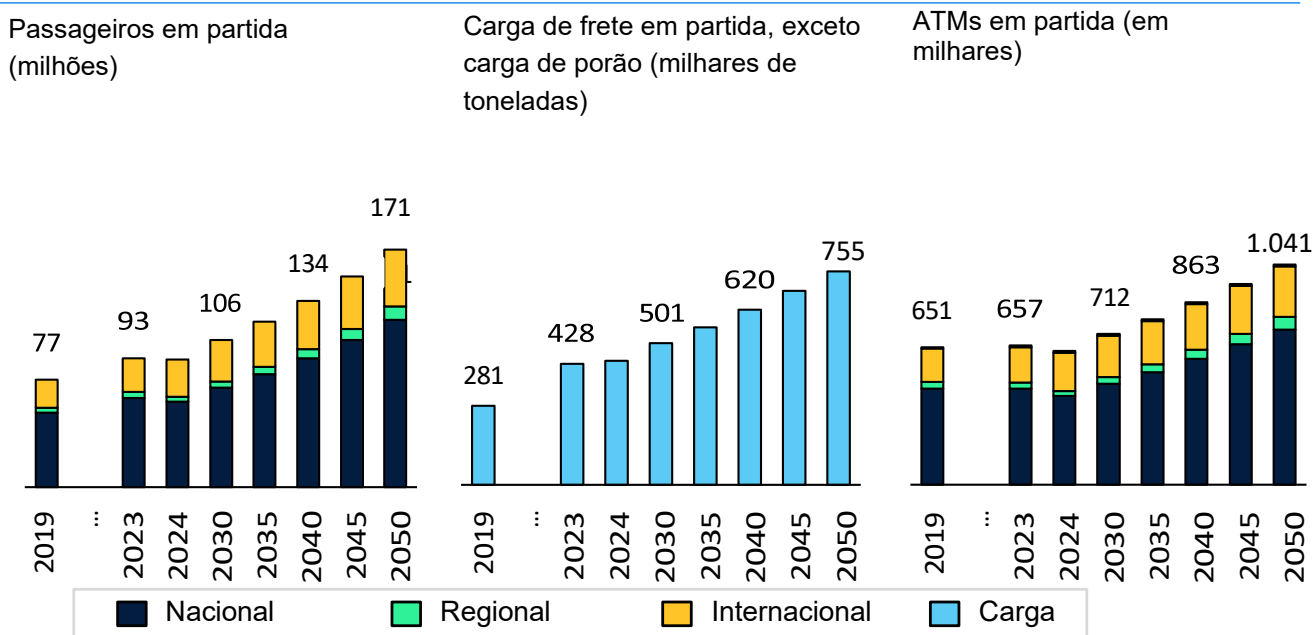
Em 2019, o México registrou 651 mil voos de partida e 281 mil toneladas de carga dedicada. 77 milhões de passageiros voaram em voos dentro do país ou com partida do México, classificando o país como o segundo maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 54 milhões de passageiros, o equivalente a 70% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 3,7 milhões e 20 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 19% em 2024.

O mercado de aviação do México se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e pelo turismo receptivo proveniente da América do Norte e da Europa. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia do México cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 1,9%. Isso resultará em uma economia 68% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 1,7% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do México cresça e amadureça ainda mais, e a ICF prevê que a demanda total de passageiros alcance 171 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 121% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 2,6%.

Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 1,0 milhão de voos de partida e 755 mil toneladas de carga dedicada, representando um CAGR de 1,5% e 3,2%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o México.

Previsão de demanda e atividade no México



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.10 Panamá

Em 2019, o Panamá registrou 78 mil voos de partida e 41 mil toneladas de carga dedicada. 8,4 milhões de passageiros voaram em voos com partida do Panamá, classificando o país como o 7º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico representou apenas 405 mil passageiros, o equivalente a 5% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 5,7 milhões e 2,4 milhões de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 19% em 2024.

O mercado de aviação do Panamá se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo do país e pela estratégia de hub da companhia aérea local. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia do Panamá cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 3,1%. Isso resultará em uma economia 156% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 3,1% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do Panamá cresça e que a demanda total de passageiros alcance 30 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 259% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 4,2%.

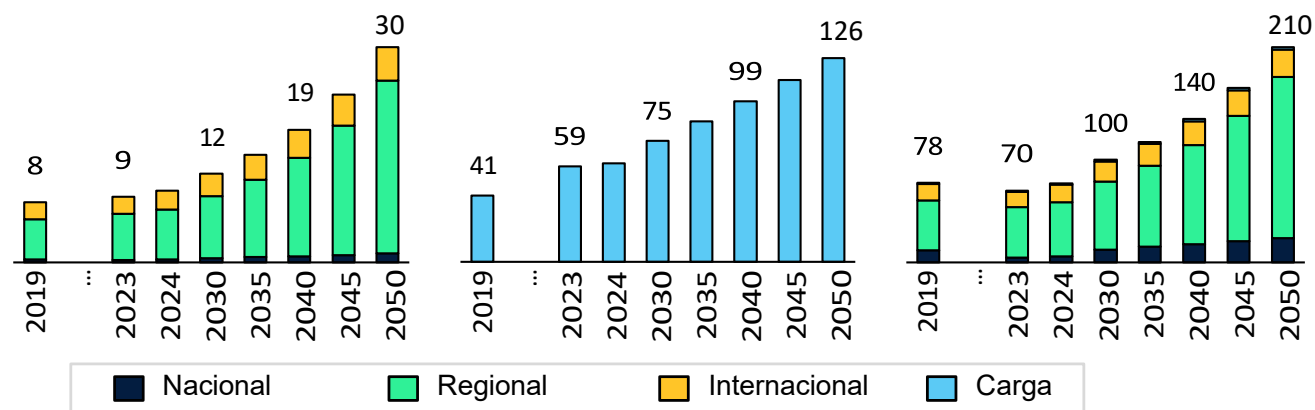
Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 210 mil voos de partida e 126 mil toneladas de carga dedicada, representando uma CAGR de 3,3% e 3,7%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o Panamá.

Previsão de demanda e atividade no Panamá

Passageiros em partida
(milhões)

Carga de frete em partida, exceto
carga de porão (milhares de
toneladas)

ATMs em partida (em milhares)



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

2.5.11 Peru

Em 2019, o Peru registrou 159 mil voos de partida e 52 mil toneladas de carga dedicada. 20 milhões de passageiros voaram em voos dentro do Peru ou com partida do país, classificando o país como o 6º maior mercado de aviação da região da ALC em volume de passageiros¹¹⁷. O mercado doméstico foi responsável por 14 milhões de passageiros, o equivalente a 70% da demanda, com os passageiros intrarregionais e internacionais representando 4,3 milhões e 1,5 milhão de passageiros, respectivamente. Após a COVID, o total de passageiros se recuperou e ultrapassou os níveis de 2019 em 5% em 2024.

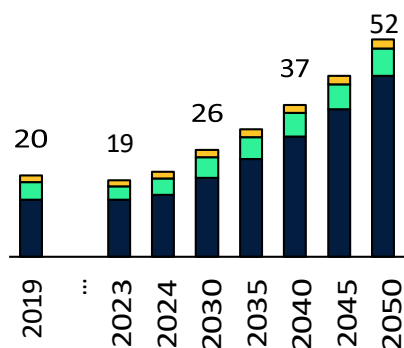
O mercado de aviação do Peru se recuperou totalmente e retomou suas tendências de crescimento de longo prazo, apoiadas pelo crescimento econômico contínuo no país e pela crescente demanda turística. No período de 2025 a 2050, prevê-se que a economia do Peru cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 3,0%. Isso resultará em uma economia 130% maior do que a linha de base de 2019, o que equivale a uma CAGR de 2,7% para o período de 2019 a 2050.

No longo prazo, prevê-se que o mercado de aviação do Peru cresça e amadureça, e a ICF prevê que a demanda total de passageiros alcance 52 milhões em 2050. Isso representará um mercado de aviação 167% maior do que a linha de base de 2019 e uma CAGR de 3,2%.

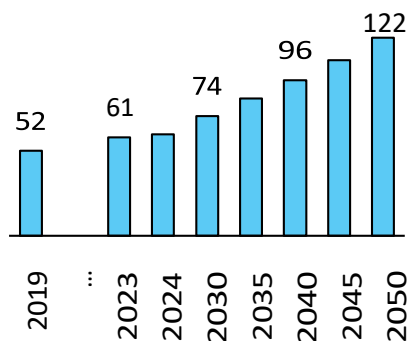
Prevê-se que os voos de passageiros e de carga aumentem para 314 mil voos de partida e 122 mil toneladas de carga dedicada, representando um CAGR de 2,2% e 2,8%, respectivamente. O gráfico a seguir resume os resultados da previsão para o Peru.

Previsão de demanda e atividade no Peru

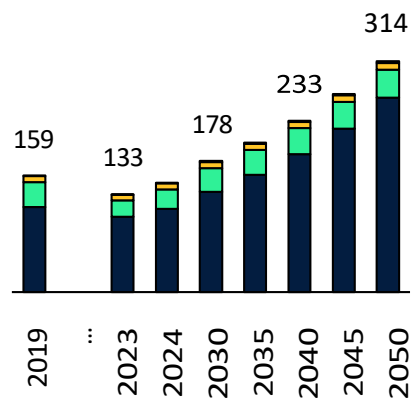
Passageiros em partida
(milhões)



Carga de frete em partida, exceto
carga de porão (milhares de
toneladas)



ATMs em partida (em
milhares)



Fonte: PAXIS, OAG, estatísticas nacionais, análise da ICF

3 O papel da renovação da frota



3.1 Modernização e substituição da frota

Esta seção discute as características da frota de aeronaves que opera na região da América Latina e do Caribe. Ela prevê como a frota mudará com o tempo para atingir as metas de crescimento, econômicas e ambientais, e como isso influencia o abastecimento de querosene de aviação na região.

Resultado principal:

Contribuição da renovação da frota

- Em 2024, 38% dos ASK com partida da região da ALC foram operados por aeronaves de nova geração, um aumento em relação aos 11% registrados em 2019, tornando-a uma das principais regiões em termos de participação em ASKs operados por aeronaves de nova geração.
- A implantação acelerada de aeronaves de próxima geração representa uma rota crítica para melhorar a eficiência de combustível e reduzir as emissões em todo o setor. No entanto, concretizar esses ganhos ambientais requer um investimento de capital substancial por parte das companhias aéreas — compromissos que as transportadoras da América Latina e do Caribe já assumiram por meio de programas e compromissos significativos de renovação da frota.
- Prevê-se que aeronaves de geração futura (movidadas a combustível convencional) entrem na frota regional a partir da segunda metade da década de 2030, começando com turboélices e seguidas por jatos regionais e aeronaves narrowbody no final da década.
- Até 2050, prevê-se que cerca de 35% do ASK de partida da região da ALC seja operado por aeronaves de geração futura (movidadas a combustível convencional), com os 65% restantes operados por aeronaves de nova geração.
- A renovação da frota e as correspondentes melhorias de eficiência de combustível devem contribuir para uma redução de cerca de 30% no consumo total de combustível por ano até 2050, reduzindo subsequentemente as emissões.

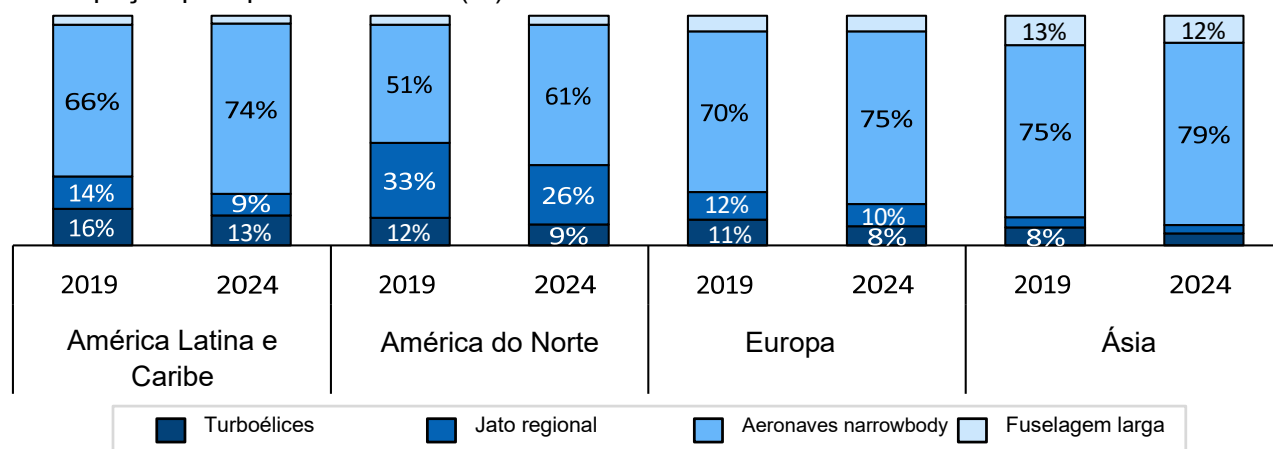
3.1.1 Contexto atual

Em 2019, 66% dos voos de partida da região da ALC foram operados por jatos narrowbody, aumentando para 74% em 2024. Isso refletiu três tendências principais observadas em toda a região e no setor: o predomínio das atividades domésticas, as companhias aéreas focadas nos mercados maiores e o aumento contínuo do porte das aeronaves (por exemplo, menos frequências de E190 / E195 e mais operações com aeronaves das famílias A320 / B737) para buscar melhor economia e rentabilidade das rotas, especialmente após a COVID.

No entanto, dada a natureza do mercado, a necessidade de conectar mercados menores e remotos, como as ilhas do Caribe, continua sendo uma parte essencial do ecossistema da aviação na região; conseqüentemente, 13% do total de voos na região ainda era operado por aeronaves turboélice em 2024. Essa é uma participação maior em comparação com outras regiões do mundo, que normalmente apresentam uma média inferior a 10%. O gráfico abaixo detalha a comparação entre as categorias de aeronaves na região da América Latina e do Caribe e em outras principais regiões do mundo.

Comparação das atividades de voo por região e categoria de aeronave

Participação por tipo de aeronave (%)



Fonte: OAG, análise da ICF

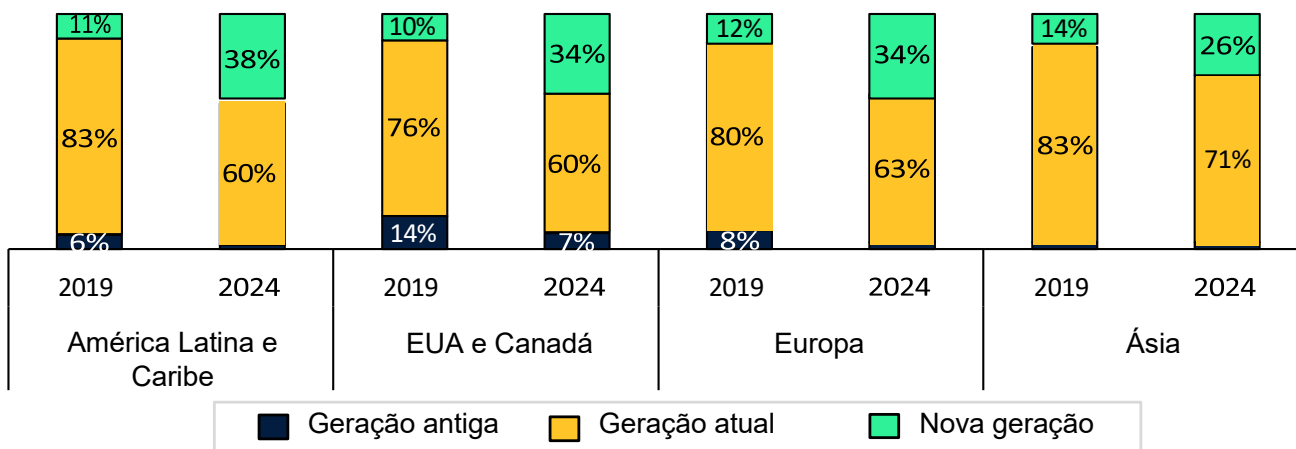
As aeronaves são ativos de longa duração, com uma vida útil de 20 a 30 anos, e as principais mudanças tecnológicas geralmente ocorrem com a mudança de geração. Esta análise agrupa as aeronaves em várias gerações com base na data em que entraram em serviço pela primeira vez. Isso permite a comparação entre gerações e a observação das melhorias no consumo de combustível. A “geração antiga” inclui modelos mais antigos, como o Boeing 737 Classic e o Boeing 767. A “geração atual” refere-se a modelos mais recentes, como o Boeing 737NG, o Airbus A320ceo e o Boeing 777. A “nova geração” inclui as aeronaves mais recentes e avançadas, como o Boeing 737MAX, o Airbus A320neo, o Boeing 787 e o Airbus A350. A previsão também considera uma “geração futura”, que abrange novos modelos de aeronaves que devem entrar em serviço nas próximas décadas. Trata-se de aeronaves que ainda não estão em produção, mas que se prevê que ofereçam uma melhoria em relação à frota ativa mais avançada representada pela categoria “nova geração”.

Em 2019, 83% dos ASKs de partida da região da ALC foram operados por tipos de aeronaves de geração atual, com outros 6% operados por aeronaves de geração antiga. Até 2024, várias companhias aéreas reestruturaram (ou ampliaram) suas frotas após a COVID, elevando a participação em ASKs das aeronaves de nova geração na região para 38%. Isso tornou a região a que possui a maior participação em ASKs operadas por aeronaves de nova geração. A participação da geração atual caiu para 60% à medida que essas aeronaves mais novas entraram na frota, restando apenas 2% operadas por aeronaves de geração antiga.

A mudança é observada principalmente em alguns mercados domésticos importantes, como Brasil, México, Chile etc. Os ASKs entre a região e a América do Norte também registraram algumas mudanças significativas em direção aos tipos de aeronaves de próxima geração. O gráfico abaixo apresenta a comparação entre a geração das aeronaves na ALC e em outras grandes regiões do mundo.

Comparação das atividades de voo por região e geração das aeronaves

Participação em ASKs (%)



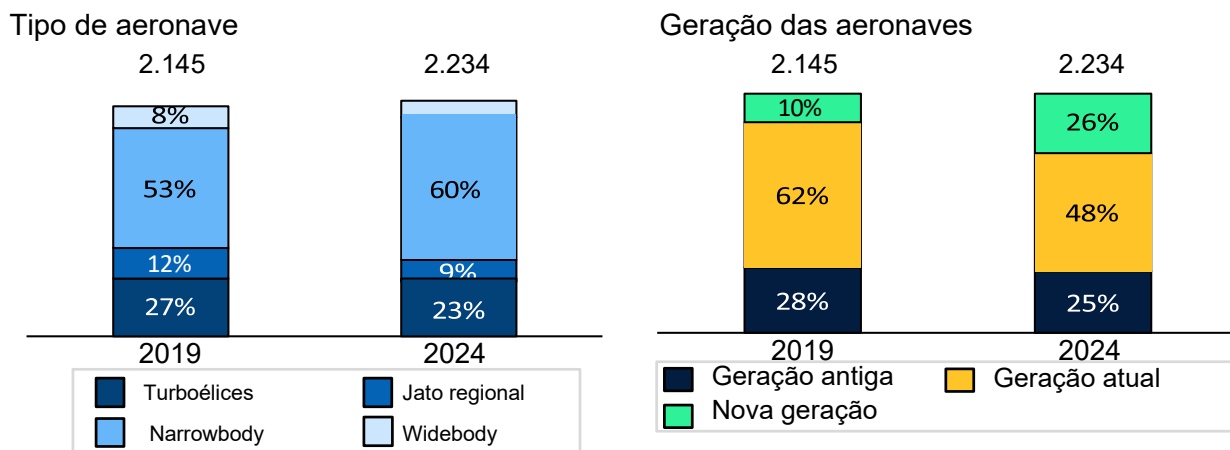
Fonte: OAG, análise da ICF

ASK = Assentos-quilômetros disponíveis

3.1.2 Frota em serviço e carteira de pedidos

Em 2019, as companhias aéreas da América Latina e do Caribe operavam, em conjunto, uma frota de 2.145 aeronaves. Esse número aumentou ligeiramente para pouco mais de 2.230 aeronaves em 2024, com os jatos narrowbody ganhando mais 7 pontos percentuais de participação, representando 57% da frota total em serviço em 2024, enquanto a participação dos turboélices e dos jatos regionais caiu 4 pontos percentuais e 3 pontos percentuais, respectivamente. Como as companhias aéreas substituíram suas aeronaves da geração atual por aeronaves de nova geração, mais novas e com maior eficiência de combustível, durante o ciclo de renegociação de contratos de leasing; como resultado, a participação das aeronaves de geração atual caiu para 48% em 2024, enquanto a participação das aeronaves de nova geração aumentou para 26%. Como as aeronaves de geração atual consistem principalmente em aeronaves narrowbody e jatos regionais, essas aeronaves geralmente geram um ATM (tráfego aéreo) mais alto por aeronave e, portanto, representam a maior parte dos ATMs em partida na região. As aeronaves de geração antiga são, em sua maioria, pequenos turboélices ou jatos mais antigos e, portanto, as companhias aéreas as mantêm para atender a necessidades específicas do mercado ou devido aos seus custos de propriedade relativamente mais baixos. O gráfico abaixo mostra o tamanho da frota operada pelas companhias aéreas da ALC e sua composição.

Frota em serviço operada por companhias aéreas sediadas na ALC (apenas frota de passageiros e carga, instantâneo no final do ano)



Fonte: CAPA, análise da ICF

Em termos de carteira de pedidos, as companhias aéreas sediadas na ALC registraram, coletivamente, 702 aeronaves encomendadas, sendo que cerca de 80% são jatos narrowbody. A Volaris, com sede no México, possui a maior carteira de pedidos, com 131 aeronaves encomendadas, seguida pelo Grupo LATAM, com mais de 110 aeronaves. Embora se espere que algumas dessas novas aeronaves apoiem as ambições de crescimento de companhias aéreas individuais, parte do pedido provavelmente será utilizada para substituir aeronaves mais antigas em serviço à medida que elas atingem a idade de retirada de serviço.

Tabela 23: Frota em serviço e encomendada das principais companhias aéreas da região da América Latina e do Caribe (passageiros e carga até o final de 2024, apenas encomendas firmes)¹¹⁸

Companhia aérea	Frota em serviço	Turboélices encomendadas	Jatos regionais encomendados	Aeronaves narrowbody encomendadas	Aeronaves widebody encomendadas	Total de aeronaves encomendadas
Grupo LATAM Airlines	334	0	0	96	15	111
Grupo Abra ¹¹⁹	307	0	0	221	14	235
Azul	182	4	56	20	7	87
Grupo Aeromexico	150	0	0	21	1	22
Grupo Volaris	113	0	0	131	0	131
Copa Airlines	112	0	0	35	0	35
Viva Aerobus	93	0	0	16	0	16
Aerolíneas Argentinas	80	0	0	6	0	6
Grupo JetSMART	40	0	0	76	0	76
Sky Airline	36	0	0	10	0	10
Caribbean Airlines Limited	20	0	0	1	0	1
Outros	797	22	20	23	0	65
Total	2.234	26	76	577	23	702

¹¹⁸ CAPA, análise da ICF

¹¹⁹ Representa o total da ABRA, incluindo o Grupo Avianca e a Gol Linhas Aéreas. Em novembro de 2025, o Grupo Abra assinou um acordo preliminar com a Sky Airlines - <https://abragroup.net/wp-content/uploads/2025/11/ENG-Comunicado-Abra-Sky-Airline.pdf>

3.1.3 Melhorias de eficiência

3.1.3.1 Desempenho intergeracional

As companhias aéreas aceleraram o ciclo de renovação da frota durante a COVID, com o objetivo de retirar de serviço aeronaves mais antigas e menos eficientes em termos de consumo de combustível, substituindo-as por modelos modernos e mais eficientes. Apesar do custo de aquisição mais elevado, as aeronaves de nova geração são mais eficientes em termos de consumo de combustível e, portanto, ajudam as companhias aéreas a reduzir as despesas com combustível como parte de seus custos operacionais. Embora as reduções do consumo de combustível variem de acordo com o tipo de aeronave e a missão realizada, é geralmente aceito que elas estejam na faixa de 15% a 20% menores do que as das aeronaves de geração atual para a mesma categoria de aeronave.

Por exemplo, o Boeing 737MAX é anunciado como sendo até 20% mais eficiente em termos de eficiência de combustível (por assento) do que o Boeing 737NG; benefícios semelhantes são observados para o Airbus A320neo em comparação com o A320ceo¹²⁰. No que diz respeito às aeronaves widebody, o Airbus A330neo é anunciado como tendo uma eficiência de combustível até 25% maior (por assento) do que o atual A330ceo, graças a uma combinação de novas tecnologias de motores e uma cabine mais compacta¹²¹. Os Boeing 787 também são comercializados com um nível semelhante de reduções do consumo de combustível em comparação com as aeronaves de nova geração que estão substituindo, como os B767 e os B777-200.

A ICF espera que as aeronaves de geração futura provavelmente proporcionem uma melhoria de eficiência semelhante por meio de uma combinação de tecnologias de motores mais avançadas, materiais mais leves e projeto aprimorado da aeronave. Por exemplo, os fabricantes OEM de motores estão desenvolvendo novos motores com maior relação de bypass, o que melhorará a eficiência de propulsão; enquanto isso, os fabricantes OEM de estruturas aeronáuticas estão investigando a tecnologia de asas curvadas ou asas canard, que melhorará o desempenho aerodinâmico. A tabela abaixo resume as premissas de modelagem adotadas pela ICF ao modelar o consumo de combustível para tipos de aeronaves de geração futura (combustível convencional), o que está em linha com outras publicações do setor¹²².

Tabela 24: Premissas de ganho de eficiência para aeronaves de geração futura (combustível convencional)¹²³

Categoria de aeronave	Ganho de eficiência (%) (geração atual > nova geração)	Ganho de eficiência (%) (nova geração > próxima geração)
Turboélices	15%	15%
Jato regional	15%	15%
Jato narrowbody	17%	22%
Jato widebody	17%	18%

3.1.3.2 Desempenho intra-geracional

Embora a renovação da frota gere economia de combustível, ganhos de eficiência também são alcançados por meio de atualizações intrageracionais. Por exemplo, uma aeronave narrowbody produzida em 2018 é mais eficiente do que o mesmo modelo produzido 10 a 20 anos antes. Esses ganhos de eficiência têm sido normalmente obtidos por meio de:

- Redução de peso: os fabricantes OEM de aeronaves conseguem reduzir o peso à medida que o programa de aeronaves amadurece
- Aerodinâmica: Os fabricantes OEM de aeronaves aprimoraram a eficiência aerodinâmica dos modelos existentes. Exemplos comuns incluem winglets/puntas de asa, bem como superfícies de redução de arrasto. Isso proporcionou uma economia de combustível de 2% a 4% historicamente¹²⁴.
- Motores: Os fabricantes OEM de motores aprimoraram os modelos com vários pacotes de melhorias

¹²⁰ <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-12/EN-Airbus-A320-Facts-and-Figures-December-2021.pdf>

¹²¹ <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a330-family>

¹²² Roteiro Tecnológico da IATA para Aeronaves até 2050 e emissões líquidas zero 2050: novas aeronaves (dezembro de 2024)

¹²³ Análise da ICF, Boeing CASCADE

¹²⁴ Sites da Airbus e da Boeing

implementados ao longo da vida útil de um programa de motores. Isso proporcionou uma economia de combustível de 2% a 5% historicamente¹²⁵.

Combinados, esses benefícios intra-geracionais normalmente resultam em melhorias de desempenho na eficiência de combustível na faixa de um dígito baixo a médio ao longo da vida útil de um tipo de aeronave¹²⁶. A tabela abaixo resume as premissas adotadas pelo ICF ao modelar as melhorias de eficiência de combustível dentro da mesma geração de aeronaves.

Tabela 25: Premissas de ganho de eficiência intrageracional de aeronaves¹²⁷

Categoria de aeronave	Ganho de eficiência ao longo da vida útil
Turboélices	até 2,0%
Jato regional	até 2,0%
Jato narrowbody	até 2,0%
Jato widebody	até 2,0%

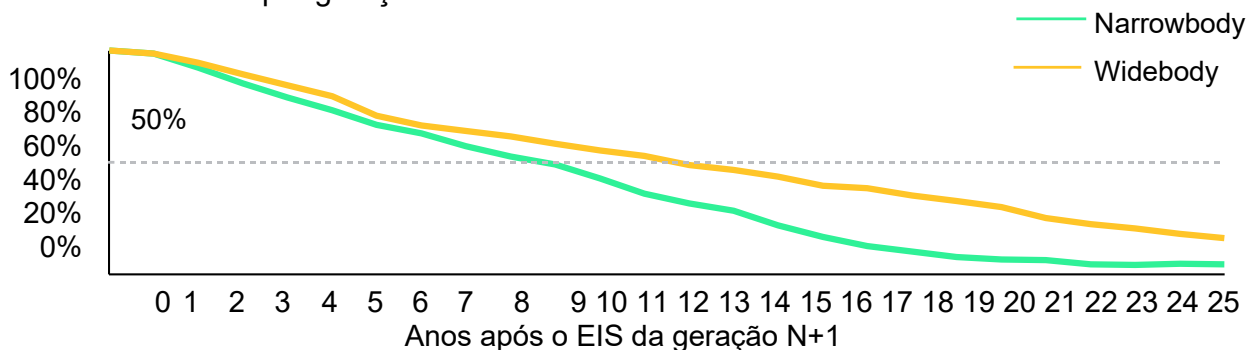
3.1.4 Perfil de transição da frota

3.1.4.1 Tendência histórica de transição

Para analisar a tendência de transição da frota, a ICF examinou o número histórico de voos realizados por aeronaves da geração anterior (geração N, por exemplo, Boeing 737 Classic, Airbus A340 e Boeing 767) em comparação com aeronaves de próxima geração (geração N+1, por exemplo, Boeing 737NG, A330 e Boeing 777) e analisou suas relações. Verificou-se que, para aeronaves narrowbody, cerca de 50% das atividades de voo passaram de modelos mais antigos para modelos mais novos após aproximadamente 10 anos da entrada em serviço (EIS), e aos 20 anos ou mais, apenas cerca de 10% dos modelos mais antigos permanecem em operação. A tendência também se aplica às aeronaves de fuselagem larga ou widebody (ALC), com cerca de 10% dos modelos mais antigos permanecendo em operação após 20 anos. Para aeronaves widebody, verificou-se que as tendências de substituição geracional demoram um pouco mais. Isso é esperado, já que as companhias aéreas costumam operar aeronaves widebody por mais tempo em comparação com as aeronaves narrowbody. A curva de transição das aeronaves widebody começa um pouco mais tarde para a ALC, mas a taxa de substituição se equipara com o tempo e atinge um nível semelhante no 20º ano. A figura abaixo resume o resultado da análise de transição da frota.

Perfil de transição da frota por porcentagem de atividades de voo (ATM)

% de voos realizados por geração N



Fonte: Análise da ICF
EIS = Entrada em serviço

¹²⁵ Atualização do CFM56-5B da GE Aerospace

¹²⁶ ATAG Waypoint 2050

¹²⁷ Análise da ICF, Boeing CASCADE

3.1.4.2 Últimas tendências de transição

Analisando as atividades globais de aeronaves narrowbody, as aeronaves de nova geração ganharam uma participação média de 2 pontos percentuais por ano entre 2015 e 2024. O número é semelhante para a ALC, enquanto a América do Norte e a Europa ficaram cerca de 1% acima da média. No entanto, isso está abaixo da tendência histórica, já que as aeronaves narrowbody de nova geração passaram por uma série de problemas de produção e certificação, como a suspensão de voos do B737MAX, o problema no motor do A320neo e os problemas na cadeia de suprimentos pós-COVID, que adiaram o cronograma de substituição. No que diz respeito às atividades com aeronaves widebody, a nova geração ganhou uma participação média de 4 pontos percentuais por ano entre 2015 e 2024, o que está em linha com a tendência histórica.

3.1.4.3 Tendência de transição da frota para a América Latina e o Caribe

A última informação necessária para projetar o plano de transição da frota é a data potencial de entrada em serviço (EIS) para futuros tipos de aeronaves. A ICF formulou as seguintes premissas de EIS com base em várias revisões da literatura e pesquisa documental:

Tabela 26: Premissas de entrada em serviço (EIS) para aeronaves de geração futura¹²⁸

Categoria de aeronave	Tecnologia	EIS estimado
Turboélices	Combustível convencional	Meados de 2030
	Hidrogênio / elétrico	Após 2050
Jato regional	Combustível convencional	Meados/final de 2030
	Hidrogênio / elétrico	Após 2050
Jato narrowbody	Combustível convencional	Final de 2030
	Hidrogênio / elétrico	Após 2050
Jato widebody	Combustível convencional	Início de 2040
	Hidrogênio / elétrico	Após 2050

A inclusão de aeronaves movidas a hidrogênio e elétricas nas frotas comerciais está projetada para ocorrer além do horizonte de previsão deste estudo. Isso se baseia em vários fatores críticos: o atual grau de maturidade tecnológica desses sistemas de propulsão, incertezas significativas quanto à sua viabilidade para a aviação comercial em grande escala e a ausência de infraestrutura de apoio e marcos regulatórios necessários para sua adoção em larga escala. Por exemplo, a Airbus estabeleceu inicialmente uma meta para a introdução de aeronaves movidas a hidrogênio até 2035, mas, em 2025, a empresa anunciou um atraso, adiando a entrada em serviço prevista para o final da década de 2040¹²⁹. Tais atrasos ressaltam os desafios enfrentados pelos fabricantes, incluindo a necessidade de avanços significativos na tecnologia de células de combustível, armazenamento de hidrogênio e distribuição, bem como o desenvolvimento de infraestrutura aeroportuária capaz de suportar esses novos tipos de aeronaves. Mesmo que ocorra um rápido progresso tecnológico e as aeronaves a hidrogênio ou elétricas sejam certificadas e iniciem operações comerciais, prevê-se que sua integração nas frotas das companhias aéreas até 2050 seja limitada. A adoção provavelmente se restringirá a missões de curto alcance, principalmente devido às limitações de alcance, prontidão da infraestrutura e complexidades operacionais associadas a esses novos sistemas de propulsão. Como resultado, sua contribuição para a redução do consumo geral de querosene de aviação e das emissões durante o período de previsão será insignificante, se é que existirá.

Em 2024, 2% dos ASKs de partida da região da América Latina e do Caribe foram operados por aeronaves de geração antiga, e espera-se que esse número diminua ainda mais, uma vez que a maioria dessas aeronaves já ultrapassou os 20 anos de idade. Outros 60% dos ASKs de partida foram operados por aeronaves de geração atual (por exemplo, família A320ceo, B737NGs, E190/5 etc.), e espera-se que essa proporção diminua gradualmente até a próxima década, à medida que as companhias aéreas continuam a receber aeronaves de nova geração (por exemplo, família A320neo, B737MAX, E190/5-E2 etc.), o que impulsiona o aumento da participação

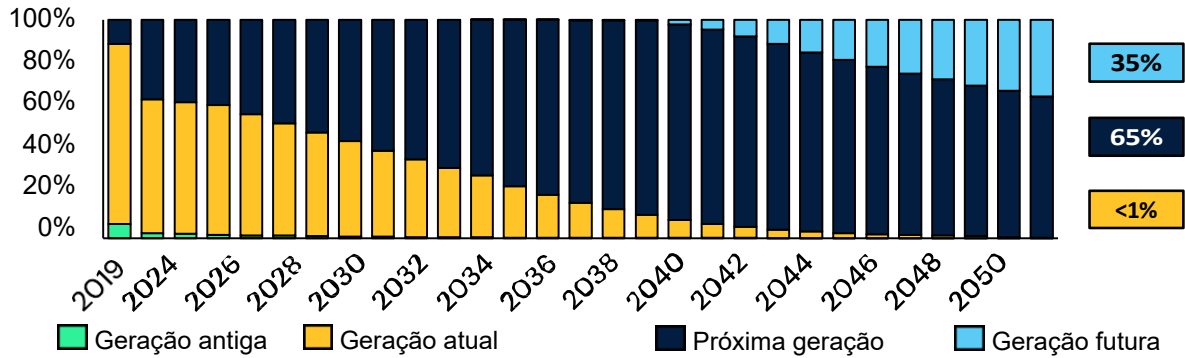
¹²⁸ Análise da ICF, Boeing CASCADE

¹²⁹ <https://sustainabilitymag.com/articles/airbus-delays-plans-for-commercial-hydrogen-aircraft>

da nova geração. Prevê-se que uma pequena proporção dos ASKs seja operada por aeronaves de geração futura movidas a combustível convencional a partir de 2034/5, embora sejam principalmente aeronaves turboélice, com base nas últimas tendências de desenvolvimento observadas no setor, antes que jatos regionais e aeronaves narrowbody de geração futura (movidas a combustível convencional) entrem em serviço no final da década de 2030. A figura abaixo mostra a transição de geração da frota por ASKs.

As companhias aéreas da região da América Latina e do Caribe já começaram a transição para aeronaves eficientes em consumo de combustível. Espera-se que a geração futura penetre na frota no final da década de 2030

Composição da frota por ASKs



Fonte: Análise da ICF

ASKs = Assentos-quilômetros disponíveis; Geração futura – a geração após os NEOs e MAXs

4 Melhorias operacionais e previsão de emissões



4.1 Introdução

Principais resultados:

- Melhorias operacionais em termos de eficiência da aeronave, operações aeroportuárias e em solo, e otimização do perfil de voo podem reduzir o consumo de combustível em **3,3–11,3% até 2050**, o que equivale a uma redução de 1,0–3,5 Mt de querosene de aviação em 2050.
- As economias iniciais provêm principalmente de medidas das companhias aéreas e em terra, como o taxiamento eficiente e o planejamento otimizado de combustível, enquanto as reduções de longo prazo dependem da modernização do espaço aéreo, de tecnologias avançadas e de procedimentos transfronteiriços harmonizados.
- Para aproveitar todos os benefícios, são necessários investimentos coordenados e alinhamento regulatório, apoiados por um monitoramento de desempenho robusto, ferramentas digitais e forte colaboração entre companhias aéreas, aeroportos, prestadores de serviços de navegação aérea e formuladores de políticas.

Em 2023, o voo 100 da Virgin Atlantic decolou de Londres com destino a Nova York¹³⁰. Em colaboração com aeroportos, controle de tráfego aéreo e outras partes interessadas, melhorias de eficiência reduziram o consumo de combustível de aviação do Boeing 787 e, conseqüentemente, as emissões de CO₂, em 4,4% em relação a um avião que normalmente voa nessa rota. A eficiência em rota desempenhou um papel fundamental, representando 47% da redução, seguida por iniciativas pré-voo com 27% e pelas fases de decolagem e chegada com 13% cada.

As melhorias operacionais oferecem um benefício duplo, reduzindo tanto as emissões de CO₂ quanto o consumo de querosene de aviação pelas companhias aéreas. Isso é particularmente verdadeiro na ALC, onde os preços do querosene de aviação costumam estar acima da média global. O voo 100 da Virgin demonstrou que é possível obter economias significativas com a tecnologia existente, mas desafios relacionados ao clima, à operação, ao congestionamento e aos investimentos ainda impedem a ampliação dessa conquista em todo o setor. Esta análise mostra que muitos elementos operacionais na ALC já são mais eficientes do que a média global, mas melhorias adicionais poderiam ser alcançadas por meio de investimentos direcionados e mudanças regulatórias.

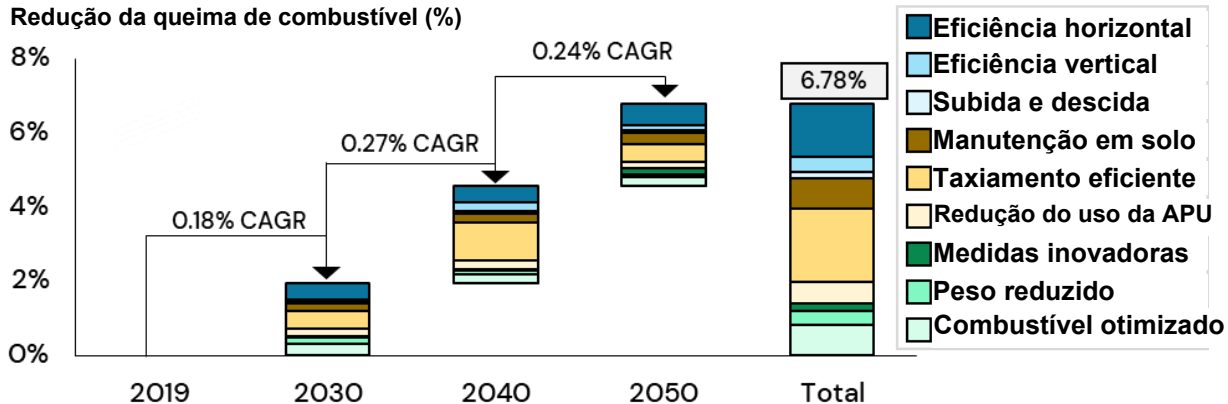
Este estudo tem como objetivo estimar o potencial de melhorias operacionais na ALC entre 2019 e 2050, considerando tanto os métodos atuais quanto as tecnologias futuras. Ele se baseia em estudos de caso globais para destacar os fatores que impulsionam essas mudanças e os requisitos para alcançar ganhos adicionais.

4.1.1 Resumo dos resultados

Melhorias operacionais na ALC em termos de eficiência da aeronave, operações aeroportuárias e em solo, e otimização do perfil de voo podem reduzir o consumo de combustível em 3,3–11,3% até 2050, em comparação com uma linha de base de 2019, nos cenários modelados. Conforme ilustrado na figura abaixo, essas economias se acumulam progressivamente ao longo do tempo, com ganhos iniciais impulsionados por medidas das companhias aéreas e em terra, e reduções maiores a longo prazo decorrentes da modernização do espaço aéreo, tecnologias avançadas e forte colaboração entre diferentes partes interessadas. Juntas, essas iniciativas representam um dos caminhos mais custo-efetivos para reduzir as emissões da aviação, ao mesmo tempo em que melhoram a resiliência e a eficiência operacionais.

¹³⁰ <https://flywith.virginatlantic.com/content/dam/sustainability/Flight100-Executive-Summary.pdf>

Melhorias operacionais na ALC poderiam reduzir a queima de combustível das aeronaves em 3,3–11,3% em 2050, mas exigem o apoio de outras partes interessadas

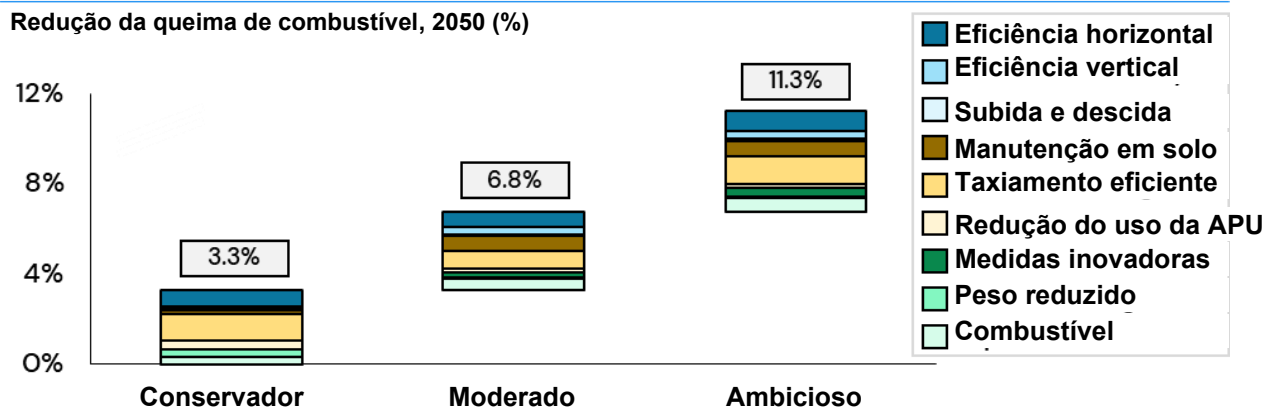


Fonte: Análise da ICF.

Nota: Cenário central; Medidas inovadoras incluem voo em formação

A diferença entre os cenários conservador e ambicioso, que varia de 3,3% a 11,3% em melhorias de eficiência operacional, é substancial. Isso poderia se traduzir em uma economia de quase 2,5 Mt de querosene de aviação por ano até 2050. Alcançar todo esse potencial dependerá em grande parte do nível de apoio fornecido por outros setores, o que este capítulo explora em detalhes. As diferenças entre os cenários em 2050, discriminadas por grupo de iniciativas, são mostradas na figura abaixo.

As diferenças nos ganhos de eficiência operacional dependem do apoio das partes interessadas e da maturidade tecnológica



Fonte: Análise da ICF.

Nota: As medidas inovadoras incluem voo em formação

Medidas de eficiência e planejamento de aeronaves podem reduzir a queima de combustível em 0,2-1,0% até 2030 e em 0,6-2,4% até 2050. A otimização do combustível a bordo oferece o maior impacto potencial, mas seu sucesso depende em grande parte da adoção e do avanço de programas de monitoramento comportamental e de eficiência. A redução do peso a bordo por meio de equipamentos de cabine e materiais mais leves pode desempenhar um papel importante, assim como medidas inovadoras, como o voo em formação, embora isso dependa em grande parte dos avanços tecnológicos.

Medidas em aeroportos e no solo proporcionam o maior impacto de curto prazo, com economias combinadas de 0,3% a 1,6% até 2030, aumentando para 1,7% a 5,5% até 2050, das quais 1,2% a 3,3% provêm de procedimentos de rolagem mais eficientes. Para obter o máximo de ganhos, a tomada de decisão colaborativa em aeroportos será implementada de forma agressiva, reduzindo os tempos de taxiamento por meio de maior previsibilidade e sequenciamento, enquanto a adoção do taxiamento com um único motor (SET) continuará a aumentar à medida que os procedimentos amadurecem. Espera-se que os rebocadores elétricos de solo se tornem

uma medida fundamental de economia de combustível até meados do século, oferecendo reduções maiores do que o SET, especialmente em grandes hubs com longas distâncias de taxiamento. Enquanto isso, a redução das unidades de energia auxiliar (APU) continua sendo uma medida fundamental, apoiada pela expansão da energia elétrica em solo e da infraestrutura de PCA (ar pré-condicionado) d, proporcionando até 0,77% de reduções do consumo de combustível até 2050. Embora essas medidas proporcionem reduções imediatas e escaláveis de emissões, alcançar seu potencial total requer investimento significativo em infraestrutura e estreita colaboração entre diferentes partes interessadas, com grande parte da oportunidade dependendo de modernizações no lado aeroportuário e de ações governamentais facilitadoras, em vez de iniciativas das companhias aéreas.

A otimização do perfil de voo, incluindo subida e descida, eficiência vertical e eficiência horizontal, oferece economias de 0,2% a 0,9% até 2030, aumentando para 0,9% a 3,4% até 2050, tornando-se um componente crítico das melhorias de longo prazo. A região da ALC apresenta bom desempenho em eficiência de voo, com eficiência horizontal entre as mais altas globalmente e ineficiências de subida e descida abaixo da média global, refletindo práticas operacionais sólidas. No entanto, ainda há espaço para obter ganhos, principalmente por meio de iniciativas de modernização do espaço aéreo, como o espaço aéreo de rotas livres (FRA), disponibilidade dinâmica de rotas e separação otimizada de decolagem e partida por meio de ferramentas como entrega otimizada de pista (ORD) e entrega otimizada de separação (OSD). Alcançar essas melhorias exigirá investimento coordenado na modernização da gestão do tráfego aéreo, procedimentos transfronteiriços harmonizados e forte colaboração entre prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs), reguladores e companhias aéreas, apoiados por programas robustos de monitoramento de desempenho e comportamentais para garantir a adoção consistente.

A coordenação entre as partes interessadas é fundamental para alcançar essas economias. Melhorias operacionais exigem estreita colaboração entre companhias aéreas, aeroportos, ANSPs (prestadores de serviços de navegação aérea), reguladores e organizações de pesquisa. Embora algumas medidas dependam de modernizações de infraestrutura ou modernização do espaço aéreo, as companhias aéreas podem continuar a agir por meio de procedimentos operacionais, treinamento, programas de monitoramento de desempenho e participação em testes. Essas ações iniciais não apenas geram ganhos de curto prazo, mas também preparam o terreno para tecnologias avançadas de navegação aérea e estruturas regulatórias. A figura abaixo ilustra o nível de envolvimento de cada parte interessada em todas as iniciativas, utilizando uma escala que vai de responsabilidade mínima (branco) a essencial (azul escuro).

Envolvimento das partes interessadas por maturidade da iniciativa

Escala: branco (mínimo) – azul escuro (essencial)

Iniciativa	Companhias aéreas	Aeroportos / Serviços de solo	ANSPs	Formuladores de políticas / Reguladores	Pesquisa / Academia
1.3.1 Sistemas de desempenho e monitoramento de desempenho das companhias aéreas	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.3.2 Otimização do combustível a bordo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.3.3 Redução do peso a bordo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.3.4 Voo em formação	Mínimo	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo
1.4.2 Redução do uso da APU	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.4.3.1 Roda com um único motor	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.4.3.2 A-CDM	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.4.3.3 Rebocadores elétricos	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.4.4 Manutenção em solo	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.5.2.1 Subida e descida contínuas	Essencial	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo
1.5.2.2 Flaps reduzidos na aterrissagem	Essencial	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
1.5.3.1 RVSM Fase 2	Mínimo	Mínimo	Essencial	Essencial	Mínimo
1.5.3.2 Procedimentos de voo em formação e VHF via satélite	Mínimo	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo
1.5.3.3 Mudanças de altitude para mitigação de rastros de condensação	Mínimo	Mínimo	Essencial	Essencial	Mínimo
1.5.4.1 Modernização do espaço aéreo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Essencial	Mínimo
1.5.4.2 Paridade tarifária no espaço aéreo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Essencial	Mínimo
1.5.4.3 Gestão global de fluxo	Mínimo	Mínimo	Essencial	Mínimo	Mínimo
1.5.4.4 Espaçamento otimizado e separação em pares	Mínimo	Essencial	Essencial	Mínimo	Mínimo

4.2 Âmbito e metodologia

Este estudo avalia o potencial de melhorias de eficiência operacional na ALC, com foco em três categorias de iniciativas:

1. Medidas de eficiência e planejamento de aeronaves
2. Operações aeroportuárias e em solo
3. Otimização do perfil de voo

As iniciativas foram selecionadas com base em consultas às partes interessadas do setor e na análise de relatórios de referência importantes, incluindo a análise do objetivo aspiracional de longo prazo (LTAG) da OACI e o roteiro Destination 2050¹³¹.

Etapa 1 – Estimativa das reduções do consumo de combustível por iniciativa: Para cada iniciativa, estimou-se a economia média de combustível por voo, com base em estudos de caso, avaliações técnicas e outros relatórios do setor. Quando disponíveis, aplicou-se uma faixa de valores de economia mínima e máxima para capturar a incerteza. Se as economias ainda não tivessem sido relatadas como porcentagens, elas foram expressas como uma redução percentual, normalizando a economia absoluta de combustível em relação à queima de combustível por movimento de tráfego aéreo na região.

Etapa 2 – Estabelecimento dos níveis atuais de implementação: As linhas de base de implementação são decorrentes das contribuições diretas das partes interessadas. Três companhias aéreas membros da ALTA, com uma frota combinada de cerca de 300 aeronaves, responderam a uma pesquisa sobre a adoção atual e planejada das medidas LTAG da OACI, e quatro companhias aéreas participaram de entrevistas sobre práticas de eficiência operacional. Esse feedback foi complementado com estudos de caso internacionais e dados de adoção publicados para refinar as estimativas regionais.

Etapa 3 – Projeção da implementação até 2050: foram desenvolvidos cenários de implementação conservadores, intermediários e ambiciosos até 2050. Essas trajetórias foram calculadas com base no feedback da pesquisa e das entrevistas, em referências globais de implementação e em evidências de contextos

¹³¹ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG_da_OACI/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM4.pdf; <https://www.destination2050.eu/roadmap/>

internacionais comparáveis. Para cada medida, a taxa de implementação projetada em um determinado ano foi calculada como a diferença entre a adoção de linha de base e a taxa de adoção prevista.

Etapa 4 – Agregação das reduções do consumo de combustível: A economia anual em toda a frota foi estimada multiplicando-se a taxa de implementação incremental de cada iniciativa pela economia por voo. Nos casos em que o desempenho variou significativamente por tipo de aeronave, tanto a economia quanto as taxas de implementação foram calculadas no nível da aeronave e, em seguida, agregadas para e ar a frota regional.

4.3 Medidas de eficiência e planejamento de aeronaves

4.3.1 Sistemas de monitoramento de desempenho das companhias aéreas

Os sistemas de monitoramento de desempenho das companhias aéreas combinam planejamento operacional, monitoramento em tempo real e análise pós-voo para melhorar a eficiência de combustível em todas as fases do voo. Eles utilizam dados em grande escala e inteligência artificial para detectar ineficiências, recomendar melhores práticas e envolver as tripulações em ações de economia de combustível. As funções principais incluem planejamento otimizado de combustível, monitoramento da trajetória durante o voo e feedback pós-voo. Ao possibilitar a tomada de decisões baseada em dados, esses sistemas reduzem a queima de combustível, as emissões de CO₂ e os custos operacionais das companhias aéreas.

Um estudo em grande escala da Virgin Atlantic destaca a dimensão comportamental, testando como o feedback e o estabelecimento de metas influenciam o comportamento dos pilotos¹³². O estudo introduziu três intervenções: fornecer informações sobre oportunidades de reduções do consumo de combustível, oferecer metas personalizadas e dar feedback mensal de desempenho. Essas intervenções foram agrupadas em quatro áreas operacionais: *Economia no Plano de Voo*, que incentivava os pilotos a aderir a rotas e perfis de velocidade ideais; *Carga de Combustível*, que se concentrava na redução do transporte de combustível discricionário; *Voo Eficiente*, que promovia práticas como aproximações em descida contínua; e *Taxiamento Eficiente*, que incentivava operações de taxiamento com um único motor. Os resultados demonstraram que mesmo o anúncio do monitoramento melhorou a conformidade, um fenômeno conhecido como efeito Hawthorne. Quando combinadas com feedback e metas, essas medidas resultaram em 7.769 toneladas de combustível economizado e 24.472 toneladas de CO₂ evitadas durante o período de teste de oito meses. Essas evidências mostram o poder de combinar tecnologia com estratégias comportamentais para proporcionar ganhos significativos de eficiência.

Para evitar contagem dupla, este estudo não modela essas economias como uma medida isolada; em vez disso, os benefícios são distribuídos entre iniciativas relacionadas, como redução do uso de APU, otimização de subida e descida e redução do combustível discricionário.

Responsabilidade pela implementação: as companhias aéreas lideram a implantação e os programas de feedback dos pilotos; os reguladores apoiam a governança de dados.

4.3.2 Combustível otimizado a bordo

A redução do combustível a bordo significa otimizar a carga de combustível para transportar apenas o necessário para as operações planejadas, incluindo contingências e reservas. Essa abordagem minimiza o transporte excessivo e, por sua vez, reduz o consumo de combustível durante o voo. De acordo com a IATA, cada tonelada adicional de combustível transportada queima cerca de 30 kg a mais de combustível por hora¹³³. Na prática, porém, o combustível adicional é frequentemente adicionado por motivos de segurança, incluindo incertezas relacionadas ao clima, congestionamento ou outras necessidades potenciais de espera ou desvio.

As companhias aéreas que adotam práticas avançadas de planejamento de combustível e sistemas de monitoramento de desempenho podem obter ganhos significativos de eficiência. As companhias aéreas relataram uma economia de até 2% ao melhorar a gestão discricionária de combustível por meio de programas avançados de desempenho¹³⁴. O estudo da Virgin Atlantic reforça esse ponto: pilotos que receberam feedback e metas personalizadas alcançaram uma economia média de combustível de cerca de 191 kg por voo por meio de um planejamento de combustível mais preciso¹³⁵. À medida que fatores externos, como tecnologia de previsão do tempo, ferramentas de sequenciamento e outras medidas de gerenciamento de congestionamento evoluem, o combustível discricionário necessário pode ser reduzido.

¹³² <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/impact-management-practices-employee-productivity-field-experiment-airline-captains/>

¹³³ <https://www.iata.org/en/publications/newsletters/iata-knowledge-hub/fuel-efficiency-in-aviation-why-it-matters-more-than-ever/>

¹³⁴ <https://blog.openairlines.com/engaging-pilots-in-fuel-efficiency-at-azul-airlines>; <https://www.aviationbusinessnews.com/low-cost/azul-to-use-skybreathe-360-eco-flying-platform/>

¹³⁵ <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2017/01/working-paper-262-Gosnell-et-al-March-2019.pdf>

A flexibilidade regulatória pode aumentar ainda mais a eficiência. Uma companhia aérea da região da ALC informou ser a única transportadora a obter aprovação de sua autoridade de aviação civil para reduzir sua margem de combustível discricionário em aeronaves narrowbody dos 5% padrão para 3%. Tais aprovações normalmente exigem sistemas robustos de gestão de segurança, ferramentas avançadas de planejamento de voo e forte supervisão operacional.

Em um cenário ambicioso, as companhias aéreas adotam ferramentas avançadas de gestão de combustível que continuam a evoluir tecnologicamente ao longo do tempo, juntamente com programas comportamentais para reduzir o transporte de combustível discricionário. A adoção deve atingir 50% até 2030, 75% até 2040 e a implementação total até 2050, resultando em uma economia líquida de 1,5% por voo. Em contrapartida, um cenário conservador pressupõe atrasos na adoção, com base no feedback menos ambicioso, e a tecnologia permanece estagnada, gerando economias mais modestas de 0,5% por voo.

Dependências: **As companhias aéreas** são responsáveis pela política de combustível, análises e treinamento; **Os reguladores** permitem flexibilidade na política de reservas; **Os ANSPs** apoiam procedimentos que reduzem as necessidades de combustível de contingência.

4.3.3 Redução do peso a bordo

Reduzir o peso da cabine e dos equipamentos de bordo é uma forma comprovada de melhorar a eficiência de combustível e reduzir as emissões. O programa FlyZero do Instituto de Tecnologia Aeroespacial analisou o potencial de redução de peso da cabine no A320neo entre 2020 e 2030¹³⁶. O estudo estimou que o peso da cabine poderia ser reduzido em 16% por meio de medidas como a instalação de assentos leves, a otimização das cozinhas de bordo e a remoção de itens não essenciais, sendo que a substituição dos assentos proporcionaria a maior redução de peso. Estima-se que essas mudanças reduzam as emissões de CO₂ em 0,85% por voo, em consonância com a faixa do LTAG da OACI para medidas operacionais (0,65–0,85%).

Duas das três companhias aéreas da ALTA entrevistadas esperam que as taxas de implementação se alinhem às projeções do LTAG, enquanto uma antecipa uma adesão ligeiramente menor. Essas formam os cenários ambicioso e conservador deste estudo. Alcançar o cenário ambicioso depende das companhias aéreas acelerarem os retrofits de cabine, apoiadas por incentivos para materiais leves e parcerias com fornecedores. Os reguladores podem apoiar isso estabelecendo metas de redução de peso e publicando melhores práticas, enquanto os OEMs e fabricantes de assentos desenvolvem projetos ultraleves.

Execução: **As companhias aéreas** especificam e adquirem medidas de redução de peso; **fornecedores/pesquisadores** desenvolvem projetos leves.

4.3.4 Voo em formação

O voo em formação é uma técnica tática em que duas ou mais aeronaves voam em estreita proximidade, permitindo que a aeronave que segue reduza o arrasto aerodinâmico e economize combustível. Em 2021, a Airbus demonstrou o voo em formação no âmbito de seu programa fello'fly, voando com dois A350s de Toulouse a Montreal a uma separação de cerca de 1,2 milhas náuticas¹³⁷. O teste mostrou que a aeronave que segue poderia economizar de 5 a 10% de combustível em voos de longo curso. Com base nesses resultados, a Airbus lidera o projeto Gain Environmental Efficiency by Saving Energy (GEESE) no âmbito da Pesquisa Conjunta do Céu Único Europeu (SESAR) até 2026, com foco em conceitos operacionais, avaliações de segurança e viabilidade no espaço aéreo europeu.

Os voos em formação são mais promissores em rotas de alta densidade com trajetórias estruturadas, como o corredor do Atlântico Norte, onde fluxos de tráfego previsíveis e longos segmentos de cruzeiro criam condições favoráveis para o emparelhamento de aeronaves¹³⁸. No entanto, a complexidade operacional continua sendo uma barreira significativa para os voos em formação, e sua viabilidade comercial permanece em grande parte não comprovada. A coordenação de partidas, planos de voo e posicionamento preciso requer automação avançada, comunicação robusta da aeronave e compartilhamento de dados em tempo real. Essas operações também devem ser integradas aos sistemas ATC existentes, garantindo ao mesmo tempo a conformidade com as normas de segurança, incluindo a separação para turbulência de esteira. Os benefícios são assimétricos: as aeronaves que seguem ganham mais, enquanto as que lideram obtêm pouco ou nenhum benefício, exigindo acordos comerciais

¹³⁶ <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-AIR-POS-0039-Sustainable-Cabin-Design.pdf>

¹³⁷ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-airbus-and-sesar-partners-are-taking-wake-energy-retrieval-to-the-next>

¹³⁸ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report-2022-F4.pdf> ⁷¹

ou incentivos entre as companhias aéreas.

As partes interessadas expressaram otimismo quanto à adoção do voo em formação, embora as expectativas variem. Duas companhias aéreas projetaram uma taxa de adoção de 3% até 2030, e a terceira estimou 3% até 2040. Duas previram 15% até 2050, enquanto uma projetou 10%. Esses números constituem a base do cenário ambicioso deste estudo. No entanto, dados os significativos desafios tecnológicos, regulatórios e operacionais, essas projeções são consideradas altamente otimistas. O cenário conservador pressupõe 0% de adoção até 2050, refletindo a probabilidade de que o voo em formação permaneça em grande parte experimental, com uso operacional limitado até meados do século. Este estudo pressupõe que o voo em formação será aplicável apenas a voos internacionais.

Governança: ANSPs e reguladores lideram conjuntamente procedimentos e casos de segurança; organizações de pesquisa apoiam a modelagem e os testes; companhias aéreas participam de testes de pesquisa e administram acordos comerciais.

4.3.5 Resultados das medidas de eficiência e planejamento de aeronaves

Tabela 27: Implementação e economia das medidas de eficiência e planejamento de aeronaves

Medida	Economias de combustível (%) (Baixa, Alta)	Implementação de linha de base (%)	Métrica	2030 (%) (Baixa, Alta)	2040 (%) (Baixa, Alta)	2050 (%) (Baixa, Alta)
Redução do combustível a bordo	1 (0,5, 1,5)	5	Implementação adicional	32,5 (20, 45)	57,5 (45, 70)	82,5 (70, 95)
			Redução de combustível em toda a frota	0,33 (0,10, 0,68)	0,58 (0,23, 1,05)	0,83 (0,35, 1,43)
Peso reduzido a bordo	0,75 (0,65, 0,85)	45	Implementação adicional	21,7 (21,7, 21,7)	36,7 (36,7, 36,7)	47,5 (45, 50)
			Redução de combustível em toda a frota	0,16 (0,14, 0,18)	0,28 (0,24, 0,31)	0,36 (0,29, 0,43)
Voo em formação	7,5 (5, 10)	0	Implementação adicional	0,5 (0, 1,0)	0,7 (0, 1,3)	2,9 (0, 5,8)
			Redução de combustível em toda a frota	0,04 (0, 0,10)	0,05 (0, 0,13)	0,22 (0, 0,58)
Redução de combustível em toda a frota				0,5 (0,2, 1,0)	0,9 (0,5, 1,5)	1,4 (0,6, 2,4)

Cenário ambicioso: A região da ALC acelera o progresso por meio de incentivos políticos, adoção de tecnologia e colaboração do setor. As companhias aéreas implementam sistemas avançados de gestão de combustível, programas comportamentais e aceleram os retrofits de cabine durante os ciclos de manutenção. Fabricantes e fornecedores oferecem materiais ultraleves, enquanto a integração digital com ATC e a automação permitem voos em formação em corredores de longo curso selecionados. Este cenário pressupõe forte apoio regulatório e investimento, alcançando a plena realização do potencial de economia até 2050.

Cenário intermediário: O progresso é constante, mas incremental. As companhias aéreas lideram a otimização de combustível e a redução de peso, impulsionadas por economias de custo e compromissos de sustentabilidade. A redução de peso da cabine ocorre principalmente por meio da renovação da frota, e o software de gestão de combustível se torna padrão até 2040. A adoção do voo em formação permanece limitada a testes e algumas rotas operacionais até 2050. Este cenário reflete melhorias impulsionadas pelo setor, sem ações de política pública transformadoras.

Cenário conservador: As companhias aéreas implementam apenas medidas operacionais básicas, e a redução de peso da cabine ocorre principalmente por meio da renovação natural da frota. O voo em formação permanece experimental, sem implantação operacional até meados do século. As reduções do consumo de combustível são marginais, e a região corre o risco de ficar para trás em relação às melhores práticas globais.

4.4 Operações aeroportuárias e em solo

4.4.1 Introdução

As operações em solo representam cerca de 8% das emissões globais de aeronaves e oferecem algumas das oportunidades mais imediatas para reduzir a queima de combustível e as emissões de CO₂¹³⁹. No entanto, uma implementação eficaz requer esforços coordenados entre operadores aeroportuários, companhias aéreas, prestadores de serviços de assistência em solo e autoridades reguladoras.

4.4.2 Redução do uso de APUs

As unidades de potência auxiliar (APUs) fornecem energia e ar condicionado quando os motores principais estão desligados, mas queimam querosene de aviação e emitem CO₂ e poluentes locais. Seu uso pode ser minimizado pela substituição por sistemas terrestres (AGES (sistemas de energia em solo para aeronaves)), como unidades de energia em solo fixas (GPU) e PCA (ar pré-condicionado). A expansão do uso de AGES reduz a queima de combustível, as emissões e o ruído durante as operações em solo.

Um estudo do Aeroporto de Zurique de 2016 avaliou os impactos dos AGES e do PCA em 269.160 movimentos de aeronaves¹⁴⁰. Verificou-se que a intensidade de emissões varia significativamente: as APUs emitem 337 kg de CO₂/h para aeronaves de curta distância contra 0,7 kg de CO₂/h para AGES elétricos, e 758 kg de CO₂/h contra 1,2 kg de CO₂/h para aeronaves de longo curso. As emissões, que totalizaram 50.066 toneladas de CO₂ quando se dependia exclusivamente de APUs, caíram para 8.945 toneladas com a implantação parcial de AGES e para 2.131 toneladas com a implantação total. Isso equivale a uma economia por voo de cerca de 178 kg de CO₂ entre os cenários mínimo e máximo.

Em 2018, 55% dos portões de embarque europeus contavam com energia elétrica em terra e 27% com PCA¹⁴¹. Os aeroportos impulsionaram a redução do uso de APUs por meio de limites rigorosos: Heathrow restringe o uso de APUs em aeronaves narrowbody a 15 minutos antes da partida e 10 minutos após a chegada, enquanto Schiphol planeja um limite de cinco minutos e cobertura total de PCA, além de testes com GPUs movidas a hidrogênio¹⁴². As companhias aéreas e os governos apoiam esses esforços. A easyJet está implantando unidades híbridas de PCA em Milão Malpensa no âmbito do Projeto APU-ZERO, e a Alemanha financiou 1,9 milhão de euros para 15 e-GPUs em Colônia-Bonn¹⁴³. Além disso, soluções de software, como o produto Turnaround Control da Assaia, podem otimizar o uso de GPUs e alcançaram uma redução de 5 kg de CO₂ por voo¹⁴⁴.

No Brasil, a Engie e a Inframerica instalaram sistemas de alimentação elétrica em terra movidos a energia solar e sistemas PCA no Aeroporto Internacional de Brasília em 2019, gerando uma economia estimada de 15 kt de CO₂ por ano¹⁴⁵. O projeto está se expandindo para 26 pontes de embarque e sendo implementado nos aeroportos internacionais de Porto Alegre, Fortaleza e São Paulo, reduzindo coletivamente as emissões de CO₂ em 76 kt por ano e cobrindo 28% do mercado brasileiro. As companhias aéreas também estão participando, por meio da assinatura de acordos com fornecedores para reduzir o uso de APUs.

A adoção de alternativas à APU na ALC permanece bem abaixo da Europa, com implantação estimada em 20%, semelhante às médias globais do LTAG da OACI. Muitos aeroportos carecem de energia fixa em solo e de PCA, forçando a dependência de APUs ou de autoabastecimento oneroso. O AGES movido a energia renovável costuma

¹³⁹ <https://www.iata.org/contentassets/d1d4d535bf1c4ba695f43e9beff8294f/airport-environmental-sustainability-policy.pdf>

¹⁴⁰ https://www.flughafen-zuerich.ch/-/jssmedia/airport/portal/dokumente/das-unternehmen/politics-and-responsibility/environmental-protection/technische-berichte/2018_zrh_aircraft-ground-energy-system.pdf?vs=1

¹⁴¹ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

¹⁴² https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/team-heathrow/airside/operational-safety-instructions/ASEnv_OSI_078%20Use%20of%20Aircraft%20Auxiliary%20Power%20Units_v2.pdf; <https://news.schiphol.com/action-plan-targets-reduced-auxiliary-power-unit-apu-use-by-stationary-aircraft-at-schiphol/>; <https://news.schiphol.com/world-first-at-schiphol-airport-tests-the-first-hydrogen-gpu/>

¹⁴³ <https://avitrader.com/2025/03/13/easyjet-rolls-out-project-apu-zero-at-milan-malpensa/>; <https://www.cologne-bonn-airport.com/en/company/newsroom/press-releases/detail/airport-invests-in-electric-gr>

¹⁴⁴ <https://worldaviationfestival.com/blog/companhias-aereas/apronai-case-study-reducing-kerosene-costs/>

¹⁴⁵ <https://www.engie.com.br/en/imprensa/press-releases/a-pioneer-in-the-decarbonization-of-airports-in-brazil-engie-supplies-aircraft-with-renewable-energy-and-reduces-emissions/>

ser mais caro que o diesel, e as estruturas de preços raramente incentivam opções de baixa emissão. Com base em dados de Zurique e no monitoramento de desempenho, a redução do uso de APUs poderia economizar cerca de 183 kg de CO₂ (≈58 kg de combustível) por escala, ou 0,96% por voo.

Acelerar a redução do uso de APUs na ALC requer ação coordenada. Os aeroportos devem ampliar a disponibilidade de AGES apesar dos altos custos, que variam em média de € 150.000 a € 170.000 para unidades de energia em solo e de € 240.000 a € 270.000 para unidades de PCA¹⁴⁶. Os reguladores podem impulsionar a adoção por meio de limites de tempo para o uso de APUs, taxas baseadas em emissões e incentivos financeiros. As companhias aéreas devem se comprometer por meio de acordos do tipo offtake para assegurar a demanda, mas tais compromissos só serão viáveis quando os preços forem competitivos em termos de custo. Se as tendências atuais persistirem, a adoção poderá atingir 50% até 2050, uma década atrás das metas do LTAG da OACI. Com forte intervenção por meio de financiamento, mandatos operacionais claros e coordenação regional, a penetração poderia subir para 90% até 2050.

Funções: Os aeroportos garantem a disponibilidade de GPU/PCA juntamente com limites de tempo para o uso de APU; as companhias aéreas se comprometem por meio de acordos de compra/uso e monitoram a conformidade; os formuladores de políticas incentivam a energia limpa; fornecedores e instituições de pesquisa desenvolvem tecnologias mais eficientes.

4.4.3 Taxiamento eficiente

4.4.3.1 Taxiamento com um único motor

O taxiamento com um único motor (SET) utiliza um motor em vez de dois para o taxiamento entre o portão de embarque e a pista (SET-out) ou vice-versa (SET-in), reduzindo a queima de combustível e as emissões, ao mesmo tempo que mantém operações em solo seguras¹⁴⁷. Na Europa, a adoção continua limitada: menos de 10% dos voos utilizam SET-out, em comparação com cerca de 50% para SET-in. Essa diferença reflete restrições operacionais e de segurança¹⁴⁸. O SET-out aumenta a carga de trabalho para pilotos e ATC, apresenta riscos de incêndio durante o aquecimento do motor e requer tempo para dar partida no segundo motor antes da decolagem. O SET-in também precisa de um período de resfriamento antes do desligamento. Ambos os processos levam cerca de três minutos e exigem coordenação, e um tempo mínimo de taxiamento deve estar disponível para que sejam viáveis. Alguns aeroportos proíbem totalmente o SET, enquanto outros o restringem em situações como a travessia de pistas ativas devido ao risco de falha do motor¹⁴⁹.

Apesar desses desafios, as companhias aéreas da região da ALC fizeram progressos significativos na obtenção de reduções do consumo de combustível por meio de um SET. Por exemplo, uma companhia aérea da ALTA alcançou uma taxa de SET de 90% por meio de procedimentos, cultura e treinamento sólidos, mostrando que as barreiras podem ser superadas. É provável que haja uma adoção mais ampla, já que a Airbus agora recomenda o SET como procedimento padrão, e a comunicação aprimorada da aeronave ajuda a confirmar o tempo mínimo de taxiamento¹⁵⁰. A tecnologia também auxilia no monitoramento de desempenho. Por exemplo, a Volaris utilizou ferramentas da Storkjet para constatar que os pilotos em Cancún mantinham uma média de 4:14 minutos de SET contra um tempo possível de 6:36 minutos, indicando espaço para melhorias¹⁵¹.

Em 2019, os tempos médios de taxiamento de saída e de entrada em 23 aeroportos da região da América Latina e do Caribe foram de 20:36 e 8:48 minutos, semelhantes aos de grandes aeroportos dos EUA¹⁵². Utilizando esses números, a composição da frota regional e as estimativas do SESAR, um voo que utilizasse tanto o SET de saída quanto o SET de entrada economizou cerca de 2,2% de combustível em comparação com um que não utilizasse nenhum dos dois (ver *Tabela 28*).

¹⁴⁶ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

¹⁴⁷ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/webinars/Guiseppa.pdf>

¹⁴⁸ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/webinars/Guiseppa.pdf>

¹⁴⁹ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-07/eurocontrol-sustainable-taxi-operations-conops.pdf>

¹⁵⁰ <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/system-upgrades/single-engine-taxi-without-auxiliary-power-unit-setwa>

¹⁵¹ <https://storkjet.com/wp-content/uploads/2024/06/Volaris-Case-Study-2024.pdf>

¹⁵² <https://ansperformance.eu/efficiency/>; <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icmsem-23/125992457>

Tabela 28: Benefícios médios do SET por tipo de aeronave

Categoria de aeronave	Economias de combustível (kg/min)	Economia na decolagem (kg/aeronave)	Economia na rotação de entrada (kg/aeronave)
Turboélices	2	41	18
Jato regional	4	82	35
Jatos narrowbody	5	103	44
Jato widebody	10	206	88

Os dados específicos para a América Latina e o Caribe são limitados, mas as taxas provavelmente são semelhantes às da Europa, cerca de 10% para SET-out e 50% para SET-in, considerando regras de segurança e metas de economia de combustível comparáveis. A crescente adoção exigirá mais do que melhorias tecnológicas: os aeroportos precisam fornecer orientações operacionais claras, os reguladores devem padronizar os procedimentos SET e as companhias aéreas devem incorporar o SET no treinamento e no monitoramento de desempenho. Uma melhor comunicação da aeronave e a integração do SET nas ferramentas de plano de voo também serão fundamentais para alcançar uma maior adoção.

Medidas de implementação: **As companhias aéreas** atualizam os procedimentos operacionais padrão (POP), a formação e o monitoramento; **os aeroportos/ANSPs** fornecem orientações locais claras e previsibilidade quanto ao tempo de rotação.

4.4.3.2 Tomada de decisão colaborativa em aeroportos

A-CDM (tomada de decisão colaborativa em aeroportos) melhora a eficiência, a previsibilidade e o uso de recursos nos aeroportos, permitindo o compartilhamento de informações em tempo real entre operadores aeroportuários, ATC, companhias aéreas, prestadores de serviços de assistência em terra e gestores de rede. Ao compartilhar marcos-chave, como o tempo-alvo de saída da área de manobra (TOBT), o tempo-alvo de aprovação de partida (TSAT) e o tempo-alvo de decolagem (TTOT), o A-CDM otimiza a sequência de partidas, reduz atrasos na rotação e apoia medidas de economia de combustível, como o SET.

O A-CDM está em vigor em 34 aeroportos europeus, enquanto aeroportos menores utilizam alternativas como a Torre ATC Avançada quando a implementação completa não se justifica¹⁵³. A análise da EUROCONTROL em 17 aeroportos constatou uma redução média do tempo de taxiamento de 7%¹⁵⁴. Treze relataram economias mensuráveis no taxiamento, com sete alcançando reduções de um minuto ou mais por voo. Em Heathrow, a maior precisão do A-CDM reduziu o desvio médio em relação ao horário de decolagem planejado de 8 minutos e 40 segundos para 30 segundos. A implementação do A-CDM requer forte coordenação entre as partes interessadas, infraestrutura digital robusta e dados precisos em tempo real. A EUROCONTROL estima custos entre € 750.000 e € 5.000.000, com custos operacionais anuais de € 50.000 a € 500.000.

Em 2025, o Aeroporto Internacional El Dorado, em Bogotá, tornou-se o primeiro da América Latina a implementar o A-CDM, possibilitando o compartilhamento de dados entre companhias aéreas, prestadores de serviços de assistência em terra e ATC¹⁵⁵. A adoção regional pode avançar se os aeroportos e as companhias aéreas estabelecerem processos claros de CDM, se comprometerem com o compartilhamento de dados e o treinamento conjunto e implantarem centros de operações aeroportuárias focados na eficiência. O A-CDM também pode se integrar ao ATCO CDM (ver Seção 4.5.4.3), exigindo coordenação regional. Em um cenário ambicioso, o A-CDM poderia abranger aeroportos que movimentam 25% dos voos internacionais da América Latina e do Caribe até 2030 e 50% até 2040. Este estudo estima uma redução de 7% nos tempos de taxiamento, observando que o A-CDM também permite outras melhorias operacionais.

Responsabilidade: **Os aeroportos** lideram os centros de operações aeroportuárias e o compartilhamento de dados; **os ANSPs** integram os marcos do ATC; **as companhias aéreas** fornecem dados precisos de TOBT/TSAT e cumprem as janelas de tempo de decolagem calculadas.

¹⁵³ <https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making>

¹⁵⁴ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf>

¹⁵⁵ <https://www.sita.aero/pressroom/news-releases/el-dorado-becomes-first-airport-in-latin-america-to-implement-a-cdm-system/>

4.4.3.1 Rebocadores elétricos

Os rebocadores elétricos são tratores de reboque especializados que permitem que as aeronaves taxiem sem usar seus motores a jato. Um exemplo notável é o TaxiBot, que foi desenvolvido em 2009 pela Israel Aerospace Industries (IAI) em parceria com a TLD, uma empresa de equipamentos de serviços em solo, e entrou em serviço em 2014 com a Lufthansa no Aeroporto de Frankfurt¹⁵⁶. De acordo com a Lufthansa, o uso do TaxiBot pode economizar cerca de 50–100 kg de combustível por voo do Boeing 737¹⁵⁷. Na Índia, o TaxiBot está em uso comercial desde 2018 e agora está implantado em vários aeroportos. Em Delhi, as operações do A320 e do 737 economizam cerca de 532 kg de CO₂ por aeronave para um reboque de 14 minutos com o TaxiBot¹⁵⁸. Na Europa, o TaxiBot está sendo testado no âmbito da iniciativa Highly Efficient Green Operations (HERON) do SESAR, com a adoção em larga escala projetada para reduzir o consumo de combustível em até 50% e em até 85% em rotas de taxiamento mais longas¹⁵⁹. Embora a TLD tenha anunciado planos para introduzir o TaxiBot no Brasil em 2015, não foram divulgadas atualizações adicionais¹⁶⁰.

Atualmente, o TaxiBot é certificado para as famílias A320 e 737, com uma versão para aeronaves widebody planejada e uma versão totalmente elétrica prevista para 2026. A Destinations 2050 estima que um rebocador elétrico para aeronaves narrowbody custe cerca de € 1,4 milhão, com as versões para aeronaves widebody custando aproximadamente o dobro. Supondo três minutos para acoplar, dois para desacoplar e seis horas de uso diário, a maioria dos aeroportos precisaria de cinco unidades ou menos, enquanto os principais hubs poderiam exigir mais de 80¹⁶¹. Esses números destacam a escala de investimento em infraestrutura e planejamento necessários para a adoção generalizada na ALC, para a qual os aeroportos e prestadores de serviços de assistência em terra provavelmente seriam os principais responsáveis pelos custos.

O uso generalizado de rebocadores elétricos na ALC exigirá investimento coordenado e apoio político. Os aeroportos e prestadores de serviços de assistência em solo devem financiar a aquisição de rebocadores elétricos e infraestrutura de apoio, como estações de recarga e instalações de manutenção, enquanto os governos podem acelerar a adoção por meio de incentivos financeiros e programas de financiamento verde. As companhias aéreas precisam incorporar as operações com rebocadores elétricos em seus procedimentos e trabalhar com os aeroportos para otimizar os processos de turnaround. A adoção inicial pode começar com programas-piloto nos principais hubs, permitindo que as partes interessadas testem as operações, treinem tripulações e coletem dados de desempenho para construir um forte caso de negócios para uma implantação mais ampla.

Como os rebocadores elétricos oferecem mais economia de combustível do que o SET, espera-se que sejam preferidos. Em um cenário ambicioso, a adoção poderia atingir 10% para aeronaves narrowbody até 2030 e 80% até 2050. Para aeronaves widebody, a adoção é improvável antes de 2030, mas poderia subir para 60% até 2050. A implementação total do cenário ambicioso é semelhante ao LTAG da OACI, enquanto o cenário de linha de base se alinha estreitamente com o feedback das partes interessadas.

Funções sugeridas: **Aeroportos/operadores de assistência** prestam apoio a rebocadores/carregamento; **Formuladores de políticas** oferecem financiamento verde e incentivos; **Companhias aéreas** ajustam os processos de turnaround para integrar as operações de rebocadores e participam de projetos-piloto de viabilidade comercial.

¹⁵⁶ <https://taxibot-international.com/>

¹⁵⁷ <https://taxibot-international.com/2017/10/09/iais-taxibot-obtained-faa-certification-for-the-Boeing-737-family/>

¹⁵⁸ <https://www.tld-group.com/technologies/taxibot/>

¹⁵⁹ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2025-07-taxibots-spool-up-as-project-heron-winds-down>

¹⁶⁰ <https://airconnected.com.br/releases/novidade-do-tld-group-em-equipamentos-aeroportuarios-taxibot-chega-em-breve-ao-pais/>

¹⁶¹ <https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2023/03/The-Price-of-Net-Zero-Report.pdf>

4.4.3.4 Subresultados de taxiamento eficiente

Tabela 29: Implementação de taxiamento eficiente e economias

Melhoria	Economias de Implementação de combustível (%) ¹⁶²	linha de base (%)	Métrica	2030 (%) (Baixa, Alta)	2040 (%) (Baixa, Alta)	2050 (%) (Baixa, Alta)
SET	NB: 2,77 Banco Mundial: 0,85	22	Implementação adicional	13 (8, 18)	14,1 (18, 10,2)	8,6 (28, -10,9)
			Redução de combustível em toda a frota	0,28 (0,17, 0,38)	0,32 (0,39, 0,26)	0,18 (0,59 -0,2)
A-CDM	NB: 0,45 WB: 0,15	0	Implementação adicional	15 (5, 25)	30 (10, 50)	45 (20, 70)
			Redução de combustível em toda a frota	0,05 (0,02 0,09)	0,11 (0,04, 0,18)	0,16 (0,07, 0,25)
Rebocadores elétricos	NB: 3,2-5,5 WB: 1,1-1,9	0	Implementação adicional	4,7 (0, 9,5)	33,6 (0,95, 57,8)	49,7 (20,5, 78,9)
			Redução de combustível em toda a frota	0,15 (0, 0,37)	1,06 (0,22, 2,3)	1,65 (0,54, 3,22)
Redução de combustível em toda a frota				0,5 (0,2, 0,8)	1,5 (0,6, 2,7)	2,0 (1,2, 3,3)

4.4.4 Manutenção em solo

A manutenção em solo refere-se a ações de rotina que mantêm o desempenho do motor e da estrutura da aeronave para minimizar a queima de combustível. Essas medidas incluem, entre outras, lavagem de motores na asa, reparo ou substituição de pás e limpeza externa para reduzir o arrasto. Essas medidas evitam a degradação do desempenho que aumenta o consumo de combustível. Estudos de caso mostram benefícios significativos. O programa EcoPower de lavagem de motores da Pratt & Whitney relata reduções do consumo de combustível de até 1,2% por lavagem, e a Southwest Airlines economizou mais de 9 milhões de galões de combustível e evitou cerca de 90.000 toneladas de CO₂ desde 2006¹⁶³.

A LTAG estima que as reduções de emissões decorrentes de melhorias na manutenção em solo estejam entre 0,2% e 1,9% por voo, e que sua implementação seja de 30% em 2020, 50% em 2030, 70% em 2040 e 100% em 2050. As companhias aéreas da região da ALC estimam uma implementação ligeiramente atrasada em relação a esses números até 2040, mas ela pode ser acelerada por meio de investimento das companhias aéreas em procedimentos de manutenção.

Responsabilidade: As companhias aéreas e as empresas de manutenção, reparo e revisão (MRO) planejam e executam os programas; **a pesquisa** identifica mecanismos eficazes.

¹⁶² NB: Aeronaves Narrowbody; WB: Widebody

¹⁶³ <https://carbonoffsetsdaily.com/news-channels/usa/southwest-airlines-saves-millions-on-fuel-and-reduces-co2-emissions-withpratt-whitney-ecopowerr-engine-wash-6787.htm>

4.4.5 Resultados das operações aeroportuárias e em solo

Tabela 30: Implementação e economia nas operações aeroportuárias e em solo

Melhoria	Economias de combustível (%) (Baixa, Alta)	Implementação de linha de base (%)	Métrica	2030 (%) (Baixa, Alta)	2040 (%) (Baixa, Alta)	2050 (%) (Baixa, Alta)
Redução do uso de APU	0,96	10	Implementação adicional	20 (10, 30)	45 (30, 60)	60 (40, 80)
			Redução de combustível em toda a frota	0,19 (0,1, 0,29)	0,43 (0,29, 0,58)	0,58 (0,38, 0,77)
Táxi eficiente	N/A	N/A	Redução de combustível em toda a frota	0,5 (0,2, 0,8)	1,5 (0,6, 2,7)	2,0 (1,2, 3,3)
Manutenção em solo	1,05 (0,2, 1,9)	25	Implementação adicional	20 (15, 25)	45 (45, 45)	75 (75, 75)
			Redução de combustível em toda a frota	0,21 (0,03, 0,48)	0,47 (0,09, 0,86)	0,79 (0,15, 1,43)
Redução de combustível em toda a frota				0,88 (0,32, 1,60)	2,40 (1,02, 4,17)	3,36 (1,74, 5,45)

Cenário ambicioso: A região da ALC acelera o progresso se aproveitando de fatores como um forte apoio político, investimento coordenado e integração digital. Os aeroportos ampliam a disponibilidade de AGES e PCA e investem na infraestrutura de rebocadores elétricos, enquanto as companhias aéreas se comprometem a utilizar esses sistemas por meio de contratos de offtake. A adoção do SET é otimizada por meio de tecnologia, programas comportamentais e melhorias processuais, e a implantação de rebocadores elétricos nos principais hubs. O A-CDM torna-se padrão em grandes aeroportos, apoiado por centros de operações aeroportuárias e um compartilhamento de dados robusto. Os reguladores aplicam limites de tempo para APUs, incentivam a energia em solo de baixa emissão e oferecem financiamento verde para rebocadores elétricos, enquanto os fornecedores de tecnologia oferecem AGES, rebocadores elétricos e plataformas digitais com custo-efetividade para otimização do turnaround. Este cenário reflete a colaboração total do setor e a liderança política para alcançar ganhos de eficiência máximos.

Cenário intermediário: O progresso é constante, mas desigual. Os aeroportos expandem gradualmente os AGES e o PCA, mas o investimento em rebocadores elétricos permanece limitado. As companhias aéreas adotam amplamente o SET, mas adiam a integração em larga escala de rebocadores elétricos devido a lacunas de custo e infraestrutura, e o A-CDM é implementado apenas em alguns hubs. Os reguladores introduzem algumas restrições e incentivos para APUs, mas as medidas carecem de consistência em toda a região. As companhias aéreas e os aeroportos colaboram em treinamento e compartilhamento de dados, mas, sem políticas ou financiamento robustos, a adoção de tecnologias avançadas permanece lenta. Ganhos de eficiência são alcançados, mas um potencial significativo permanece inexplorado.

Cenário conservador: a adoção permanece mínima devido à fraca ação regulatória e ao investimento limitado. Algumas operadoras privadas continuam a implementar AGES e PCA, mas os altos custos da energia renovável tornam as GPUs a diesel mais atraentes, retardando a transição para energia em solo de baixa emissão. As companhias aéreas implementam o SET de forma inconsistente, e os rebocadores elétricos continuam praticamente ausentes. O A-CDM é implantado em apenas alguns aeroportos. Os reguladores não conseguem fazer cumprir os limites de APU nem oferecer incentivos significativos, e os fornecedores de tecnologia veem pouca demanda por soluções avançadas. As reduções do consumo de combustível são marginais, e a região corre o risco de ficar para trás em relação às melhores práticas globais.

4.5 Otimização do perfil de voo

4.5.1 Introdução

A otimização do perfil de voo concentra-se em melhorar a eficiência das trajetórias das aeronaves para reduzir a queima de combustível e as emissões. Envolve partes interessadas, incluindo prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs), reguladores e companhias aéreas, trabalhando em conjunto para minimizar ineficiências na subida, cruzeiro e descida. Um exemplo notável é a métrica NATS 3Di do Reino Unido, que mede a eficiência do espaço aéreo comparando as rotas de voo reais com uma trajetória ideal baseada em rotas ortodrômicas e níveis de voo solicitados¹⁶⁴. A Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido (CAA) regula esse sistema e incentiva o desempenho vinculando recompensas ou penalidades financeiras às pontuações 3Di, com impactos potenciais equivalentes a 1% da receita anual da NATS. A EUROCONTROL aplica uma abordagem semelhante por meio de seu sistema de avaliação de desempenho, que monitora a eficiência de voo em todo o espaço aéreo europeu para apoiar a otimização contínua e reduzir as emissões de CO₂ relacionadas às aeronaves.

4.5.2 Otimização de subida e descida

As fases de subida e descida oferecem oportunidades significativas para reduzir a queima de combustível por meio de perfis e procedimentos otimizados. Operações otimizadas de subida (CCO) e descida (CDO) e pousos com flaps reduzidos minimizam os nivelamentos, reduzem o arrasto e melhoram a eficiência. Essas medidas dependem tanto da tecnologia quanto do comportamento, exigindo recursos avançados de navegação, coordenação do ATC e adesão consistente dos pilotos, apoiada por treinamento e monitoramento.

4.5.2.1 Operações otimizadas de subida e descida

As CCO e CDO permitem que a aeronave suba e desça sem nivelamentos desnecessários, reduzindo as mudanças de empuxo e o tempo em altitudes ineficientes. O Top of Descent otimizado garante que a descida comece no ponto mais eficiente com base no desempenho e nas condições do vento.

O CCO e o CDO são amplamente utilizados em todo o mundo. Um estudo da EUROCONTROL de 2017 constatou que 94% dos voos na Europa utilizam o CCO até o FL100 e 74% até o topo da subida, enquanto 41% utilizam o CDO a partir do FL75 e 24% a partir do topo da descida¹⁶⁵. Na região SAM da ICAO, as taxas foram muito mais baixas, com 34% para o CDO e 26% para o CCO, abaixo da meta de 40% estabelecida pela Declaração de Bogotá¹⁶⁶. A navegação baseada em desempenho (PBN) é um facilitador essencial do CCO e do CDO, pois permite que as aeronaves sigam trajetórias laterais e verticais precisas, reduzindo a necessidade de nivelamentos¹⁶⁷. Na região SAM, a cobertura de PBN atingiu 71% para partidas e 55,7% para chegadas em 2024, um aumento em relação aos 66% e 50,7% em 2019¹⁶⁸.

Estudos mostram que o CDO oferece maiores benefícios do que o CCO. A EUROCONTROL estimou que voos que não utilizam o CDO poderiam economizar 46 kg de combustível por voo, em comparação com 15 kg para o CCO¹⁶⁹. Como parte de seu Relatório Ambiental de 2022, a ICAO conduziu um estudo de subida e descida por região, que quantificou a queima de combustível decorrente de subidas e descidas ineficientes com base na média de todos os voos nas respectivas regiões (ver *Tabela 31*)¹⁷⁰. Os resultados mostram que as economias potenciais (ou seja, a ineficiência) nas regiões do Caribe e da América do Sul são significativamente menores do que a média global.

Tabela 31: Potencial médio de economia proveniente de CDO e CCO por região da ICAO

Região da ICAO	Excesso de combustível CDO (kg)	Excesso de combustível CCO (kg)
Ásia e Pacífico (APAC)	47	13
África Oriental e Austral (ESAF)	23	2
Europa e Atlântico Norte (EUR/NAT)	37	4

¹⁶⁴ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg138-140.pdf

¹⁶⁵ <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

¹⁶⁶ https://www2023.icao.int/SAM/Documents/2017-RAAC15/RAAC15_WP08.pdf

¹⁶⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261925001205>

¹⁶⁸ <https://www2023.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/GREPECAS21/GRP21WP10.pdf>

¹⁶⁹ <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>

¹⁷⁰ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report-2022-F4.pdf>

Oriente Médio (MID)	60	9
América do Norte (NAM)	43	5
Caribe / América do Sul (CAR/SAM)	24	3
África Ocidental e Central (WACAF)	20	1
Total	41	7

O monitoramento de desempenho tem se mostrado eficaz na melhoria da conformidade. Por exemplo, a NATS no Reino Unido relata que o desempenho da aproximação em descida contínua (medido a partir de cerca de 6.000 pés) melhorou de 56% para 76% entre 2006 e 2016 por meio de monitoramento e feedback¹⁷¹. A EUROCONTROL publica métricas de CDO por país, companhia aérea e aeroporto, mostrando variações significativas: em 2024, a Estônia atingiu 71,5% de CDO a partir do início da descida, em comparação com 13,1% na Alemanha, com uma média de 33%¹⁷². As companhias aéreas também podem se beneficiar do monitoramento. A Wizz Air, em colaboração com a Storkjet e a Universidade de Tecnologia da Silésia, introduziu um indicador-chave de desempenho (KPI) para o consumo de combustível na descida e forneceu feedback mensal aos pilotos¹⁷³. Isso reduziu o consumo total de combustível na descida em 8% no primeiro ano, impulsionado por uma melhor conformidade com a velocidade e estimativas mais precisas do início da descida. No entanto, uma pesquisa de 2019 constatou que menos de 30% das companhias aéreas medem seu próprio desempenho em CCO/CDO¹⁷⁴.

Ganhos adicionais de eficiência em subida e descida podem ser alcançados por meio de procedimentos avançados de navegação. Os procedimentos avançados de desempenho de navegação exigido (RNP), parte da estrutura PBN, permitem que as aeronaves sigam trajetórias altamente precisas com monitoramento de desempenho e alertas a bordo. Essa precisão reduz as milhas percorridas e contribui para o CCO e o CDO. Em Santiago, foram introduzidas partidas RNP avançadas para fornecer trajetórias laterais e verticais precisas e, quando combinadas com aproximações paralelas independentes em condições visuais, essas mudanças proporcionaram uma economia anual estimada de 380 toneladas de combustível¹⁷⁵. Da mesma forma, nos aeroportos de Concepción e Atacama, as aproximações RNP avançadas encurtaram as trajetórias de chegada e melhoraram a consistência do topo da descida, resultando em uma economia anual estimada de 192 toneladas de combustível para uma companhia aérea.

Para a região da ALC (América Latina e Caribe), as melhorias potenciais da ICAO são utilizadas como linha de base para economias potenciais. Como a análise da ICAO já leva em conta a combinação atual de voos otimizados e não otimizados, este estudo define uma implementação de linha de base de 0% em 2019 para fins de modelagem, mesmo que as companhias aéreas já apliquem práticas de otimização de subida e descida. Embora seja improvável que o CCO e o CDO sejam totalmente otimizados devido ao relevo, às restrições do espaço aéreo e à complexidade do tráfego, melhorias significativas são possíveis. Estas dependem da expansão da cobertura PBN, da implantação de ferramentas avançadas de gerenciamento de voo e trajetória e do fortalecimento do monitoramento de desempenho. O feedback regular às companhias aéreas e aos pilotos, apoiado por KPIs claros e análises pós-operações, provou ser eficaz em outras regiões e deve ser ampliado na ALC. Este estudo pressupõe que, das economias potenciais restantes, 15% adicionais podem ser alcançados a cada década. Para o CDO, as economias médias da região da NAM são utilizadas para voos que pousam fora da região da ALC.

Modelo de implementação: os ANSPs habilitam procedimentos PBN e RNP e fornecem autorizações; as companhias aéreas integram esses procedimentos aos SOPs, ampliam o treinamento de pilotos e implementam programas de monitoramento de desempenho e de otimização de desempenho; os reguladores estabelecem metas de desempenho e garantem a transparência.

¹⁷¹ <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5881.pdf>

¹⁷² <https://ansperformance.eu/efficiency/vfe/>

¹⁷³ <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5881.pdf>

¹⁷⁴ https://www2023.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg145-152.pdf

¹⁷⁵ IATA

4.5.2.2 Flaps reduzidos

A aterrissagem com flaps reduzidos é um procedimento em que a aeronave aterrissa utilizando uma configuração mais baixa dos flaps quando as condições permitem. Isso reduz o arrasto aerodinâmico na aproximação final, exigindo menos impulso do motor e diminuindo a queima de combustível. O procedimento é utilizado apenas quando o comprimento da pista, as condições meteorológicas e o peso da aeronave permitem, e não compromete a segurança.

A experiência do setor sugere que as aterrissagens com flaps reduzidos poupam cerca de 7 a 10 kg de combustível por aterrissagem para uma aeronave narrowbody e até 25 kg para uma aeronave widebody¹⁷⁶. Uma análise envolvendo a Airbus constatou que a Wizz Air economiza cerca de 15 kg de combustível por aproximação utilizando a aterrissagem com flaps reduzidos e lidera o setor em termos de adoção¹⁷⁷. Embora haja informações públicas limitadas sobre a configuração de flaps reduzidos na ALC, há indícios de que ela tenha sido implementada com sucesso por algumas companhias aéreas.

Acelerar a adoção da configuração de flaps reduzidos requer procedimentos padronizados em todos os aeroportos elegíveis, apoiados por alertas do Electronic Flight Bag, treinamento de pilotos, integração de SOPs e monitoramento de desempenho com feedback. Em um cenário ambicioso, essas medidas são implementadas em toda a região até 2040, enquanto em um cenário conservador, a adoção permanece limitada a algumas companhias aéreas e aeroportos. Embora a taxa atual de uso de procedimentos com flaps reduzidos não seja conhecida na ALC, presume-se que seja de cerca de 30%, próxima da taxa máxima permitida pela tecnologia atual. Em um cenário ambicioso, isso poderia aumentar em cerca de 10% por década.

Viabilização: **As companhias aéreas** são responsáveis por desenvolver e atualizar os SOPs, oferecer treinamento direcionado aos pilotos e implementar programas de monitoramento de desempenho; **os aeroportos** dão suporte publicando procedimentos locais e garantindo que as condições das pistas permitam operações com flaps reduzidos.

4.5.2.3 Subresultados das operações de subida e descida

Tabela 32: Implementação e economia nas operações de subida e descida

Melhoria	Economias de Implementação de combustível (%)	linha de base (%)	Métrica	2030 (%) (Baixa, Alta)	2040 (%) (Baixa, Alta)	2050 (%) (Baixa, Alta)
CCO	0,05	0	Implementação adicional	10 (5, 15)	20 (10, 30)	30 (15, 45)
			Redução de combustível em toda a frota	0,00 (0,00, 0,01)	0,01 (0, 0,01)	0,01 (0,01, 0,02)
CDO	0,44	0	Implementação adicional	10 (5, 15)	20 (10, 30)	30 (15, 45)
			Redução de combustível em toda a frota	0,04 (0,02 0,07)	0,09 (0,04, 0,13)	0,13 (0,07, 0,2)
Retalhos reduzidos	0,16 (0,13, 0,18)	30	Implementação adicional	5 (0, 10)	12,5 (5, 20)	20 (10, 30)
			Redução de combustível em toda a frota	0,01 (0, 0,02)	0,02 (0,01, 0,04)	0,03 (0,01, 0,05)
Redução de combustível em toda a frota				0,06 (0,02, 0,09)	0,12 (0,06, 0,18)	0,18 (0,09, 0,27)

¹⁷⁶ <https://blog.openairlines.com/what-you-need-to-know-about-reduced-landing-flaps>

¹⁷⁷ <https://www.wizzair.com/en-gb/information-and-services/about-us/news/2020/10/29/wizz-air-develops-new-fuel-saving-initiatives-in-commitment-to-reducing-emissions>

4.5.3 Eficiência vertical em rota

A eficiência vertical em rota significa reduzir o tempo gasto voando abaixo do nível de voo ideal. Quando a aeronave não consegue atingir ou manter altitudes eficientes devido a normas de separação, restrições de tráfego ou atrasos nas comunicações, a queima de combustível e as emissões aumentam. A análise da ICAO de 2025 sobre a eficiência de voo vertical (VFE-ER) mostra que a queima de combustível adicional aumenta com a duração da etapa, passando de 49,7 kg para voos com menos de 500 nm a 267,6 kg para voos com mais de 6.500 nm¹⁷⁸. A média global de ineficiência foi de 63,2 kg por voo, destacando uma grande oportunidade de melhoria.

4.5.3.1 Altimetria geométrica e RVSM Fase 2

A altimetria geométrica utiliza medições baseadas em GNSS para determinar a altitude verdadeira, permitindo uma separação vertical mais precisa do que os sistemas barométricos. Ela sustenta a Fase 2 da redução dos mínimos de separação vertical (RVSM), que propõe reduzir a separação mínima de 1.000 pés para 500 pés, permitindo que as aeronaves voem mais próximas dos perfis ideais. O RVSM original, que reduziu a separação de 2.000 pés para 1.000 pés, foi implementado entre 1997 e 2005 e reduziu a queima de combustível na Europa em 1,6–2,3%¹⁷⁹. Espera-se que as economias decorrentes da Fase 2 do RVSM sejam semelhantes.

Atualmente, a Fase 2 do RVSM permanece na fase de concepção e validação no âmbito dos programas SESAR e ICAO, com testes focados em segurança, turbulência de esteira e padrões de aviãoica. A implementação exigirá padronização global, equipamentos GNSS e alinhamento regulatório. Em um cenário ambicioso, a adoção antecipada da altimetria geométrica e dos procedimentos da Fase 2 do RVSM poderia começar em corredores selecionados até a década de 2040, apoiada pela modernização dos ANSP e por programas de equipamento das companhias aéreas. Um cenário conservador pressupõe que não haverá adoção da Fase 2 do RVSM dentro do horizonte do estudo, limitando os ganhos a melhorias procedimentais.

Pré-requisitos: os ANSPs e reguladores lideram o desenvolvimento de padrões e a validação de segurança; **a pesquisa** apoia testes de desempenho do sistema; **as companhias aéreas** se preparam para futuras atualizações de capacidade e integração de procedimentos.

4.5.3.2 ITP e comunicações VHF baseadas em satélite

A otimização vertical oceânica é essencial para voos de longo curso que cruzam espaço aéreo não vigiado, onde a separação procedural frequentemente obriga as aeronaves a voar abaixo de sua altitude ideal por longos períodos. Dois facilitadores-chave, o procedimento in-trail (ITP) e as comunicações de frequência muito alta (VHF) baseadas em satélite, foram projetados para superar essas restrições e possibilitar um gerenciamento de altitude mais eficiente.

O ITP é uma aplicação de transmissão de vigilância dependente automática (ADS-B) que permite que uma aeronave suba ou desça pela altitude de outra aeronave na mesma rota usando separação baseada na distância¹⁸⁰. Testes da Administração Federal de Aviação (FAA) nas regiões de informação de voo (FIRs) de Oakland e Anchorage relataram uma economia média de 573 lb (≈260 kg) por voo para aeronaves equipadas com ITP, mesmo sem manobras, graças a uma melhor consciência situacional e mudanças de altitude antecipadas.

O VHF via satélite, demonstrado no âmbito do programa ECHOES do SESAR, fornece conectividade de voz e dados sobre regiões oceânicas e remotas¹⁸¹. O projeto ECHOES realizou a primeira comunicação de voz VHF via satélite entre um piloto e um centro de ATC sobre o Atlântico em 2025, confirmando a viabilidade¹⁸². Esses testes, envolvendo a Iberia, a Air Europa e a TAP Air Portugal, demonstraram que o VHF via satélite pode suportar separação reduzida e gestão dinâmica de altitude em corredores oceânicos. O SESAR anunciou que a próxima fase de testes incluirá o corredor do Atlântico Sul em parceria com o Brasil, um passo crítico para as operações na ALC.

Com base no feedback das companhias aéreas, este estudo pressupõe uma taxa de implementação inicial do ITP de 25 % em 2020, aumentando para entre 80 e 90 % até 2050. Essas economias são aplicadas apenas a voos de aeronaves widebody, usados como proxy para voos de longo curso, onde os procedimentos do ITP são relevantes. Os benefícios do VHF baseado em satélite não são quantificados separadamente nesta análise devido à limitação

¹⁷⁸ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/2025/Envreport2025_38.pdf

¹⁷⁹ Reduced Vertical Separation Minima (RVSM) | SKYbrary Aviation Safety; <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/awards2021/R-WAKE%20and%20GEOMETRIC%20ALTIMETRY.pdf>

¹⁸⁰ https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb/pilot/itp

¹⁸¹ <https://www.sesar.eu/news/testing-get-underway-2025-low-orbit-satellite-communication-technology>

¹⁸² https://www.enaire.es/en_GB/2025_06_24/ndp_gb_startical_successfully_launched_second_satellite_jod2

de dados, mas a tecnologia é reconhecida como um facilitador essencial para atingir esses níveis de adoção. Alcançar uma alta taxa de adoção requer que as aeronaves sejam equipadas com ADS-B In, bem como atualizações na gestão do tráfego aéreo para processar solicitações de ITP. Os requisitos de investimento são significativos. O LTAG da OACI estima que as atualizações do sistema de gestão do tráfego aéreo oceânico para o ITP custarão aproximadamente US\$ 3.000.000 por sistema e, para as companhias aéreas, o equipamento e a ativação do ADS-B In são estimados em US\$ 15.000 por aeronave¹⁸³. Esses números destacam a necessidade de investimento coordenado por parte dos ANSPs, companhias aéreas e fornecedores de tecnologia para alcançar uma alta taxa de adoção.

Coinvestimento: os ANSPs atualizam os sistemas de gestão do tráfego aéreo; as companhias aéreas equipam-se com ADS-B In e participam de pesquisas e testes; os reguladores coordenam procedimentos entre FIRs; as organizações de pesquisa apoiam a validação de tecnologia, testes operacionais e análise de desempenho.

4.5.3.3 Alterações de altitude para mitigação de rastros de condensação

A mitigação de rastros de condensação envolve ajustar a altitude de cruzeiro para evitar camadas frias e úmidas onde se formam rastros de condensação persistentes, que são um dos principais contribuintes para o impacto climático não CO₂ da aviação. Ao contrário de outras medidas nesta seção, a mitigação de rastros de condensação não economiza combustível; ela aumenta a queima de combustível nos voos ajustados. Estudos e testes indicam que os voos que evitam regiões de formação de rastros de condensação normalmente consomem cerca de 2% a mais de combustível nesses voos ajustados¹⁸⁴.

No entanto, a formação de rastros de condensação é altamente concentrada: pesquisas mostram que cerca de 5% dos voos são responsáveis por 80% do aquecimento relacionado a rastros de condensação¹⁸⁵. Isso significa que estratégias direcionadas podem trazer benefícios climáticos significativos com impacto operacional limitado. No âmbito desses programas direcionados, o aumento estimado no consumo de combustível em toda a frota é de 0,01% a 0,3%, mesmo mitigando uma grande parcela do aquecimento causado por rastros de condensação¹⁸⁶. Neste estudo, essas médias são ajustadas para baixo em 50%, pois os voos de partida da região da ALC são menos propensos a exigir grandes desvios, dado que as áreas mais sensíveis aos rastros de condensação estão concentradas em outras regiões, como o corredor do Atlântico Norte. Apesar da queima de combustível adicional, a mitigação dos rastros de condensação continua sendo uma medida climática forte e, neste estudo, um cenário de implementação ambicioso é tratado como o caso alto, refletindo sua provável adoção juntamente com outras melhorias operacionais importantes.

Estrutura de decisão: A pesquisa fornece previsões de rastros de condensação e métricas de impacto; os ANSPs/reguladores possibilitam flexibilidade tática; as companhias aéreas aplicam ajustes de altitude direcionados.

4.5.3.4 Resultados parciais sobre eficiência vertical em rota

Tabela 33: Implementação e economias decorrentes de melhorias verticais em rota

Melhoria	Economias de Implementação de combustível (%)	linha de base (%)	Métrica	2030 (%) (Baixa, Alta)	2040 (%) (Baixa, Alta)	2050 (%) (Baixa, Alta)
RVSM	1,95 (1,60, 2,30)	0	Implementação adicional	0	10 (0, 20)	15 (0, 30)
			Redução de combustível em toda a frota	0	0,20 (0, 0,46)	0,29 (0, 0,69)
ITP	0,76 (0,65, 0,87)	8	Implementação adicional	6,33 (0, 12,65)	13,45 (7,91, 18,98)	20,56 (17,4, 23,73)
			Redução de	0,05	0,10	0,16

¹⁸³ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM4.pdf

¹⁸⁴ <https://blog.google/technology/ai/ai-airlines-contrails-climate-change/>

¹⁸⁵ <https://notebook.contrails.org/contrails-org-why-its-time-to-change-course-for-the-climate/>

¹⁸⁶ <https://www.transportenvironment.org/articles/contrail-avoidance>

			combustível em toda a frota	(0, 0,11)	(0,05, 0,17)	(0,11, 0,21)
Mitigação de rastros de condensação	-0,08 (-0,01, -0,15)	0	Implementação adicional	5 (0, 10)	20 (10, 30)	50 (20, 80)
			Redução de combustível em toda a frota	0,00 (0, -0,02)	-0,02 (0, -0,05)	-0,04 (0, -0,12)
			Redução de combustível em toda a frota	0,04 (0, 0,10)	0,28 (0,05, 0,58)	0,41 (0,11, 0,78)

4.5.4 Eficiência horizontal

Um estudo da ICAO sobre o tráfego de 2017 estimou a eficiência de voo horizontal em 94–98% por região, com a América do Sul e a ESAF perto de 98% e o Caribe pouco acima de 97%¹⁸⁷. Isso mostra que a região da ALC já opera com alta eficiência horizontal; no entanto, medidas específicas, como modernização do espaço aéreo, estruturas tarifárias harmonizadas, gestão de fluxo colaborativa e ferramentas de separação dinâmica, ainda podem proporcionar ganhos incrementais. Mesmo em cenários ambiciosos, uma eficiência de 100% é irrealista devido a restrições persistentes, como variações climáticas, reservas temporárias de espaço aéreo, limites do terreno e requisitos de sequenciamento próximos a aeroportos.

4.5.4.1 Modernização do Espaço Aéreo

Tradicionalmente, os voos seguiam rotas aéreas fixas, o que frequentemente causava roteiros ineficientes e maior queima de combustível. O espaço aéreo de rotas livres (FRA) permite que as companhias aéreas planejem trajetórias diretas entre pontos de entrada e saída definidos quando o espaço aéreo estiver disponível. O FRA proporcionou ganhos significativos na Europa, reduzindo a extensão média das rotas de 3,58% em 2007 para 1,59% em 2024¹⁸⁸. A EUROCONTROL estima que o FRA agora cobre mais de 75% do espaço aéreo europeu e que a implementação total poderia economizar 6 Mt de combustível.

Na região da ALC, no âmbito do projeto Rede de Intercâmbio de Dados de ATFM da CANSO para as Américas (CADENA), foram realizados testes de otimização ponta a ponta em quatro rotas entre os EUA e a América Latina durante 90 dias¹⁸⁹. A economia, quando extrapolada para um ano (uma aeronave, cinco voos semanais), foi substancial: Atlanta–Lima: 845.360 kg de CO₂, Atlanta–Buenos Aires: 444.590 kg de CO₂, Miami–Piarco: 271.934 kg de CO₂, e Houston–Puerto Vallarta: 307.168 kg de CO₂. No nível de voo, a redução de CO₂ da rota direta de Atlanta–Lima foi estimada em 3.673,73 kg. Além disso, na América Central, o programa “Single Sky” da COCESNA está investindo € 24,6 milhões ao longo de seis anos para padronizar e interconectar sistemas de controle de tráfego aéreo (ATC) em seis estados, melhorando as opções de rota e a resiliência¹⁹⁰.

Mesmo com o FRA, algumas restrições permanecem em vigor para gestão de tráfego ou uso militar, conforme publicado no Documento de Disponibilidade de Rotas (RAD), que define quais rotas estão abertas ou fechadas em horários específicos. Na região da ALC, várias partes interessadas identificaram o espaço aéreo militar não utilizado como uma ineficiência fundamental, embora essa questão não se limite à região da ALC. Um estudo da EUROCONTROL de 2024 constatou que 30–50% do espaço aéreo militar reservado não é efetivamente utilizado. Embora o planejamento militar seja normalmente feito com antecedência, permitindo que as operadoras utilizem rotas ideais, as companhias aéreas costumam apresentar planos de voo com até 10 horas de antecedência, criando uma lacuna. Na França, por exemplo, observou-se que voos contornam o espaço aéreo reservado mesmo fora do horário reservado, resultando em um alongamento adicional da rota de 2 a 4%.

A gestão dinâmica do RAD flexibiliza temporariamente as restrições quando o tráfego e a disponibilidade de pessoal permitem, possibilitando rotas diretas no dia das operações. Testes do SESAR e da EUROCONTROL em 2.500 voos mostraram que a suspensão de restrições selecionadas economizou, em média, 44 kg de combustível

¹⁸⁷ <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB-1.pdf>

¹⁸⁸ [https://www.eurocontrol.int/concept/free-routeairspace#:~:text=Free%20route%20airspace%20\(FRA\)%20is,network%2C%20subject%20to%20airspace%20availability](https://www.eurocontrol.int/concept/free-routeairspace#:~:text=Free%20route%20airspace%20(FRA)%20is,network%2C%20subject%20to%20airspace%20availability)

¹⁸⁹ <https://airspace.canso.org/canso-airspace-magazine-58-2023/planning-the-perfect-flight>

¹⁹⁰ https://www.indracompany.com/sites/default/files/230510_pr_indra_cocesna.pdf

e 138 kg de CO₂ por voo, comprovando que o RAD dinâmico é um complemento eficaz ao FRA¹⁹¹.

Na Colômbia, já estão em andamento esforços para reduzir as ineficiências causadas pelas restrições do espaço aéreo militar. Na sequência da ação da IATA, o espaço aéreo de Palanquero está se tornando mais flexível, o que deverá proporcionar uma economia de combustível média de 117 kg por voo em comparação com a rota tradicional¹⁹².

Uma camada adicional de modernização do espaço aéreo envolve a setorização dinâmica, que otimiza a configuração dos setores de ATC em tempo real com base na demanda de tráfego e na carga de trabalho dos controladores. Sistemas automatizados avaliam continuamente possíveis combinações de setores, propondo configurações que equilibram capacidade e complexidade. Essa abordagem permite que os controladores gerenciem fluxos de tráfego complexos de forma mais eficaz, maximizando os benefícios do FRA e do RAD dinâmico.

Nem todos os esforços de modernização, no entanto, garantem maior eficiência. Um estudo de caso de uma parte interessada da ALTA destacou o espaço aéreo extenso e complexo do Brasil como um desafio específico. As operadoras podiam enviar solicitações de rotas preferenciais para otimizar a eficiência, mas, quando combinadas, algumas integrações na verdade aumentavam a queima de combustível em certas regiões, mesmo que melhorias fossem alcançadas em outros locais. As partes interessadas também observaram que a flexibilidade tática na alteração de rotas preferenciais continua sendo fundamental para maximizar os ganhos de eficiência operacional.

Dada a alta linha de base, os ganhos de eficiência em rota decorrentes da modernização do espaço aéreo na ALC são estimados em 1,0–1,5%. Mesmo com uma implantação ambiciosa, a eficiência de 100% é inatingível devido a fatores inevitáveis, como clima, espaço aéreo militar, terreno e sequenciamento próximo a aeroportos.

Em um cenário de baixa implementação, o progresso se limitaria à cobertura parcial da FRA, restrições estáticas de rota, coordenação transfronteiriça mínima e reconfiguração setorial pouco frequente, com a coordenação civil-militar permanecendo ad hoc e poucas ferramentas de apoio à decisão disponíveis. Um cenário de alta implementação, por outro lado, requer a adoção total da FRA nas principais FIRs, disponibilidade dinâmica de rotas e setorização e em tempo real apoiada por ferramentas automatizadas. Alcançar isso depende de forte apoio institucional e financeiro: investimento em infraestrutura de vigilância e comunicação, políticas harmonizadas entre os ANSPs, aprovações regulatórias e treinamento abrangente dos controladores. Facilitadores adicionais incluem acordos civis-militares estruturados para o uso flexível do espaço aéreo, incentivos baseados em desempenho para os ANSPs e acesso a financiamento verde ou financiamento de bancos de desenvolvimento para compensar os custos. Análises pós-operações transparentes e estruturas de governança regional, como CADENA ou CIIFRA, são essenciais para sustentar melhorias e garantir a prestação de contas.

Responsabilidade: os ANSPs e os reguladores implementam a FRA, o RAD dinâmico e a setorização por meio de acordos transfronteiriços coordenados; **as companhias aéreas** utilizam rotas diretas de forma tática e participam de testes; **os reguladores** facilitam a coordenação civil-militar para desbloquear o espaço aéreo restrito e garantir acordos de uso flexível; **a pesquisa** apoia o projeto do sistema, a análise de desempenho e a validação de conceitos operacionais.

4.5.4.2 Paridade tarifária no espaço aéreo

Ao planejar um voo, as companhias aéreas equilibram a queima de combustível, as condições meteorológicas e as tarifas de uso do espaço aéreo para minimizar os custos operacionais. Grandes diferenças nas tarifas podem influenciar a seleção de rotas e levar a trajetórias mais longas e menos eficientes em termos de combustível. A análise da NASA sobre voos transatlânticos constatou que a queima de combustível extra entre rotas de custo ótimo e rotas de combustível ótimo era de 0,4–1,0 tonelada no sentido leste e de 0,5–0,9 tonelada no sentido oeste¹⁹³. Por exemplo, em um voo Chicago–Londres, a rota que minimiza o consumo de combustível consumiria 500 kg a menos de combustível (55.100 kg contra 55.600 kg), mas incorreria em taxas US\$ 400 mais altas (US\$ 1.800 contra US\$ 1.400), ilustrando como o preço do combustível e as taxas, em conjunto, moldam as decisões de roteamento.

Na região da ALC, as disparidades nas tarifas são gritantes. As companhias aéreas evitam FIRs como Argentina, Brasil e Venezuela, onde as tarifas de rota são de US\$ 1.163, US\$ 919 e US\$ 505 por 1.000 km, em comparação com US\$ 228 no Chile e US\$ 295 no Peru. As taxas domésticas costumam ser muito mais baixas; na Argentina,

¹⁹¹ <https://www.sesar.eu/news/sesar-partners-offer-dynamic-solution-lowering-aviations-carbon-footprint>

¹⁹² IATA

¹⁹³ <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008910/downloads/20160008910.pdf>

as tarifas de rota são de apenas US\$ 4 por 1.000 km, em comparação com US\$ 1.163 para voos internacionais. Esses desequilíbrios levam a desvios que aumentam a queima de combustível e as emissões. Em um cenário pessimista, as tarifas permanecem inalteradas e nenhuma melhoria ocorre. Em um cenário ambicioso, os governos harmonizam as tarifas de rota ou introduzem mecanismos de paridade, permitindo que as companhias aéreas selecionem rotas com combustível otimizado e realizem plenamente essas economias.

Os principais obstáculos à harmonização das taxas incluem a fragmentação regulatória, a dependência de tarifas de sobrevoos como fonte de receita e a ausência de uma estrutura regional de recuperação de custos. Esses problemas podem ser resolvidos por meio de acordos regionais sob a ICAO ou a CANSO, com base em iniciativas como a CADENA e a CIIFRA. Uma abordagem em fases poderia incluir a publicação de referências transparentes, a introdução de limites máximos para as taxas ou corredores de paridade, e vincular as reformas tarifárias a metas ambientais para que os Estados possam acessar financiamento verde ou compensar os impactos nas receitas. A colaboração com companhias aéreas e instituições financeiras pode ajudar a projetar mecanismos neutros em termos de custo, como pooling de receitas ou incentivos ao crescimento do tráfego, para manter a receita do Estado e, ao mesmo tempo, reduzir preços distorcivos. O alinhamento das tarifas de uso do espaço aéreo não é modelado de forma independente neste estudo, mas sim como parte da modernização do espaço aéreo.

Liderança: Os formuladores de políticas harmonizam as tarifas de rota por meio de acordos regionais; os ANSPs fornecem estruturas de custos transparentes.

4.5.4.3 Gestão global de fluxo

Embora o CDM aeroportuário melhore a eficiência, a ATFM (gestão de fluxo de tráfego aéreo) mais ampla, incluindo a ATFM global, é crucial para equilibrar a demanda e a capacidade em toda a rede, reduzindo a espera em voo e melhorando a previsibilidade. Em vez de absorver atrasos no ar, o ATFM os transfere para o solo ou ajusta as trajetórias em rota, onde a queima de combustível é mínima. Isso é apoiado por ferramentas como os CTOT (horários calculados de decolagem), que as aeronaves devem cumprir dentro de uma pequena janela de tolerância, normalmente de -5 a +10 minutos. Ao sequenciar partidas e chegadas com mais precisão, o ATFM ajuda a reduzir o congestionamento em aeroportos movimentados e gargalos em rota em várias FIRs.

Globalmente, os programas de ATFM estão se expandindo. A Autoridade dos Aeroportos da Índia relatou 757 iniciativas de ATFM em 2024, economizando cerca de 32.654 toneladas de combustível e 103.186 toneladas de CO₂ ao reduzir atrasos no ar e melhorar a conformidade com os CTOTs¹⁹⁴. As taxas de conformidade melhoraram de 77% em 2023 para 85% em 2024, atingindo 98% nos últimos meses do ano, demonstrando o valor do envolvimento coordenado das partes interessadas.

Na região da ALC, as companhias aéreas já atrasam as partidas em terra quando se prevê atrasos nas chegadas, e a formalização desses procedimentos por meio de programas regionais ou de ATFM entre FIRs poderia proporcionar ganhos de eficiência mensuráveis. O LTAG estima que a economia poderia variar entre 0,02% e 0,053% por voo. Para uma implementação bem-sucedida, é necessária uma estrutura regional coordenada de ATFM, com equilíbrio compartilhado entre demanda e capacidade, procedimentos harmonizados e estrita conformidade com o CTOT. As lições do programa de ATFM da Índia mostram que a conformidade melhora quando o CTOT é integrado às autorizações de partida, os slots revisados são coordenados de forma proativa e os slots são entregues mais cedo no turnaround. Para alcançar isso, é necessário investir na troca de dados em tempo real, em ferramentas de apoio à decisão e na integração de dados operacionais das companhias aéreas, com o apoio do alinhamento regulatório e de acordos transfronteiriços. Com base no feedback das partes interessadas, a implementação global do ATFM poderia atingir entre 50% e 100% até 2050.

Conformidade: os ANSPs operam o ATFM; as companhias aéreas/aeroportos integram os CTOTs nos turnarounds; os reguladores harmonizam os procedimentos entre as FIRs.

4.5.4.4 Suporte otimizado à entrega de pistas e redução da separação entre pares

O congestionamento nos principais aeroportos frequentemente leva a longas filas de taxiamento para partidas e espera em voo para chegadas, aumentando a queima de combustível e as emissões. Essas ineficiências podem decorrer de regras de espaçamento baseadas em categorias fixas de turbulência de esteira e mínimos de separação estáticos. Ferramentas modernas permitem a otimização dinâmica das separações entre aeronaves, mantendo a segurança e, ao mesmo tempo, melhorando a eficiência.

¹⁹⁴ <https://www.atfmaai.aero/portal/sites/default/files/CATFM%20Post%20ops%20Annual%20Report%202024.pdf>

Para partidas, a Entrega Otimizada de Separação (OSD) calcula o espaçamento entre aeronaves em tempo real, utilizando modelos avançados de turbulência de esteira, como o RECAT-EU e a abordagem de Separação em Pares¹⁹⁵. Em vez de aplicar uma regra uniforme a todas as aeronaves, a OSD determina a distância mínima de segurança para cada par e se ajusta a fatores como ventos cruzados. Testes do SESAR nos principais aeroportos europeus indicam que o OSD pode reduzir as filas de decolagem, aumentar a previsibilidade e reduzir a queima de combustível durante a rolagem em cerca de 6%.

No que diz respeito às chegadas, as ferramentas de Entrega Otimizada de Pista (ORD) permitem que os controladores gerenciem o espaçamento na aproximação final com maior precisão. No aeroporto de Londres Heathrow, a NATS comparou as emissões médias de CO₂ por aeronave para os períodos de janeiro a maio de 2024 e janeiro a maio de 2025, que são antes e depois da introdução da Separação por Pares¹⁹⁶. Os dados mostraram uma redução aproximada de 240 kg de CO₂ por aeronave, sugerindo uma melhoria potencial na eficiência operacional, mantendo chegadas seguras e ordenadas.

Na região da ALC, várias melhorias na separação já foram atingidas graças a mudanças nos procedimentos. No aeroporto de São Paulo Guarulhos, a dependência entre chegadas e partidas em pistas paralelas com espaçamento reduzido exigia separações prolongadas, causando atrasos e queima adicional de combustível¹⁹⁷. Em 2018, foram introduzidas operações segregadas em condições visuais, permitindo chegadas independentes em uma pista e partidas na outra. Isso reduziu a separação de aproximação de 5 NM para 3 NM e o espaçamento de partida para cerca de 1,5 minuto, aumentando a capacidade da pista de 52 para 60 operações por hora. A economia anual estimada é de cerca de 3.200 toneladas de combustível em voo e 1.250 toneladas durante a rolagem para os 270.000 movimentos anuais do aeroporto. Ganhos adicionais vieram da redução de arremetidas desnecessárias por meio da introdução de mínimos de separação reduzidos nas pistas, o que evitou cerca de 34 arremetidas em 2024. Ambas as medidas melhoram a previsibilidade e reduzem o desperdício de combustível, podendo ser aplicadas em outros aeroportos com layouts de pista adequados, supervisão de segurança e treinamento de controladores.

O LTAG da OACI estima reduções do consumo de combustível de 0,038–0,189% por voo para OSD e de 0,511–0,758% para ORD. O feedback das partes interessadas sugere que a implementação ficará aquém dessas estimativas. Para acelerar a implementação da entrega otimizada de pista (ORD) e da redução da separação entre pares na ALC, várias etapas são essenciais.

Primeiro, os reguladores devem aprovar padrões de separação e integrá-los aos procedimentos nacionais. Os prestadores de serviços de navegação aérea e os aeroportos precisam investir em ferramentas de otimização em tempo real que se conectem aos sistemas de gerenciamento de chegadas e partidas, apoiadas por dados precisos sobre ventos e turbulência de esteira. Os programas de treinamento de controladores devem ser atualizados para incorporar esses novos conceitos às operações diárias, e modernizações de infraestrutura, como pistas de taxiamento de saída rápida, devem ser priorizadas em aeroportos de alta densidade. Restrições como a complexidade da frota mista e restrições locais de ruído podem ser gerenciadas por meio de implementações em fases e análises de desempenho baseadas em dados.

Implementação: os prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs) e os reguladores aprovam e operam a separação dinâmica; **os aeroportos** integram ferramentas de pista; **as companhias aéreas** adaptam os procedimentos operacionais padrão (SOPs) e a programação.

¹⁹⁵ <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/PJ02-01-02%20Contextual%20Note.pdf>

¹⁹⁶ <https://www.nats.aero/news/nats-delivers-on-time-boost-and-carbon-cuts-with-world-first-at-heathrow/>

¹⁹⁷ IATA

4.5.4.5 Subresultados de eficiência horizontal

Tabela 34: Implementação e economias decorrentes de melhorias de eficiência horizontal

Melhoria	Economias de Implementação de		Métrica	2030 (%)	2040 (%)	2050 (%)
	combustível (%)	linha de base (%)				
Modernização do espaço aéreo	1,25 (1, 1,5)	0	Implementação adicional	22,5 (15, 30)	45 (30, 60)	67,5 (45, 90)
			Redução de combustível em toda a frota	0,28 (0,15, 0,45)	0,56 (0,30, 0,90)	0,84 (0,45, 1,35)
Gestão global de fluxo	0,04 (0,02, 0,05)	8	Implementação adicional	12,5 (0, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Redução de combustível em toda a frota	0,00 (0,00, 0,01)	0,01 (0,01, 0,03)	0,03 (0,01, 0,05)
OSD	0,11 (0,04, 0,19)	0	Implementação adicional	18,8 (12,5, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Redução de combustível em toda a frota	0,02 (0,0, 0,05)	0,04 (0,01, 0,09)	0,09 (0,02, 0,19)
ORD	0,63 (0,51, 0,76)	0	Implementação adicional	18,8 (12,5, 25)	37,5 (25, 50)	75 (50, 100)
			Redução de combustível em toda a frota	0,12 (0,06, 0,19)	0,24 (0,13, 0,38)	0,48 (0,26, 0,76)
Redução de combustível em toda a frota				0,43 (0,22, 0,70)	0,86 (0,44, 1,40)	1,43 (0,73, 2,35)

4.5.5 Resultados da otimização do perfil de voo

Tabela 35: Implementação e economia decorrentes de melhorias de eficiência horizontal

Medida	Redução de combustível em toda a frota (%)		
	2030	2040	2050
Otimização de subida e descida	0,06 (0,02, 0,09)	0,12 (0,06, 0,18)	0,18 (0,09, 0,27)
Eficiência vertical em rota	0,04 (0, 0,10)	0,28 (0,05, 0,58)	0,41 (0,11, 0,78)
Eficiência horizontal	0,43 (0,22, 0,70)	0,86 (0,44, 1,40)	1,43 (0,73, 2,35)
Total	0,53 (0,24, 0,89)	1,26 (0,55, 2,16)	2,02 (0,93, 3,40)

Cenário ambicioso: A região da ALC alcança progressos significativos por meio do alinhamento regulatório, da implantação de tecnologia e de uma forte colaboração entre as partes interessadas. As companhias aéreas aproveitam a adoção já existente de CCO e CDO, melhorando a consistência e otimizando procedimentos por

meio de ferramentas avançadas de trajetória, integração de dados em tempo real e monitoramento de desempenho. Governos e ANSPs modernizam as estruturas do espaço aéreo, implementam procedimentos harmonizados e possibilitam padrões dinâmicos de separação. Aterrissagens com flaps reduzidos tornam-se prática padrão onde for operacionalmente viável, apoiadas por orientações digitais e treinamento. Acordos regionais garantem a coordenação transfronteiriça, e o alinhamento cultural promove a transparência e a responsabilidade compartilhada. Esses esforços combinados proporcionam reduções substanciais na queima de combustível e nas emissões, ao mesmo tempo em que melhoram a previsibilidade e a resiliência.

Cenário Moderado: O progresso é constante, mas desigual. As companhias aéreas ampliam o uso de procedimentos otimizados de subida e descida e de pousos com flaps reduzidos, mas a adoção varia de acordo com o aeroporto e o estado. A modernização do espaço aéreo avança gradualmente, com a implantação parcial do Espaço Aéreo de Rota Livre e a adoção limitada de ferramentas de separação dinâmica. A tomada de decisão colaborativa e o monitoramento de desempenho melhoram a conformidade, mas o compartilhamento de dados permanece inconsistente. As estruturas regulatórias evoluem lentamente e os incentivos financeiros são limitados, deixando alguns ganhos de eficiência por realizar.

Cenário Conservador: A adoção permanece mínima devido a ações regulatórias fracas, investimento limitado e governança fragmentada. As companhias aéreas mantêm as práticas atuais, com apenas melhorias incrementais no uso de CCO e CDO. Conceitos avançados de gestão do tráfego aéreo, como separação dinâmica e entrega otimizada de pistas, permanecem amplamente ausentes. A modernização do espaço aéreo é lenta, com ineficiências estruturais persistentes e coordenação transfronteiriça limitada. Barreiras culturais e institucionais impedem uma colaboração significativa, resultando em reduções do consumo de combustível marginais e um fosso cada vez maior entre a região da ALC e o resto do mundo e as melhores práticas globais.

4.6 Resultados e discussão

Os resultados deste estudo, conforme apresentados na tabela abaixo, demonstram que medidas de eficiência operacional podem proporcionar reduções substanciais de combustível e reduções de emissões na ALC. Até 2050, o impacto combinado das medidas relacionadas às companhias aéreas, operações em solo e perfil de voo poderia alcançar até 11,3% de reduções do consumo de combustível. As operações em solo representam a maior oportunidade, seguidas pela otimização do perfil de voo, enquanto as medidas no nível das companhias aéreas proporcionam ganhos menores, mas ainda assim importantes. Essas economias potenciais não implicam que as companhias aéreas possam absorver os custos associados, já que a maioria das medidas requer investimento de várias partes interessadas e estruturas regulatórias favoráveis.

Tabela 36: Resultados da redução de combustível em toda a frota, em comparação com a linha de base de 2019

Medida	Redução de combustível em toda a frota (%)		
	2030	2040	2050
Medidas de eficiência e planejamento de aeronaves	0,5 (0,2, 1,0)	0,9 (0,5, 1,5)	1,4 (0,6, 2,4)
Operações aeroportuárias e em solo	0,9 (0,3, 1,6)	2,4 (1,0, 4,2)	3,4 (1,7, 5,5)
Otimização do perfil de voo	0,5 (0,2, 0,9)	1,3 (0,6, 2,2)	2,0 (0,9, 3,4)
Total	1,9 (0,8, 3,5)	4,6 (2,0, 7,8)	6,8 (3,3, 11,3)

Concretizar esse potencial requer mais do que soluções técnicas. Depende de uma ação coordenada entre governos, órgãos reguladores, companhias aéreas, aeroportos e fornecedores de tecnologia, apoiada por incentivos alinhados, investimentos direcionados e uma cultura de colaboração.

Alinhamento regulatório e incentivos: A regulamentação deve criar um ambiente em que medidas de eficiência sejam viáveis e atraentes. Isso inclui harmonizar procedimentos entre fronteiras, estabelecer padrões operacionais claros e alinhar incentivos financeiros com metas ambientais e de desempenho. As estruturas de incentivo devem recompensar a conformidade e a inovação, garantindo ao mesmo tempo que as exigências sejam acompanhadas de medidas facilitadoras, como modernizações de infraestrutura e treinamento. Os governos também podem incorporar requisitos de infraestrutura nos contratos para garantir que novos acordos incluam os recursos necessários para gerar ganhos de eficiência.

Investimento e infraestrutura: Esses investimentos exigem responsabilidade compartilhada entre as partes interessadas. Os governos podem oferecer apoio político e acesso a financiamento verde; aeroportos e prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs) devem priorizar modernizações de infraestrutura; e as companhias aéreas devem se comprometer por meio de acordos de longo prazo que justifiquem esses investimentos. Bancos de desenvolvimento e instituições financeiras podem desempenhar um papel na redução de barreiras de capital e na garantia de uma distribuição equitativa de custos.

Compromissos das companhias aéreas e dos aeroportos: As companhias aéreas e os aeroportos devem continuar a colocar essas medidas em prática. As companhias aéreas precisam continuar a integrar procedimentos otimizados de subida e descida, pousos com flaps reduzidos e taxiamento eficiente em seus procedimentos operacionais padrão (SOPs), com o apoio de treinamento e monitoramento de desempenho. Os aeroportos devem complementar esses esforços expandindo a infraestrutura aeroportuária, implementando a tomada de decisão colaborativa em aeroportos e integrando ferramentas de otimização em tempo real para o sequenciamento de pistas e a gestão de partidas.

Tecnologia e integração de dados: a digitalização é um facilitador essencial. A troca de dados em tempo real entre as partes interessadas apoia a tomada de decisões colaborativa, a gestão de fluxo e a otimização do perfil de voo. O monitoramento de desempenho e os ciclos de feedback, apoiados por KPIs claros, podem impulsionar a melhoria contínua. Os provedores de tecnologia devem garantir a interoperabilidade e a escalabilidade para facilitar a adoção regional.

Cultura e mudança comportamental: tecnologia e regulamentação, por si só, não produzirão resultados sem uma cultura de colaboração. Companhias aéreas, aeroportos e ANSPs precisam encarar a eficiência operacional como uma responsabilidade compartilhada, e não como uma vantagem competitiva. Isso requer compartilhamento transparente de dados, análises conjuntas de desempenho e disposição para adaptar práticas operacionais. Programas comportamentais, como feedback aos pilotos e definição de metas, provaram ser eficazes em outras regiões e devem ser ampliados na ALC.

Coordenação e governança regionais: a fragmentação continua sendo uma grande barreira. Plataformas regionais devem ser aproveitadas para harmonizar procedimentos, compartilhar melhores práticas e coordenar investimentos. Acordos estruturados entre autoridades civis e militares podem liberar capacidade adicional do espaço aéreo, enquanto benchmarking e relatórios transparentes podem sustentar a prestação de contas. Vincular melhorias de eficiência a objetivos ambientais também pode liberar financiamento climático e fortalecer o caso de negócios para a reforma.

4.7 Previsão de linha de base para o querosene de aviação

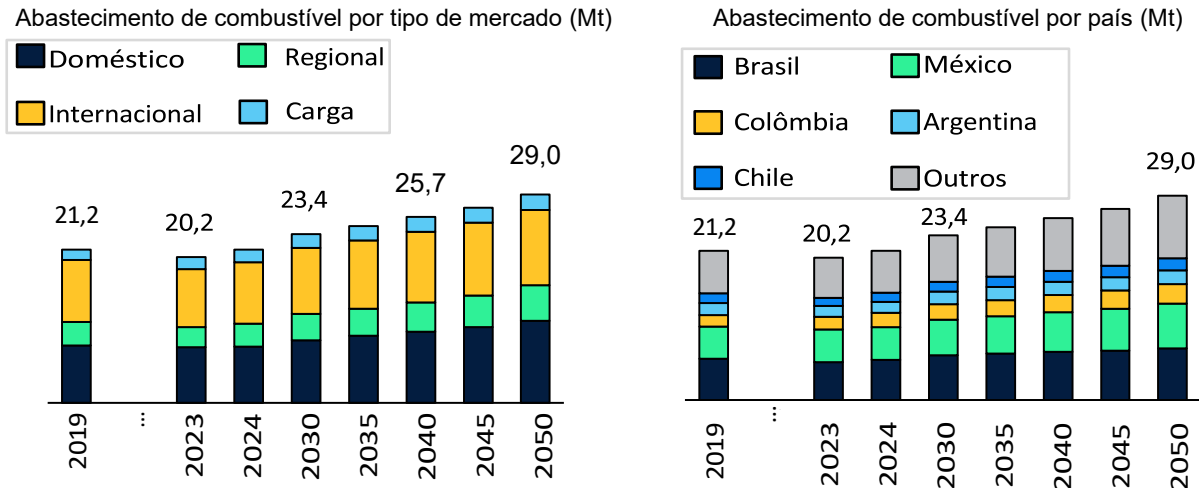
A ICF estimou o abastecimento de combustível de referência utilizando níveis de atividade históricos combinados com o banco de dados de queima de combustível da OACI. As projeções futuras foram então desenvolvidas utilizando a previsão de atividade discutida na Seção 2 deste relatório, juntamente com a previsão de renovação da frota e melhorias de eficiência operacional descritas nas seções anteriores.

Em 2019, a ICF estimou que um total de 21,2 Mt de querosene de aviação foi objeto de abastecimento por todos os voos de partida da região da ALC, com base no banco de dados de queima de combustível da OACI. Em 2023, o abastecimento de combustível registrou um ligeiro declínio, já que o número de ATMs permaneceu ligeiramente abaixo dos níveis de 2019, e as companhias aéreas retiraram de serviço ou substituíram aeronaves de geração antiga por modelos mais novos e mais eficientes em termos de consumo de combustível durante a COVID. Para 2050, a ICF prevê que o abastecimento de combustível atingirá 29,0 Mt, representando uma CAGR de 1,0% entre 2019 e 2050. Em comparação com a CAGR prevista de 2,7% no crescimento do tráfego para o mesmo período, isso reflete melhorias contínuas de eficiência impulsionadas pela renovação da frota e por medidas operacionais; sem essas medidas, o abastecimento de combustível deve atingir 44,5 Mt até 2050. Embora as atividades domésticas representem aproximadamente 70% dos ATMs, elas correspondem a apenas 39% da necessidade de combustível prevista devido aos trechos mais curtos. As atividades regionais e internacionais representam cerca

de 17% e 36%, respectivamente, enquanto o transporte de carga representa os 8% restantes.

Até 2050, prevê-se que os cinco principais países sejam responsáveis por quase 70% do consumo total de combustível da região: Brasil com 25%, México com 22%, Colômbia com 10%, Argentina com 7% e Chile com 6%. Essa distribuição permanece amplamente consistente com os níveis de 2019. Os gráficos e a tabela a seguir resumem os resultados da previsão de abastecimento de combustível para esses países em destaque e para a região como um todo.

Previsão de abastecimento de combustível na ALC por tipo de mercado (esquerda) e divisão por país (direita)



Fonte: Análise da ICF

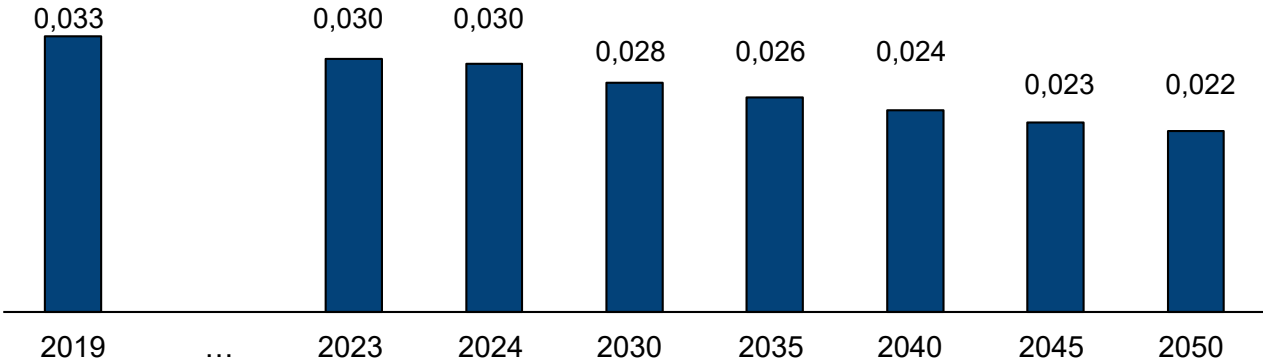
Tabela 37: Resumo da previsão de abastecimento de combustível na região da América Latina e do Caribe por países em foco

País em foco	Consumo de combustível em 2019 (Mt)	Consumo de combustível em 2035 (Mt)	Combustível em 2050 (Mt)	Participação no abastecimento de combustível em 2019	Participação no abastecimento de combustível em 2050	2019-2050 CAGR
Brasil	5,9	6,6	7,4	28%	25%	0,7%
México	4,6	5,3	6,3	22%	22%	1,0%
Colômbia	1,6	2,3	2,8	8%	10%	1,7%
Argentina	1,7	1,9	2,0	8%	7%	0,4%
Chile	1,4	1,5	1,7	6%	6%	0,7%
Peru	1,2	1,2	1,5	6%	5%	0,7%
Panamá	0,7	0,9	1,3	3%	5%	2,2%
Rep. Rep.	0,6	1,0	1,5	3%	5%	3,0%
Equador	0,4	0,4	0,5	2%	2%	0,5%
Bahamas	0,1	0,1	0,1	1%	0%	0,4%
El Salvador	0,2	0,2	0,3	1%	1%	1,4%
Outros	2,9	3,1	3,7	14%	13%	0,8%
Total ALTA	21,2	24,5	29,0	100%	100%	1,0%

Em 2019, a queima de combustível por RPK foi estimada em aproximadamente 0,033 kg de querosene de aviação por RPK. Esse valor caiu para cerca de 0,030 kg por RPK em 2023, à medida que as companhias aéreas implantaram aeronaves mais eficientes em consumo de combustível e aprimoraram suas práticas operacionais após a COVID. A métrica continuou a diminuir em 2024, refletindo novas transições da frota e a recuperação nas operações de longo curso. Espera-se que o consumo de combustível por RPK continue melhorando ao longo do período de previsão, atingindo cerca de 0,022 kg por RPK até 2050. Essa melhoria é impulsionada principalmente pela evolução das tecnologias aeronáuticas, com aeronaves de nova geração previstas para representar quase 80% dos ASKs na região até meados de 2035. A figura abaixo ilustra a evolução prevista da queima de combustível por RPK em anos selecionados.

Prevê-se que a renovação da frota e as melhorias operacionais resultem em um ganho anual de eficiência de combustível de 1,3% (CAGR) de 2019 a 2050 na ALC

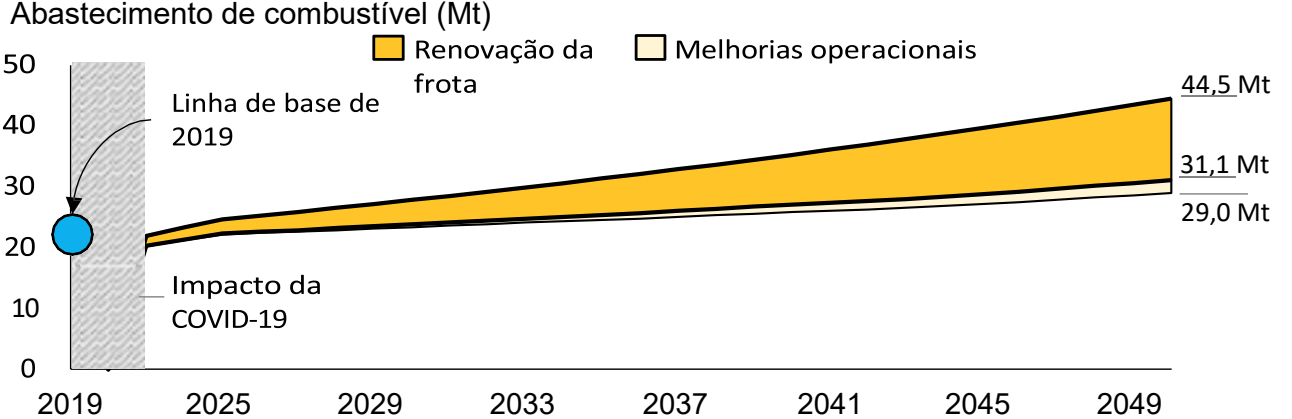
Queima de combustível (kg) por RPK



Fonte: Análise da ICF

Prevê-se que o aumento no abastecimento de combustível cresça a uma taxa composta anual (CAGR) de 1,0% entre 2019 e 2050. Esse crescimento é impulsionado por uma combinação de maior densidade de passageiros na cabine e evolução da tecnologia aeronáutica, o que deverá reduzir o consumo de combustível em aproximadamente 30% em comparação com os níveis atuais. Isso está em consonância com as observações atuais de que cada nova geração de aeronaves proporciona reduções do consumo de combustível de cerca de 15 a 20%. Além disso, projeta-se que melhorias operacionais reduzam as necessidades de combustível em mais 6,8% até 2050. O gráfico a seguir ilustra a previsão de abastecimento de combustível e a contribuição da renovação da frota e das melhorias operacionais para as reduções do consumo de combustível.

Prevê-se que a renovação da frota e as medidas de eficiência operacional reduzam a queima de combustível em 35% em 2050. São necessárias medidas adicionais para atingir as emissões líquidas zero



Fonte: Análise da ICF

5 Avaliação das oportunidades e obstáculos para os combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) na América Latina e no Caribe



Principais resultados:

- Mais de 1,9 bilhão de galões de capacidade de produção de SAF foram anunciados em toda a região da ALC; no entanto, ainda não foi produzido nenhum SAF na região, e nenhum projeto chegou à decisão final de investimento (FID) (em novembro de 2025). Também é importante observar que a capacidade anunciada não significa que ela se traduzirá totalmente em capacidade operacional, como visto em inúmeros cancelamentos de instalações em todo o mundo.
- O HEFA continua sendo a rota comercialmente mais viável atualmente, mas sua escalabilidade é limitada pela disponibilidade de matéria-prima. O AtJ oferece um potencial de longo prazo mais robusto à medida que a disponibilidade de matéria-prima se expande.
- As preocupações com a sustentabilidade relacionadas à origem e ao cultivo das matérias-primas continuam sendo um obstáculo fundamental e precisam ser abordadas para que os combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) possam oferecer uma contribuição real. É importante que a produção de SAF não ocorra em detrimento da mudança no uso da terra, da segurança alimentar, da natureza e dos recursos hídricos, considerando que mais de dois terços das emissões no Brasil e na Colômbia têm origem no setor AFOLU.
- Espera-se que os preços dos SAFs permaneçam significativamente acima dos preços do querosene de aviação até 2050 (de 3 a 12 vezes mais altos), mesmo com o amadurecimento contínuo da tecnologia e a produção em escala.
- Os custos de abatimento variam de acordo com a rota, mas diminuem significativamente ao longo do tempo. Até 2050, prevê-se que as rotas AtJ apresentem os custos de abatimento mais baixos em geral, sendo que a rota AtJ baseada no etanol de cana-de-açúcar representa a opção mais custo-efetiva, atingindo aproximadamente US\$ 417/tCO₂.

5.1 Oportunidades e desafios para o SAF na América Latina e no Caribe

O combustível de aviação sustentável (SAF) é a medida “dentro do setor” com o maior potencial teórico de longo prazo para descarbonizar a aviação, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida em comparação com o combustível de aviação convencional (CAF). Por ser um combustível drop-in, o SAF pode ser utilizado nas frotas e infraestruturas existentes sem modificações, o que facilita a integração.

No entanto, a implantação em larga escala na ALC e, globalmente, enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios, incluindo:

- a disponibilidade de matéria-prima sustentável em quantidade suficiente;
- investimentos na cadeia de abastecimento e na infraestrutura de produção e distribuição;
- limitação das oportunidades de exportação da ALC para outras regiões devido aos critérios de elegibilidade da matéria-prima sob diferentes marcos regulatórios;
- superação do diferencial de preço substancial em relação aos combustíveis convencionais (preço de 3 a 12 vezes mais alto para o SAF), o que poderia aumentar os preços das passagens e reduzir a conectividade.

Juntos, esses desafios têm dificultado a adoção do SAF, apesar dos esforços contínuos do ecossistema da aviação global e regional.

Neste relatório, é explorada a situação atual do mercado de SAF na ALC, são identificados os principais desafios para a região e são destacadas as oportunidades para o desenvolvimento do mercado.

O que é o SAF?

O SAF é um substituto de baixo carbono para o querosene de aviação convencional. Ele pode ser produzido a partir de uma variedade de matérias-primas, tais como:

- Culturas como cana-de-açúcar ou sementes oleaginosas
- Resíduos e subprodutos da agricultura, silvicultura ou municípios
- CO₂ capturado combinado com hidrogênio renovável (ou não fóssil de baixo carbono)

Os Combustíveis de Aviação de Baixo Carbono (LCAF) são combustíveis de aviação derivados de fontes fósseis que alcançam reduções verificadas nas emissões ao longo do ciclo de vida, por meio da redução de emissões em toda a cadeia de abastecimento. Isso pode incluir processos de produção aprimorados, transporte, redução da queima e das emissões de metano, e a adoção de tecnologias como captura e armazenamento de carbono (CCS/CCUS). O LCAF ainda está em desenvolvimento como solução, e são necessárias mais informações para compreender seu potencial como mecanismo de descarbonização.

Tanto o SAF quanto o LCAF são combustíveis drop-in, o que significa que podem ser usados na infraestrutura logística e nas aeronaves existentes sem quaisquer modificações, uma vez misturados com o querosene de aviação convencional.

Componentes de mistura sintéticos

Os Componentes de Mistura Sintéticos (SBCs) são componentes de combustível produzidos em instalações dedicadas e destinados à mistura com querosene de aviação convencional para formar o SAF. Eles devem atender às especificações da norma ASTM D7566¹⁹⁸ para garantir a operação segura em aeronaves. Atualmente, os SBCs podem ser misturados em até 50%¹⁹⁹ dependendo da rota de produção, com pesquisas em andamento para atingir 100% até 2030. A mistura ocorre em terminais de produção ou distribuição e não deve ser feita no depósito de combustível do aeroporto²⁰⁰.

Coprocessamento

Alguns materiais renováveis, como os lipídios, podem ser coprocessados em refinarias convencionais adaptadas. Nessa abordagem, a matéria-prima renovável é introduzida durante o processo de refino. Atualmente, os lipídios podem ser coprocessados em até 5% do produto final, enquanto as matérias-primas derivadas de HEFA podem ser coprocessadas em até 10%²⁰¹. O coprocessamento permite o aumento gradual da produção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) sem a necessidade de instalações dedicadas e independentes.

5.2 Arcabouço de políticas públicas global de SAF: ICAO e CORSIA

Em um contexto global, os esforços para mitigar as emissões de carbono no setor de aviação têm sido impulsionados pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), principalmente por meio do sistema de compensação e redução de carbono para a aviação internacional (CORSIA). O CORSIA é um quadro global com o objetivo de alcançar um crescimento neutro em carbono na aviação internacional de 2021 a 2035 (uma prorrogação pode ser possível), utilizando 85% das emissões de 2019 de voos entre os países participantes como sua linha de base.

O CORSIA apoia o Acordo de Paris ao exigir que as companhias aéreas relatem suas emissões e compensem o aumento das emissões do setor por meio da compra e do cancelamento de unidades de emissão. O uso de combustíveis elegíveis ao CORSIA (CEFs), que incluem tanto o SAF quanto o LCAF, reduz os requisitos de compensação na mesma proporção em que o combustível reduz a pegada de carbono em comparação com o equivalente fóssil.

A meta de emissões líquidas zero da OACI para 2050 (LTAG) é acompanhada por uma Visão global coletiva e ambiciosa de buscar uma redução de 5% nas emissões de CO₂ da aviação internacional até 2030 por meio do uso de CEFs (CAAF/3). Na busca dessa Visão, as circunstâncias e capacidades específicas de cada Estado definirão sua contribuição dentro de seu próprio cronograma nacional, sem impor obrigações ou compromissos

¹⁹⁸ D7566 Especificação Padrão para Combustível de Turbina de Aviação Contendo Hidrocarbonetos Sintetizados

¹⁹⁹ <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>

²⁰⁰ Conforme recomendado pelo JIG

²⁰¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-conversion-processes>

específicos a Estados individuais.

A ICAO também estabeleceu a Assistência, Capacitação e Treinamento em SAF (ACT-SAF) e a plataforma Fininvest para apoiar a implantação de SAF em nível global.

5.2.1 CORSIA

Os critérios de sustentabilidade estabelecidos no CORSIA são relevantes para a ALC. Eles são amplamente reconhecidos no contexto do CAAF/3 como uma base relevante e valorizados pelos países da região como uma base adequada para o desenvolvimento de uma estrutura de SAF. Além disso, eles orientarão o processo de reivindicação de reduções de emissões potenciais provenientes de voos internacionais operando em rotas sujeitas à conformidade com o CORSIA.

Para que o SAF seja considerado um combustível elegível ao CORSIA (CEF), ele deve satisfazer os Critérios de Sustentabilidade do CORSIA da ICAO²⁰², e os produtores de combustível devem ser verificados sob um Esquema de Certificação de Sustentabilidade (SCS) aprovado pela ICAO²⁰³. Os critérios de sustentabilidade estão estruturados em torno dos “temas” ambientais, sociais e econômicos mostrados na figura abaixo²⁰⁴. Geralmente, para estar em conformidade, o SAF deve evitar ou mitigar impactos negativos significativos nesses temas e atender a limites especificados. Esses requisitos estão entre os mais rigorosos aplicados a qualquer biocombustível atualmente, o que reflete a intenção do setor de estabelecer um alto padrão de transparência.

Temas de sustentabilidade para o SAF do CORSIA



Fonte: ICAO, análise da ICF

Emissões de GEE, estoque de carbono e permanência da redução de GEE

A conformidade com os temas de sustentabilidade relativos aos gases de efeito estufa e ao estoque de carbono é avaliada por meio de uma metodologia quantitativa. De acordo com os critérios de sustentabilidade, o CEF deve atingir uma redução líquida das emissões de GEE de pelo menos 10% em relação à linha de base das emissões do combustível de aviação convencional (89 gCO₂e/MJ) com base no ciclo de vida. Na prática, isso significa que o SAF deve ter uma intensidade de carbono inferior a 80 gCO₂e/MJ para atender aos critérios de sustentabilidade do CORSIA.

As emissões ao longo do ciclo de vida do CEF devem ser calculadas de acordo com a metodologia especificada e incluir um componente central de avaliação do ciclo de vida (ACV) e, quando aplicável, um componente de

²⁰² Documento da ICAO “Critérios de sustentabilidade do CORSIA para combustíveis elegíveis ao CORSIA”

²⁰³ Documento da ICAO 04 - Esquemas de Certificação de Sustentabilidade aprovados pelo CORSIA

²⁰⁴ O combustível de aviação de baixo carbono do CORSIA possui um critério adicional relativo a impactos sísmicos e vibracionais.

mudança induzida no uso da terra (ILUC). O componente central da ACV reflete as emissões diretamente associadas à cadeia de abastecimento do combustível, incluindo a produção da matéria-prima, o acondicionamento, o transporte e a conversão em combustível, bem como o transporte, a distribuição e, quando aplicável, a combustão do combustível.

O valor da ILUC reflete as emissões indiretas associadas à conversão de terras (por exemplo, de florestas, pastagens, turfeiras ou perdas de carbono do solo) impulsionadas pela produção de matéria-prima. Considerações sobre a mudança direta no uso da terra (DLUC) também podem ser necessárias quando ocorreram mudanças no uso da terra após 1º de janeiro de 2008. Esse valor de DLUC substitui o valor de ILUC no cálculo das emissões do ciclo de vida completo se as emissões de DLUC excederem as emissões de ILUC.

As emissões do ciclo de vida total para um determinado SAF podem ser calculadas utilizando:

- Valores padrão de emissões do ciclo de vida para SAFs publicados pela ICAO em função da matéria-prima, do processo de conversão e da região de produção do SAF²⁰⁵.
- Valores reais calculados, seguindo a metodologia CORSIA apropriada²⁰⁶.

Os produtores de CEF também podem utilizar a captura e sequestro geológico de carbono para reduzir a intensidade de carbono do SAF. De acordo com o tema da permanência da redução de GEE, isso também está sujeito aos requisitos definidos pela ICAO.

A conformidade com as emissões de GEE, o estoque de carbono e a permanência da redução de GEE deve ser avaliada por um SCS aprovado.

Temas de sustentabilidade restantes

Ao contrário dos temas de GEE, estoque de carbono e permanência da redução de GEE, os demais temas de sustentabilidade na figura acima são menos prescritivos. A ICAO os define de forma ampla e permite flexibilidade na implementação em nível estadual, o que significa que:

- Os Estados individuais podem ajudar a definir como a avaliação da conformidade é realizada para esses temas.
- Os SCS podem adotar regras ou orientações específicas de cada Estado para demonstrar a conformidade.
- Geralmente, não há limites quantitativos equivalentes à exigência de redução de 10% de GEE; em vez disso, a conformidade baseia-se na prevenção ou mitigação de impactos negativos inaceitáveis.

Como resultado, embora esses temas sejam essenciais para garantir a sustentabilidade geral, eles são mais qualitativos e dependentes do contexto do que os temas relacionados aos GEE, e o rigor de sua aplicação pode variar de acordo com a jurisdição.

Matérias-primas e CORSIA

A ICAO mantém uma lista positiva de matérias-primas consideradas elegíveis ao CORSIA²⁰⁷. Essas matérias-primas podem ser amplamente atribuídas às categorias descritas na Tabela 38, que também mostra exemplos representativos de matérias-primas dentro de cada categoria. Novas matérias-primas podem ser adicionadas à lista seguindo o procedimento definido pela ICAO.

Embora, em princípio, qualquer matéria-prima que atenda aos critérios de sustentabilidade do CORSIA possa ser usada para produzir CEF, a realidade é mais complexa. Matérias-primas que exigem um valor de ILUC e que atualmente não possuem um valor padrão apropriado especificado (ou seja, não constam na lista positiva) não podem ser utilizadas para produzir CEF até que tanto um valor padrão básico quanto um valor padrão de ILUC tenham sido estabelecidos e adicionados à lista da ICAO de valores padrão do CORSIA, de acordo com a metodologia do CORSIA para o cálculo dos valores reais de emissões ao longo do ciclo de vida. Isso tem implicações na elegibilidade de matérias-primas da região da América Latina e do Caribe e é discutido com mais detalhes adiante neste documento.

²⁰⁵ Documento da ICAO “Valores padrão de emissões do ciclo de vida do CORSIA para combustíveis elegíveis ao CORSIA”

²⁰⁶ Documento da ICAO “Metodologia do CORSIA para o cálculo dos valores reais de emissões do ciclo de vida”

²⁰⁷ Matérias-primas para SAF

Tabela 38: Categorias de matérias-primas do CORSIA, definições e exemplos representativos

Categoria	Definição	Exemplo representativo
Produtos primários e coprodutos	Os principais produtos de um processo de produção. Esses produtos têm valor econômico significativo e oferta elástica	<ul style="list-style-type: none"> • Cana-de-açúcar • Semente de soja • Sementes de camelina
Subproduto	Produtos secundários com oferta inelástica e valor econômico.	<ul style="list-style-type: none"> • Sebo
Resíduo	Materiais secundários com oferta inelástica e pouco valor econômico.	<ul style="list-style-type: none"> • Bagaço, espigas, cascas • Resíduos florestais
Lixo	Materiais com oferta inelástica e sem valor econômico. Um resíduo é qualquer substância ou objeto que o detentor descarta, pretende descartar ou é obrigado a descartar ²⁰⁸ .	<ul style="list-style-type: none"> • Resíduos sólidos urbanos • Óleo de cozinha usado

Produtos primários

Os mercados de biocombustíveis existentes na ALC dependem fortemente de produtos primários (ou seja, culturas) como matérias-primas - por exemplo, etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de soja ou de palma. O aumento da produção dessas matérias-primas estabelecidas à base de safras para SAF provavelmente gerará preocupações em relação a muitos dos temas de sustentabilidade do CORSIA discutidos acima, em particular a mudança no uso da terra e a segurança alimentar, além de outros impactos esperados sobre a natureza e a água.

Esquemas voluntários de sustentabilidade específicos para matérias-primas, como o Bonsucro, existem além do CORSIA, o que oferece orientações mais detalhadas e mecanismos de verificação para a produção responsável de matérias-primas. Esses esquemas se concentram em minimizar os impactos ambientais, melhorar os resultados sociais e aprimorar a rastreabilidade em toda a cadeia de suprimentos. Ao certificar a conformidade com critérios como gestão responsável da terra, eficiência no uso da água e normas trabalhistas, eles podem ajudar a mitigar riscos associados a matérias-primas de origem vegetal, incluindo desmatamento, perda de biodiversidade e competição com a produção de alimentos.

Quando alinhados aos requisitos do CORSIA, tais esquemas de certificação oferecem aos produtores uma rota para demonstrar que seus SAF atendem às expectativas de sustentabilidade regionais e internacionais, ao mesmo tempo em que proporcionam confiança aos compradores e reguladores quanto à integridade ambiental e social dos combustíveis. É preciso ter cuidado ao considerar esse tipo de abordagem local e nacional, pois há o risco de limitar a capacidade de exportação dos SAF produzidos na ALC para os mercados internacionais se a certificação doméstica não estiver alinhada com a certificação utilizada nos mercados internacionais.

Resíduos, resíduos e subprodutos

Matérias-primas derivadas de resíduos, subprodutos e subprodutos oferecem uma alternativa de menor risco às culturas primárias para a produção de SAF. Esses materiais, como óleo de cozinha usado, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais ou subprodutos agrícolas, normalmente têm impactos mínimos associados à mudança no uso da terra e não competem diretamente com a produção de alimentos. No entanto, a conformidade com os temas de sustentabilidade do CORSIA ainda depende do abastecimento adequado, do processamento e da contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida.

Esquemas de certificação de sustentabilidade, incluindo a Certificação Internacional de Sustentabilidade e Carbono (ISCC) e a Mesa Redonda sobre Biomateriais Sustentáveis (RSB), fornecem orientações para sua coleta, processamento e rastreabilidade, ajudando a garantir que as salvaguardas ambientais e sociais sejam mantidas ao longo de toda a cadeia de suprimentos. A utilização dessas matérias-primas para SAF poderia permitir que os produtores da região da ALC aproveitem os fluxos de resíduos existentes, reduzam as emissões de gases de efeito

²⁰⁸ Matérias-primas ou substâncias que tenham sido intencionalmente modificadas ou contaminadas para atender a esta definição não são abrangidas por esta definição.

estufa e forneçam SAF que atenda aos requisitos internacionais de sustentabilidade, ao mesmo tempo em que lidam com muitos dos riscos associados às matérias-primas de origem vegetal, desde que seja demonstrada a conformidade com os critérios do CORSIA.

Resumo

Os critérios de sustentabilidade do CORSIA constituem atualmente o quadro internacional mais relevante para a avaliação dos combustíveis de aviação sustentáveis (SAF). Os critérios do CORSIA estabelecem tanto limites quantitativos, como os requisitos de redução de GEE ao longo do ciclo de vida, quanto temas qualitativos mais amplos relacionados ao uso da terra, aos ecossistemas e às salvaguardas sociais.

5.3 Indústria e políticas de SAF na América Latina e no Caribe

5.3.1 Políticas e desenvolvimento de mercado de SAF

Políticas previsíveis, consistentes e robustas são essenciais para apoiar o desenvolvimento da indústria de SAF e permitir seu uso como parte do alcance de metas de sustentabilidade de longo prazo. Ao fornecer orientações claras e incentivos para produtores e passageiros, os formuladores de políticas podem estimular o investimento, ampliar o acesso a matérias-primas sustentáveis e promover reduções de custo e compensar o diferencial de preço, facilitando uma adoção mais ampla dos SAF. Embora os altos custos de produção, a disponibilidade limitada de matéria-prima para SAF à base de HEFA, as ineficiências na cadeia de abastecimento de combustível e a competição por recursos representem desafios, arcabouços de políticas públicas bem elaborados podem ajudar a limitar o efeito dessas barreiras e facilitar a implantação progressiva dos SAF.

Tais políticas estão começando a se desenvolver em toda a região da ALC, embora geralmente estejam em um estágio muito inicial. As seções a seguir resumem o panorama dos SAF em toda a região da ALC.

5.3.1.1 Argentina

No Plano de Ação Nacional da Argentina apresentado à OACI em 2021²⁰⁹, a migração para o SAF é apontada como um impacto esperado do imposto sobre o CO₂, que passou a ser aplicado aos combustíveis de aviação em 2021. Além dessa medida, não há atualmente políticas nacionais específicas que promovam ou incentivem a implantação do SAF, embora várias iniciativas de pesquisa e viabilidade estejam em andamento. O Instituto Nacional de Tecnologia Industrial (INTI) realizou pesquisas sobre tecnologias de bioenergia que poderiam apoiar a produção de SAF. Em 2025, a Airbus e a ICAO anunciaram uma parceria para realizar estudos de viabilidade sobre SAF na Argentina, bem como no Peru e no Panamá, no âmbito do programa ACT-SAF da ICAO²¹⁰.

5.3.1.2 Bahamas

O SAF está incluído no conjunto de medidas que devem contribuir para a redução das emissões de CO₂ da aviação no Plano de Ação Nacional das Bahamas, apresentado à ICAO em 2022²¹¹; no entanto, atualmente não há políticas nacionais específicas ou incentivos em vigor para facilitar isso. O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) iniciou um projeto de cooperação técnica que visa fornecer apoio à aviação sustentável nas Bahamas, incluindo o desenvolvimento de uma estratégia de aviação sustentável e estudos para apoiar a adoção de SAF²¹².

5.3.1.3 Brasil

A lei brasileira “Combustível do Futuro” estabelece o Programa Nacional de Aviação Sustentável (ProBioQAV), que exige que as companhias aéreas alcancem reduções nas emissões de CO₂ principalmente por meio do uso de SAF em voos domésticos, em vez de determinar um percentual volumétrico de mistura de SAF.

Essa lei foi promulgada em 2024 e exige que as operadoras aéreas reduzam suas emissões em voos domésticos, começando com uma redução de 1% em 2027 e aumentando para 10% até 2037. No entanto, os regulamentos que definem os detalhes de implementação ainda estão em discussão e o impacto negativo esperado sobre a conectividade ainda não foi resolvido.

As companhias aéreas estão se envolvendo e colaborando com o governo em uma série de mesas redondas para identificar soluções que possam tornar essa meta compatível com o impacto significativo nos custos previsto para

²⁰⁹ Plano de Ação para a Redução das Emissões de CO₂ no sistema de transporte aéreo argentino - Final

²¹⁰ <https://www.aviacionline.com/airbus-and-icao-partner-to-study-sustainable-aviation-fuel-feasibility-in-argentina-panama-and-peru>

²¹¹ Plano de Ação das Bahamas para a Redução de Emissões (APER)

²¹² <https://www.iadb.org/en/project/BH-T1130>

as companhias aéreas²¹³. Isso poderia incluir mecanismos de apoio aos preços que mitigassem os impactos negativos sobre a conectividade essencial que as companhias aéreas fornecem no país.

Do ponto de vista da sustentabilidade do SAF, a Lei do Combustível do Futuro exige uma intensidade de carbono pelo menos 10% menor em comparação com o querosene de aviação convencional. Além disso, essa lei incentiva o uso das rotas de produção de SAF mais eficientes em carbono^{214, 215}.

A partir de 2027, o Brasil será incluído como um dos países na lista de pares de Estados no âmbito da Fase 2 do CORSIA (obrigatória). Isso fará com que as emissões internacionais de operadores brasileiros que excedam 85% dos níveis observados em 2019 devam ser compensadas por meio da aquisição de créditos de carbono ou do uso de combustíveis elegíveis no âmbito do CORSIA²¹⁶. O Brasil também está desenvolvendo seu próprio mercado de carbono, no qual o SAF e os créditos de carbono são medidas complementares.

Em agosto de 2024, o governo brasileiro anunciou um pacote de financiamento de US\$ 1,09 bilhão para apoiar o desenvolvimento de SAF e biocombustíveis marítimos²¹⁷. Essa iniciativa, financiada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e pela Fundação Nacional de Estudos e Projetos (FNEP), está alocando recursos por meio de editais que visam:

- Construção de biorrefinarias
- Pesquisa e desenvolvimento
- Projetos de engenharia e projetos-piloto
- Aquisição de equipamentos e capital de giro

No entanto, todos os incentivos e financiamentos atualmente são destinados a apoiar a produção de SAF, sem que haja, no momento, apoio ou incentivos para a demanda por SAF. As companhias aéreas brasileiras estão trabalhando com o governo e as partes interessadas para garantir que o apoio aos passageiros domésticos seja implementado e que a diferença de preço seja resolvida, a fim de evitar a redução esperada no transporte aéreo dentro do Brasil devido ao custo mais elevado do SAF²¹⁸.

Além de ser uma medida fundamental para a redução das emissões da aviação, o SAF é considerado importante para o setor agrícola no Brasil e também é estratégico do ponto de vista agroindustrial. É importante observar, no entanto, que mais de 2/3 das emissões no Brasil têm origem no setor AFOLU²¹⁹.

5.3.1.4 Chile

O programa Vuelo Limpio é fundamental para os esforços do Chile na redução das emissões da aviação. Trata-se de uma iniciativa público-privada que promove a eficiência energética, melhorias operacionais e a adoção de SAF. O programa colabora com as principais companhias aéreas, aeroportos e distribuidoras de combustível para monitorar as emissões, implementar as melhores práticas e desenvolveu um Roteiro SAF 2050. Esse roteiro aspira atender a pelo menos 50% da demanda por combustível de aviação com SAF até 2050 e é apoiado por uma coalizão de mais de 90 instituições. O Chile pretende concretizar essa ambição por meio de grandes usinas que utilizam óleos, gorduras e resíduos biológicos e municipais, bem como e-combustíveis²²⁰.

No campo da pesquisa, a Unidade de Desenvolvimento Tecnológico (UDT) da Universidade de Concepción produziu o primeiro litro de combustível de aviação a partir de resíduos plásticos no Chile²²¹ e também está realizando pesquisas sobre o uso da camelina como cultura sustentável para SAF.

Um projeto de pesquisa e desenvolvimento voltado para a produção de combustível de aviação sustentável (SAF) a partir do óleo de camelina, utilizando uma biorrefinaria experimental, vem sendo desenvolvido pela Universidade

²¹³ Observando que o custo de produção do SAF é pelo menos o dobro do preço de venda do querosene de aviação e que o combustível representa 30-40% dos custos operacionais na região, conforme dados da ALTA.

²¹⁴ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_50.pdf

²¹⁵ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2674362-Brazil-saf-industry-set-to-take-off-in-2027>

²¹⁶ <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>

²¹⁷ <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/BNDES-e-Finep-disponibilizam-6-bilhoes-de-reais-para-investimentos-em-combustivel-verde-para-aviacao-e-navegacao>

²¹⁸ Com base no feedback das partes interessadas no projeto

²¹⁹ Com base no feedback das partes interessadas no projeto; AFOLU = Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra

²²⁰ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2025/Envreport2025_70.pdf

²²¹ <https://vuelolimpio.cl/2025/08/19/hito-udec/>

Católica da Santíssima Conceição (UCSC), por meio de seu Centro de Energia, em parceria com a SKY. Essa iniciativa encontra-se em fase inicial e representa o primeiro acordo entre a ciência e a indústria no país voltado para a produção de SAF renovável de origem local²²².

5.3.1.5 Colômbia

Em janeiro de 2025, a Colômbia assinou a Resolução 00090, estabelecendo um roteiro para o SAF. Isso define metas para que a Colômbia se torne líder regional na produção de SAF, produzindo 100 milhões de galões de SAF até 2035, com expansão para até 450 milhões de galões até 2050²²³. O roteiro gira em torno de três pilares: redução de emissões no setor, desenvolvimento de uma indústria produtiva e sustentável e transformação social e inclusão. Estes são apoiados por cinco eixos transversais: facilitadores legais e regulatórios, promoção da oferta e da demanda, implantação da cadeia de suprimentos, desenvolvimento tecnológico, educacional e industrial, além de financiamento e investimentos. Em particular, as companhias aéreas têm participado das discussões sobre o uso de SAF, bem como no desenvolvimento de legislação e marcos regulatórios para sua implementação. Ecopetrol, empresa estatal de petróleo da Colômbia, identificou o coprocessamento e a produção dedicada de SAF como uma das muitas iniciativas renováveis visadas para o potencial de investimento e produziu os primeiros lotes-piloto de querosene de aviação coprocessado no país. Ela também é uma defensora ativa de projetos de SAF, embora nenhum tenha sido confirmado ou financiado até o momento.

Em 2024, a Ecopetrol realizou testes industriais em sua refinaria de Cartagena, produzindo 32.000 barris de querosene de aviação coprocessado com óleos vegetais. No entanto, o combustível produzido não atendeu aos padrões de sustentabilidade. Embora ainda não esteja totalmente certificado pela ICAO, esse combustível marca um primeiro passo em direção à potencial produção futura de SAF, prevista para 2028²²⁴. Apesar de a fase de testes ter sido concluída, uma decisão final de investimento, bem como todas as autorizações regulatórias necessárias para as melhorias propostas nas instalações da refinaria existente, ainda estão pendentes para permitir a produção em escala comercial²²⁵.

5.3.1.6 República Dominicana

Em 24 de abril de 2023, a República Dominicana lançou sua “Declaração de Santo Domingo”, um compromisso nacional para promover o desenvolvimento e o uso de SAF²²⁶. Essa iniciativa estabelece um roteiro claro para a descarbonização do setor de aviação do país, com base em marcos anteriores, como a “Declaração de Punta Cana” de 2016 e um estudo de viabilidade de 2018 sobre SAF²²⁷. A declaração representa uma abordagem governamental unificada, envolvendo ministérios-chave e autoridades de Aviação para liderar essa transição verde.

O roteiro estabelecido delinea metas específicas de curto e médio prazo. Para 2023, o foco foi na criação de estruturas colaborativas e no compartilhamento de informações para identificar e superar as barreiras iniciais de implementação do SAF. Olhando para o período de 2024 a 2026, o plano inclui uma revisão abrangente do marco legal e regulatório, visando especificamente a Lei de Incentivos à Energia Renovável, para criar um ambiente favorável à produção, logística e adoção de combustíveis sustentáveis, posicionando o país como líder regional em aviação sustentável.

Atualmente, a República Dominicana já está apoiando a ampliação do uso de SAF, oferecendo incentivos para combustíveis alternativos por meio da Lei 57-07, que prevê isenções fiscais para projetos de energia renovável.²²⁸

5.3.1.7 Equador

O Equador não possui políticas nem legislação relacionadas a SAFs. No entanto, vale a pena salientar que os SAFs foram identificados como uma oportunidade-chave, com matérias-primas potenciais consideradas para essa fase como a cana-de-açúcar, o óleo de palma e MSW²²⁹.

²²² <https://ucsc.cl/medios-ucsc/noticias/sky-y-ucsc-desarrollan-proyecto-para-producir-combustible-sostenible-de-aviacion-en-chile/>

²²³ Futuro verde da aviação na Colômbia: Roteiro para combustíveis sustentáveis

²²⁴ https://www.icao.int/SAM/Documents/2025-RAAC18/RAAC18_WP34_Environment_SAF.pdf

²²⁵ <https://www.ogj.com/refining-processing/refining/optimization/article/55241583/ecopetrol-wraps-testing-for-saf-production-at-cartagena-refinery>

²²⁶ <https://www.idac.gob.do/es/instituciones-suscriben-declaracion-de-santo-domingo-un-compromiso-para-promover-uso-de-energia-limpia-en-la-aviacion/>

²²⁷ https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/FeasibilityStudy_DomRep_ENG_Web.pdf

²²⁸ <https://www.iea.org/policies/5290-law-57-07-on-incentives-for-development-of-renewable-energy-sources-and-its-special-regimes>

²²⁹ Rumo à descarbonização sustentável da aviação na América Latina | MIT News | Instituto de Tecnologia de Massachusetts

5.3.1.8 El Salvador

El Salvador reconhece em seu Plano de Ação Nacional que, embora os combustíveis renováveis (SAF) sejam reconhecidos como um instrumento fundamental para reduzir as emissões de carbono da aviação, o principal desafio continua sendo garantir um amplo compromisso dos atores interessados com seu desenvolvimento²³⁰.

5.3.1.9 México

O Plano México (publicado em janeiro de 2025) inclui o SAF como prioridade nacional. A Lei de Biocombustíveis (*Ley de Biocombustibles*), promulgada em março de 2025, juntamente com seus futuros regulamentos de implementação (em fase de elaboração no momento da redação deste relatório), pretende estabelecer critérios claros e inclusivos, alinhados com as normas internacionais para a produção e certificação de SAF, e visa promover o uso e a comercialização de biocombustíveis²³¹. Grupos de trabalho interinstitucionais (AFAC, ASA, SEMARNAT, SENER, CONADEUCA, SADER, SICT) foram criados para harmonizar políticas, validar dados e definir critérios de sustentabilidade e certificação. A Agência Federal de Aviação Civil do México (AFAC) está, além disso, liderando o desenvolvimento de um roteiro nacional para SAF, em colaboração com a OACI - Organização da Aviação Civil Internacional, companhias aéreas e a CANAERO. O lançamento desse roteiro está previsto para 2026, delineando ações-chave, incluindo pesquisa e desenvolvimento, incentivos econômicos, marcos regulatórios, diretrizes de infraestrutura e critérios de sustentabilidade para matérias-primas, a fim de evitar impactos negativos sobre a segurança alimentar e o meio ambiente²³².

A Lei de Biocombustíveis visa promover o aproveitamento de resíduos (economia circular) e culturas energéticas cultivadas em terras marginais, garantindo que não haja interferência na soberania e segurança alimentar. Está sendo considerada a colaboração com autoridades florestais para definir critérios de sustentabilidade e monitorar mudanças no uso da terra; enquanto as culturas energéticas são restritas a terras marginais, o excedente de sorgo e cana-de-açúcar (excluindo o milho) pode ser utilizado para a produção de biocombustíveis.

5.3.1.10 Panamá

A Estratégia Nacional do Panamá para o Hidrogênio Verde e Derivados estabelece metas claras para a integração do hidrogênio renovável e dos combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) no mix energético da aviação, com o objetivo de que essas fontes forneçam 30% da demanda energética do setor até 2050²³³. A estratégia traça objetivos gerais fundamentais, como tornar-se um hub de energia sustentável por meio da facilitação do uso de hidrogênio renovável (H2V²³⁴) nos setores aéreo e marítimo, e da criação de um marco legal e regulatório para apoiar o investimento e o desenvolvimento de infraestrutura.

5.3.1.11 Peru

O Peru ainda não divulgou planos de políticas para combustíveis de aviação sustentáveis (SAF). Atualmente, a Airbus está trabalhando com a ICAO para realizar estudos de viabilidade de SAF no Peru, como parte do programa ACT-SAF²³⁵. O objetivo é avaliar a disponibilidade de matéria-prima, as necessidades de infraestrutura e a viabilidade econômica do SAF no país.

5.3.2 Capacidade de produção de SAF anunciada na América Latina e no Caribe

Matérias-primas derivadas de biomassa e resíduos, incluindo resíduos agrícolas e florestais, óleo de cozinha usado e resíduos orgânicos municipais, entre outros, desempenham um papel relevante no desenvolvimento da produção de SAF por meio de rotas de conversão estabelecidas e emergentes. O aproveitamento desses recursos locais poderia diversificar a matriz de combustíveis, fortalecer a indústria nacional de combustíveis e tornar a implantação de SAF parte integrante da estratégia de segurança de querosene de aviação da região. A tabela abaixo mostra as instalações de SAF anunciadas na ALC (em outubro de 2025), embora **seja importante observar que ainda**

²³⁰ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/State_Action_Plans/PLAN-DE-ACCION-DE-REDUCCION-DE-CO2-DEL-ESTADO-ECUATORIANO-2021-2024-signed.pdf

²³¹ <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBio.pdf>

²³² [https://mexicobusiness.news/aerospace/news/mexico-aims-sustainable-aviation-fuel-2030-says-canaero#:~:text=Mexico%20could%20begin%20producing%20sustainable,of%20Air%20Transport%20\(CANAERO\).](https://mexicobusiness.news/aerospace/news/mexico-aims-sustainable-aviation-fuel-2030-says-canaero#:~:text=Mexico%20could%20begin%20producing%20sustainable,of%20Air%20Transport%20(CANAERO).)

²³³ Diário Oficial Digital

²³⁴ H2V = Hidrogênio verde

²³⁵ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ACT-SAF.aspx>

não há projetos na região que tenham passado da fase de decisão final de investimento (FID). Alcançar a FID marca uma etapa importante para um projeto, aumentando a chance de que ele avance para a construção e produção devido ao compromisso financeiro estabelecido. Atualmente, todos os projetos na ALC estão passando pelas fases de pré-viabilidade e viabilidade, avaliando o potencial, as opções tecnológicas e a viabilidade comercial de cada proposta. No entanto, é comum que alguns anúncios de projetos não avancem além da fase de viabilidade. Isso tem sido observado mesmo em mercados mais desenvolvidos, como a Europa, onde grandes empresas de petróleo e gás, como a Shell e a BP, cancelaram seus planos de dar continuidade aos projetos de SAF anunciados^{236 237}. Portanto, a capacidade anunciada é apenas uma indicação da produção potencial, mas **não implica que ela se concretizará em produção operacional.**

Tabela 39: Instalações de SAF na ALC (Status: anúncio e meta) em outubro de 2025

País	Produtor	SAF (milhões de galões)	Matéria-prima	Ano (estimado) ²³⁸	Status	Tecnologia
Argentina	Grupo Bahia Energia ²³⁹	49,5	Etanol (de milho)	2031	Anúncio	AtJ
Argentina	GreenSinnery e Axens ²⁴⁰	*	CO ₂ biogênico	2033	Anúncio	PtL (FT)
Brasil	BP Bunge Bioenergia ²⁴¹	396,3	Etanol (cana-de-açúcar)	2030	Meta	AtJ
Brasil	Biocombustíveis do Brasil ²⁴²	66,0	Óleo de palma	2026	Anúncio	HEFA
Brasil	Petrobras ²⁴³	231,2	Óleo de soja e sebo	2029	Anúncio	HEFA
Brasil	Petrobras ²⁴⁴	297,2	Óleo de soja e sebo	2029	Anúncio	HEFA
Brasil	Combustíveis Verdes ²⁴⁵	*	-	2031	Anúncio	AtJ
Brasil	Grupo Energis 8 ²⁴⁶	99,1	Etanol	2031	Anúncio	AtJ
Brasil	Raizen ²⁴⁷	33,0	Etanol (cana-de-açúcar)	2031	Meta	AtJ

²³⁶ <https://www.shell.com/news-and-insights/newsroom/news-and-media-releases/2025/shell-not-restart-construction-rotterdam-biofuels-plant.html>

²³⁷ <https://www.safinvestor.com/news/147414/castellon/>

²³⁸ Se não houver anúncio

²³⁹ <https://www.safinvestor.com/news/146125/argentina/>

²⁴⁰ <https://www.qcintel.com/biofuels/article/german-firm-partners-with-axens-for-argentina-saf-plant-42839.html>, <https://www.axens.net/resources-events/news/greensinnery-and-axens-sign-memorandum-understanding-advance-saf-project-argentina-latin-america/>

²⁴¹ https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/air-bp-news/bp_plans_to_deliver_five_projects_to_increase_SAF_supply.html

²⁴² Biocombustíveis: produzidos a partir de óleo de palma | Grupo BBF

²⁴³ Petrobras licencia tecnologia da Honeywell UOP para produção de diesel renovável e SAF no Brasil

²⁴⁴ <https://www.jota.info/energia/petrobras-anuncia-producao-de-saf-entenda-o-que-e-o-combustivel-sustentavel-de-aviacao>

²⁴⁵ <https://greenfuels.co.uk/producing-fuel/>

²⁴⁶ <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/negocios/empresa-promete-investimento-de-r-2-bi-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao-no-interior-de-sp/>

²⁴⁷ https://finance.yahoo.com/news/ceraweek-brasils-raizen-scouting-locations-175330828.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAABMF-Dd7LtG258fQqJRkuQ0x90NNOEHaHAESaZv1JCN8mGyhpDwqzP2KAbnJW9oL_IFOgzOPpBikBafiklQXRxfJry0VvNxyUQCNUuMV762_puRfNaFKDImZntG5Hu3JyQtD4706Ky68InXUM-iqy_uWJn4AMv11Y-dUjUlv-

Brasil	Acelen ²⁴⁸	132,1	Sementes não comestíveis e óleos residuais	2027	Anúncio	HEFA
Brasil	Refinaria Riograndense ²⁴⁹	99,1	Óleo de soja e sebo	2028	Anúncio	HEFA
Brasil	Satarem América ²⁵⁰	*	Etanol (cana-de-açúcar)	2028	Anúncio	AtJ
Brasil	Sempen ²⁵¹	*	-	2033	Anúncio	PtL
Chile	Copec & Ineratec ²⁵²	0,8	CO ₂ biogênico	2032	Anúncio	PtL
Colômbia	Quipu Bio ²⁵³	*	-	2028	Meta	HEFA
Colômbia	Bio-D ²⁵⁴	49,5	Resíduos agrícolas e florestais	2027	Anúncio	AtJ
Colômbia	Ecopetrol ²⁵⁵	*	Óleo de palma, UCO	2028	Anúncio	HEFA
Colômbia	Ecopetrol ²⁵⁶	92,5	Óleo de palma, UCO	2030	Anúncio	HEFA
Panamá	SGP BioEnergy – Primeira fase ²⁵⁷	366,5	-	2027	Anúncio	HEFA

* Esta informação ainda não foi anunciada

Embora o número de projetos seja notável, é importante destacar que apenas uma fração desses projetos passou por estudos de viabilidade de investimento e nenhum deles chegou à decisão final de investimento (FID). Além disso, uma parcela significativa depende da rota ATJ, uma tecnologia que ainda está em desenvolvimento e não está madura. O Brasil tem o maior número de projetos de produção de SAF anunciados na região. Aliado à disponibilidade estadual de matéria-prima e às cadeias de valor de biodiesel e etanol já existentes, existe o potencial para que o Brasil se torne um grande hub regional de fornecimento de SAF. Argentina, Chile, Panamá e Colômbia também anunciaram instalações focadas nas rotas HEFA, AtJ e PtL. A figura abaixo ilustra as refinarias de petróleo existentes, os portos de querosene de aviação e as instalações de SAF anunciadas na região.

²⁴⁸ <https://www.pnewswire.com/news-releases/acelen-renewables-selects-honeywell-for-saf-and-renewable-diesel-fuel-production-302042935.html>

²⁴⁹ <https://www.topsoe.com/press-releases/topsoe-to-provide-technology-for-one-of-brazils-first-commercial-scale-sustainable-aviation-fuel-production-plants>

²⁵⁰ <https://en.clickpetroleoegas.com.br/Brazilian-city-will-gain-new-factory-worth-R%2423-billion-and-this-will-generate-800-direct-jobs/>

²⁵¹ <https://www.sempen.com/#OurProjects>

²⁵² <https://www.ineratec.de/en/news/ineratec-and-copec-enter-strategic-partnership-spearhead-e-fuel-availability-chile> ;

<https://www.safinvestor.com/opinion/145423/chile/>

²⁵³ <https://www.linkedin.com/company/quipu-bio/about/>

²⁵⁴ <https://www.aviacionline.com/2023/05/revolutionizing-aviation-in-colombia-latam-airlines-and-bio-d-partner-to-produce-sustainable-fuel/>

²⁵⁵ <https://www.ineratec.de/en/news/ineratec-conclui-testes-para-producao-de-saf-na-refinaria-de-cartagena> | Oil & Gas Journal

²⁵⁶ <https://www.safinvestor.com/news/147339/ecopetrol/>

²⁵⁷ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2496643-sgp-plans-2024-fid-for-panama-biorefinery>,

<https://www.safinvestor.com/project/142197/sgp-bioenergy-golden-city-biorefinery-panama/>

Refinarias, instalações de SAF anunciadas e principais portos de querosene de aviação na ALC



Fonte: Miskolc Enterprise, S.L., análise da ICF 2025

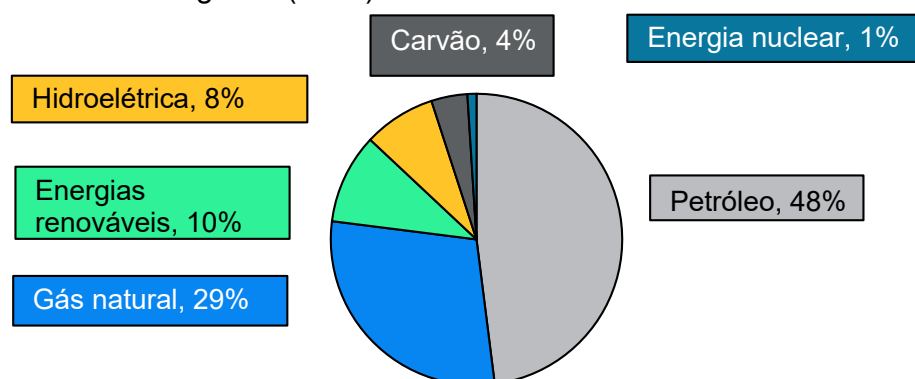
5.4 Infraestrutura energética e implicações para a produção de SAF

No contexto da produção de SAF, é relevante analisar o panorama energético geral da região. Os balanços energéticos, bem como o peso das energias renováveis, são relevantes para as perspectivas de produção potencial de SAF e da possível demanda por parte de outros setores.

No setor de energia limpa, a região está emergindo como uma das principais líderes globalmente. Em 2024, as energias renováveis e a energia hidrelétrica representavam algumas das principais fontes de energia, conforme mostrado na figura abaixo, ressaltando a forte orientação da região para a energia mais limpa. Aproveitando seus recursos florestais, bem como a produção de milho e cana-de-açúcar, a região também se tornou a segunda maior produtora mundial de biocombustíveis²⁵⁸. Esse perfil energético reflete o potencial significativo para uma maior expansão das fontes de energia limpa.

Quase metade do abastecimento energético na ALC provém do petróleo, mas a relevância das energias renováveis e da energia hidrelétrica está crescendo

% do abastecimento energético (2024)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy 2025, análise da ICF

5.4.1 Desafios relacionados à refinação e ao abastecimento de querosene de aviação

A confiabilidade e a adequação da refinação e do abastecimento de querosene de aviação são fundamentais para as operações futuras das companhias aéreas na ALC. Sem um abastecimento estável e suficiente de querosene de aviação a um preço competitivo, as companhias aéreas enfrentam riscos elevados de aumento dos custos operacionais (que já representam uma parcela significativa dos custos operacionais gerais das companhias aéreas na região, entre 30% e 40%) e desafios operacionais, o que pode prejudicar a conectividade e o crescimento econômico em toda a região. À medida que a aviação continua a se expandir, garantir uma infraestrutura de refino modernizada e uma distribuição de combustível resiliente será essencial não apenas para manter a confiabilidade do serviço, mas também para apoiar a competitividade da região no mercado global de transporte aéreo.

Em 2024, a capacidade de refino da região permaneceu limitada, contribuindo com 8% da capacidade mundial de refino de 4.731 Mt por ano.

Nos próximos 25 anos, a OPEP projeta um aumento modesto da capacidade de refino de apenas 45,3 Mt na região²⁵⁹. Com o crescimento geral previsto para permanecer estável, a segurança do abastecimento dependerá das taxas de utilização, da modernização das refinarias para atender aos padrões de combustíveis mais limpos e de sinais políticos estáveis para atrair investimentos.

Historicamente, grande parte da indústria de petróleo bruto foi configurada para atender à demanda do mercado dos EUA, priorizando as exportações em detrimento da produção de combustíveis refinados para consumo doméstico, incluindo querosene de aviação. A infraestrutura de refino, como a da região do Caribe, foi projetada

²⁵⁸ Revisão Estatística da Energia Mundial do Energy Institute, 2025

²⁵⁹ <https://publications.opec.org/woo/Download>

em torno da produção de combustível residual para atender às necessidades dos EUA, em vez de realizar a capacitação para combustíveis de transporte dentro da região²⁶⁰.

Além disso, a utilização geral da capacidade de refino na região diminuiu drasticamente, passando de 84% em 2000 para apenas 62% em 2024. Esse declínio decorre de uma combinação de desafios estruturais e externos. Sanções geopolíticas, particularmente contra a Venezuela devido às restrições dos EUA ao seu fornecimento de petróleo, limitaram severamente um dos maiores sistemas de refino da região. Ao mesmo tempo, o reinvestimento limitado, a manutenção adiada e a infraestrutura envelhecida, inclusive em grandes hubs de refino como o México, reduziram a eficiência e a confiabilidade. Muitas instalações também permanecem tecnologicamente ultrapassadas e são inadequadas para processar os tipos de petróleo bruto mais pesados que dominam a produção regional, restringindo ainda mais a utilização, levando à dependência de importações e afetando a segurança energética da região.

Houve casos em que falhas na infraestrutura de refino interromperam o abastecimento de querosene de aviação. Em agosto de 2024, uma falha de energia na refinaria de Cartagena levou a uma escassez nacional de Jet A1 na Colômbia. Os estoques de combustível se esgotaram nos aeroportos de Leticia, Montería e Bucaramanga, enquanto os níveis em Bogotá caíram para níveis críticos, afetando todas as companhias aéreas da Colômbia. A interrupção gerou um déficit de 5% nas entregas de Jet A1 e exigiu importações de emergência de 12.700 toneladas. Isso destacou a importância de garantir um abastecimento confiável de querosene de aviação na região. Como resultado, o declínio dos ativos de refino corroeu a capacidade da região de atender à demanda por querosene de aviação, reforçando a dependência de importações, apesar da capacidade instalada substancial. Isso é demonstrado na figura abaixo. Relatórios recentes destacaram desafios significativos na gestão do abastecimento de querosene de aviação em vários países da região. Essas interrupções no abastecimento levaram a um aumento da incerteza e da instabilidade no setor de aviação, com consequências diretas, incluindo atrasos nos voos. Tais questões ressaltam a necessidade urgente de melhorar a coordenação e a supervisão dos processos de distribuição de combustível para mitigar riscos operacionais e garantir a confiabilidade dos serviços de transporte aéreo²⁶¹, ²⁶², ²⁶³.

²⁶⁰ <https://digitalcommons.law.umaryland.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1103&context=mjil>

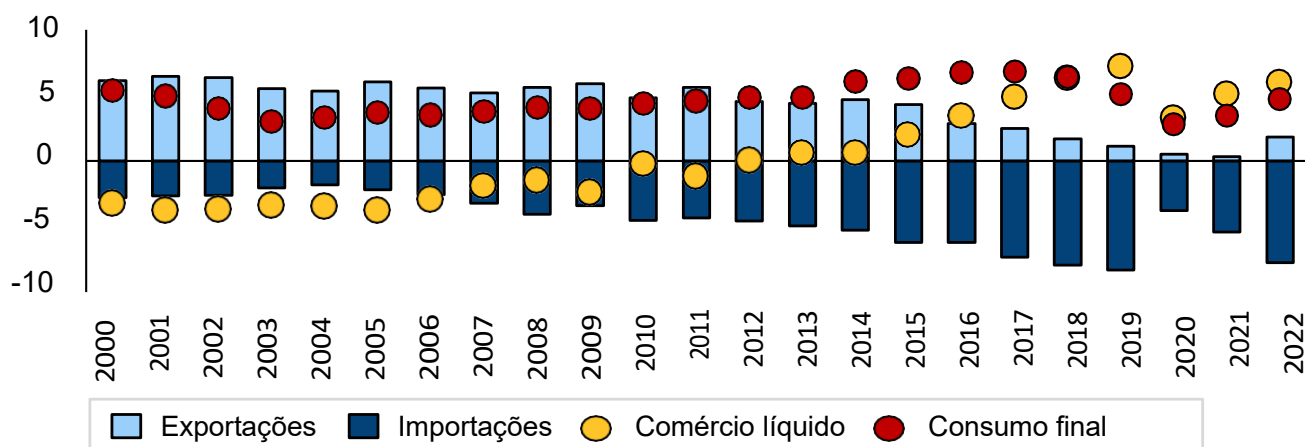
²⁶¹ https://rpp.pe/lima/actualidad/pasajeros-de-vuelo-a-arequipa-se-encuentran-varados-en-avion-por-falta-de-combustible-en-nuevo-aeropuerto-jorge-chavez-noticia-1638386?ref=rpp#google_vignette

²⁶² <https://www.infobae.com/peru/2025/06/03/mtc-senala-a-lap-como-responsable-del-desabastecimiento-de-combustible-en-el-nuevo-aeropuerto-jorge-chavez/>

²⁶³ <https://rpp.pe/lima/actualidad/lap-reconoce-que-no-hay-correccion-de-combustible-en-nuevo-aeropuerto-tras-reportes-de-vuelos-varados-noticia-1638394?ref=rpp>

A região da ALC tornou-se importadora líquida de querosene de aviação na última década

Comércio de querosene de aviação na ALC (Mt)

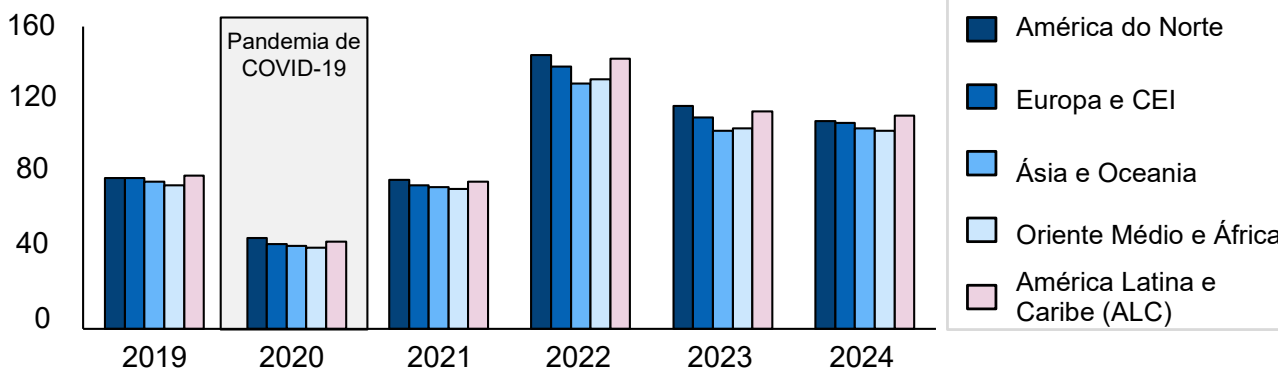


Fonte: Estatísticas da ONU, análise da ICF

Em 2024, a América Latina e o Caribe registraram os preços mais altos de querosene de aviação por barril em todo o mundo e têm sido consistentemente a região com os preços mais altos ou os segundos mais altos desde 2019, conforme mostrado na figura abaixo. Isso é impulsionado pela forte dependência da região em relação às importações, pela capacidade de refino limitada e desigual e por uma cadeia de abastecimento fragmentada, desafios ainda mais agravados pela depreciação da moeda e pelos elevados custos logísticos.

O preço do querosene de aviação na ALC tem historicamente estado na faixa mais alta em comparação com outras regiões

Preço regional do querosene de aviação (USD/barril)



Fonte: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc. Índices Platts World Querosene de Aviação. Análise da ICF

5.5 Sustentabilidade e o mercado global de SAF

A região da ALC é frequentemente citada como tendo um potencial significativo para a produção de SAF, devido à sua vasta paisagem agrícola e à consequente disponibilidade de matéria-prima. No entanto, a avaliação desse potencial deve ser cuidadosamente ponderada em relação aos riscos associados, incluindo a competição com a produção de alimentos, a mudança no uso da terra e as pressões sobre os ecossistemas locais, com foco particular na biodiversidade, na disponibilidade de água e no impacto social em grande escala. Para lidar com esses riscos, critérios robustos de sustentabilidade são um componente essencial da política de combustíveis renováveis, garantindo que a implantação de combustíveis renováveis traga benefícios ambientais e sociais genuínos para cada país e sua população como um todo.

É necessária uma avaliação mais aprofundada para compreender plenamente os impactos ambientais, sociais e econômicos mais amplos da produção de SAF na ALC. A coleta abrangente e independente de dados e a análise científica nos níveis de bacias hidrográficas, paisagem e região são cruciais para identificar possíveis trade-offs e consequências indesejadas. Incentivos governamentais ou apoio direcionado poderiam desempenhar um papel fundamental na aceleração do desenvolvimento dessa base de evidências robusta, incentivando a colaboração entre as partes interessadas e garantindo a transparência. Tais iniciativas não apenas forneceriam aos formuladores de políticas informações essenciais para a tomada de decisões responsáveis, mas também facilitariam o alinhamento com as normas internacionais de sustentabilidade, fortalecendo, em última instância, a posição da região no mercado global de SAF.

5.5.1 Sustentabilidade no contexto da América Latina e do Caribe

Vários países da região da ALC estão começando a explorar estruturas de sustentabilidade para SAF, muitas vezes com base em orientações internacionais, como o CORSIA e os princípios da UNFCCC. Em particular, o princípio da UNFCCC de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, é importante na região devido à sua ampla diversidade socioeconômica, oferecendo uma estrutura para equilibrar o desempenho ambiental com as realidades do desenvolvimento local. Essas iniciativas ainda se encontram em um estágio inicial, refletindo tanto o estado incipiente da implantação de SAF na região quanto a necessidade de integrar considerações mais amplas de desenvolvimento nas estruturas de sustentabilidade.

Ao mesmo tempo, os dados necessários para apoiar plenamente a certificação CORSIA e outras avaliações internacionais de sustentabilidade ainda estão em desenvolvimento na ALC. Grande parte das informações disponíveis hoje provém de estudos de unidades de produção, que fornecem insights úteis, mas podem não captar impactos sistêmicos mais amplos em nível de bacia hidrográfica, paisagem ou região. O fortalecimento de dados científicos independentes nessas escalas daria aos formuladores de políticas maior confiança para lidar com possíveis trade-offs e evitar consequências indesejadas. Isso também representa uma oportunidade para a região construir uma base de evidências robusta que apoie tanto as prioridades nacionais quanto o alinhamento internacional.

Os mercados atuais de biocombustíveis na América Latina e no Caribe são dominados por matérias-primas provenientes de culturas primárias, como cana-de-açúcar, soja e palma. Essas matérias-primas estão bem estabelecidas, mas suscitam preocupações recorrentes sobre a mudança no uso da terra, a biodiversidade e a segurança alimentar — o que poderia influenciar seu papel como matérias-primas para os combustíveis sustentáveis de origem agrícola (SAF). Ao mesmo tempo, há um interesse crescente em resíduos, subprodutos e produtos derivados, como bagaço de cana, resíduos florestais, óleo de cozinha usado e resíduos sólidos urbanos. Esses materiais geralmente exercem menor pressão sobre o uso da terra, mas ainda exigem contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida e rastreabilidade. Esquemas de certificação voluntária, como Bonsucro, ISCC e RSB, desempenham um papel complementar ao lado do esquema CORSIA, fornecendo padrões de sustentabilidade específicos para cada matéria-prima que ajudam a definir como as diferentes opções de SAF são avaliadas na região.

Até o momento, a maioria dos esforços regulatórios em combustíveis renováveis na América Latina tem se concentrado nos mercados domésticos de biocombustíveis, em vez do comércio internacional. Vários países poderiam buscar aproveitar esses programas de biocombustíveis existentes para apoiar a sustentabilidade dos SAF.

A harmonização dos critérios de sustentabilidade é um importante facilitador para o comércio internacional de SAF. Isso se aplica tanto ao comércio dentro da região da ALC quanto globalmente — onde critérios de sustentabilidade mais rigorosos podem ser aplicados. Com investimento contínuo em dados, análise científica e monitoramento independente, a região tem uma grande oportunidade de moldar uma indústria de SAF sustentável que atenda tanto às prioridades de desenvolvimento local quanto às necessidades globais do transporte aéreo.

Embora a América Latina e o Caribe estejam dando os primeiros passos em direção à sustentabilidade dos SAF, muitas estruturas permanecem em estágios iniciais de desenvolvimento. A diversidade socioeconômica da região ressalta a relevância das orientações da UNFCCC na elaboração de políticas de sustentabilidade equitativas e sensíveis ao contexto. O alinhamento com os critérios internacionais de sustentabilidade pode ampliar o acesso ao mercado, particularmente no contexto do “book and claim”; no entanto, o grau de importância pode variar de

acordo com as prioridades estratégicas e o estágio de desenvolvimento de cada país.

5.5.2 Padrões globais de sustentabilidade dos SAF

Em todo o mundo, diferentes jurisdições estabeleceram suas próprias estruturas para reger o desempenho ambiental e social dos SAF. O alinhamento dos critérios entre essas estruturas é, portanto, fundamental para garantir que os SAF possam circular livremente pelos mercados, mantendo a credibilidade em termos de resultados climáticos e de sustentabilidade. No contexto dos SAF, a União Europeia, o Reino Unido e os Estados Unidos são os mais avançados em termos de progresso na implementação de critérios de sustentabilidade, enquanto outras regiões ainda estão desenvolvendo estruturas nacionais ou dependem principalmente de normas internacionais, como o CORSIA.

5.5.2.1 União Europeia

Na UE, os critérios de sustentabilidade para os SAF são definidos pelo ReFuelEU²⁶⁴ e pela Diretiva de Energias Renováveis III (RED III). Essas estruturas especificam limites mínimos de redução de GEE ao longo do ciclo de vida, em comparação com o combustível fóssil para aviação (94 gCO₂e/MJ), de 65%²⁶⁵ para biocombustíveis e de pelo menos 70% para combustíveis de carbono reciclado e combustíveis renováveis de origem não biológica. O SAF produzido a partir de culturas não é elegível ao abrigo do ReFuelEU Aviação. A RED III também contém disposições ambientais relativas à biodiversidade, à alteração do uso da terra e à saúde do solo, mas não contém orientações sobre os aspectos sociais ou econômicos da sustentabilidade.

5.5.2.2 Reino Unido

No Reino Unido, os critérios de sustentabilidade para SAF são definidos no Mandato SAF, parte da Obrigação de Combustíveis Renováveis para Transportes. Os combustíveis elegíveis devem atingir uma redução mínima de 40% nas emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida em relação ao querosene de aviação (~89 gCO₂e/MJ). Apenas resíduos e detritos, combustíveis de carbono reciclado e combustíveis power-to-liquid produzidos com hidrogênio de baixo carbono e eletricidade renovável são elegíveis. Os biocombustíveis de origem vegetal (incluindo aqueles produzidos a partir de culturas energéticas dedicadas) estão excluídos.

O mandato inclui disposições ambientais para a biomassa florestal, exigindo a legalidade da colheita, o manejo florestal sustentável e a rastreabilidade das matérias-primas. Assim como o marco da UE, o Mandato SAF do Reino Unido concentra-se principalmente no desempenho ambiental e não fornece orientações detalhadas sobre aspectos de sustentabilidade social ou econômica.

5.5.2.3 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, os critérios de sustentabilidade para SAF são definidos principalmente pela Lei One Big Beautiful Bill (OBBBA), que prorroga o Crédito de Produção de Combustível Limpo 45Z até 2029. Os combustíveis elegíveis devem ter emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida inferiores a 47,4 gCO₂e/MJ.

No entanto, a partir de 2026, apenas matérias-primas provenientes dos Estados Unidos, Canadá ou México se qualificam para esse crédito²⁶⁶, excluindo efetivamente as importações da América Latina. Embora a OBBBA também remova a mudança indireta no uso da terra (ILUC) dos cálculos de emissões, isso tem implicações diretas limitadas para o mercado latino-americano (exceto o México), dada a restrição do crédito às matérias-primas e à produção da América do Norte.

5.5.2.4 Resumo

Assim como o CORSIA, as estruturas de sustentabilidade para SAF na UE, no Reino Unido e nos EUA incluem critérios claros de redução de GEE, embora os limites específicos e as matérias-primas elegíveis variem entre as regiões. O CORSIA estabelece uma linha de base global mais baixa de 10% de redução de GEE, o que significa que os SAF que atendem apenas ao CORSIA podem não satisfazer automaticamente os requisitos mais rigorosos desses mercados regionais. Por exemplo, na UE, culturas alimentares e forrageiras não são consideradas

²⁶⁴ Vale ressaltar que a análise da IATA sugere que, sob o mandato ReFuelEU, as taxas de SAF pagas pelas companhias aéreas têm sido mais do que o dobro dos preços de mercado do SAF, uma vez que os fornecedores de combustível, como partes obrigadas (fornecedores de combustível), optaram por repassar as multas de conformidade: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/excessive-saf-fees-in-the-eu--a-lost-opportunity-to-abate-2.7-million-tonnes-of-co2>

²⁶⁵ De acordo com a RED II, os biocombustíveis para transporte devem atingir uma redução de 50% para instalações em operação antes de outubro de 2015, 60% para as instaladas após outubro de 2015, aumentando para 65% de redução para novas instalações após 2021.

²⁶⁶ <https://rsmus.com/insights/services/business-tax/obbba-tax-clean-fuels.html#:~:text=Exclusion%20of%20foreign%20feedstocks:%20Effective,producers>

matérias-primas elegíveis, enquanto podem ser utilizadas nos EUA e no âmbito do CORSIA, desde que os critérios de sustentabilidade exigidos sejam cumpridos. Ao mesmo tempo, o CORSIA adota uma abordagem mais holística, abordando temas de sustentabilidade ambiental, social e econômica, enquanto as estruturas da UE, do Reino Unido e dos EUA se concentram principalmente no desempenho ambiental. As diferenças nos padrões de sustentabilidade podem afetar o acesso ao mercado para os SAF, uma vez que os produtores devem se alinhar aos requisitos específicos de cada jurisdição.

5.6 Disponibilidade de matéria-prima biogênica para a produção de SAF

Esta seção descreve a abordagem para a seleção das matérias-primas analisadas neste estudo e a metodologia utilizada para quantificar sua disponibilidade para SAF. A discussão é apresentada por matéria-prima para facilitar uma descrição mais eficiente da metodologia. Os resultados são resumidos em nível nacional na Seção 5.6.5.

5.6.1 Seleção de matérias-primas

As matérias-primas consideradas estão resumidas na tabela abaixo e foram selecionadas com base em:

1. Reconhecimento pela CORSIA – considerando apenas as matérias-primas atualmente reconhecidas pela CORSIA²⁶⁷.
2. Compatibilidade com pelo menos um dos processos de conversão de SAF aprovados pela ASTM²⁶⁸.
3. Relevância comercial comprovada na América Latina – incluindo apenas as matérias-primas com cadeias de abastecimento estabelecidas ou emergentes na região, garantindo a viabilidade a curto e médio prazo para a produção de SAF.

Tabela 40: Resumo das matérias-primas consideradas para a produção de SAF neste estudo

Matéria-prima	Classificação da ICAO	Processos de conversão compatíveis
Óleo de palma	Produto primário	HEFA, coprocessamento
Óleo de soja	Produto principal	HEFA, coprocessamento
Cana-de-açúcar (como etanol)	Produto primário	AtJ
Milho (como etanol)	Produto primário	AtJ
Gorduras animais	Subproduto	HEFA, coprocessamento
Resíduos agrícolas	Resíduo	FT, AtJ (como etanol lignocelulósico)
Resíduos florestais	Resíduo	FT
Óleo de cozinha usado	Resíduos	HEFA, coprocessamento
Resíduos sólidos urbanos	Resíduos	FT
Gases residuais (como etanol)	Resíduos	AtJ

5.6.2 Metodologia geral

A metodologia geral seguida para a avaliação da disponibilidade de matéria-prima para combustíveis renováveis (SAF) é ilustrada na figura abaixo. O primeiro passo é a avaliação do potencial de matéria-prima, definido como a quantidade máxima da matéria-prima disponível. O segundo passo é estimar o potencial técnico, que representa a fração do potencial teórico que pode ser efetivamente coletada, levando em conta as limitações técnicas e logísticas. Em seguida, são consideradas as utilizações concorrentes existentes da matéria-prima, incluindo aplicações em alimentos, rações, materiais, geração de calor e energia, e combustíveis de transporte não SAF (por exemplo, transporte rodoviário). A quantidade restante após essas deduções é considerada como a matéria-prima disponível para a produção de SAF.

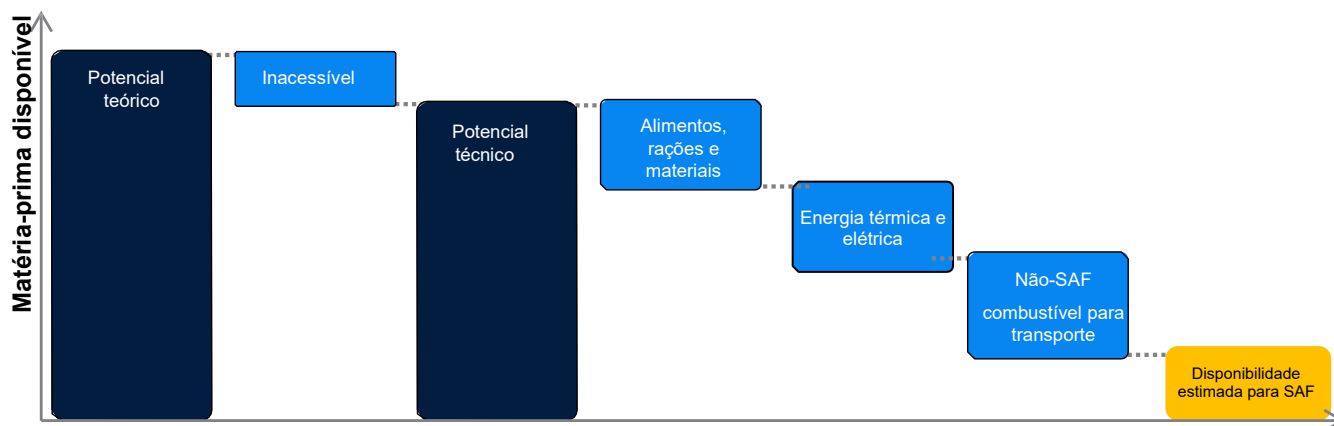
Nas seções a seguir, o potencial teórico e a disponibilidade estimada para SAF são avaliados para cada uma das matérias-primas identificadas na tabela acima²⁶⁹.

²⁶⁷ Matérias-primas SAF da ICAO

²⁶⁸ ICAO – Processos de conversão aprovados

²⁶⁹ Volumes de matérias-primas quantificados como energia utilizando as seguintes conversões (GJ/t): UCO, gorduras animais e óleos vegetais: 37; etanol: 27; resíduos agrícolas e florestais: 18; MSW: 12.

Segue-se uma abordagem em três etapas para obter a matéria-prima disponível na ALC para a produção de SAF



Fonte: Análise da ICF

5.6.3 Análise aprofundada das matérias-primas

5.6.3.1 Óleo de cozinha usado

O óleo de cozinha usado (UCO) é uma matéria-prima à base de óleo adequada para a produção de SAF por meio do processo HEFA e de coprocessamento. Para a avaliação do potencial de SAF a partir do UCO, a análise começa com os dados populacionais²⁷⁰ para cada país dentro do escopo do estudo. Posteriormente, o consumo de petróleo é explorado, bem como a taxa de coleta, para estimar os volumes de UCO recuperáveis. Essa metodologia segue a abordagem desenvolvida no trabalho de Teixeira et al.²⁷¹, onde 320 g de UCO são gerados por kg de petróleo consumido, e 232 g por kg de UCO são subsequentemente valorizados.

A partir do UCO coletado, é realizada uma análise para estimar a disponibilidade de SAF, excluindo os volumes alocados a outros setores de transporte. É importante destacar que 0,1 Mt foi subtraído, pois essa quantidade é alocada para a produção de biodiesel (FAME)²⁷². A disponibilidade de SAF resultante é apresentada na tabela a seguir.

Tabela 41: Disponibilidade teórica de UCO e disponibilidade estimada para a produção de SAF com base nas estimativas para 2025²⁷³

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	8,37	1,66
Bahamas	0,02	-
Brasil	45,67	5,39
Chile	1,22	0,24
Colômbia	7,99	1,59
República Dominicana	2,42	0,48

²⁷⁰ <https://population.un.org/wpp/>

²⁷¹ Teixeira, M. R., Nogueira, R., & Nunes, L. M. (2018). Avaliação quantitativa da valorização de óleos de cozinha usados em 23 países. *Gestão de resíduos*, 78, 611-620.

²⁷² https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biocombustíveis%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0022.pdf

²⁷³ análise da ICF

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Equador	3,52	0,70
El Salvador	0,20	0,02
México	16,30	3,23
Panamá	0,38	0,08
Peru	2,78	0,55
Total	88,87	13,94

Os resultados mostram que o Brasil, a Argentina e o México apresentam a maior disponibilidade de SAF derivada da matéria-prima UCO, enquanto a disponibilidade de SAF nas Bahamas, em El Salvador e no Panamá é insignificante (menos de 1 PJ).

Perspectivas

A coleta de óleo de cozinha usado (UCO) está passando por uma fase de crescimento em muitos países da América Latina, impulsionada por regulamentações ambientais, campanhas de conscientização pública e a crescente viabilidade do UCO como matéria-prima para biocombustíveis. Considerando o crescimento populacional, a expansão das redes de coleta e o aumento da participação dos consumidores, espera-se que a disponibilidade teórica de UCO continue sua tendência de alta, tornando-o uma fonte potencial de SAF.

5.6.3.2 Gorduras animais

As gorduras animais incluem sebo bovino, banha de porco e gordura de frango, que são subprodutos da processamento industrial. Assim, enquanto as gorduras comestíveis são utilizadas na produção de alimentos, as gorduras não comestíveis oferecem oportunidades para aplicações como ração para animais de estimação, ração animal, geração de energia e fabricação de sabão. Essa matéria-prima é atraente, pois possui custos mais baixos em comparação com os óleos vegetais; no entanto, apresenta preocupações de sustentabilidade e restrições regulatórias em vários países²⁷⁴. Conforme mostrado na tabela abaixo, essa matéria-prima pode ser convertida em SAF usando as rotas HEFA e de coprocessamento. Para avaliar a disponibilidade de SAF derivada de gorduras animais, a produção de sebo em cada país é analisada. Para isso, os valores de produção de sebo e de gado foram extraídos da FAO^{275, 276}.

Tabela 42: Disponibilidade teórica de gorduras animais e disponibilidade estimada para a produção de SAF com base nas estimativas para 2025²⁷⁷

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	10,34	1,34
Bahamas	-	-
Brasil	44,86	5,12
Chile	0,74	0,09
Colômbia	7,86	1,02
República Dominicana	-	-
Equador	-	-
El Salvador	0,22	0,03

²⁷⁴ Blanshard, A., McCurdy, M., & Chokhani, S. (2021). *Alimentando o Net Zero: Como a indústria da aviação pode implantar combustível de aviação sustentável em quantidade suficiente para atender às ambições climáticas. Um relatório da ICF para o ATAG Waypoint 2050.*

²⁷⁵ <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

²⁷⁶ <https://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/en/>

²⁷⁷ análise da ICF

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
México	7,84	1,01
Panamá	-	-
Peru	1,57	0,20
Total	73,43	8,81

O Brasil é responsável por aproximadamente 72% da produção de sebo entre os países incluídos neste estudo, seguido pela Argentina (15%). Com base nessa análise, o sebo tem sido utilizado em diversas aplicações, tais como formulações de rações para suínos, aves e animais de estimação, bem como nas indústrias química, de higiene e de limpeza, na produção de vernizes, lubrificantes e glicerina para uso farmacêutico. No Brasil, o principal uso do sebo é a produção de biodiesel, devido à sua relação custo-efetivo e sustentabilidade como fonte de gordura²⁷⁸.

Na prática, aproximadamente 30% do processo de processamento de subprodutos animais no Brasil é utilizado para a produção de biodiesel, 27% para produtos de higiene pessoal, 30% em rações para animais de estimação²⁷⁹ e os 13% restantes para exportação. Em termos de exportações, os Estados Unidos representaram aproximadamente 97% das exportações de sebo do Brasil em 2025²⁸⁰. Além disso, 0,64 Mt de sebo no Brasil foram excluídas, pois são destinadas à produção de biodiesel (FAME)²⁸¹. Consequentemente, o potencial para produzir SAF a partir de gorduras animais na região depende principalmente do redirecionamento dos volumes de exportação para a produção doméstica. A análise da disponibilidade de SAF a partir de gorduras animais foi realizada utilizando a mesma metodologia aplicada ao Brasil, resultando em um potencial estimado de 5,12 PJ para o Brasil, seguido por 1,34 PJ para a Argentina e 1,01 PJ para o México.

Perspectivas

A gordura animal é um coproduto da indústria de processamento de carne. Embora a indústria da carne na América Latina seja substancial, seu crescimento é tipicamente constante e vinculado ao crescimento populacional e ao crescimento econômico. O volume de gordura animal gerado é relativamente consistente com a escala da produção e do processamento pecuário. Embora haja um interesse crescente em seu uso para biocombustíveis, não se espera que a oferta geral tenha aumentos dramáticos além do crescimento constante da indústria primária.

5.6.3.3 Óleo de palma

O óleo de palma é um óleo vegetal amplamente produzido na América Latina, derivado do fruto da palmeira-de-óleo. No contexto da produção de combustíveis renováveis (SAF), ele pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de SAF baseada em HEFA ou como insumo em rotas de coprocessamento.

Conforme mostrado na tabela abaixo, a Colômbia é o maior produtor de óleo de palma na ALC, com produção atingindo 65 PJ (1,77 Mt) em 2022. Outros produtores significativos incluem Brasil, Equador, México e Peru, com produção anual em toda a região, incluindo a Colômbia, totalizando 131 PJ (3,5 Mt).

O óleo de palma é amplamente utilizado na produção de alimentos e outros produtos industriais, como sabão e detergentes. Esses usos têm precedência sobre a produção de biocombustíveis de acordo com a hierarquia de resíduos. Assim, o óleo de palma atualmente utilizado para esses fins, incluindo as exportações, foi considerado indisponível para a produção de SAF nesta análise.

²⁷⁸ <https://brazilianrenderers.com/fats/>

²⁷⁹ <https://nara.org/wp-content/uploads/2024/10/Lucas-Cypriano-Brasil-update.pdf>

²⁸⁰ <https://www.fastmarkets.com/insights/us-saf-exporters-become-key-outlet-for-brazilian-tallow-in-august/>

²⁸¹ https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2024-0022.pdf

Tabela 43: Disponibilidade teórica e estimada de óleo de palma para a produção de SAF com base em estimativas para 2025²⁸²

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	-	-
Bahamas	-	-
Brasil	21,70	0,0035
Chile	-	-
Colômbia	65,40	-
República Dominicana	1,70	-
Equador	16,20	-
El Salvador	-	-
México	13,20	-
Panamá	2,20	-
Peru	10,40	-
Total	130,80	0,0035

O óleo de palma também está estabelecido na ALC como matéria-prima para a produção de biodiesel (ou seja, éster metílico de ácido graxo, FAME), que pode ser consumido internamente ou exportado. Para os fins desta análise, assumiu-se que o volume de óleo de palma atualmente consumido internamente como biodiesel não estava disponível para a produção de combustíveis renováveis, a fim de evitar o deslocamento do uso existente de energia renovável.

Por outro lado, presume-se que o óleo de palma atualmente exportado como biodiesel seja potencialmente redirecionável e possa ser retido no mercado interno para a produção de SAF. Utilizando dados do USDA, apenas o Brasil²⁸³ foi identificado como exportador de biodiesel à base de palma²⁸⁴.

Embora a Colômbia seja o maior produtor de óleo de palma na região da América Latina e do Caribe (ALC) e possua uma indústria doméstica de biodiesel desenvolvida, toda a produção doméstica é consumida dentro da Colômbia²⁸⁵. Da mesma forma, a produção doméstica de biodiesel no Peru é inteiramente utilizada no mercado interno²⁸⁶. A produção de biodiesel nos demais países produtores de palma é limitada²⁸⁷.

Com base nas premissas descritas acima, nenhum dos países avaliados possui um suprimento atual de óleo de palma que provavelmente esteja disponível para a produção de SAF. Verificou-se que o volume de biodiesel derivado de óleo de palma exportado do Brasil é insignificante (0,0035 PJ, ~0,09 quilotoneladas). Nos demais países produtores de óleo de palma, a produção atual é inteiramente consumida para uso doméstico ou destinada a exportações já comprometidas com outros mercados de maior prioridade (ou seja, alimentos/rações), tornando-a indisponível para a produção de SAF.

Perspectivas

A análise descrita acima destaca que, nos níveis atuais de produção, é provável que haja oportunidades limitadas para o uso do óleo de palma como matéria-prima para a produção de SAF na ALC, uma vez que a oferta existente está comprometida com outros usos em mercados estabelecidos. Isso indica que seria necessário um aumento na oferta de óleo de palma para facilitar seu uso na produção de SAF. Isso poderia ser possível, por exemplo, por meio de práticas agrícolas aprimoradas que proporcionem maiores rendimentos nas plantações existentes. No

²⁸² análise da ICF

²⁸³ USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis do Brasil 2024

²⁸⁴ Isso pressupõe que a composição da matéria-prima das exportações brasileiras de biodiesel reflete as proporções utilizadas na produção doméstica.

²⁸⁵ USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis da Colômbia 2025

²⁸⁶ USDA – Relatório Anual de Biocombustíveis do Peru 2025

²⁸⁷ Nota Técnica nº 5: Uma introdução ao setor de biocombustíveis na América Latina e no Caribe

entanto, é essencial que o uso do óleo de palma como matéria-prima para SAF não desvie a matéria-prima dos mercados existentes, particularmente o de alimentos, nem induza mudanças no uso da terra para a produção de palma.

A sustentabilidade é uma consideração crítica para o uso do óleo de palma como matéria-prima para SAF. No âmbito da estrutura atual do CORSIA, um valor de ILUC é especificado apenas para o óleo de palma produzido na Indonésia e na Malásia. Como resultado, o óleo de palma produzido na ALC não é considerado uma matéria-prima elegível ao CORSIA. Além disso, é improvável que o óleo de palma processado sem a captura de metano do efluente de usinas de óleo de palma (POME) atenda aos requisitos de sustentabilidade do CORSIA. Na Colômbia, por exemplo, menos de 12% das usinas de processamento possuem atualmente sistemas de captura de metano instalados²⁸⁸. Além disso, garantias quanto ao potencial impacto sistemático de qualquer expansão da produção de óleo de palma para territórios atualmente não plantados sobre a água e a biodiversidade, e, em particular, a prevenção de danos a áreas úmidas, turfeiras ou savanas.

5.6.3.4 Óleo de soja

O óleo de soja é um óleo vegetal amplamente produzido na América Latina, derivado da soja, e pode ser usado como matéria-prima para produzir SAF à base de HEFA ou como insumo em rotas de coprocessamento.

Conforme mostrado na tabela abaixo, a produção de óleo de soja na ALC está fortemente concentrada no Brasil e na Argentina, que produzem cerca de 323 PJ (8,7 Mt) e 276 PJ (7,5 Mt) por ano, respectivamente. O volume de produção de óleo é determinado tanto pela escala da produção de soja quanto pela capacidade de esmagamento doméstico²⁸⁹.

Por exemplo, na Argentina, a capacidade de esmagamento excede a produção doméstica de soja, exigindo a importação de grãos para utilizar plenamente as instalações. Em contrapartida, no Brasil, a capacidade de esmagamento é de apenas cerca de metade da safra anual de soja, o que significa que uma parcela significativa da soja é exportada, em vez de ser transformada em óleo no mercado interno.

Nesta análise, a soja que não é processada internamente foi considerada indisponível para a produção de combustíveis renováveis, uma vez que as exportações de grãos inteiros da América Latina se destinam principalmente aos mercados de alimentos e rações²⁹⁰. A soja comercializada dentro da região e posteriormente processada é refletida nos números de produção de óleo de soja do país onde ocorre o processamento, evitando assim a dupla contagem.

O óleo de soja é amplamente utilizado na América Latina como matéria-prima para a produção de biodiesel. Em consonância com a metodologia aplicada ao óleo de palma (ver Seção 5.6.3.3), assumiu-se que apenas o volume de óleo de soja atualmente exportado como biodiesel poderia ser considerado disponível para a produção de SAF.

Tabela 44: Disponibilidade teórica e estimada de óleo de soja para a produção de SAF com base em estimativas para 2025²⁹¹

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	276,00	31,30
Bahamas	-	-
Brasil	323,00	-
Chile	0,38	-
Colômbia	6,80	-
República Dominicana	0,21	-
Equador	0,18	-
El Salvador	-	-

²⁸⁸ <https://elpalmicultor.com/biogas-impulso-economia-descarbonizacion-sector/>

²⁸⁹ <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/agriculture/022725-brazilian-soybean-meal-pulls-ahead-as-argentina-faces-supply-challenges>

²⁹⁰ <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-reliance-soybean-imports-continues-despite-cutback-plans-braun-2025-04-30/>

²⁹¹ análise da ICF

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
México	36,80	-
Panamá	0,26	-
Peru	0,05	-
Total	643,68	31,30

Esta análise mostrou que a Argentina exporta 31 PJ (0,85 Mt) de óleo de soja como biodiesel, o que equivale a cerca de 50% da produção doméstica²⁹², e poderia ser considerado disponível para SAF. As quantidades disponíveis no Brasil são muito menores, onde o biodiesel produzido internamente é quase todo consumido no país²⁹³.

Perspectivas

O potencial para aumentar a produção de óleo de soja na ALC para uso como matéria-prima para combustíveis renováveis (SAF) provavelmente será limitado devido a preocupações com mudanças no uso da terra, impacto sobre a água e a natureza em grande escala. As previsões da OCDE-FAO sugerem que a produção global de soja continuará a crescer cerca de 1,3% ao ano até 2029²⁹⁴, impulsionada por aumentos no rendimento (66% do crescimento da produção) e aumento da área colhida (33% do crescimento da produção). No entanto, esse crescimento é em grande parte uma resposta ao aumento da demanda por ração animal²⁹⁴. Portanto, qualquer nova demanda por óleo de soja para combustíveis renováveis provavelmente se somaria a essa demanda forte, existente e crescente por ração animal. Isso cria, por natureza, pressão para uma maior expansão de terras, mesmo considerando os ganhos de produtividade.

Historicamente, a produção de soja na ALC tem sido um fator impulsionador do desmatamento. Embora os esforços para eliminar o desmatamento direto na região tenham sido relativamente bem-sucedidos²⁹⁴, recentemente ficou demonstrado que a expansão das plantações de soja está impulsionando indiretamente o desmatamento no Brasil e na Argentina²⁹⁴.

Além disso, no Brasil, a oferta doméstica de soja já excede a capacidade de esmagamento; portanto, essa capacidade teria que ser aumentada antes que o óleo de soja pudesse ser produzido como matéria-prima para combustíveis renováveis no país²⁸⁹.

5.6.3.5 Bioetanol de cana-de-açúcar e milho

O bioetanol é uma matéria-prima fundamental para a produção de SAF por meio do processo de conversão AtJ (álcool para combustível de aviação). Ele é tipicamente produzido por meio da fermentação de culturas ricas em açúcar ou amido, principalmente cana-de-açúcar e milho na América Latina. Embora seu uso principal continue sendo como combustível para transporte rodoviário, o bioetanol também é empregado nas indústrias farmacêutica, alimentícia, química, de bioplásticos e de higienizantes²⁹⁵.

Tabela 45: Disponibilidade teórica e estimada de bioetanol para a produção de SAF com base em estimativas para 2025²⁹⁶

Países	Potencial teórico em 2025 (PJ)		Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)	
	Cana-de-açúcar	Milho	Cana-de-açúcar	Milho
Argentina	-	16,00	-	0,85
Bahamas	-	-	-	-

²⁹² USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis da Argentina 2024

²⁹³ USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis do Brasil 2024

²⁹⁴ https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2020_11_Study_Cerulogy_soy_and_deforestation.pdf

²⁹⁵ Etanol - UNICA

²⁹⁶ análise da ICF

Brasil	537,00	150,00	5,30	1,50
Chile	-	-	-	-
Colômbia	8,30	-	-	-
República Dominicana	-	-	-	-
Equador	1,13	-	-	-
El Salvador	-	-	-	-
México	-	-	-	-
Panamá	-	-	-	-
Peru	3,40	-	-	-
Total	549,83	166,00	5,30	2,35

Conforme mostrado na tabela acima, a produção atual de bioetanol na América Latina é dominada pelo Brasil, onde são produzidos 686 PJ (32,5 bilhões de litros) anualmente. Tanto a cana-de-açúcar (325,7 Mt) quanto o milho (15,5 Mt) são utilizados como matérias-primas para a produção de bioetanol no Brasil, sendo a cana-de-açúcar a matéria-prima dominante. A maior parte do bioetanol produzido, 609 PJ (28,8 bilhões de litros), é utilizada como combustível para transporte rodoviário no Brasil, com o consumo doméstico de bioetanol como combustível atingindo 628 PJ (29,7 bilhões de litros) em 2024.

A Argentina²⁹² (16 PJ, 0,76 bilhão de litros), a Colômbia²⁹⁷ (8 PJ, 0,40 bilhão de litros), o Peru²⁹⁸ (3 PJ, 0,16 bilhão de litros) e o Equador²⁹⁹ (1 PJ, 0,05 bilhão de litros) também possuem indústrias de produção de bioetanol estabelecidas, mas em uma escala significativamente menor do que a do Brasil.

Em consonância com a abordagem utilizada para o óleo de palma e de soja, presume-se que o bioetanol atualmente consumido como combustível de transporte não esteja disponível para a produção de SAF, a fim de preservar os usos existentes de energia renovável. Assim, apenas o bioetanol exportado foi considerado disponível para SAF. Dos países avaliados, apenas o Brasil e a Argentina são exportadores líquidos de bioetanol para combustível, exportando 6,76 PJ (320 milhões de litros) e 0,85 PJ (40 milhões de litros), respectivamente; esses volumes foram tratados nesta análise como disponíveis para a produção de SAF.

Perspectivas

Todos os países da região da ALC têm potencial para produzir culturas de açúcar e amido adequadas para o bioetanol. A produção do setor poderia aumentar devido a melhorias nos rendimentos das culturas, como as previstas pelas Projeções da FAO para a Alimentação e a Agricultura até 2050. No entanto, aumentar a produção de etanol por meio do plantio de mais culturas suscita preocupações com a segurança alimentar e a mudança no uso da terra, a água e a natureza, o que pode limitar o papel que as culturas podem desempenhar na produção de etanol para aplicações de SAF.

O milho de segunda safra oferece um caminho promissor para aumentar o fornecimento de etanol de forma sustentável. Cultivado entre as safras principais (normalmente de soja), ele apresenta menor risco de mudança no uso da terra e foi recentemente certificado pelo CORSIA como tendo baixo risco de mudança no uso da terra³⁰⁰. No entanto, a intensidade de carbono do milho de segunda safra é maior, resultando em menor eficiência energética por hectare³⁰¹. No Brasil, prevê-se que a produção de etanol de milho duplique até 2032, impulsionada em parte pelo aumento do uso do milho de segunda safra³⁰². Atualmente, 12 usinas adicionais de etanol de milho estão em construção no Brasil, enquanto outras nove receberam aprovação regulatória³⁰².

²⁹⁷ USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis da Colômbia 2025

²⁹⁸ USDA – Relatório Anual sobre Biocombustíveis do Peru 2025

²⁹⁹ USDA – Relatório Anual sobre Açúcar no Equador 2025, IICA - O estado dos biocombustíveis líquidos nas Américas 2024

³⁰⁰ Primeiro Certificado ISCC de Baixo Risco de Alteração do Uso da Terra Emitido - Sistema ISCC

³⁰¹ Comentários das partes interessadas

³⁰² Produção de etanol de milho do Brasil deve quase dobrar até 2032 com a expansão do setor | S&P Global Energy

A longo prazo, também é provável que o aumento da eletrificação do transporte rodoviário possa fazer com que o bioetanol atualmente utilizado no setor fique disponível para o SAF. Por exemplo, o ICCT desenvolveu um cenário para uma alta adoção de veículos elétricos no Brasil, o que sugere que os VEs poderiam representar 70% das vendas de veículos novos no país até 2050³⁰³.

Dada a importância do Brasil como produtor de etanol, foi realizada uma avaliação para determinar o impacto do aumento da produtividade da cana-de-açúcar, do aumento da produção de etanol de milho e de uma adoção agressiva de veículos elétricos no país sobre a disponibilidade de bioetanol a longo prazo para a produção de SAF.

Nessas circunstâncias, a análise mostra que a produção total de bioetanol poderia aumentar em 22% até 2050, impulsionada principalmente pelo aumento da produção de etanol de milho³⁰⁴. Ao mesmo tempo, uma adoção massiva de veículos elétricos (representando cerca de 40% da frota de veículos de passageiros³⁰⁵) poderia reduzir a demanda do setor de transporte rodoviário em cerca de 30% até 2050. Combinados, esses fatores liberam 384 PJ de bioetanol até 2050, que poderiam ser utilizados na produção de SAF.

Considerando que a maioria dos outros países da região da ALC é importadora líquida de bioetanol, é provável que qualquer aumento na produção doméstica seja consumido pelos mercados existentes.

5.6.3.6 Etanol a partir de gases residuais

Os gases residuais de siderúrgicas são os gases produzidos como subprodutos durante os processos de fabricação de aço. Esses gases contêm componentes combustíveis que podem ser capturados e utilizados como energia ou convertidos em biocombustíveis. Especificamente, nesta análise, o gás do forno básico de oxigênio (BOF) é considerado para conversão em etanol, que pode então ser convertido em SAF por meio do processo AtJ.

Tabela 46: Disponibilidade teórica de etanol e disponibilidade estimada para a produção de SAF com base em estimativas para 2025³⁰⁶

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	2,30	0,28
Bahamas	-	-
Brasil	19,90	2,50
Chile	0,60	0,08
Colômbia	0,84	0,10
República Dominicana	-	-
Equador	0,32	0,04
El Salvador	0,05	0,01
México	8,60	1,10
Panamá	-	-
Peru	0,97	0,12
Total	33,58	4,23

³⁰³ A transição para veículos elétricos na indústria automotiva do Brasil e seus efeitos sobre empregos e renda – ICCT 2025

³⁰⁴ <https://unica.com.br/en/the-sector/etanol/> e a UNICA afirmam que a produção de etanol de milho poderá subir para 14 bilhões de litros em 2033, partindo dos 8,2 bilhões de litros da safra de 2024/2025.

³⁰⁵ Com base no cenário de eletrificação do ICCT, com as vendas de carros de passeio elétricos atingindo 6% dos veículos novos em 2030, 40% em 2040 e 70% em 2050.

³⁰⁶ análise da ICF

O Instituto Aço Brasil providenciou as estatísticas sobre a produção de aço bruto na América Latina para 2024³⁰⁷. Durante o processo de fabricação do aço, são produzidos 100 Nm³ de gás BOF por tonelada de aço bruto³⁰⁸. Nesta análise, assumiu-se que 70% do aço bruto produzido na ALC utiliza a tecnologia BOF e que 75% dele é atualmente utilizado para recuperação de energia na usina siderúrgica, com o 25% sendo queimado³⁰⁸. Presumiu-se que os gases residuais atualmente queimados estariam disponíveis para a produção de SAF, com uma eficiência de captura conservadora de 50%. Com base na literatura disponível, assumiu-se que 0,64 toneladas de etanol são produzidas por 1.000 Nm³ de gás BOF. Os resultados desta análise estão resumidos na tabela acima.

Esta análise mostra que há um potencial moderado para a produção de etanol a partir de gases residuais de siderúrgicas tanto no Brasil quanto no México, com base nas premissas descritas acima. No entanto, deve-se observar que esta análise reflete a produção de gases residuais em todas as siderúrgicas de cada país. Dados da literatura sugerem que, para ser viável, uma usina de etanol deve produzir 58 milhões de litros de etanol por ano³⁰⁸, o que exigiria a geração de aproximadamente 72 milhões de Nm³ de gases residuais em um único local. Portanto, embora exista potencial regional, a escala de geração de gases residuais em usinas siderúrgicas individuais pode ser insuficiente para sustentar uma única usina de etanol comercialmente viável.

Perspectivas

É improvável que a disponibilidade de gases residuais de siderúrgicas para a produção de SAF aumente em relação aos níveis atuais, já que, globalmente, o setor provavelmente avançará em direção a tecnologias de baixo carbono para atender à demanda por produtos de baixo carbono.

5.6.3.7 Resíduos agrícolas

Os resíduos agrícolas são subprodutos do cultivo e processamento de culturas que permanecem após a colheita ou extração do produto primário. Eles podem ser convertidos em SAF por meio de gaseificação e do processo Fischer-Tropsch (FT), ou via AtJ após a conversão em etanol celulósico. Os resíduos agrícolas podem ser divididos em duas categorias: resíduos de campo e resíduos de processamento.

Os resíduos de campo são gerados no próprio campo durante a colheita, principalmente a partir de cereais e outros grãos, como o arroz. Entre eles estão a palha e os caules que permanecem após a coleta do produto principal. Uma parte desses resíduos é normalmente deixada no campo por razões agronômicas. Da mesma forma, quando coletados, esses resíduos são frequentemente utilizados na pecuária. A fração desses resíduos que não é necessária para nenhuma dessas finalidades pode ser utilizada para geração de calor e energia ou produção de biocombustíveis. No entanto, a coleta desses resíduos representa um desafio econômico e um desafio logístico, uma vez que sua geração está dispersa por sistemas agrícolas descentralizados.

Os resíduos de processamento são gerados no local onde a cultura primária é processada. Estes incluem cascas, palhas, espigas e bagaço. Os resíduos de processamento podem ser utilizados na alimentação animal e também são frequentemente utilizados no local para gerar calor e energia para as operações de processamento. Os resíduos de processamento não necessários para esses fins são considerados disponíveis como matéria-prima para SAF.

Em toda a região da ALC, os resíduos agrícolas excedentes a essas necessidades são frequentemente queimados a céu aberto, contribuindo para a poluição do ar e as emissões de CO₂. Redirecionar esse recurso para a produção de SAF, portanto, não apenas forneceria uma matéria-prima renovável, mas também traria benefícios ambientais adicionais ao substituir a queima a céu aberto por um uso de maior valor na hierarquia de resíduos.

Para avaliar a disponibilidade de SAF derivada de resíduos agrícolas, a metodologia examinou inicialmente os dados de produção agrícola e pecuária de cada país no âmbito deste projeto, utilizando o FAOSTAT³⁰⁹ como fonte primária de dados. As principais culturas produtoras de resíduos em cada país foram identificadas e incluídas nesta análise.

Os números médios de produção para o período 2019–2023 foram utilizados para contabilizar quaisquer

³⁰⁷ Estatística-da-Indústria-do-Aço_2º_TRI_2025.pdf

³⁰⁸ https://www.safmaps.com/dbms-app/#off_gases_reports

³⁰⁹ FAOSTAT

influências climáticas ou ambientais anuais sobre a produção. Posteriormente, foram identificados os principais resíduos de campo e de processamento, juntamente com suas respectivas razões resíduo-produto (RPRs)^{310,311,312,313}. O resultado final é obtido pela soma dos resíduos de campo e de processamento, após contabilizar as alocações para bioenergia não destinada ao transporte, outras aplicações não relacionadas à bioenergia e a parcela de resíduos deixada no campo. Os resíduos de campo e de processamento foram considerados separadamente para garantir que suas respectivas cadeias de valor fossem refletidas com precisão.

*Tabela 47: Disponibilidade teórica e estimada de resíduos agrícolas para a produção de SAF com base em estimativas para 2025*³¹⁴

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	8.110,00	462,09
Bahamas	0,18	0,02
Brasil	19.818,00	1.215,00
Chile	133,00	7,30
Colômbia	374,00	27,83
República Dominicana	64,00	4,35
Equador	171,00	11,41
El Salvador	66,00	4,52
México	2.043,00	120,72
Panamá	32,00	2,09
Peru	279,00	69,33
Total	31.090,18	1.924,66

A disponibilidade de SAF derivada de resíduos agrícolas é apresentada na tabela acima. Os resultados mostram que o Brasil possui uma disponibilidade potencial de 1.215 PJ, seguido pela Argentina (462,09 PJ). Por outro lado, Equador, Chile, El Salvador, República Dominicana, Panamá e Bahamas apresentam uma disponibilidade inferior a 15 PJ.

Perspectivas

Embora já seja significativa, a potencial para aumentar a coleta e a valorização de resíduos agrícolas permanece amplamente inexplorada. Melhorias nas práticas agrícolas, aliadas à crescente conscientização sobre os princípios da economia circular e ao desenvolvimento de tecnologias de processamento descentralizadas, sugerem um futuro em que uma proporção maior desses resíduos possa ser coletada e convertida de forma econômica. Políticas que promovam a agricultura sustentável e soluções de conversão de resíduos em energia impulsionarão ainda mais esse crescimento.

5.6.3.8 Resíduos florestais

Os resíduos florestais são materiais orgânicos produzidos pelas indústrias florestais e madeireiras existentes. Eles podem ser gaseificados para produzir SAF por meio de uma rota de FT, ou usados como matéria-prima para ATJ após a conversão em etanol lignocelulósico. Os resíduos florestais podem ser divididos em duas classes: resíduos de colheita e resíduos de processamento.

Os resíduos de colheita incluem troncos de pequeno diâmetro com pouco ou nenhum valor comercial, juntamente

³¹⁰ Produção Sustentável de Biocombustíveis de Segunda Geração (EN)

³¹¹ Microsoft Word - ldoc9385_ornl_feedstock_potential_final_feb18.doc

³¹² Osei, I., Addo, A., & Kemausuor, F. (2021). Utilização de resíduos de culturas para geração de energia renovável em Gana: Revisão da abordagem de avaliação de matérias-primas, tecnologias de conversão e desafios. *Ghana Journal of Technology*, 5(2), 29-42.

³¹³ Martinez-Valencia, L., & Valderrama-Rios, C. Produção sustentável de combustível de aviação na Colômbia: oportunidades e desafios.

³¹⁴ Análise da ICF

com galhos, detritos e outros materiais normalmente deixados no solo da floresta durante operações de manejo florestal ou derrubada. Manter parte desse material na floresta durante o manejo é essencial para preservar a biodiversidade, a fertilidade do solo e o carbono do solo. No entanto, parte dele pode ser recuperada como parte das operações florestais existentes, embora isso geralmente exija investimento adicional em infraestrutura de coleta e transporte. Na América Latina, particularmente em áreas rurais, parte desse recurso também é utilizada como lenha³¹⁵.

Os resíduos de processamento são subprodutos gerados durante a conversão da madeira colhida em serrarias e outras instalações de processamento de madeira. Estes incluem serragem, casca, lascas, placas e aparas. Ao contrário dos resíduos de colheita, os resíduos de processamento estão concentrados em locais centralizados e já são amplamente utilizados para aplicações como bioenergia, celulose e produtos de painéis. Devido a esses usos existentes, os resíduos de processamento não foram incluídos nesta análise, pois desviá-los para a produção de SAF poderia competir com indústrias estabelecidas, muitas das quais têm precedência de acordo com a hierarquia de resíduos.

Os resíduos da exploração florestal podem ser gerados tanto em florestas primárias (naturais) quanto em florestas plantadas comercialmente. Esta análise concentra-se apenas nos resíduos provenientes de florestas plantadas, uma vez que estes são geralmente produzidos em um ambiente mais regulamentado e gerenciado. Consequentemente, há uma maior probabilidade de que sua recuperação possa ser realizada de maneira sustentável, com risco reduzido de impactos negativos sobre a biodiversidade e as funções ecossistêmicas. Em contrapartida, os resíduos de florestas primárias foram excluídos, uma vez que é muito mais difícil garantir que sua remoção seja sustentável ou ambientalmente responsável.

Nesta análise, a disponibilidade potencial de resíduos de colheita florestal de plantações de eucalipto e pinheiro foi estimada da seguinte forma, de acordo com a metodologia relatada pela Agroicone³¹⁶:

$$\text{Harvesting Residues} = \text{Planted area} \times \text{Mean annual increment} \times \text{Residue ratio} \times \text{Recovery rate}$$

Onde:

- A área plantada é a área total de floresta plantada em cada país, em hectares
- O incremento médio anual (IMA) é a quantidade de biomassa produzida por hectare por ano, específica para cada país e espécie
- A taxa de resíduos representa a proporção da biomassa colhida que se transforma em resíduos (por exemplo, galhos, detritos, pequenos troncos); e
- A taxa de recuperação é a fração desses resíduos que pode ser viável coletar, após considerar as restrições ecológicas e operacionais.

Os dados sobre a área de floresta plantada foram obtidos do conjunto de dados de uso da terra da FAO³¹⁷, exceto para o Brasil, onde foi utilizado um estudo específico sobre plantações de eucalipto³¹⁸. A distribuição da floresta plantada entre eucalipto e pinheiro, bem como os MAIs específicos por país e as taxas de resíduos específicas por espécie, foram obtidos da literatura. Por fim, assumiu-se uma taxa de recuperação de 50% em todos os casos³¹⁶.

Equador, El Salvador, República Dominicana e Panamá foram excluídos desta análise devido às suas áreas relativamente pequenas de florestas plantadas e à escassez de dados confiáveis. Nesses países, as informações disponíveis não distinguem claramente entre plantações comerciais destinadas à produção de madeira e plantações estabelecidas para fins de conservação ou restauração.

De acordo com um estudo recente da Agroicone, a maioria dos resíduos de colheita é atualmente deixada no campo, principalmente por razões econômicas, e não agronômicas³¹⁶. Portanto, a estimativa de resíduos de colheita florestal relatada neste estudo representa a disponibilidade potencial e pressupõe que a logística e a infraestrutura necessárias poderiam ser implementadas para apoiar sua coleta. A Agroicone também observa que

³¹⁵ Astrid Schilmann et al 2021 Environ. Res. Lett. 16 105012. DOI: 10.1088/1748-9326/ac28b2

³¹⁶ https://www.safmaps.com/dbms-app/pdfs/SAF_WOOD_RESIDUES_Final.pdf

³¹⁷ <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>

³¹⁸ https://www.safmaps.com/dbms-app/#eucalyptus_reports

uma pequena quantidade desses recursos é, por vezes, coletada para uso na geração de calor/energia por usinas, embora não sejam fornecidos dados quantitativos. Nesta análise, assumimos conservadoramente que 30% dos resíduos de colheita coletados são utilizados para geração de calor/energia e, conseqüentemente, não estão disponíveis para SAF.

Tabela 48: Disponibilidade teórica e estimada de resíduos florestais para a produção de SAF com base nas estimativas para 2025³¹⁹

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	87,20	30,50
Bahamas	725,00	254,00
Brasil	215,00	75,00
Chile	27,60	9,70
Colômbia	2,40	-
República Dominicana	5,67	-
Equador	0,69	-
El Salvador	10,60	3,71
México	0,54	-
Panamá	23,30	8,20
Peru	-	-
Total	1.098,00	381,11

Os resultados desta análise são apresentados na tabela acima e mostram que existe um potencial significativo para os resíduos florestais como matéria-prima, particularmente no Brasil, onde 254 PJ de resíduos de colheita florestal poderiam estar disponíveis anualmente. No total, 94% dos resíduos de colheita florestal na ALC estão concentrados no Brasil, no Chile e na Argentina. No entanto, conforme discutido acima, é importante observar que esses valores representam a disponibilidade potencial; as limitações atuais em logística, combinadas com os desafios econômicos do uso de resíduos florestais para a produção de combustíveis renováveis, significam que a oferta acessível é consideravelmente menor no momento.

Perspectivas

A análise apresentada na tabela acima destaca o forte potencial para o uso de resíduos florestais como matéria-prima sustentável para a produção de SAF na ALC, desde que a infraestrutura necessária de coleta, transporte e processamento seja desenvolvida e que as restrições ecológicas, como a saúde do solo e a biodiversidade, sejam mantidas.

5.6.3.9 Resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos urbanos (MSW) são uma matéria-prima diversificada que compreende vários fluxos de resíduos, como alimentos, resíduos verdes, plásticos, papel e papelão, entre outros. A coleta, a gestão, os padrões de composição, o tamanho e a densidade da população afetam as características do MSW. Conseqüentemente, a composição do MSW varia significativamente entre países e cidades³²⁰.

Atualmente, uma parte significativa dos resíduos sólidos urbanos globais é mal gerenciada, com pelo menos um terço sendo despejado a céu aberto ou queimado, o que representa uma oportunidade global para produzir SAF a partir de resíduos urbanos, aprimorando as práticas de gestão de resíduos e contribuindo para a redução das

³¹⁹ Análise da ICF

³²⁰ Gueboudji, Z., Mahmoudi, M., Kadi, K., & Nagaz, K. (2024). Characteristics and impacts of municipal solid waste (MSW): A review. Technical Landfills and Waste Management: Volume 1: Landfill Impacts, Characterization and Valorisation, 115-134.

emissões da aviação³²¹. A produção de SAF a partir de MSW por meio da tecnologia FT consiste em evitar as emissões que resultariam da decomposição dos resíduos em aterros sanitários. Ao converter a fração biogênica dos MSW em combustíveis drop-in, a pegada de carbono do ciclo de vida do transporte aéreo pode ser reduzida³²².

A avaliação dos MSW foi realizada com base em um modelo ICF detalhado. Na prática, o modelo de MSW utiliza dados do Grupo Banco Mundial³²³ para estabelecer uma relação em nível nacional entre a população histórica e o PIB, a fim de prever o volume, a composição e o destino dos resíduos de cada país. Essa ferramenta considera todos os resíduos, incluindo os não coletados, os destinados à reciclagem e compostagem, à incineração, ao aterro, ao despejo e outras especificações adequadas para a produção de SAF.

A tabela a seguir mostra a disponibilidade de SAF considerando os resíduos sólidos urbanos como matéria-prima. Conforme observado, esta análise foi realizada com base na geração de resíduos e no PIB per capita. Assim, a disponibilidade de SAF derivada de resíduos sólidos urbanos é maior no Brasil (558 PJ), seguido pelo México, Argentina e Colômbia.

Tabela 49: Disponibilidade teórica de MSW e disponibilidade estimada para a produção de SAF com base em estimativas para 2025³²⁴

País	Potencial teórico em 2025 (PJ)	Disponibilidade estimada para SAF em 2025 (PJ)
Argentina	249,60	114,00
Bahamas	3,60	1,20
Brasil	1.092,00	558,00
Chile	98,40	57,60
Colômbia	177,60	75,60
República Dominicana	63,60	28,80
Equador	80,40	33,60
El Salvador	24,00	14,40
México	732,00	237,60
Panamá	24,00	13,20
Peru	127,20	55,20
Total	2.672,40	1.189,20

Apesar dos desafios associados ao seu uso, os resíduos sólidos urbanos (MSW) demonstraram potencial para a produção de combustíveis alternativos (SAF). O aprimoramento das práticas de gestão de resíduos poderia resultar em um aumento na disponibilidade de resíduos municipais e industriais. Os biocombustíveis e a bioenergia surgiram como soluções viáveis por meio da valorização de resíduos. As estruturas da economia circular e da bioeconomia são identificadas como fatores-chave que moldam as estratégias de resíduos para alternativas na ALC³²⁵.

³²¹ Kafle, S., Karki, B. K., Sakhakarmy, M., & Adhikari, S. (2025). Uma revisão das rotas globais de gestão e valorização de resíduos sólidos urbanos. *Reciclagem*, 10(3), 113.

³²² Como todas as matérias-primas e tecnologias de produção de combustível de aviação sustentável (SAF) podem contribuir para a descarbonização da aviação | Notícias e opiniões | Air bp

³²³ População, total | Dados

³²⁴ análise da ICF

³²⁵ Ulloa-Murillo, L. M., Villegas, L. M., Rodríguez-Ortiz, A. R., Duque-Acevedo, M., & Cortés-García, F. J. (2022). Gestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no contexto de um modelo sustentável e circular: Análise das tendências na América Latina e no Caribe. *Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública*, 19(10), 6041.

Perspectivas

A produção de MSW está diretamente ligada ao crescimento populacional e à urbanização, que são tendências em curso na América Latina. À medida que as cidades se expandem e as práticas de gestão de resíduos melhoram (afastando-se dos aterros sanitários em direção a abordagens mais circulares), espera-se que a disponibilidade de MSW como matéria-prima para recuperação de energia e produção de SAF cresça significativamente. Mudanças nas políticas em direção à conversão de resíduos em energia e à recuperação de recursos serão fatores-chave.

5.6.4 Matérias-primas emergentes e oportunidades futuras

Este estudo se concentrou nos dados mais confiáveis para a região, a fim de garantir o melhor grau de precisão. No entanto, isso inclui a limitação de que matérias-primas e tecnologias potenciais possam ser desenvolvidas no futuro, oferecendo potencial adicional. Quatro estudos de caso foram destacados na seção a seguir.

5.6.4.1 Macauba

A palmeira de macauba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira produtora de óleo nativa da América tropical que apresenta frutificação intensa, resultando em alto rendimento de frutos e óleo. Estudos mostram que sua eficiência energética por hectare supera a de culturas energéticas tradicionais, como cana-de-açúcar, palma-de-óleo, girassol, milho e jatrofa³²⁶. Por exemplo, demonstrou-se que ela é de 7 a 10 vezes mais produtiva por hectare plantado do que a soja³²⁷.

O BNDES aprovou um financiamento de R\$ 257,9 milhões para a criação do Acelen Agripark, um centro de inovação tecnológica dedicado à pesquisa e ao desenvolvimento da macauba. Essa iniciativa faz parte do projeto integrado da Acelen para a produção de diesel renovável e SAF, com foco na domesticação da macauba e seu cultivo em terras degradadas³²⁸.

Esses números sugerem a viabilidade de integrar o cultivo da macauba a estratégias mais amplas de gestão sustentável da terra, utilizando porções mínimas de terras subutilizadas e permitindo a coexistência com outras iniciativas de reabilitação sem concorrência substancial. Atualmente, a macauba não consta da lista de combustíveis elegíveis ao CORSIA da ICAO.

5.6.4.2 Sargaço

O sargaço, também conhecido como *Sargassum*, é um tipo de alga marrom que periodicamente é levado para a costa em grandes quantidades em toda a região do Caribe. O sargaço tornou-se agora uma preocupação ambiental devido à sua proliferação sem precedentes nos últimos anos. Essas espessas camadas de algas acumulam-se ao longo da costa, sufocando as praias, prejudicando o turismo, prejudicando a pesca local e liberando gás de hidrogênio sulfídrico à medida que se decompõem, o que pode afetar a qualidade do ar e a saúde humana. O manejo e o descarte do sargaço tornaram-se uma questão urgente para muitas nações caribenhas.

Apesar desses desafios, o sargaço também representa uma oportunidade como matéria-prima potencial para combustíveis renováveis (SAF). Sua rápida taxa de crescimento, abundância e independência de terras aráveis o tornam um recurso renovável atraente. No entanto, os aspectos práticos da coleta em larga escala de sargaço estão repletos de dificuldades, incluindo seu alto teor de umidade, que complica o processamento, o transporte e o tratamento posterior, além dos obstáculos logísticos da colheita de biomassa mista, frequentemente arenosa, nas margens. Além disso, há uma falta de dados abrangentes e de pesquisas sobre as rotas de conversão e a viabilidade econômica da produção de SAF a partir do sargaço. Atualmente, embora o potencial seja reconhecido, são necessários avanços científicos e técnicos significativos antes que o sargaço possa contribuir de forma significativa para a cadeia de abastecimento de SAF.

O sargaço surgiu como um candidato potencial de matéria-prima para a produção de SAF no México, nas Bahamas e na República Dominicana, o que se alinha às metas mais amplas de sustentabilidade na região³²⁹. Atualmente, o sargaço não consta da lista de combustíveis elegíveis ao CORSIA da ICAO.

³²⁶ https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/202071/1/IIASA-WWF_Sustainable-Aviation-Fuels_South-America.pdf

³²⁷ <https://h2businessnews.com/brasil-acelen-anuncia-la-primera-extraccion-industrial-de-aceite-de-macauba-para-combustibles/>

³²⁸ [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/socioambiental/BNDES-aprova-R\\$-258-mi-a-Acelen-para-inovacao-e-desenvolvimento-da-macauba-para-combustiveis/](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/socioambiental/BNDES-aprova-R$-258-mi-a-Acelen-para-inovacao-e-desenvolvimento-da-macauba-para-combustiveis/)

³²⁹ Comunicações pessoais durante reuniões de engajamento (SEMARNAT)

5.6.4.3 Culturas intermediárias – camelina

Culturas de cobertura e intermediárias, como a camelina, oferecem uma abordagem sustentável ao utilizar terras aráveis subutilizadas sem comprometer a saúde do solo ou a produção agrícola existente. Ao contrário dos sistemas de policultivo, que cultivam duas ou mais culturas comerciais principais sequencialmente ou simultaneamente na mesma terra, as culturas de cobertura são normalmente plantadas entre as culturas principais ou durante períodos de pousio e destinam-se principalmente a proporcionar benefícios ambientais, embora também possam ser colhidas para produtos de valor agregado, como o SAF. Quando cultivada sob normas ambientais robustas, a camelina oferece novas oportunidades para os agricultores locais e aumenta a disponibilidade de matéria-prima energética, tudo isso evitando a competição com culturas alimentares e preservando as paisagens naturais.

Com base em dados de desenvolvedores locais³³⁰, a área total disponível para o cultivo de camelina é estimada em cerca de 30 milhões de hectares na Argentina, no Brasil, no Uruguai e no Paraguai. No entanto, isso representa um potencial máximo, e a área viável provavelmente será menor quando se considerar a adequação climática e outras restrições agronômicas, embora dados específicos ainda não estejam disponíveis. Por exemplo, na Argentina, a área disponível é estimada em 13,6 milhões de hectares, mas a área realisticamente viável está mais próxima de 11 milhões de hectares.

Os rendimentos de óleo por hectare são altamente variáveis, variando de 400 a 800 kg/ha. Supondo um rendimento médio de 600 kg/ha, a produção potencial máxima poderia atingir aproximadamente 18 Mt de óleo. Isso representa um recurso energético adicional significativo, que poderia atender tanto à aviação quanto a outros mercados fora da região. Deve-se observar, no entanto, que é improvável que a implantação no mundo real atinja essas estimativas máximas. Esses números têm como único objetivo fornecer uma indicação de áreas potenciais para exploração e desenvolvimento adicionais.

5.6.4.4 Gramíneas perenes

Gramíneas perenes, como o miscanthus e o switchgrass, são matérias-primas reconhecidas pelo CORSIA³³¹. Estas podem ser particularmente atraentes para a produção de SAF do ponto de vista ambiental quando comparadas a outras matérias-primas à base de safras, pois apresentam altos rendimentos anuais, requisitos mínimos de insumos (por exemplo, água, fertilizantes etc.) e podem crescer em terras marginais, degradadas ou subutilizadas³³². A capim-elefante também está emergindo como uma promissora matéria-prima perene, particularmente em regiões tropicais, para fornecer biomassa para biocombustíveis avançados. No entanto, a comercialização de gramíneas perenes para a produção de SAF está em um estágio inicial. Recentemente, a Jord, uma empresa especializada no cultivo de biomassa de gramíneas C4, cultivadas em terras marginais ou degradadas no Senegal e na República Dominicana, anunciou uma parceria com a Votion Biorefineries, desenvolvedora de tecnologia de biorrefinaria, com o objetivo de desenvolver SAF a partir de gramíneas C4³³³.

5.6.5 Resumo dos resultados

Os resultados da análise da disponibilidade de matéria-prima são apresentados na Tabela 50. Essa análise mostra que o Brasil é o país com o potencial mais significativo para a produção de SAF, com 2.046 PJ de matéria-prima potencialmente disponível. A Argentina (642 PJ) e o México (367 PJ) também possuem recursos notáveis.

As matérias-primas de origem vegetal, o óleo de coque de óleo de soja (UCO) e as gorduras animais estão atualmente limitadas, pois são amplamente destinadas a mercados existentes, como a produção de biodiesel ou aplicações alimentícias. Uma exceção notável é o óleo de soja na Argentina, onde as exportações significativas para biodiesel criam oportunidades potenciais para o desvio para SAF em condições de mercado em mudança. A médio e longo prazo, a disponibilidade dessas matérias-primas pode aumentar se a eletrificação do transporte rodoviário reduzir a demanda por combustíveis convencionais.

As matérias-primas emergentes, particularmente os resíduos agrícolas, representam um recurso substancial ainda inexplorado. Nossa análise sugere que 1.924 PJ de resíduos agrícolas poderiam ser mobilizados para a produção

³³⁰ Dados fornecidos à ICF pela Camelina Company com base em estudos próprios.

³³¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/saffeedstocks>

³³² O papel das gramíneas energéticas – Biocombustíveis sustentáveis no Reino Unido e na Europa - Haush

³³³ Jord e Votion, da Suécia, unem-se para produzir SAF a partir de gramíneas C4 | SAF Investor

de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) em toda a região, mesmo levando em conta os usos atuais para bioenergia e outros fins. Isso destaca a importância de desenvolver cadeias de abastecimento, incluindo infraestrutura de coleta, armazenamento e transporte, para transformar esse potencial em capacidade prática de produção de SAF, embora essas cadeias de abastecimento sejam frequentemente complexas e possam ser onerosas. A concretização desse potencial provavelmente exigirá políticas direcionadas, incentivos ao investimento e coordenação com as partes interessadas existentes nos setores agrícola e de bioenergia.

De modo geral, a análise regional revela uma estratégia dupla: exploração de curto prazo de óleos vegetais subutilizados em contextos específicos, aliada à ampliação de médio a longo prazo da utilização de resíduos por meio do desenvolvimento de cadeias de abastecimento e de arcabouços de políticas públicas de apoio.

Tabela 50: Resumo da disponibilidade de matéria-prima para SAF com base nas estimativas de produção para 2025, PJ

Matéria-prima	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	República Dominicana	Equador	El Salvador	México	Panamá	Peru	Bahamas
UCO	1,7	5,4	0,24	1,6	0,5	0,7	0,0	3,2	0,0	0,6	0,0
Gorduras animais	1,3	5,1	0,1	1,0	-	-	0,0	1,0	-	0,2	-
Óleo de palma	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Óleo de soja	31,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bioetanol de cana-de-açúcar e milho	0,9	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Etanol a partir de gases residuais	0,3	2,5	0,1	0,1	-	0,0	0,0	1,1	-	0,1	-
Resíduos agrícolas	462,0	1.215,0	7,3	27,8	4,4	11,4	4,5	120,0	2,1	69,3	0,0
Resíduos florestais	30,5	254,0	75,2	9,7	-	-	-	3,7	-	8,2	-
Resíduos sólidos urbanos	114,0	558,0	57,6	75,6	28,8	33,6	14,4	238,0	13,2	55,2	1,2
Total	642	2.047	141	116	34	46	19	367	15	134	1,2

Nota: Valores arredondados para uma casa decimal. Totais arredondados para o número inteiro mais próximo

5.7 Metodologia de cálculo do preço do SAF e premissas das projeções

Visão geral do preço do SAF

O setor de SAF permanece em um estágio inicial de desenvolvimento em comparação com o mercado estabelecido de querosene de aviação convencional, onde mecanismos transparentes de precificação estão em vigor há muitos anos. A produção global de SAF ainda é limitada, resultando em volatilidade de preços que reflete vários fatores influentes, como tipo de combustível, localização e acordos de compra (incluindo contratos à vista versus contratos de longo prazo).

Esta análise adota um **preço calculado para o SAF** que incorpora uma série de componentes, incluindo custo direto de produção, retorno sobre o investimento previsto e despesas logísticas associadas a atividades como mistura, transporte e armazenamento, bem como custos administrativos.

Atualmente, observa-se frequentemente um prêmio de mercado para o SAF, refletindo sua disponibilidade limitada, o estágio inicial do desenvolvimento de mercado e as complexidades envolvidas na ampliação das cadeias de abastecimento em comparação com o querosene de aviação convencional. Embora esse prêmio de mercado exista, é desafiador projetar as condições de mercado e refleti-las com precisão, uma vez que grandes flutuações têm sido observadas. No entanto, espera-se que esse prêmio diminua com o tempo, à medida que a maturidade do mercado avance, os volumes de produção aumentem, os avanços tecnológicos sejam concretizados e os marcos regulatórios evoluam. Espera-se que isso resulte na convergência do preço de mercado em direção ao preço calculado para o SAF. Esta seção tem como objetivo fornecer uma visão sobre essas dinâmicas, concentrando-se no preço calculado do SAF, oferecendo uma base para a avaliação da viabilidade econômica e do potencial futuro das rotas de desenvolvimento do SAF na região.

5.7.1 Metodologia

Foi desenvolvido um modelo técnico-econômico abrangente de fluxo de caixa descontado (DCF) para estimar o preço de diferentes tipos de SAF na América Latina e no Caribe. A análise estabelece uma linha de base para o preço mínimo de venda de combustível (MFSP) que reflete os custos relacionados à produção, logística, distribuição e certificação.

O modelo concentra-se nos principais fatores que determinam o preço, tais como o custo de produção influenciado pelo investimento de capital, pelas escolhas de matéria-prima e pelas configurações tecnológicas, bem como pelos custos operacionais, logísticos e administrativos. Ele reflete os desafios do desenvolvimento de instalações de SAF, particularmente para rotas que ainda estão emergindo ou têm implantação comercial limitada. As estimativas de custo baseiam-se em premissas consolidadas destinadas a fornecer uma visão representativa da economia de preços na região. Embora alguns parâmetros sejam adaptados a países específicos, as características individuais dos projetos podem levar a variações em relação a essas estimativas.

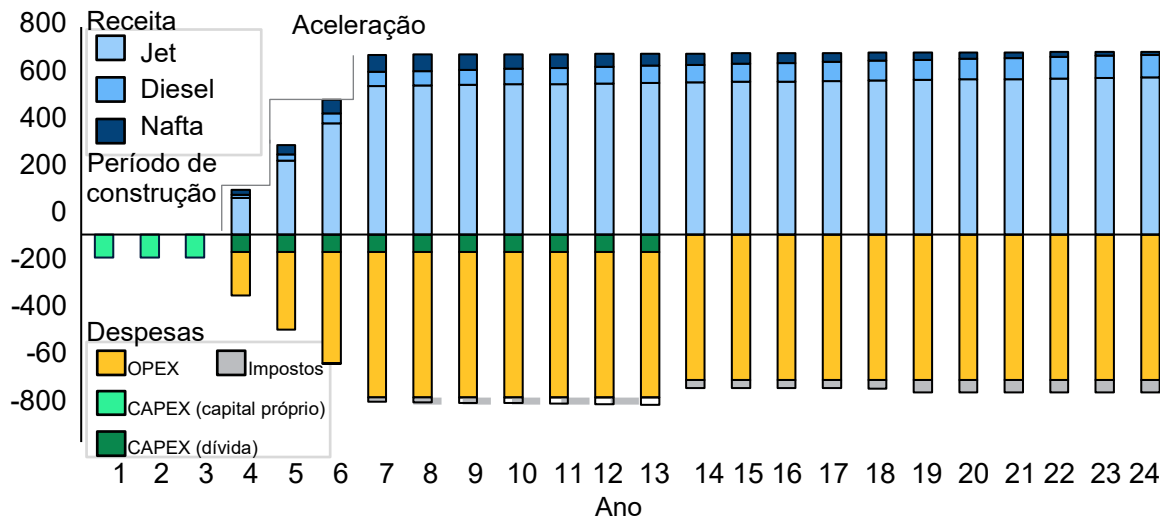
O modelo da ICF permite o cálculo do MSP por tecnologia e por país. O modelo pressupõe um período de construção de três anos para uma instalação, seguido por uma fase de aumento gradual da produção. Os principais componentes de custo incluem:

- Custos de capital (divididos em capital próprio e dívida)
- Despesas operacionais (incluindo serviços públicos, matérias-primas e custos fixos)
- A alíquota do imposto de renda sobre os lucros

As receitas são geradas pelas vendas de SAF e coprodutos, como diesel renovável e nafta. A figura abaixo ilustra um exemplo da perspectiva de fluxo de caixa anual para uma instalação potencial com início de construção em 2025.

Exemplo de perspectiva de fluxo de caixa para uma instalação de AtJ de cana-de-açúcar no Brasil

USD (milhões)



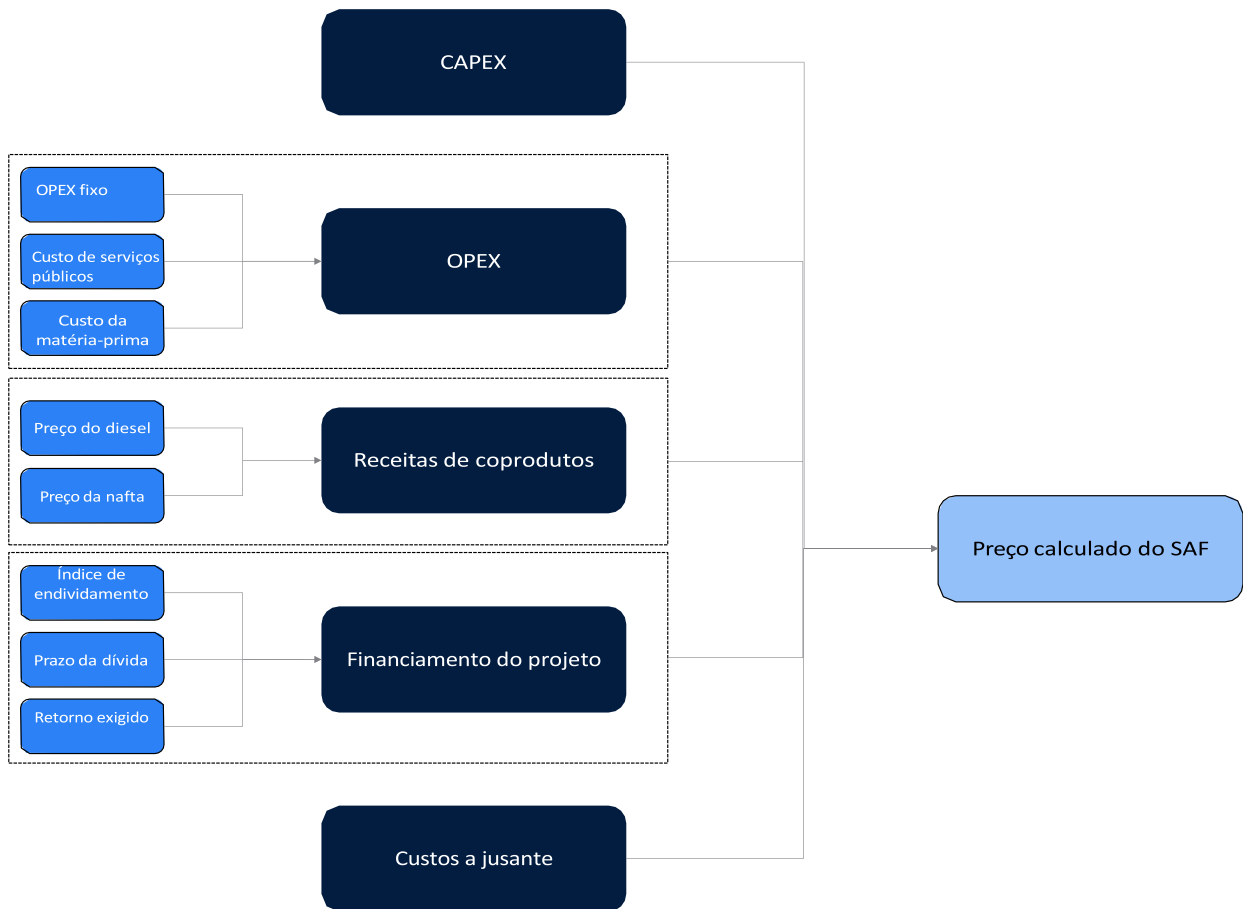
Fonte: Inclui dados da S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., IEA. Análise da ICF

Premissas: período de construção de 3 anos, período de ramp-up de 3 anos até que a capacidade total de produção seja atingida, vida útil de 20 anos, alíquota de imposto de renda de 34% sobre os lucros no Brasil AtJ (álcool para combustível de aviação)

O modelo é ajustado para todas as combinações de país, matéria-prima, tecnologia e ano de construção dentro do cronograma previsto (até 2050), produzindo uma perspectiva dinâmica de fluxo de caixa para cada instalação. Em seguida, calcula-se o MFSP necessário para que o SAF atinja um valor presente líquido (VPL) de zero na taxa interna de retorno (TIR) alvo. A determinação do preço estimado do SAF para cada matéria-prima, país e tecnologia, assumindo cronogramas de construção em intervalos de cinco anos, permite uma análise agregada subsequente. Embora as premissas financeiras variem por país, os resultados são apresentados em nível agregado para maior clareza. Custos logísticos e administrativos são adicionados para chegar ao preço calculado do SAF.

A figura abaixo apresenta a arquitetura do modelo e os fluxos de dados que alimentam o preço final calculado do SAF. Essas entradas e premissas são discutidas em detalhes nas seções a seguir. O modelo pressupõe uma instalação com capacidade nominal anual de 132.132 mmgpy (0,4 Mt), um cronograma de construção de 3 anos e um período de ramp-up até a produção operacional total. São feitos ajustes para possíveis paradas, e pressupõe-se uma vida útil operacional de 20 anos.

Diagrama de fluxo de entradas/saídas do modelo de cálculo de preço do SAF



5.7.2 CAPEX e OPEX fixo

5.7.2.1 CAPEX

As despesas de capital (CAPEX) representam uma parcela significativa do investimento inicial em uma instalação de produção de SAF. O CAPEX inclui todas as despesas necessárias para projetar, licenciar, adquirir, construir e colocar em operação a planta física antes do início da produção de SAF. Esses custos abrangem estudos de engenharia, gerenciamento de projetos, aquisição de terrenos, obras civis (como fundações e edifícios), compra e instalação de equipamentos de processo (reatores, colunas, separadores, compressores), infraestrutura elétrica, instrumentação e sistemas de segurança. Despesas indiretas — incluindo licenciamento, honorários advocatícios e contingências para desafios inesperados de construção — também fazem parte do CAPEX.

O valor e a estrutura desses custos dependem da rota tecnológica de SAF escolhida. Por exemplo, usinas baseadas em HEFA, frequentemente adaptadas de instalações de biodiesel existentes, geralmente requerem menos CAPEX em comparação com usinas baseadas em síntese FT, PtL e AtJ. Cada tecnologia tem seus próprios requisitos de engenharia, necessidades da cadeia de suprimentos e demandas por mão de obra e equipamentos especializados. A síntese FT, que converte biomassa ou resíduos em gás de síntese antes de produzir hidrocarbonetos líquidos, requer reatores de alta temperatura e unidades de tratamento de gás. O PtL requer eletrolisadores e unidades de síntese e melhoria, enquanto o AtJ depende de tecnologias de fermentação e melhoria. Como resultado, os custos de capital podem variar amplamente, de dezenas de milhões a várias centenas de milhões de dólares para uma instalação em escala comercial.

O CAPEX também varia de acordo com a localização devido aos custos locais de construção, às habilidades da força de trabalho e à disponibilidade de infraestrutura. Economias de escala e capacidades estabelecidas de engenharia e construção podem reduzir os custos, enquanto projetos em ambientes menos industrializados podem enfrentar custos mais elevados devido à importação de equipamentos ou à necessidade de expertise especializada.

Com o tempo, espera-se que o CAPEX para instalações de SAF diminua. Essa mudança é impulsionada pela implantação mais ampla de tecnologias de SAF, o que leva a maior experiência e eficiência durante a execução do projeto. A padronização de equipamentos e projetos de plantas pode reduzir ainda mais os custos, à medida que os fornecedores oferecem soluções prontas e as equipes de projeto se beneficiam de menos engenharia personalizada. Avanços na tecnologia de processo, como melhorias nos catalisadores, melhor integração de coprodutos ou controle de processo aprimorado, podem reduzir os requisitos de equipamentos e instalação. O crescimento da mão de obra qualificada e cadeias de suprimentos locais mais desenvolvidas também podem reduzir os custos associados à mão de obra especializada e aos componentes importados. O ritmo das reduções de CAPEX dependerá de fatores como desenvolvimento tecnológico, experiência do setor e a situação econômica mais ampla. De modo geral, as perspectivas sugerem que as instalações de SAF se tornarão gradualmente mais acessíveis e viáveis para uma gama mais ampla de mercados e investidores.

Esta análise utiliza projeções de custos de CAPEX desenvolvidas pela Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), que incluem custos de capital históricos (2020) e previstos por tecnologia até 2045 como linha de base³³⁴. Para fins de consistência, os valores relatados para produções específicas de SAF foram convertidos em CAPEX por tonelada de capacidade nominal, com ajustes baseados no rendimento. A interpolação foi aplicada para estimar as variações anuais nos custos de capital, permitindo que o modelo reflita essas variações de acordo com a data de construção prevista para cada usina e avalie como a evolução do CAPEX pode influenciar os custos de produção de SAF e, conseqüentemente, os preços. A ICF refinou ainda mais os custos de capital projetados por unidade de produção, refletindo a realidade de mercado para uma usina baseada em HEFA³³⁵. Além disso, o custo fornecido no estudo da IATA para a tecnologia FT refere-se a uma instalação piloto, enquanto o presente estudo pressupõe uma usina em escala comercial, refletindo-se em um custo de capital mais baixo. São adotados custos mais elevados no modelo em comparação com os valores originais da IATA, o que reflete potenciais ineficiências esperadas na região em comparação com mercados mais desenvolvidos.

Tabela 51: Evolução dos custos de CAPEX por tecnologia (USD/galão de capacidade nominal)

Tecnologia	Unidade	2020	2035	2045
HEFA	USD/galão	2,54	2,47	2,43
AtJ	USD/galão	6,43	5,79	3,86
FT	USD/galão	44,10	26,46	26,46
PtL	USD/galão	41,73	17,76	17,38

5.7.2.2 OPEX fixo

Custos operacionais fixos — tais como manutenção, mão de obra, seguros, licenciamento e despesas de vendas, gerais e administrativas (SG&A) — são normalmente expressos como uma porcentagem do CAPEX, pois variam de acordo com o tamanho e a complexidade da instalação. Esses custos tendem a ser relativamente estáveis ano a ano e não variam significativamente com o volume de produção. Manutenção e mão de obra geralmente representam as maiores parcelas, seguidas por seguros e impostos sobre a propriedade. A tabela abaixo resume as parcelas de custos fixos estimadas por rota tecnológica.

³³⁴ <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/finance-net-zero-roadmap.pdf>

³³⁵ Custo real divulgado pela Neste para o desenvolvimento de uma refinaria de SAF à base de HEFA em Cingapura - <https://www.neste.com/news/neste-oil-starts-up-its-new-renewable-diesel-plant-in-singapore>

Tabela 52: Valores de OPEX fixo por instalação, por tecnologia³³⁶

Componente	% do CAPEX anual	HEFA	AtJ	FT	PtL
Manutenção	%	1,5	1,5	2	1,5
Mão de obra	%	1	1,5	1,2	1
Despesas gerais e administrativas	%	0,5	0,15	0,15	0,5
Seguro	%	0,75	0,75	0,75	0,75
Imposto sobre a propriedade	%	1	1	1	1
Manutenção de grande porte	%	1	1	1	1
Total	%	5,75	5,9	6,4	5,0

5.7.3 OPEX variável (serviços públicos e matéria-prima)

Os custos operacionais variáveis de uma instalação de SAF referem-se a despesas que flutuam de acordo com os níveis de produção. A matéria-prima é o principal fator, incluindo óleo usado (UCO), gorduras animais, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos (MSW) e outros insumos descritos na Seção 5.6. Os custos da matéria-prima dependem do tipo e da disponibilidade e podem ser influenciados por fatores sazonais ou pela concorrência de outros setores. O consumo de energia (serviços públicos) é outro componente significativo, já que a produção de SAF frequentemente envolve processos como hidrotratamento ou síntese de Fischer-Tropsch, que requerem eletricidade e calor. Para o SAF de PtL, a eletricidade renovável usada para produzir hidrogênio verde por meio de eletrólise é um fator-chave de custo. A fonte de energia, seja da rede elétrica ou renovável, afeta tanto o custo quanto a intensidade de carbono.

5.7.3.1 Serviços públicos

Para as tecnologias HEFA, AtJ e FT, foram consideradas quatro principais entradas de serviços públicos: eletricidade, gás natural, hidrogênio e oxigênio. A necessidade de energia varia de acordo com a tecnologia do processo e, portanto, influencia os custos associados. A tabela abaixo resume a necessidade de energia estimada por tecnologia.

Tabela 53: Necessidade de energia por tecnologia³³⁷

Serviço público	Unidade/galão de produção de combustível	HEFA	AtJ	FT
Eletricidade	kWh	0,09	1,42	0,38
Gás natural	MMBtu	0,01	0,02	-
Hidrogênio	t de H ₂	1,4 x 10 ⁻⁴	3,0 x 10 ⁻⁵	-
Oxigênio	t de O ₂	-	-	0,01

³³⁶ <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/state-eu-saf-market-2023>

³³⁷ Eletricidade, gás natural e hidrogênio com base na modelagem interna da ICF. Hidrogênio com base em <https://cs3.mit.edu/publication/118414>

Conhecer os recursos necessários para produzir um galão de combustível permite calcular o custo anual associado a esses recursos para o tamanho específico da instalação modelada. Ao relacionar a necessidade de recursos com o preço de cada um deles e a produção anual da instalação, obtém-se o custo anual dos recursos. Foram utilizadas várias fontes para obter os preços regionais da energia³³⁸.

Para a tecnologia PtL, foram considerados quatro insumos de serviços públicos: eletricidade renovável, insumos químicos, água e remoção de águas residuais por meio de um sistema de tratamento de águas residuais³³⁹. A avaliação do custo nivelado de eletricidade (LCOE) foi realizada país por país, onde havia dados disponíveis³⁴⁰. Isso envolveu o cálculo de uma média ponderada do LCOE para energia solar fotovoltaica, eólica onshore e hidrelétrica renovável com base no mix de geração atual de cada país e a aplicação de reduções de custo projetadas por meio de curvas de aprendizado tecnológico. Os valores regionais foram aplicados quando os dados de LCOE em nível nacional não estavam disponíveis.

Outros serviços públicos são normalmente necessários para as operações de SAF; no entanto, sua contribuição para o custo total dos serviços públicos é limitada e eles não foram modelados neste estudo.

5.7.3.2 Matérias-primas

Os custos das matérias-primas representam tipicamente uma parcela considerável do OPEX total. Avanços tecnológicos na coleta e no processamento, como a recuperação aprimorada de óleo usado (UCO), a triagem de resíduos sólidos urbanos (MSW) e a logística de resíduos agrícolas, podem afetar tanto a disponibilidade quanto o custo ao longo do tempo. A dinâmica do mercado também influencia os preços das matérias-primas. A maioria das matérias-primas utilizadas na produção de SAF é comercializada como commodities, o que significa que seus custos flutuam de acordo com os equilíbrios de oferta e demanda, desenvolvimentos geopolíticos e políticas comerciais. Quando a disponibilidade de matéria-prima é limitada ou a concorrência de outras aplicações industriais aumenta, os preços podem subir. Por outro lado, o acesso generalizado a certas matérias-primas pode exercer pressão para baixo sobre os custos.

Existem também variações regionais nos preços das matérias-primas devido à disponibilidade local de recursos, infraestrutura e ambientes regulatórios. Por exemplo, algumas regiões estabeleceram cadeias de abastecimento e programas de incentivo que podem impactar os custos, enquanto outras podem enfrentar restrições logísticas que resultam em preços mais altos. Além disso, a sazonalidade e os padrões climáticos podem influenciar a produção e a coleta de certos tipos de biomassa ou matérias-primas derivadas de resíduos. Com o tempo, é possível que o perfil geral de custos das matérias-primas mude à medida que novas tecnologias são adotadas, as taxas de reciclagem melhoram e as condições de mercado evoluem. O monitoramento desses fatores pode fornecer insights sobre as tendências futuras na economia da produção de SAF e orientar o planejamento de instalações e as decisões de investimento.

Embora os preços variem na América Latina e no Caribe, o Brasil foi utilizado como referência na análise devido à maior disponibilidade de dados sobre preços de matérias-primas. Nos casos em que foram encontrados dados específicos por país, estes foram priorizados; no entanto, isso ocorreu em casos limitados. Os dados de custo de matéria-prima da S&P Global Energy foram utilizados como fonte principal para os preços de mercado atuais, complementados por pesquisas independentes e premissas para matérias-primas nas quais não há informações de negociação disponíveis³⁴¹. Como este estudo faz projeções até 2050, espera-se que os custos de algumas matérias-primas sofram alterações. A ICF desenvolveu cenários para capturar essas mudanças e analisar seu

³³⁸ Custos de eletricidade por país (dezembro de 2024) - https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/; Oxigênio – suposição da ICF; Hidrogênio - <https://cs3.mit.edu/publication/118414>

³³⁹ Energia renovável e consumo de água, custo de produtos químicos e geração de águas residuais com base na modelagem interna da ICF; custos de tratamento de água e águas residuais com base em <https://iwaponline.com/h2open/article/3/1/355/76768/Drivers-of-change-in-urban-water-and-wastewater>.

³⁴⁰ LCOE por país e região com base na IRENA, 2024; geração de energia renovável com base em <https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/>; tendências futuras do LCOE com base no NREL 2024 ATB.

³⁴¹ Os preços históricos e atuais (agosto de 2025) foram fornecidos pela S&P Global Energy para óleo de cozinha usado, gordura animal, óleo de soja e etanol de cana-de-açúcar comercializados no Brasil, bem como para óleo de soja na Argentina.

impacto. Os seguintes perfis de preço foram considerados para os diferentes grupos de matérias-primas:

- Presume-se que as matérias-primas de origem petrolífera convertidas em SAF por meio da rota HEFA, como óleo de cozinha usado (UCO), gordura animal e soja, terão aumento de preço ao longo do período projetado devido à escassez global do produto e ao aumento da demanda de outros setores
- O etanol de segunda geração produzido a partir de resíduos agrícolas e florestais, bem como de gases residuais, deverá ter uma redução de preço impulsionada pela curva de aprendizagem associada à produção desse etanol e pelos avanços em tecnologia e processamento
- Presume-se que o etanol de culturas produzido a partir de cana-de-açúcar e milho apresente um perfil de preço relativamente estável, pelo que o nível de preço atual é mantido

5.7.4 Combustível físico e coprodutos

5.7.4.1 Querosene de aviação

Atualmente, o SAF é negociado com um prêmio em relação ao querosene de aviação convencional³⁴². O querosene de aviação fóssil é uma commodity, com um mercado estabelecido e transparente, enquanto o mercado de SAF ainda é incipiente, as transações são limitadas e a volatilidade dos preços é alta. A precificação do querosene de aviação fóssil depende principalmente da dinâmica do mercado de petróleo bruto, dos custos de refino e da logística de distribuição. Outro fator que influencia a economia futura do querosene de aviação convencional é a possível implementação de impostos sobre carbono ou taxas ambientais semelhantes. Tais medidas têm como objetivo internalizar os custos ambientais associados à queima de combustíveis fósseis, aumentando efetivamente o preço do querosene de aviação para as companhias aéreas. Isso poderia impactar os padrões de transporte aéreo regional, especialmente em regiões altamente sensíveis aos preços, como a América Latina e o Caribe (ALC). Os impactos negativos sobre a demanda poderiam incluir redução da frequência de voos, pressão sobre a lucratividade das companhias aéreas e diminuição da conectividade regional, à medida que as companhias aéreas são forçadas a cortar rotas ou limitar o serviço em resposta ao aumento dos custos operacionais decorrentes da precificação do carbono (com o querosene de aviação já representando 30-40% dos custos operacionais das companhias aéreas na região).

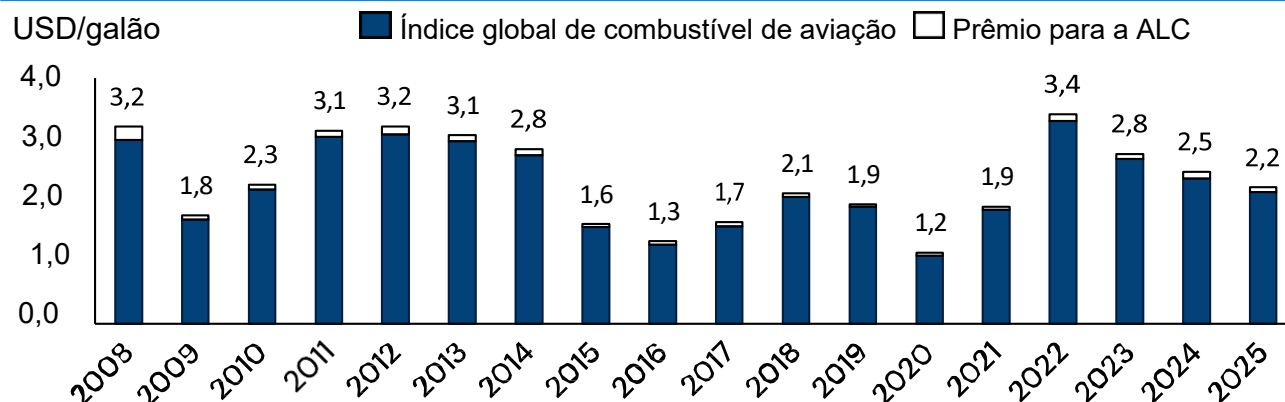
Em contrapartida, o preço do SAF reflete não apenas o custo de produção determinado pelo preço das matérias-primas, frequentemente derivadas de fontes renováveis, a rota tecnológica e a eficiência dos processos de conversão (e o financiamento das instalações de produção associadas), mas também o valor dos coprodutos, os custos de mistura e logística, os custos administrativos e, em alguns casos, um prêmio de mercado. Para compreender o prêmio “verde” do SAF e calcular o custo de abatimento, vinculando a economia de carbono ao usar SAF em vez do querosene de aviação convencional ao preço subjacente, é importante ter uma estimativa dos preços atuais e futuros do combustível fóssil de aviação.

O querosene de aviação convencional na América Latina e no Caribe tem sido historicamente negociado com um prêmio em relação ao preço médio global do querosene³⁴³, provavelmente impulsionado pela produção doméstica limitada e pela dependência de importações, conforme explorado em mais detalhes na Seção 5.4.

³⁴² <https://www.airlines.org/dataset/saf-vs-jet-fuel-comparison/>

³⁴³ Com base na análise do índice global de combustível de aviação da S&P Global Energy e do índice de combustível de aviação da América Latina e do Caribe

O querosene de aviação tem sido historicamente negociado com um prêmio na ALC em comparação com a média global



Fonte: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc. Análise da ICF

A previsão para o querosene de aviação utiliza como linha de base a relação entre o petróleo bruto e o querosene observada historicamente. Foi realizada uma análise de correlação entre os preços médios anuais históricos (2002-2024) do petróleo Brent e o Índice S&P Global Energy Platts Jet para a América Latina e o Caribe^{344, 345}. A figura acima mostra os preços históricos do índice de querosene de aviação na América Latina. Foi encontrado um valor R^2 de 0,96, destacando uma forte ligação entre os dois. Isso foi então ampliado utilizando os preços previstos de petróleo bruto pela IEA, resumidos na tabela abaixo³⁴⁶. Os valores foram interpolados para obter o preço médio anual considerado a cada ano. A ligação desses preços ao índice de querosene de aviação da S&P Global Energy para a América Latina, utilizando a equação de correlação subjacente, fornece dois cenários para o custo futuro do querosene na região (utilizando os cenários de petróleo bruto STEPS e APS). O cenário NZE, no entanto, é considerado um caso relativamente extremo para o preço do petróleo, de modo que o preço correspondente do querosene de aviação não foi modelado neste estudo.

Tabela 54: Previsão do preço do petróleo bruto da IEA por cenário

Cenário da IEA	Unidade	2023	2030	2040	2050
PASSO ³⁴⁷	USD/bbl (USD/galão)	82 (1,91)	79 (1,88)	77 (1,83)	75 (1,78)
APS ³⁴⁸	USD/bbl (USD/galão)	82 (1,91)	72 (1,71)	63 (1,50)	58 (1,38)
NZE ³⁴⁹	USD/bbl (USD/galão)	82 (1,91)	42 (1,00)	30 (0,71)	25 (0,67)

³⁴⁴ Preços históricos do petróleo Brent - <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RBRT&f=M>

³⁴⁵ Fornecidos pela S&P Global Energy para fins desta análise

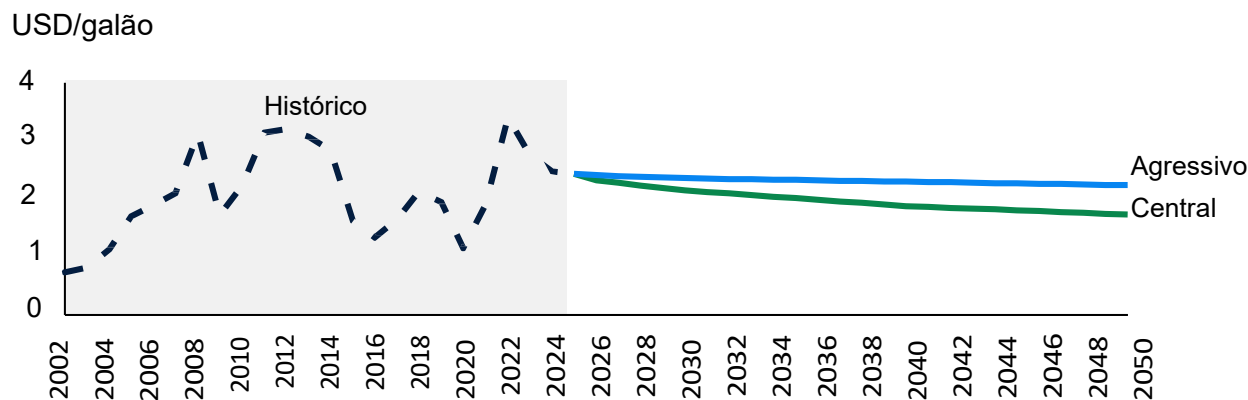
³⁴⁶ <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

³⁴⁷ STEPS = Cenário de Políticas Declaradas; projetado para fornecer uma noção da direção predominante da evolução do sistema energético e do panorama político atual. O STEPS oferece uma referência mais conservadora para o futuro do que o Cenário de Compromissos Anunciados (APS), ao não dar como certo que os governos alcançarão todas as metas anunciadas - <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/stated-policies-scenario-steps>

³⁴⁸ APS = Cenário de Compromissos Anunciados; ilustra até que ponto as ambições e metas anunciadas podem proporcionar as reduções de emissões necessárias para atingir emissões líquidas zero até 2050 - <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/announced-pledges-scenario-aps>

³⁴⁹ NZE = Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050; O Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050 (Cenário NZE) é um cenário normativo que mostra uma rota para o setor energético global atingir emissões líquidas zero de CO₂ até 2050, com as economias avançadas alcançando emissões líquidas zero antes das demais - <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>

Foram elaborados dois cenários para as perspectivas de preço do querosene de aviação na ALC



Fonte: Inclui dados da S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., IEA. Análise da ICF

Premissas: 1. Relação histórica (2002 a 2024) entre o preço do petróleo Brent e o S&P Global Platts Jet

O Índice da América Latina e do Caribe utilizou um valor R^2 de 0,97, ou seja, alta correlação); 2. Cenários de preço do petróleo bruto da AIE assumiram representar a previsão do preço do Brent; 3. O valor de 2025 utilizado é uma média observada até julho de 2025 com base nos dados da S&P Global Energy

5.7.4.2 Coprodutos

As receitas provenientes da produção de outros combustíveis, como o diesel renovável e a nafta, podem ter um impacto significativo no preço do SAF. Quando esses subprodutos são gerados juntamente com o SAF, eles podem ser vendidos no mercado, proporcionando fontes de receita adicionais. Essa receita suplementar ajuda a reduzir o custo geral da produção de SAF, tornando-a economicamente mais viável. O diesel renovável (RD), por exemplo, tem alta demanda devido à sua menor pegada de carbono em comparação com o diesel tradicional, e a nafta é uma matéria-prima valiosa na indústria petroquímica. Ao capitalizar esses subprodutos, os produtores podem reduzir o ônus financeiro associado à produção de SAF, promovendo assim sua adoção e uso. As receitas geradas por esses coprodutos dependem de seu preço de mercado, bem como dos volumes produzidos. Esses volumes, por sua vez, dependem da rota tecnológica e das especificações da instalação. Diferentes matrizes de produtos podem resultar em uma participação diferente dos coprodutos gerados anualmente. Para os fins desta análise, presume-se um rendimento crescente de SAF, refletindo a suposição de condições econômicas que favorecem a priorização do SAF em relação a outros combustíveis e desenvolvimentos tecnológicos que permitem rendimentos mais elevados de SAF. A tabela abaixo indica as matrizes de produtos assumidas no modelo ao longo do horizonte temporal analisado.

Tabela 55: Gamas de produtos assumidas³⁵⁰

Tecnologia	Unidade	2025			2035			2050		
		A jato	Diesel	Nafta	Jato	Diesel	Nafta	Kerosene	Diesel	Nafta
HEFA	%	53	40	7	60	32	8	70	20	10
AtJ	%	78	7	15	81	10	9	85	14	1
FT	%	61	36	3	63	34	4	65	30	5
PtL	%	72	14	14	75	13	13	80	10	10

A análise utiliza preços de mercado de *5,45 USD* por galão para RD e *4,69 USD* por galão para nafta renovável³⁵¹ para estimar as receitas geradas por esses coprodutos. Embora esses números reflitam as condições de mercado atuais, o mercado de combustíveis renováveis é volátil, e os preços podem mudar ao longo do tempo. As projeções da ICF baseiam-se na suposição de que esses preços permanecem constantes ao longo do período de previsão, embora mudanças nos mercados de coprodutos possam afetar o prêmio “verde” para o SAF. Esses preços baseiam-se no mercado europeu, uma vez que não há dados comparáveis prontamente disponíveis para a América Latina e o Caribe. Para levar em conta as diferenças regionais de custo, a análise inclui um ajuste de custo de transporte de *0,25 USD* por galão³⁵².

5.7.5 Premissas de financiamento de projetos

O financiamento de projetos representa um elemento fundamental para o avanço das instalações de SAF. Dadas as significativas necessidades de capital e a dinâmica do setor em fase inicial, é crucial uma compreensão clara desses mecanismos de financiamento. À medida que o setor amadurece, espera-se que fatores como desenvolvimento tecnológico, eficiências operacionais e economias de escala influenciem os riscos e custos, potencialmente melhorando o acesso ao financiamento e reduzindo as despesas de fabricação. As seções a seguir exploram como essas estruturas de financiamento e condições de mercado moldam o panorama de investimentos para projetos de SAF e descrevem as premissas adotadas na análise para a região da América Latina e do Caribe.

5.7.5.1 Estrutura de capital

Devido à natureza intensiva em capital desses projetos, bem como à evolução das tecnologias e das condições de mercado, garantir uma estrutura de financiamento adequada é um elemento fundamental do desenvolvimento do projeto. Uma abordagem padrão é a combinação de dívida e capital próprio. Na maioria dos casos, o financiamento por dívida constitui cerca de 60% a 80% das necessidades totais de capital, fornecido por credores como bancos comerciais, instituições financeiras de desenvolvimento ou investidores especializados em infraestrutura. Os 20% a 40% restantes são normalmente cobertos por contribuições de capital próprio dos patrocinadores do projeto, fundos de private equity ou parceiros estratégicos. As proporções exatas podem variar dependendo das especificidades do projeto, da confiança dos investidores e das negociações com as instituições financeiras.

Neste estudo, foram utilizados índices de dívida/capital próprio de 70%/30%, 60%/40%, 55%/45% e 55%/45% para os processos HEFA, AtJ, FT e PtL, respectivamente. Essas proporções são representativas dos níveis de 2025, e um aumento gradual na parcela da dívida é modelado ao longo da projeção para refletir a redução esperada do risco das tecnologias de combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF) e a atração de mais financiamento por meio de dívida para instalações construídas posteriormente no período.

³⁵⁰ Suposição da ICF

³⁵¹ O preço da RD é o custo médio no período (maio de 2024 a julho de 2025) – dados brutos fornecidos pela S&P Global Energy para fins desta análise. Preço da nafta renovável (agosto de 2025) da Quantum Intelligence

³⁵² Suposição da ICF

5.7.5.2 Custo da dívida e condições

Os provedores de dívida exigem pagamentos regulares de juros e amortizações do principal de acordo com um cronograma acordado. As taxas de juros aplicadas à dívida do projeto são fortemente influenciadas pela localização do projeto, e isso está intimamente ligado ao risco percebido de inadimplência pelo mercado de dívida. Em regiões como a América do Norte e a Europa Ocidental, onde os mercados financeiros são estáveis e os arcabouços de políticas públicas para combustíveis renováveis são maduros, o risco de inadimplência é geralmente baixo, levando os credores a oferecer taxas de juros mais baixas. Em mercados emergentes com ambientes regulatórios menos previsíveis ou maior risco-país, os credores percebem uma chance maior de inadimplência devido a fatores como instabilidade cambial, mudanças nos marcos legais ou experiência limitada com projetos de SAF em grande escala. Para compensar, eles exigem taxas de juros mais altas.

A América Latina e o Caribe atualmente não possuem nenhuma instalação de SAF em operação (2025), algumas economias são instáveis e os mercados são voláteis. Portanto, espera-se uma taxa de juros mais alta para o financiamento de SAF na região. Agências de classificação de crédito, como a S&P Global Ratings, analisam a situação de estabilidade de crédito em países globalmente e indicam quais regiões apresentam maior porcentagem de inadimplência, sinalizando maior risco nessas regiões. O resumo das classificações de crédito mais recentes por país na América Latina e no Caribe é apresentado na Tabela 56 abaixo. Para países com classificações mais baixas, presume-se uma taxa de juros mais alta sobre a dívida.

Para construir as premissas de taxa de juros, a ICF assumiu uma linha de base do banco central representando um indicador de uma meta bancária de longo prazo para dissociar a situação econômica atual, as taxas atuais e a inflação³⁵³. Normalmente, a taxa de juros da dívida para um projeto de energia renovável, como energia solar ou SAF, é mais alta do que a taxa do banco central devido aos riscos associados a tais projetos em setores ainda em fase inicial. Um prêmio de 2,5% a 5% sobre a linha de base em cada país foi assumido na análise, dependendo da classificação de crédito do país fornecida pela S&P Global Ratings. O estudo assume uma taxa constante ao longo do horizonte temporal, uma vez que a análise dissocia as taxas de juros da inflação. Embora mudanças na política monetária possam causar flutuações na linha de base da taxa de juros ao longo de um período de 25 anos, dependendo da implementação de uma política expansionista ou contracionista, separar esses efeitos da inflação simplifica a análise. A relação entre as taxas do banco central e o custo da dívida para um projeto foi recentemente demonstrada pelo aumento do custo dos projetos de energia solar devido ao aumento das taxas de juros³⁵⁴. O modelo pressupõe um prazo de dívida de 10 anos.

5.7.5.3 Custo do capital próprio

Além da dívida, o financiamento por capital próprio desempenha um papel igualmente crítico na estrutura geral de capital de um projeto SAF. O custo do capital próprio representa o retorno que os investidores esperam em troca de seu investimento de capital, refletindo tanto o custo de oportunidade de investir em outros lugares quanto os riscos específicos associados ao projeto. Ao contrário dos provedores de dívida, os investidores de capital próprio não recebem pagamentos fixos; em vez disso, seus retornos dependem do desempenho e da rentabilidade do projeto. Como resultado, eles enfrentam um risco maior de perder seu capital se o projeto tiver um desempenho abaixo do esperado ou fracassar.

Essa dinâmica de risco-retorno é particularmente relevante para instalações que dependem de vias emergentes ou menos comprovadas, como AtJ, FT e PtL. Embora ofereçam flexibilidade de matéria-prima e potencial de escala, elas apresentam riscos técnicos e operacionais mais elevados do que rotas mais maduras, como a HEFA. O histórico comercial de AtJ, FT e PtL é relativamente limitado, e os desafios na otimização de processos e na conformidade regulatória podem afetar cronogramas e retornos. Para compensar, os acionistas exigem retornos mais elevados, o que eleva o custo do capital próprio.

Para refletir essas diferenças, a análise pressupõe Taxas Internas de Retorno (TIR) iniciais de 18% para HEFA, 20% para AtJ e 22% para FT e PtL. Embora sejam necessárias TIR mais altas atualmente, esta análise pressupõe volumes limitados de SAF até depois de 2035; portanto, esses valores são escolhidos para representar valores em

³⁵⁴<https://sustainablefinance.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2025/03/Executive-Summary-renewable-poser-Dec-2024.pdf>

um ponto em que o setor começou a reduzir riscos para se adequar a esse cronograma. Isso é amplificado à medida que a metodologia escalona a implantação de SAF, começando com rotas mais acessíveis antes de fazer a transição para abordagens mais caras, mas mais sustentáveis; isso resulta em um atraso adicional na implantação de tecnologias de maior risco, como FT e PtL. À medida que as tecnologias amadurecem e mais instalações são implantadas na região, espera-se que essas rotas tenham seus riscos reduzidos e diminuam ligeiramente o custo de capital próprio abaixo desses pontos de partida. Uma redução mais agressiva no curto prazo é modelada para o AtJ devido ao início da comercialização de instalações em escala industrial, enquanto a redução para o FT é considerada mais gradual³⁵⁵. A linha de base do custo de capital próprio é ajustada adicionalmente por país para refletir as condições econômicas e a atratividade e, com base nas classificações de crédito da S&P Global Ratings para modelar retornos exigidos mais elevados para locais de maior risco.

A análise cuidadosa e a estruturação transparente dessas premissas de financiamento de projetos ajudam a garantir que tanto os investidores quanto os credores tenham um entendimento comum dos riscos e retornos potenciais. Dessa forma, os projetos ficam em melhor posição para concluir o fechamento financeiro e operar com sucesso ao longo de suas vidas úteis previstas.

Tabela 56: Dados financeiros específicos por país (em setembro de 2025)

País	Classificação do país pela S&P Global Ratings ³⁵⁶	Prêmio de risco presumido sobre a taxa de dívida da linha de base ³⁵⁷	Alíquota do imposto sobre as sociedades ³⁵⁸
Argentina	CCC	5%	35%
Bahamas	B+	4%	-
Brasil	BB	3%	34%
Chile	A	2%	27%
Colômbia	BB	3%	35%
República Dominicana	BB	3%	27%
Equador	B-	4%	25%
El Salvador	B-	4%	30%
México	BBB	2,5%	30%
Panamá	BBB-	2,5%	25%
Peru	BBB-	2,5%	30%

³⁵⁵ <https://www.lanzajet.com/freedom-pines>

³⁵⁶ <https://tradingeconomics.com/country-list/rating> ; <https://www.spglobal.com/ratings/sri/>

³⁵⁷ Suposição da ICF

³⁵⁸ <https://tradingeconomics.com/countries>

5.7.6 Custos a jusante

Embora o preço do SAF seja baseado nos custos de produção e nos retornos exigidos, é essencial reconhecer que o preço final pago pelas companhias aéreas inclui uma série de despesas a jusante, bem como margens associadas à dinâmica do mercado. Os custos a jusante abrangem despesas de mistura, transporte, armazenamento e administrativas, todas elas influenciando o preço final do SAF. Esses custos a jusante são significativos, especialmente considerando que as despesas com combustível representam normalmente entre 30% e 40% dos custos operacionais totais das companhias aéreas. Como o SAF costuma ter um custo base mais elevado, essas despesas suplementares tornam-se cada vez mais relevantes para o preço final de compra.

Embora o custo da mistura tenha sido estimado em US\$ 0,01–0,02 por galão de biocombustível no Reino Unido, espera-se que os custos sejam mais elevados na ALC, dada a atual infraestrutura aeroportuária³⁵⁹. O transporte representa uma parcela mais significativa das despesas a jusante e varia amplamente com base no tamanho do aeroporto, na distância dos locais de produção e na sofisticação da cadeia de suprimentos. Para aeroportos menores, urbanos ou menos bem conectados, esses custos de transporte são ainda mais elevados. No entanto, é improvável que essas instalações recebam quantidades substanciais de SAF em um futuro próximo. Espera-se que o custo do transporte de SAF seja comparável ao do querosene de aviação convencional, uma vez que ambos dependem da mesma infraestrutura. Um estudo de 2021 sobre o Brasil constatou que o custo do transporte de querosene de aviação por 400 km via rodoviária e marítima é de US\$ 0,33 e US\$ 0,17 por galão, respectivamente³⁶⁰. Com o tempo, no entanto, investimentos direcionados em infraestrutura, como hubs de mistura centralizados e maior capacidade de armazenamento, poderiam reduzir esses custos e aumentar a viabilidade econômica do SAF em toda a região. Tais melhorias contribuiriam para uma cadeia de suprimentos mais eficiente e poderiam aumentar a acessibilidade e a viabilidade econômica da adoção do SAF em diversos aeroportos.

Além dos custos de produção e de escoamento, os preços dos SAF variam de acordo com a abordagem de aquisição e a metodologia de precificação escolhida. Compras de fornecimento de curto prazo ou no mercado à vista normalmente envolvem prêmios mais altos devido à dinâmica de mercado de curto prazo³⁶¹. Contratos de offtake de longo prazo permitem que os produtores planejem operações por um período prolongado e garantam o fornecimento futuro, portanto, as margens são normalmente mais estreitas nesses contratos. Em todos os tipos de aquisição, o preço final é determinado pela estrutura do contrato, pelas condições de mercado vigentes e pela alocação dos riscos operacionais e financeiros.

³⁵⁹ <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/66601969dc15efdddf1a872d/uk-saf-mandate-final-stage-cost-benefit-analysis.pdf>

³⁶⁰ <https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2021/07/Cost-Analysis-of-Aviation-Fuels-in-Brazil.pdf>

³⁶¹ https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-procurement_12052024.pdf

Neste estudo, o custo a jusante do SAF em 2030 é estimado em US\$ 0,95 por galão. Prevê-se que esses custos diminuam de forma constante até 2045, estabilizando-se em aproximadamente US\$ 0,50 por galão. A composição dos custos inclui o transporte, que é relativamente alto dada a dependência da região do transporte rodoviário, bem como despesas de mistura e administrativas. O prêmio está diminuindo com o desenvolvimento das redes logísticas projetadas.

O papel do Book and Claim no abastecimento de SAF

No cenário do SAF, o sistema book-and-claim surgiu como um sistema de cadeia de custódia projetado para conciliar a incompatibilidade geográfica entre onde o SAF pode ser produzido com maior eficiência e onde ele é realmente demandado. Ao permitir que o fornecimento físico de SAF se concentre em hubs de produção ideais — regiões com matérias-primas abundantes, eletricidade de baixo carbono ou infraestrutura favorável — e, ao mesmo tempo, possibilitar transferências “virtuais” de atributos ambientais para compradores em qualquer lugar do mundo, o Book and Claim amplia o alcance do mercado e acelera as reduções de emissões, mesmo em locais pouco adequados para a produção ou distribuição de SAF. Hoje, existem sistemas de certificação e registro confiáveis que podem minimizar o risco de reivindicações duplicadas. No entanto, permanecem preocupações regulatórias. A governança e a supervisão operacional dos registros ainda estão em evolução, e os formuladores de políticas estão lidando com as implicações de separar o abastecimento de combustível dos benefícios ambientais associados. Essa separação levanta questões sobre como tratar benefícios colaterais, como melhorias na qualidade do ar local, incentivos fiscais ou outras vantagens ligadas a políticas que podem ou não ser acumuláveis para fornecedores ou usuários finais. Ela também destaca a distribuição potencialmente desigual de empregos, desenvolvimento tecnológico e criação de valor econômico, que tendem a se concentrar em torno de hubs de produção, em vez de nos locais onde os atributos ambientais são, em última instância, reivindicados e, portanto, onde o custo extra é suportado.

Economicamente, o sistema “book-and-claim” inegavelmente aumenta a concorrência ao ampliar o tamanho efetivo do mercado e reduzindo os custos de fornecimento. No entanto, essa mesma dinâmica pode criar barreiras para novos participantes, especialmente aqueles que desenvolvem tecnologias de SAF em estágio inicial ou de maior risco. Por exemplo, um país com água limpa abundante, restrições frequentes de energia renovável e uma rede elétrica de baixo carbono poderia produzir e-SAF altamente competitivo sob um modelo de book-and-claim. Embora isso seja benéfico para os compradores e eficiente do ponto de vista do comércio aberto, pode prejudicar regiões que ainda estão em transição para redes mais limpas, afetando potencialmente a segurança energética e retardando a diversificação das rotas de abastecimento. O risco de “dumping” de mercado também se torna mais relevante em um sistema onde as restrições de transporte físico não limitam mais a concorrência.

Do ponto de vista logístico, o “book-and-claim” costuma ser compatível com as cadeias de abastecimento de combustíveis convencionais existentes, o que ajuda a manter os custos relativamente baixos. No entanto, os custos administrativos e técnicos de estabelecer e manter registros robustos podem compensar essas economias logísticas. Além disso, quando estruturas regulatórias como o CORSIA não vinculam a declaração ambiental ao local de abastecimento físico, o valor agregado do “book-and-claim” diminui. Somente nos casos em que o local de abastecimento é altamente relevante é que

o “book-and-claim” se torna particularmente vantajoso, mas esses são precisamente os cenários em que a implementação se torna mais complexa.

De modo geral, o “book-and-claim” é um poderoso facilitador do crescimento do mercado de SAF e da redução de custos, mas seu desenho e governança exigem atenção cuidadosa para garantir justiça, integridade e sustentabilidade de longo prazo em todo o setor de aviação.

5.7.7 Custo de abatimento

Para calcular o custo de abatimento para cada matéria-prima, o primeiro passo foi determinar os valores de emissões do ciclo de vida. Os valores padrão de emissões do ciclo de vida do CORSIA para 2025, incluindo a mudança induzida no uso da terra (ILUC), foram utilizados como fonte primária sempre que disponíveis³⁶². Para matérias-primas com valores separados relatados para instalações autônomas e integradas, assumiu-se o valor integrado com base nas realidades regionais. Nos casos em que havia valores específicos para o Brasil, estes

³⁶² <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAOdocument-06-Default-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>

foram priorizados em detrimento das médias globais. Para o FT-MSW, o fator de emissões do ciclo de vida foi aplicado em função do conteúdo não biogênico, utilizando valores da ICAO³⁶³. Como o CORSIA não inclui valores para o PtL, foram utilizados dados do Fórum Econômico Mundial³⁶⁴.

Entre 2025 e 2050, espera-se que a intensidade de carbono do SAF diminua por várias razões. Em todas as rotas de produção de combustíveis alternativos de fonte renovável (), presume-se uma redução de 50% nas emissões da produção de combustível, devido à menor intensidade de carbono dos insumos energéticos. Os valores de ILUC devem diminuir em 25–50% devido a melhorias nas práticas agrícolas. Espera-se que o conteúdo biogênico do MSW aumente à medida que as tecnologias de triagem avançam. Além disso, prevê-se que os processos PtL se tornem menos intensivos em energia à medida que a eficiência melhora. Os valores utilizados para 2025 e 2050, incluindo as premissas de ILUC, são apresentados na tabela abaixo.

A redução na intensidade de carbono em relação ao querosene de aviação foi então calculada comparando o valor das emissões do ciclo de vida de cada matéria-prima com a linha de base do CORSIA de 89 gCO₂e/MJ. Essa redução foi convertida em emissões evitadas por tonelada de combustível utilizando um fator “well-to-wake” de 3,81. Para cada ano e combinação matéria-prima/tecnologia, a diferença entre o preço calculado do SAF e o preço do querosene de aviação, expresso por tonelada de combustível, foi dividida pela quantidade associada de emissões evitadas. O custo de abatimento resultante é expresso em dólares americanos por tonelada de CO₂ evitada.

Tabela 57: Emissões do ciclo de vida por combinação matéria-prima/tecnologia

Tecnologia	Matéria-prima	ACV 2025 Valor (gCO ₂ e/MJ)	2025 Custo de abatimento (USD/CO ₂ e)	ACV 2050 Valor (gCO ₂ e/MJ)	2050 Custo de abatimento (USD/CO ₂ e)
HEFA	UCO	13,9	480	9,3	565
HEFA	Gordura animal	29,7	630	19,8	661
HEFA	Óleo de soja	61,1	1.175	44,4	941
HEFA	Óleo de palma	76,5 ³⁶⁵	2.075	55,6	949
AtJ	Resíduos agrícolas	24,6	1.122	15,0	560
AtJ	Resíduos florestais	24,9	1.020	15,2	500
AtJ	Gases residuais	29,4	835	23,8	469
AtJ	Etanol de cana- de-açúcar	32,8	704	17,2	417
AtJ	Etanol de milho	63,4	1.567	33,2	546
FT	MSW	39,3	2.694	25,7	955
PtL	CO ₂	10,0	1.947	5,7	874

³⁶³ <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-rule-of-thumb>

³⁶⁴ https://www3.weforum.org/docs/WEF_FMC_SAF85_Technical_Brief_2024.pdf

³⁶⁵ Presume-se que o biogás seja capturado e oxidado

5.7.8 Preços calculados do SAF e resultados dos custos de abatimento

Esta seção apresenta os resultados do preço calculado do SAF, projetado até 2050. Por se tratar de um setor incipiente, os preços evoluirão com a ampliação da tecnologia, o amadurecimento da cadeia de suprimentos, as mudanças nas condições de mercado, bem como a crescente demanda, e variarão de acordo com a rota. As trajetórias futuras dos preços serão impulsionadas pela maturidade e aprendizado tecnológico, disponibilidade de matéria-prima e preço, despesas de capital, eficiência operacional e fatores de mercado, que, em conjunto, definirão a viabilidade e a competitividade de cada rota.

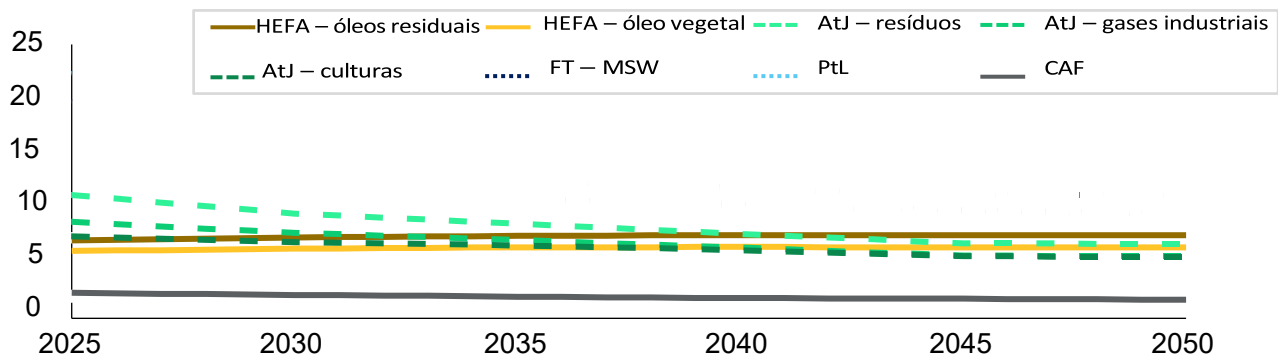
Essas estimativas de preço do SAF são então combinadas com uma análise de intensidade de carbono para chegar ao custo de abatimento de diferentes combinações matéria-prima/tecnologia. Vincular a análise de disponibilidade e potencial do SAF aos custos de abatimento permitirá uma projeção da economia potencial de CO₂ com o SAF nos diferentes países da região da América Latina e do Caribe e dos custos associados nas próximas etapas do estudo. A discussão sobre o que isso significa para o preço do SAF, bem como a análise de sensibilidade, também são apresentadas nesta seção.

5.7.8.1 Visão geral dos resultados

A evolução projetada do preço dos SAFs e do custo de abatimento de emissões nas diferentes rotas na ALC é apresentada nas duas figuras a seguir³⁶⁶. Os resultados são apresentados como médias agregadas, com análises detalhadas em nível de país e de matéria-prima realizadas em segundo plano, e têm como objetivo fornecer uma visão indicativa das condições e do potencial regionais. Uma visão geral da situação atual e das perspectivas para cada uma das quatro tecnologias é fornecida nas subseções a seguir.

Prevê-se que o preço do SAF diminua para a maioria das rotas devido ao amadurecimento da tecnologia, enquanto o preço do HEFA está aumentando devido à dinâmica do comércio de matérias-primas

Preço do SAF (USD/galão)



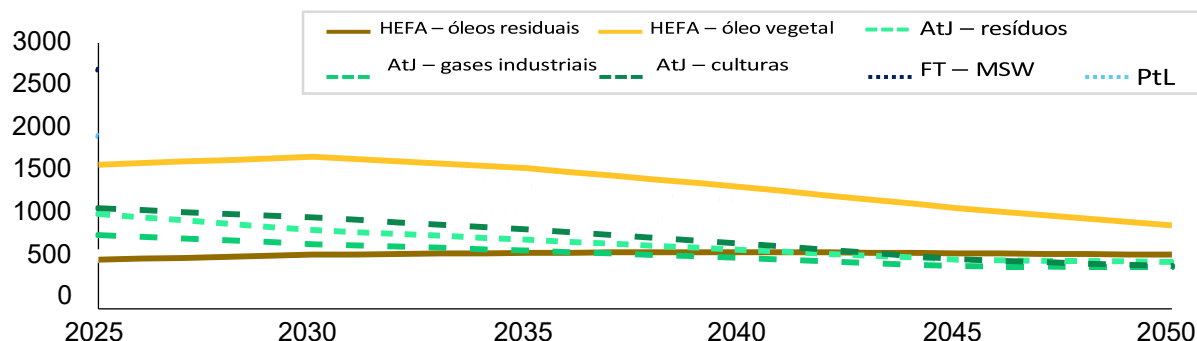
Fonte: Análise da ICF

Nota: Óleo vegetal HEFA = óleo de soja e óleo de palma; óleo residual HEFA = óleo de cozinha usado e gordura animal; cultura AtJ = etanol de cana-de-açúcar e milho; resíduos AtJ = resíduos agrícolas e florestais; CAF = combustível de aviação convencional

³⁶⁶ O preço inclui o custo de produção e os custos a jusante; os valores de emissões do ciclo de vida baseiam-se em <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-06-Default-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>, <https://www.icao.int/environmental-protection/saf-rule-of-thumb> e https://www3.weforum.org/docs/WEF_FMC_SAF85_Technical_Brief_2024.pdf

Prevê-se que o custo de abatimento diminua na maioria dos cenários devido a melhorias na intensidade de carbono e ao amadurecimento da tecnologia

Custo de abatimento por tecnologia (USD/tCO_{2e})



Fonte: Análise da ICF

Nota: Óleo vegetal HEFA = óleo de soja e óleo de palma; óleo residual HEFA = óleo de cozinha usado e gordura animal; cultura AtJ = etanol de cana-de-açúcar e etanol de milho; resíduos AtJ = resíduos agrícolas e florestais

5.7.8.2 HEFA

Situação atual: Atualmente, o HEFA é a rota economicamente mais viável em termos de MSP, principalmente devido à sua maturidade tecnológica avançada. Essa maturidade se traduz em menores necessidades de investimento de capital e prêmios de risco reduzidos, uma vez que a tecnologia demonstrou desempenho confiável em escala comercial. No entanto, a disponibilidade de matéria-prima na ALC é relativamente limitada, particularmente após o ajuste da oferta teórica para refletir o que o setor de aviação da ALC pode acessar de forma realista (ver Seção 5.6). Essas restrições destacam a importância de considerar tanto a maturidade tecnológica quanto a acessibilidade da matéria-prima ao avaliar as opções de SAF na ALC.

Perspectivas: Espera-se que as despesas de capital para instalações de HEFA diminuam em apenas cerca de 4% entre 2025 e 2050, já que a maturidade da tecnologia limita reduções adicionais. Essa melhora modesta provavelmente será compensada pelo aumento dos custos das matérias-primas devido à oferta limitada. Consequentemente, projeta-se que os preços gerais calculados apresentem uma tendência ligeiramente ascendente, de aproximadamente 5% para matérias-primas de óleo vegetal e 7% para matérias-primas de óleos residuais no mesmo período. Dada a grande participação dos custos de matéria-prima no custo total de produção, a economia da HEFA é altamente sensível às condições de mercado.

Sustentabilidade: O custo de abatimento varia significativamente de acordo com a matéria-prima. Em 2025, o HEFA SAF à base de óleo de cozinha usado (UCO) tem o menor custo de abatimento entre todas as combinações matéria-prima/tecnologia avaliadas, em aproximadamente US\$ 480/tCO₂, seguido pelas gorduras animais, a US\$ 630/tCO₂. Isso reflete tanto os preços mais baixos em comparação com outros tipos de SAF quanto as elevadas reduções de emissões ao longo do ciclo de vida em relação ao querosene de aviação. Em contrapartida, o SAF HEFA derivado de soja e óleo de palma tem um custo de abatimento mais do que o dobro do UCO e das gorduras animais, em parte devido às emissões decorrentes da mudança indireta no uso da terra (ILUC) associadas a tais matérias-primas. Com o tempo, espera-se que os custos de abatimento para o SAF HEFA aumentem à medida que os preços das matérias-primas subirem e os preços do combustível fóssil para aviação diminuam.

5.7.8.3 AtJ

Situação atual: o SAF à base de AtJ tem atualmente o segundo menor preço calculado entre as tecnologias avaliadas. Sua intensidade de capital é maior do que a do HEFA, com investimento inicial por galão de combustível aproximadamente o dobro do HEFA. No entanto, espera-se que essa diferença diminua à medida que as instalações se beneficiem de economias de escala, melhorias tecnológicas e eficiências operacionais. A análise da disponibilidade de matéria-prima indica que resíduos agrícolas e florestais oferecem um potencial considerável para a produção de SAF na ALC, enquanto gases industriais representam outra fonte promissora (Seção 5.6). No

entanto, em 2025, o SAF AtJ à base de safras terá um preço estimado cerca de 50% menor do que o SAF AtJ à base de resíduos.

Perspectivas: Espera-se que o AtJ experimente reduções de custos de capital mais pronunciadas do que o HEFA, com os requisitos de CAPEX projetados para diminuir em cerca de 40% entre 2025 e 2050. Isso é impulsionado por melhorias tecnológicas e pela implantação global prevista, que reduzem o risco de investimento e os custos associados. Com o tempo, o preço estimado do SAF a partir do etanol de resíduos deve convergir para o do etanol de culturas, em grande parte devido a melhorias nas tecnologias de processamento, eficiências na cadeia de suprimentos e disponibilidade de matéria-prima.

Sustentabilidade: Os custos de abatimento para o SAF AtJ dependem fortemente da escolha da matéria-prima. Em 2025, o etanol de cana-de-açúcar oferece o menor custo de abatimento entre as matérias-primas AtJ, em torno de US\$ 704/tCO₂, melhorando para aproximadamente US\$ 417/tCO₂ até 2050, o menor entre todas as combinações matéria-prima/tecnologia avaliadas. Resíduos agrícolas e florestais provavelmente desempenharão um papel fundamental, com o custo de abatimento diminuindo cerca de 51% entre 2025 e 2050, atingindo US\$ 530/tCO₂.

5.7.8.4 Gaseificação FT

Situação atual: A produção de SAF via FT a partir de MSW é atualmente a rota mais intensiva em capital, com CAPEX por galão de combustível cerca de 17 vezes maior do que o HEFA. Isso reflete a complexidade e a escala da infraestrutura necessária, incluindo sistemas avançados de reatores, unidades de tratamento de gás e processos de integração. As implantações atuais estão amplamente limitadas à escala piloto, com altas incertezas tecnológicas e riscos operacionais. Apesar desses desafios, a FT a partir de MSW é promissora para a ALC, pois os MSW têm poucos usos concorrentes e estão amplamente disponíveis.

Perspectivas: projeta-se que a FT a partir de MSW alcance a maior redução de custo de produção e, consequentemente, de preço entre as rotas. No curto prazo, espera-se que os preços caiam de US\$ 19,71/galão em 2025 para US\$ 14,60/galão em 2030 e US\$ 10,90/galão até 2035. Essas reduções são impulsionadas por avanços no projeto de reatores, sistemas de tratamento de gás e integração de processos, bem como por economias de escala, maior adoção pelo mercado e redução dos riscos tecnológicos.

Sustentabilidade: As emissões ao longo do ciclo de vida do combustível de aviação (FT) produzido a partir de resíduos sólidos urbanos (MSW) dependem do teor biogênico dos resíduos. Com 100% de teor biogênico, as emissões ao longo do ciclo de vida são reduzidas em cerca de 94% em comparação com o querosene de aviação, enquanto que com 0% de teor biogênico, as emissões aumentam em cerca de 92%. Para esta análise, foi aplicado um valor inicial de CI de 39,3 gCO₂/MJ, resultando em um custo de abatimento de aproximadamente US\$ 2.694 por tCO₂ em 2025. Embora esse valor seja alto em relação a outras rotas, espera-se que os custos de abatimento da FT diminuam mais do que em qualquer outra rota ao longo do tempo, embora permaneçam mais altos do que os do AtJ e do PtL à base de resíduos.

5.7.8.5 PtL

Situação atual: O PtL apresenta atualmente o preço teórico estimado mais alto entre as rotas avaliadas, cerca de US\$ 22,30/galão em 2025. Os custos são impulsionados principalmente pelo CAPEX e pelas despesas operacionais variáveis, particularmente o custo da eletricidade renovável para a produção de hidrogênio. No entanto, as instalações de PtL têm CAPEX e OPEX fixos mais baixos do que as usinas de FT, pois evitam a gaseificação e a purificação do gás de síntese, permitindo uma implantação mais modular. A disponibilidade de recursos renováveis abundantes na ALC sustenta o potencial de longo prazo do PtL.

Perspectivas: os preços do SAF baseado em PtL são altamente sensíveis aos preços da eletricidade renovável, que devem cair significativamente à medida que a energia eólica e a energia solar fotovoltaica continuam a se expandir. Também se projeta que os custos dos eletrolisadores caiam e, combinados com melhorias no projeto das usinas e em melhorias de eficiência, essas mudanças devem fortalecer a competitividade do PtL. Os preços calculados devem cair de US\$ 22,30 por galão em 2025 para US\$ 16,87 em 2030 e US\$ 11,16 em 2035. Apesar

dessas melhorias, não se espera que o preço do SAF de PtL caia abaixo de qualquer uma das outras combinações matéria-prima/tecnologia avaliadas neste estudo entre 2025 e 2050.

Sustentabilidade: O PtL oferece o maior potencial de redução de emissões entre as rotas avaliadas quando alimentado por eletricidade renovável adicional e combinado com DAC ou fontes biogênicas sustentáveis de CO₂. Em 2025, o custo de abatimento é de aproximadamente US\$ 1.947/tCO₂, o que é inferior ao FT a partir de MSW, mas superior ao HEFA e ao AtJ. Até 2035, o custo de abatimento do PtL deve cair para US\$ 1.027/tCO₂, e para US\$ 874/tCO₂ em 2050.

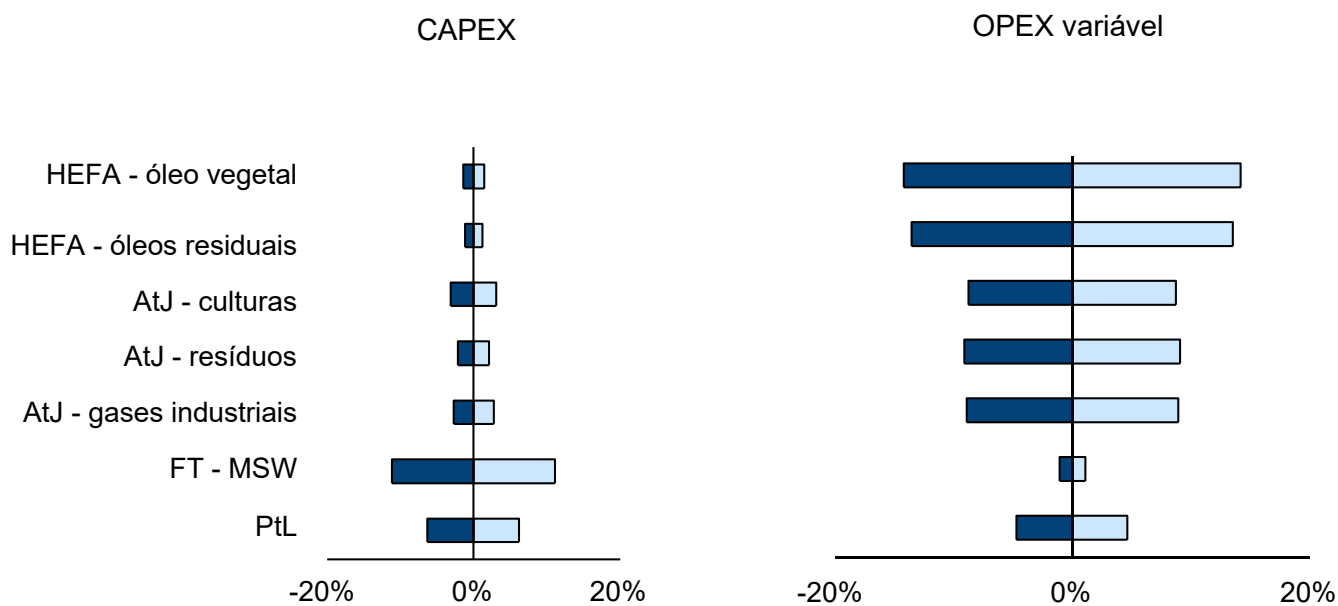
5.7.8.6 Sensibilidades e incertezas de preço

Foi realizada uma análise de sensibilidade de $\pm 10\%$ para cada rota de produção de SAF a fim de avaliar como as mudanças nos principais fatores de custo influenciam os preços estimados em 2030 e 2050. A análise considerou cinco variáveis: CAPEX, OPEX variável, taxas de juros da dívida, IRR e alíquota do imposto de renda corporativo. Essas sensibilidades destacam quais rotas estão mais expostas à volatilidade de custos e onde as incertezas poderiam afetar significativamente os preços futuros de SAF.

Os resultados mostram que a incerteza do CAPEX tem o maior impacto em rotas intensivas em capital, como FT e PtL. Um aumento de 10% no CAPEX eleva o MSP calculado para o FT em aproximadamente 11,1% em 2030 e 11,4% em 2050, enquanto o preço estimado para o PtL aumenta em 6,2% e 4,9% nos mesmos períodos. Em contrapartida, o HEFA é muito menos sensível, com variações de apenas 1,2–1,3% em 2030 e 0,9–1,0% em 2050, uma vez que sua economia é dominada pela matéria-prima, e não pelo investimento de capital. Essas conclusões indicam que o FT e o PtL estão altamente expostos a incertezas nos custos de construção, restrições da cadeia de suprimentos e taxas de aprendizagem tecnológica. A aprendizagem acelerada por meio da implantação rápida e do apoio de políticas poderia reduzir o CAPEX mais rapidamente do que o esperado, diminuindo significativamente os custos e os preços de mercado até 2050. Por outro lado, uma implantação mais lenta ou gargalos persistentes poderiam manter os preços elevados.

Conforme mostrado na figura abaixo, as rotas menos sensíveis ao CAPEX tendem a ser mais sensíveis à incerteza do OPEX variável. Para a HEFA, um aumento de 10% no OPEX variável leva a um aumento de 13,5–13,8% no MSP em 2030 e de 12,1–12,2% em 2050, refletindo sua forte dependência dos preços das matérias-primas. O AtJ apresenta exposição semelhante, com variações de 8,7–9,1% em 2030 e 9,9% em 2050. A PtL é moderadamente sensível, com variações de 4,7% e 6,3% em 2030 e 2050, respectivamente, devido aos custos da eletricidade renovável para a produção de hidrogênio. A FT apresenta uma variação de menos de 2% no, reforçando que sua economia é dominada pelo capital, e não pelos insumos operacionais.

Sensibilidade a uma variação de 10% no CAPEX/OPEX variável para uma instalação com início de construção em 2030



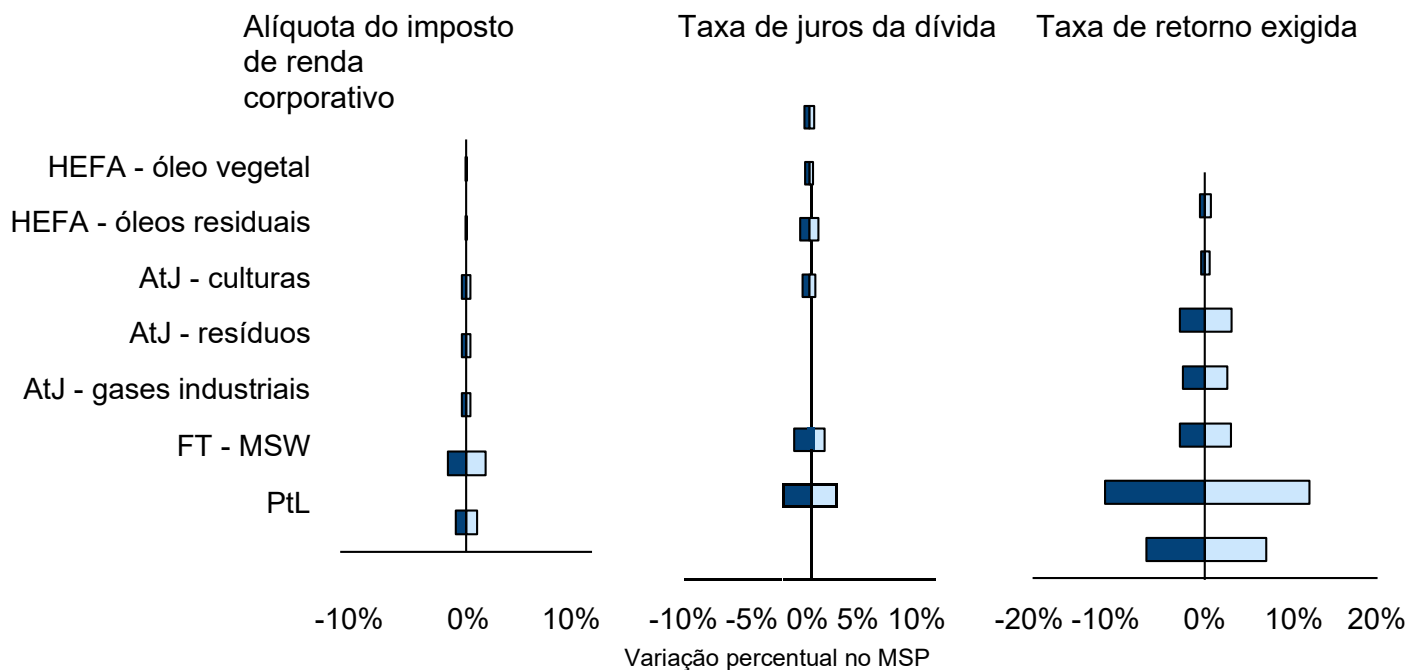
Fonte: Análise da ICF

Variação percentual no MSP

Nota: CAPEX = despesas de capital, OPEX = despesas operacionais, MSP = preço mínimo de venda
 Óleo vegetal HEFA = óleo de soja e óleo de palma, óleo residual HEFA = óleo de cozinha usado e gordura animal,
 cultura AtJ = etanol de cana-de-açúcar e milho, resíduos AtJ = resíduos agrícolas e florestais

As premissas financeiras introduzem outra camada de incerteza. Conforme visto na figura abaixo, FT e PtL são mais sensíveis a variações nas alíquotas de impostos, taxas de juros da dívida e retorno exigido sobre o patrimônio líquido, pois suas estruturas de custos são dominadas pelo financiamento. Alíquotas de impostos mais altas reduzem os fluxos de caixa após impostos, enquanto aumentos nas taxas de juros da dívida elevam diretamente os custos de financiamento. O fator financeiro mais significativo é o retorno exigido sobre o patrimônio líquido pelos investidores. Para FT e PtL, onde tanto a intensidade de capital quanto o risco percebido são altos, o capital próprio representa uma parcela substancial dos custos totais e está sujeito a expectativas de retorno da linha de base mais elevadas. Como resultado, mesmo uma pequena variação no retorno exigido ao longo da vida útil do projeto produz um aumento desproporcional no preço calculado em comparação com variações nas taxas de imposto ou juros, que influenciam apenas partes específicas do fluxo de caixa.

Sensibilidade a uma variação de 10% nas variáveis financeiras para uma instalação com início de construção em 2030



Fonte: Análise da ICF

Nota: CAPEX = despesas de capital, OPEX = despesas operacionais, MSP = preço mínimo de venda
 Óleo de culturas HEFA = óleo de soja e óleo de palma, óleo residual HEFA = óleo de cozinha usado e gordura animal, cultura AtJ = etanol de cana-de-açúcar e milho, resíduos AtJ = resíduos agrícolas e florestais

5.7.9 Conclusões

Esta seção realizou a avaliação da situação atual e do potencial futuro dos SAF na ALC, destacando tanto as oportunidades quanto as restrições em termos de políticas, disponibilidade de matéria-prima, rotas tecnológicas e viabilidade econômica.

A análise destaca que os SAF representam uma medida-chave dentro do setor para a descarbonização da aviação, com compatibilidade drop-in e potencial de redução de emissões a longo prazo. **No entanto, a implantação na ALC enfrenta vários desafios, incluindo a disponibilidade limitada de matéria-prima sustentável para tecnologias de SAF atualmente maduras (por exemplo, HEFA dependente de óleo de cozinha usado), altos custos de produção e preços consequentes, lacunas de infraestrutura, bem como preocupações com a sustentabilidade.** Essas barreiras são agravadas pela natureza inicial dos arcabouços de políticas públicas e pela ausência de instalações de produção de SAF em escala comercial na região.

A análise de matérias-primas indica que resíduos e detritos, incluindo resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos e resíduos florestais, constituem os recursos mais abundantes em toda a região, com Brasil, Argentina e México apresentando o maior potencial. Óleos de origem vegetal, como os de soja e palma, estão atualmente limitados devido a usos concorrentes e preocupações com a sustentabilidade.

Avaliações tecnológicas mostram que a tecnologia HEFA é atualmente a rota mais custo-efetiva, embora sua escalabilidade seja limitada por restrições relacionadas à matéria-prima. As rotas AtJ e PtL oferecem perspectivas promissoras a longo prazo, especialmente à medida que a capacidade de eletricidade renovável se expande e as tecnologias de etanol de segunda geração amadurecem. O coprocessamento pode oferecer uma solução de transição, mas sua contribuição para a descarbonização profunda é limitada pelas proporções de mistura e pelas complexidades da contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida.

Modelagem técnico-econômica sugere que os preços calculados do SAF permanecerão acima dos preços do querosene de aviação convencional até 2050 (de 3 a 12 vezes mais altos, dependendo da matéria-prima e da tecnologia utilizada), com custos de abatimento variando significativamente de acordo com a matéria-prima e a tecnologia. Roteiros baseados em resíduos, como o AtJ a partir de gases industriais e o FT a partir de MSW, mostram potencial para reduções de custo ao longo do tempo, embora atualmente enfrentem alta intensidade em capital e riscos operacionais.

Investimentos para melhorar a infraestrutura e desenvolver cadeias de abastecimento mais robustas poderiam ajudar a resolver ineficiências regionais e reduzir os custos logísticos associados ao transporte de combustível para aeroportos.

O desenvolvimento de SAF na região está progredindo, com vários países iniciando roteiros de SAF, estudos de viabilidade e mecanismos de financiamento. No entanto, a maioria das estruturas permanece em estágios iniciais, e a harmonização com normas internacionais, como o CORSIA, será essencial para apoiar o acesso ao mercado e a verificação da sustentabilidade.

Em resumo, a região da ALC possui os elementos fundamentais para apoiar o desenvolvimento de SAF, mas a concretização desse potencial exigirá:

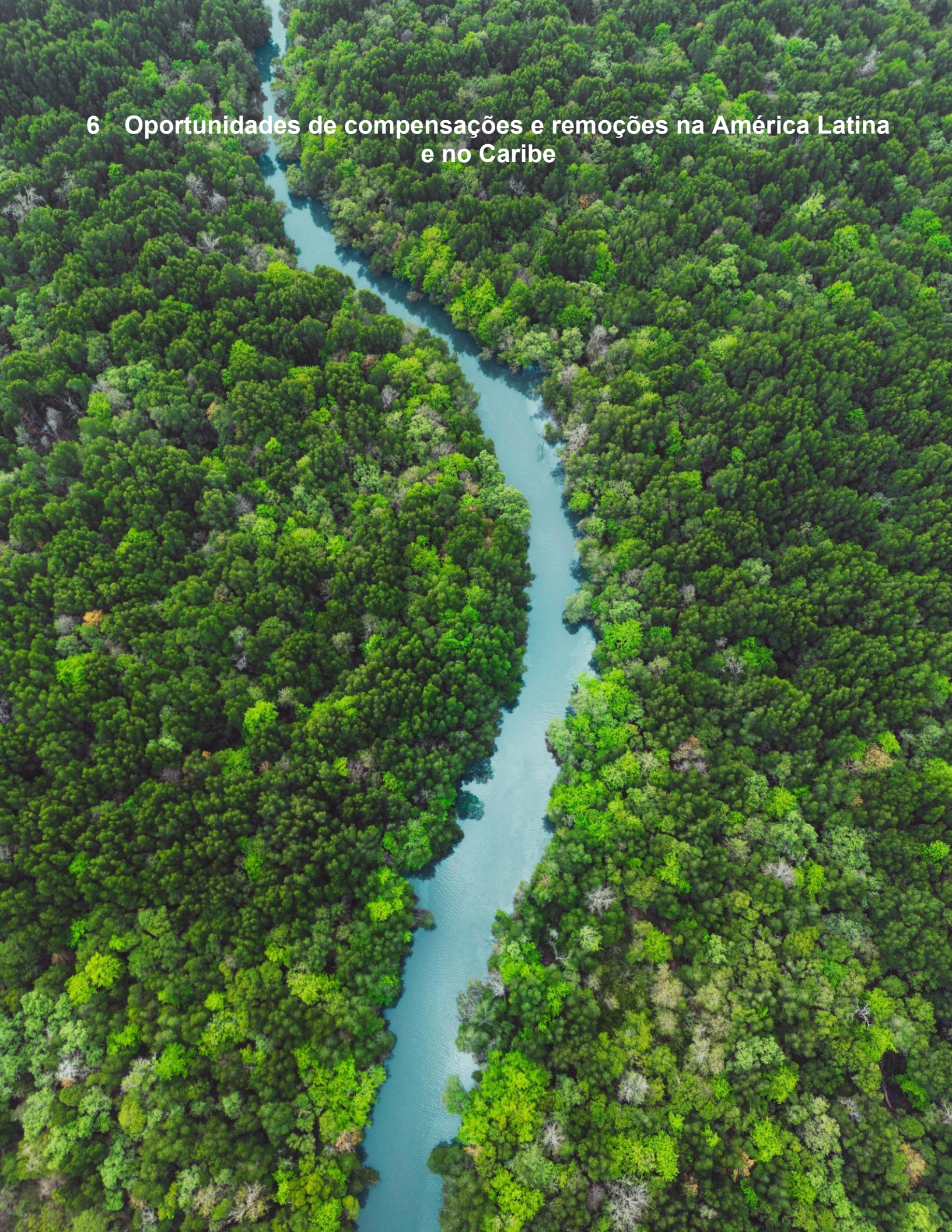
- **Estruturas reforçadas de dados e sustentabilidade** são essenciais para garantir padrões consistentes de monitoramento e reporte em toda a região. O envolvimento do governo é necessário para estabelecer políticas robustas, alocar recursos e facilitar a colaboração entre as partes interessadas, possibilitando a implementação e manutenção de sistemas eficazes de dados e sustentabilidade.
- **A mobilização de investimentos direcionados e incentivos econômicos em toda a cadeia de valor da aviação** é essencial para liberar o potencial de redução de emissões dos SAF na ALC. Ao alocar estrategicamente recursos financeiros e criar incentivos econômicos robustos, os governos podem facilitar o desenvolvimento de infraestrutura, apoiar a expansão das cadeias de abastecimento desde a produção de matéria-prima até a distribuição de combustível e limitar a diferença de preço em relação ao combustível convencional.
- **Evolução contínua das políticas e alinhamento com normas internacionais.** A harmonização das políticas com normas internacionais é necessária para evitar a fragmentação das abordagens regulatórias e dos critérios de sustentabilidade em toda a ALC. Ao alinhar as estruturas nacionais com referências

internacionais como o CORSIA, os países podem facilitar o comércio transfronteiriço de SAF, simplificar os processos de certificação e garantir uma verificação consistente da sustentabilidade.

- **Priorização estratégica de matérias-primas com baixo risco de sustentabilidade e alta disponibilidade.** Ao focar nessas matérias-primas, os países podem minimizar os riscos ambientais e sociais, ao mesmo tempo em que maximizam o potencial para uma produção confiável de SAF. Essa abordagem também facilita a conformidade com normas internacionais de sustentabilidade e apoia a escalabilidade de longo prazo, já que esses tipos de matérias-primas são menos propensos a enfrentar restrições regulatórias ou de mercado no futuro.

As conclusões deste relatório fornecem uma base para a tomada de decisões informadas e destacam áreas para exploração adicional, incluindo o papel das matérias-primas emergentes, a integração dos SAF em estratégias mais amplas de energia e clima, e o potencial para exportações de SAF e atributos ambientais.

6 Oportunidades de compensações e remoções na América Latina e no Caribe



6.1 Oportunidade para medidas baseadas no mercado

Principais resultados:

- A rica biodiversidade da região da ALC posiciona a região como líder global no desenvolvimento de créditos de carbono de alta integridade e também possui o potencial de gerar uma quantidade significativa de soluções não baseadas na natureza.
- O mercado global de carbono está se voltando para soluções baseadas na natureza de alta integridade. Isso é essencial para melhorar os benefícios ambientais, mas levará a aumentos de preço.
- As remoções por meio de tecnologias continuam caras hoje, mas devem diminuir significativamente até 2050, complementando as soluções baseadas na natureza e diversificando o portfólio de créditos de carbono da região.

6.1.1 Introdução

Esta seção destaca o escopo e a relevância dos créditos de carbono para a aviação na América Latina e no Caribe, dado o papel positivo que a aviação pode desempenhar na conservação e restauração de ecossistemas globais críticos, bem como na redução das emissões da agricultura, o setor que mais emite na região³⁶⁷. Ela analisa os volumes históricos e os preços médios dos créditos de carbono, juntamente com várias projeções futuras. Medidas baseadas no mercado, que incluem mecanismos como a compensação de carbono, são ferramentas de política destinadas a fornecer incentivos econômicos para a redução das emissões de gases de efeito estufa por meio da atribuição de um preço ao carbono; especificamente, os créditos de carbono representam reduções ou remoções de emissões verificadas que podem ser adquiridas para compensar emissões em outros locais. A análise abrange tanto os créditos de carbono do CORSIA quanto do Mercado Voluntário de Carbono (VCM) provenientes de projetos globais e regionais, oferecendo uma visão geral completa do mercado e de seus principais impulsionadores. A dinâmica de oferta e demanda é examinada por meio de uma avaliação dos preços atuais, dos projetos e dos marcos regulatórios para revelar as principais tendências e desenvolvimentos. A seção conclui com uma avaliação de recomendações estratégicas para alavancar o potencial da América Latina como líder no desenvolvimento de compensações de carbono, identificando recomendações para oportunidades no contexto regional.

6.1.2 Contexto dos créditos de carbono

Os créditos de carbono complementam um portfólio mais amplo de medidas para lidar com o impacto climático da aviação, permitindo que as partes interessadas do setor mitiguem parte de suas emissões por meio da compra de créditos de carbono verificados, gerados por projetos que reduzem, evitam ou removem emissões de gases de efeito estufa fora do setor de aviação. Cada crédito corresponde a uma tonelada métrica de emissões equivalentes de CO₂ reduzidas ou removidas, certificadas sob padrões reconhecidos para garantir a integridade e a permanência ambiental. Os projetos de créditos de carbono também podem gerar valor econômico para os Estados anfitriões, atraindo investimentos, criando empregos e apoiando o desenvolvimento local.

Várias companhias aéreas já participam de programas voluntários de compensação de carbono, apoiando projetos certificados que realizam prevenção, redução ou remoção de emissões de gases de efeito estufa. A estrutura global está se desenvolvendo rapidamente, particularmente por meio do CORSIA da ICAO, que visa fornecer uma estrutura harmonizada para a compensação de emissões de voos internacionais, ajudando a preencher a lacuna entre as emissões reais e as linhas de base acordadas pelo setor. O CORSIA pode ser entendido como um subconjunto do VCM, na medida em que se baseia no mesmo conjunto de créditos de carbono e utiliza muitos dos mesmos registros e padrões usados na compensação voluntária. No entanto, enquanto o VCM permite que empresas de todos os setores comprem créditos de forma puramente voluntária para reivindicar reduções de emissões, o CORSIA introduz uma camada de supervisão regulatória específica para a aviação internacional. No âmbito do CORSIA, apenas créditos que atendam aos rigorosos critérios de elegibilidade da ICAO são permitidos para fins de conformidade. Isso significa que, embora nem todos os créditos do VCM sejam elegíveis ao CORSIA, todos os créditos utilizados no CORSIA se originam do VCM mais amplo.

³⁶⁷ <https://publications.iadb.org/en/benefits-and-costs-reaching-net-zero-emissions-latin-america-and-caribbean>

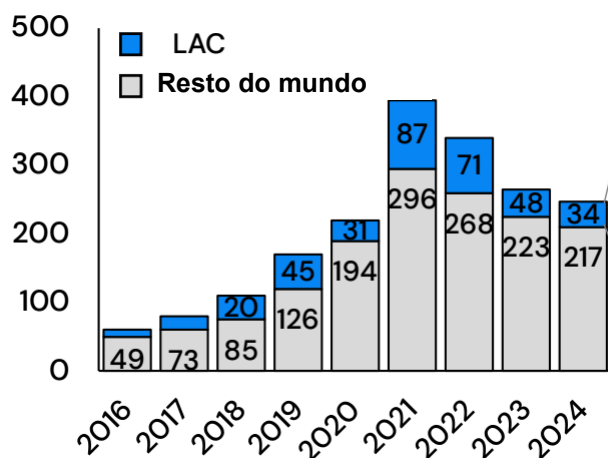
6.2 Mercado global de compensações de carbono

6.2.1 Visão geral do VCM

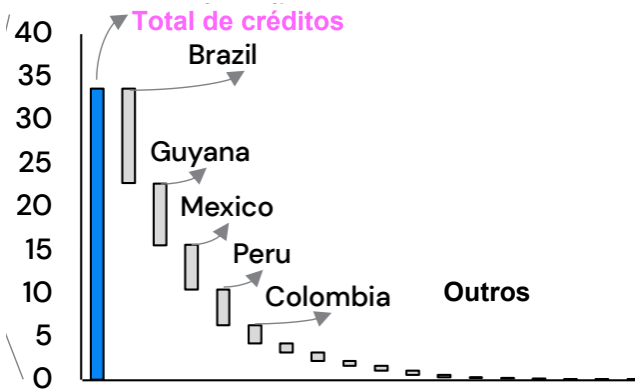
Dados ano a ano revelam um mercado voluntário de carbono em retração, o que se entende ser impulsionado em grande parte por um foco intensificado na integridade dos créditos. A introdução de metodologias, procedimentos de validação e padrões de integridade mais rigorosos resultou em menos projetos qualificados para a emissão de créditos, levando a um declínio significativo nos novos créditos que entram no mercado. Essa tendência reflete uma evolução deliberada do mercado, afastando-se de créditos mais antigos e de menor qualidade em direção a um sistema mais credível e de alta integridade. Conforme refletido na figura abaixo, os volumes de emissão caíram notavelmente desde seu pico, com um declínio de 20% a 25% em relação a 2021 relatado em 2024 e emissões cada vez menores em 2025. À medida que as emissões caem, as retiradas de créditos de carbono têm aumentado ao longo do tempo, sinalizando uma maior demanda por parte dos compradores para se alinharem às metas climáticas³⁶⁸. A América Latina e o Caribe continuam sendo as principais fontes de emissão de créditos, historicamente oscilando entre 12% e 23% do total global, com o Brasil e a Guiana se destacando ao representarem mais de 80% dos créditos na região.

A participação regional no total de créditos emitidos foi de 13% em 2024. Os quatro principais países emitiram cerca de 80% dos créditos da região, sendo 32% do Brasil e 21% da Guiana

Emissão total de créditos por ano e região
Toneladas métricas de carbono (milhões)



Emissão total de créditos por ano e região
Toneladas métricas de carbono (milhões)



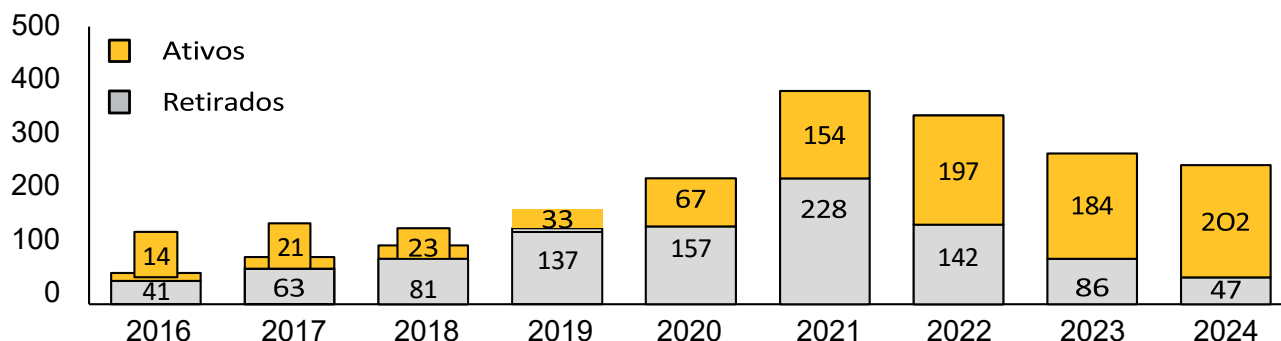
Fonte: Dados dos cinco principais registros voluntários de créditos de carbono (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS)), análise da ICF

A figura acima ilustra a proporção entre créditos retirados e créditos ativos e parece sugerir um declínio nas retiradas, uma vez que a parcela retirada diminui a cada ano. No entanto, como os créditos podem ser retirados ao longo de vários anos e os créditos emitidos mais recentemente tiveram tempo limitado para serem vendidos e retirados, a aparente queda ao longo do tempo é uma deflação artificial, refletindo um artefato de timing, e não uma tendência nas retiradas.

Deflacionamento artificial na liquidação dos créditos devido ao fato de os créditos mais recentes terem menos tempo para serem vendidos e aposentados

Status dos créditos por ano

Milhões de toneladas métricas de carbono



Fonte: Dados dos cinco principais registros voluntários de créditos de carbono (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS)), análise da ICF

Nota: Inclui apenas créditos ativos e retirados

6.2.2 Visão geral do CORSIA

Comparações significativas ano a ano dos créditos elegíveis ao CORSIA no mercado voluntário de carbono começam em 2024, quando as emissões sujeitas aos requisitos de compensação do CORSIA excederam a linha de base do esquema CORSIA. Embora os requisitos de compensação estejam em vigor desde 2021 para rotas entre estados participantes voluntários, as emissões do setor durante a fase piloto de 2021–2023 permaneceram abaixo da linha de base, resultando em um fator de crescimento do setor (SGF) igual a zero³⁶⁹. Como consequência, as companhias aéreas operando em rotas CORSIA não foram obrigadas a adquirir compensações para cumprimento, e a demanda por créditos elegíveis ao CORSIA permaneceu mínima. Isso mudou em 2024, quando as emissões ultrapassaram a linha de base e as obrigações de compensação passaram a ser operacionalmente relevantes.

Em 2024, a oferta de créditos elegíveis ao CORSIA era muito baixa, já que o CORSIA é um dos esquemas mais rigorosos do VCM, o que significa que os créditos qualificados são geralmente reconhecidos como sendo da mais alta qualidade. Dos créditos de alta qualidade restantes, apenas 17 milhões atendiam aos padrões do CORSIA globalmente. Além disso, apenas cerca de 8 milhões desses créditos possuíam uma LoA correspondente dos governos anfitriões, que é a aprovação formal necessária para autorizar o uso de créditos para fins de conformidade com o CORSIA, todos originários de um único projeto na Guiana (REDD+ ART TREES). Os créditos que, de outra forma, seriam elegíveis ao CORSIA, mas carecem de LoA, podem ser descritos como “CORSIA pendentes”, dos quais havia 7 milhões em 2024. Dos créditos elegíveis ao CORSIA com LoA, 30% já estavam comprometidos por meio de acordos plurianuais, deixando apenas cerca de 5 milhões de créditos disponíveis no mercado aberto.

As emissões globais da aviação (domésticas e internacionais) atingiram 950 Mt em 2024; no entanto, as emissões nos pares de Estados sujeitos aos requisitos de compensação do CORSIA totalizaram 363 Mt³⁷⁰. Em relação a uma linha de base igual a 85% das emissões de 2019 para esses pares de Estados, isso resultou em um SGF de 15,9% para 2024, que os Estados devem aplicar ao calcular os requisitos de compensação de 2024, antes da consideração dos combustíveis elegíveis ao CORSIA. Além do panorama de 2024 (figura abaixo), os requisitos cumulativos de compensação para a primeira fase do CORSIA (2024-2026) foram estimados pela ICAO na faixa de 106 a 149 Mt, dos quais cerca de 15% devem ser atendidos por meio de Combustíveis Elegíveis ao CORSIA

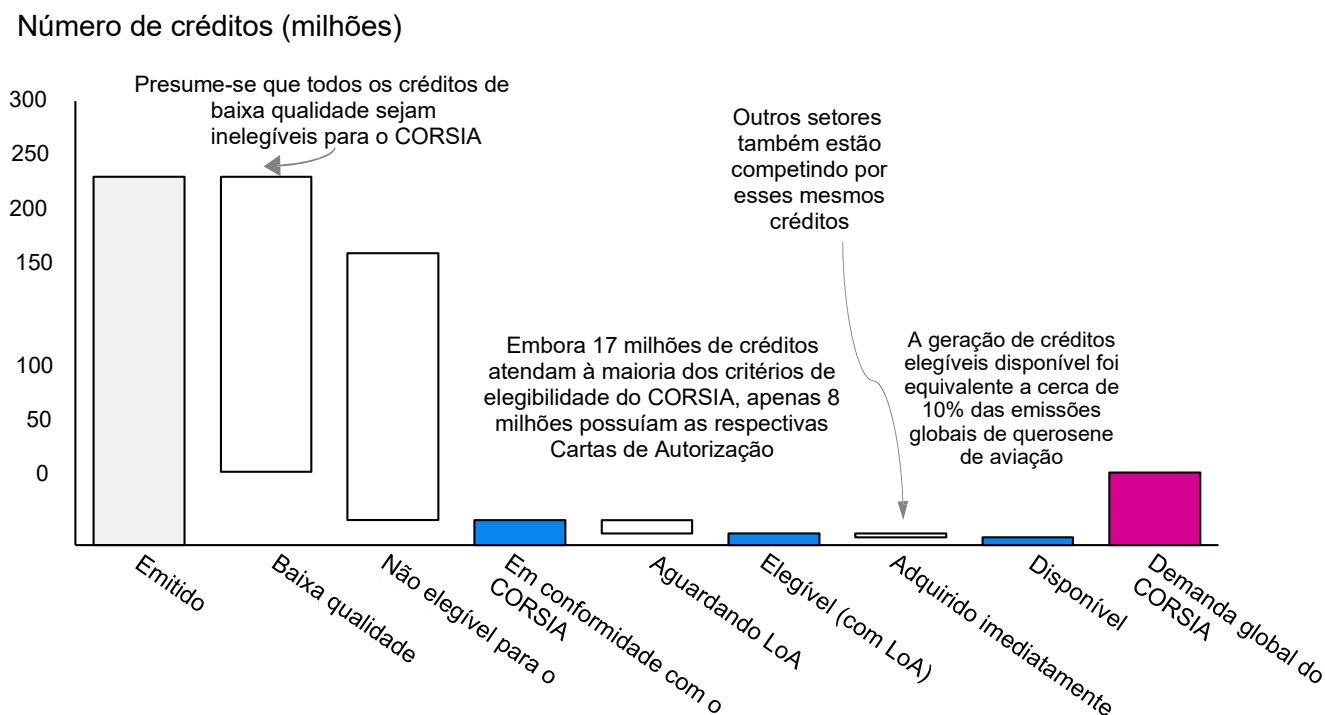
³⁶⁹ O SGF mede em que medida as emissões de todo o setor excedem a linha de base de 2019 e determina a parcela de emissões que as companhias aéreas devem compensar

³⁷⁰ <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>; <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Central%20Registry/CORSIA-Annual-SGF-4ed-2025-web.pdf>

(CEF)³⁷¹. Isso deixa aproximadamente 90 a 127 Mt (cumulativas) não atendidas e com necessidade de compensações adicionais ao longo da Fase 1.

Dada essa demanda, a oferta atual de créditos de carbono elegíveis disponíveis no mercado aberto é inferior ao necessário para o CORSIA, e a emissão total de créditos de carbono é menor do que o total de emissões da aviação. Embora se espere que a emissão de créditos cresça, também pode haver maior concorrência de outros setores, destacando a importância de a aviação utilizar um portfólio de abordagens para reduzir as emissões.

Subconjunto aninhado de créditos de carbono vs. demanda do CORSIA, 2024



Fonte: Dados dos cinco principais registros voluntários de créditos de carbono: American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS) e Verified Carbon Standard (VCS)

Nota: Demanda global do CORSIA estimada com base nos dados de 2023 reportados à ICAO
LoA = Carta de Autorização

³⁷¹ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CAEP_Inputs-to-2025-CORSIA-periodic-review-C235.pdf

6.3 Projeções de preços e volume

6.3.1 Resumo dos resultados

Os resultados desta análise ilustram um claro aumento de preços impulsionado por desequilíbrios entre oferta e demanda. A ICF estima que, no cenário base, os preços dos créditos elegíveis ao CORSIA devem subir de cerca de US\$ 21,50 por tonelada em 2025 para mais de US\$ 50 até o final da Fase 2 do CORSIA (veja a figura abaixo). Esse aumento de preço acompanha de perto o endurecimento dos padrões de elegibilidade e a capacidade de emissão restrita, incluindo atrasos nas LoAs e reformas regulatórias.

Simultaneamente, os preços do mercado voluntário caíram para menos de US\$ 5 para muitos créditos de prevenção abundantes, mas devem subir de forma constante à medida que a preferência do mercado muda para remoções de alta integridade, incluindo biocarvão e Captura e Armazenamento de Carbono (CAC). Embora se espere que o aumento da demanda eleve o preço dos créditos tradicionais de prevenção e de remoção baseada na natureza, isso pode ter um efeito diferente sobre as remoções projetadas. Essas tecnologias, como a captura direta do ar (DAC), provavelmente serão ampliadas à medida que as opções convencionais se tornarem limitadas. Seus custos serão influenciados principalmente pelo progresso tecnológico, e não pela escassez no mercado. Atualmente, a DAC tem um custo de abatimento estimado entre US\$ 1.000 e US\$ 1.300 por tonelada de CO₂e. No entanto, com menores despesas de capital e redução de riscos por meio da implantação rápida, os custos poderiam cair para menos de US\$ 600 por tonelada até 2050.

As principais conclusões qualitativas e quantitativas são detalhadas nas seções a seguir, com referência à composição dos créditos emitidos versus os retirados, aos fatores que impulsionam o aumento dos preços, à expansão projetada da oferta por meio de reformas regulatórias (especialmente LoAs) e ao papel das soluções baseadas na natureza.

6.3.2 Metodologia e premissas

Esta análise exigiu um repositório de todos os créditos emitidos, incluindo informações sobre sua localização e sua elegibilidade para o CORSIA. Para esse fim, a ICF construiu um banco de dados de volume de créditos com base nos cinco principais registros voluntários de créditos de carbono (American Carbon Registry (ACR), Architecture for REDD+ Transactions (ART), Climate Action Reserve (CAR), The Gold Standard (GS), Verified Carbon Standard (VCS)), que, juntos, representam mais de 98% da emissão global de VCM³⁷² desde 2016, com acompanhamento detalhado da origem, retirados e tipo dos projetos. Como se limita aos cinco principais registros, este banco de dados não inclui registros menores, projetos de nicho ou contratos bilaterais privados de compra (a menos que esses contratos resultem em uma transação de crédito (emissão, transferência ou retirada) dentro do próprio registro). Este repositório foi utilizado para compreender os volumes históricos de créditos, que também serviram como ponto de referência para projeções de volume e precificação. A avaliação da elegibilidade dos créditos para inclusão no banco de dados levou em conta a data de início dos projetos (2016+), a triagem de qualidade, as cartas de compromisso (LoAs) do governo anfitrião e as atualizações do status regulatório.

Os preços históricos dos créditos foram obtidos a partir dos preços dos mercados à vista globais e regionais da S&P Global Energy, validados por meio de comunicações com corretores que referenciavam preços de projetos específicos. As projeções de preços e volumes para o futuro utilizam os preços dos créditos para 2025, estabelecidos conforme descrito acima, como ponto de partida; em seguida, modelam a alta e a queda dos preços de acordo com um conjunto de diferentes cenários futuros de políticas e de mercado, baseados em informações fornecidas por instituições credenciadas e no feedback das partes interessadas, para criar cenários de projeção. As premissas consideradas nesta análise, tanto para o VCM quanto para o CORSIA, incluíram aquelas desenvolvidas pela Abatable, BloombergNEF, Statista, CarbonCredits.com e MSCI, juntamente com dados históricos da S&P Global Energy. Um fator-chave nessas projeções é a taxa de aprendizagem das tecnologias de remoção de carbono projetadas, como a DAC. Pesquisas recentes sugerem que as reduções de custo para esses métodos provavelmente ocorrerão mais lentamente do que o previsto anteriormente. Estudos abrangentes que examinam cenários de implantação em escala do DAC estimam custos de abatimento em 2050 variando de US\$ 230 a US\$ 540 por tonelada e, em alguns casos, de US\$ 100 a US\$ 600 por tonelada³⁷³. Alcançar a faixa mais baixa desses intervalos de custo exigirá altas taxas de aprendizagem, que dependem de uma implantação acelerada apoiada por um arcabouço de políticas públicas que garantam a certeza da demanda.

³⁷² https://perspectives.cc/wp-content/uploads/2024/07/PCG_CCPs-AF-analysis_07_2024.pdf

³⁷³ <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2024/03/cost-of-direct-air-carbon-capture-to-remain-higher-than-hoped.html>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332223003007>

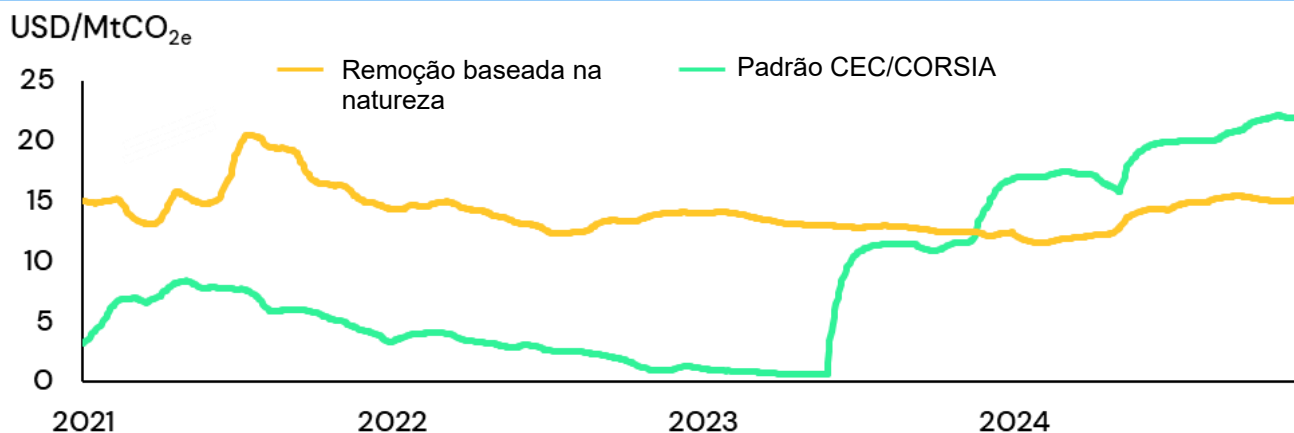
Todas as premissas estão refletidas na tabela abaixo. Premissas como essas fundamentam as previsões de preço e ajudam a esclarecer quais créditos provavelmente atenderão à demanda em cada cenário. A faixa de preços projetada pela ICF tanto para o VCM quanto para o CORSIA é determinada pelas premissas resumidas na tabela a seguir.

Essa metodologia combina e calcula a média de previsões quantificadas de importantes pesquisadores de mercado (como Abatable, BloombergNEF e outros) em cenários unificados de baixo, médio e alto com um conjunto semelhante de premissas, alinhando suas projeções em uma linha do tempo comum para que possam ser comparadas e submetidas a uma avaliação direta em relação a um. Agrupar e comparar projeções de vários pesquisadores de mercado líderes permite a consideração de uma gama mais ampla de premissas e reduz o viés inerente à dependência de uma única previsão. Por exemplo, as premissas nos cenários Baixo, Médio e Alto incorporam os impactos de vários cronogramas de implementação das Cartas de Autorização (LoA) e do aumento do investimento em tecnologias de créditos de carbono. Nos cenários Médio e Alto, a oferta restrita na década de 2020 reflete diretamente os gargalos decorrentes das Cartas de Autorização limitadas, com sua expansão gradual incorporada à recuperação de preços projetada para a década de 2030 e além, enquanto as LoA são menos restritivas no cenário Baixo. Da mesma forma, todos os cenários refletem o impacto do progresso tecnológico, mostrando como a oferta evolui ao longo do tempo. Inicialmente, há um excesso de oferta de créditos de prevenção de menor qualidade, o que retarda o desenvolvimento de mercado. No entanto, à medida que novos métodos de remoção (frequentemente impulsionados pela tecnologia) se tornam disponíveis na década de 2030 e além, a oferta muda para remoções de maior integridade. Essas premissas levam em conta a implantação gradual de novas tecnologias e atrasos no investimento de capital, que influenciam tanto os preços quanto a dinâmica do mercado. Embora, de modo geral, essa metodologia ofereça uma abordagem estruturada para integrar múltiplas projeções, permanece a incerteza devido à sensibilidade em torno do momento e da escala da emissão de LoA e dos avanços tecnológicos. Esses fatores introduzem uma variabilidade que foi capturada direccionalmente por essa metodologia, mas a extensão total de seu impacto é difícil de quantificar com precisão; portanto, as projeções resultantes devem ser vistas como intervalos indicativos, e não como previsões exatas.

Tabela 58: Premissas para as projeções de preços do ICF VCM e do CORSIA

Baixa (Excesso de oferta)	Médio (Cenário Base)	Alta (demanda agressiva)
<p><i>VCM: Os créditos de prevenção predominam até 2050, os padrões de integridade permanecem fracos e o excesso de oferta mantém os preços próximos aos custos dos projetos.</i></p> <p>CORSIA: Espera-se que a oferta de créditos CORSIA supere a demanda por compensações durante a Fase 1 do CORSIA, levando a uma queda nos preços. Na Fase 2, uma abordagem mais flexível por parte dos governos ou da ICAO para legislar sobre a integridade dos créditos ou exigir créditos resulta em menor demanda e um mercado com excesso de oferta persistente.</p> <p><i>Tecnologia: Não avança nem se expande significativamente devido à demanda e à implantação limitadas, dada a oferta excedente de créditos baratos e de baixa integridade.</i></p>	<p>VCM: A oferta se torna mais restrita em meados/final da década de 2020 devido a autorizações limitadas e supervisão mais rigorosa, causando pressão de alta sobre os preços na década de 2030. A demanda por emissões de maior qualidade expande progressivamente a disponibilidade de remoções projetadas.</p> <p>CORSIA: Espera-se que os preços dos créditos CORSIA subam acentuadamente no curto prazo, impulsionados por uma oferta restrita de créditos devido à falta de LoAs. Os preços continuam a aumentar ao longo da Fase 2 e além, mas em um ritmo mais lento à medida que o mercado se ajusta e novos projetos entram em operação.</p> <p><i>Tecnologia: A implantação moderada causa alguma redução de custos e aumenta a disponibilidade de remoções de alta integridade.</i></p>	<p>VCM: A oferta restrita até 2030, impulsionada pela expansão das regras de conformidade e de remoção exclusiva, alimenta forte concorrência e preços elevados para créditos de alta qualidade, enquanto o excesso de oferta anterior e o foco em créditos de prevenção de baixa qualidade atrasam o investimento em tecnologia de remoção, tornando as remoções convencionais e tradicionais escassas e caras.</p> <p>CORSIA: A crescente demanda por créditos CORSIA eleva os preços, inicialmente impulsionada pelo forte crescimento da aviação e pela lenta adoção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) na Fase 1 do CORSIA. A demanda continua a aumentar na Fase 2, quando o CORSIA se expande para incluir países adicionais.</p> <p><i>Tecnologia: amadurece lentamente no início, mas se difunde rapidamente assim que a demanda aumenta, reduzindo os custos das remoções de alta integridade.</i></p>

Historicamente, os créditos voluntários do mercado voluntário de carbono baseados na natureza eram negociados com um prêmio em relação aos créditos CORSIA, mas, mais recentemente, a tendência mudou



Fonte: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc. Análise da ICF

Notas: Modificado para os fins desta análise com um fator de amortecimento de suavização exponencial de 0,9 para proteger a confidencialidade dos dados; limitado a partir de 2021 devido a restrições de disponibilidade de dados; CEC: Créditos elegíveis ao CORSIA.

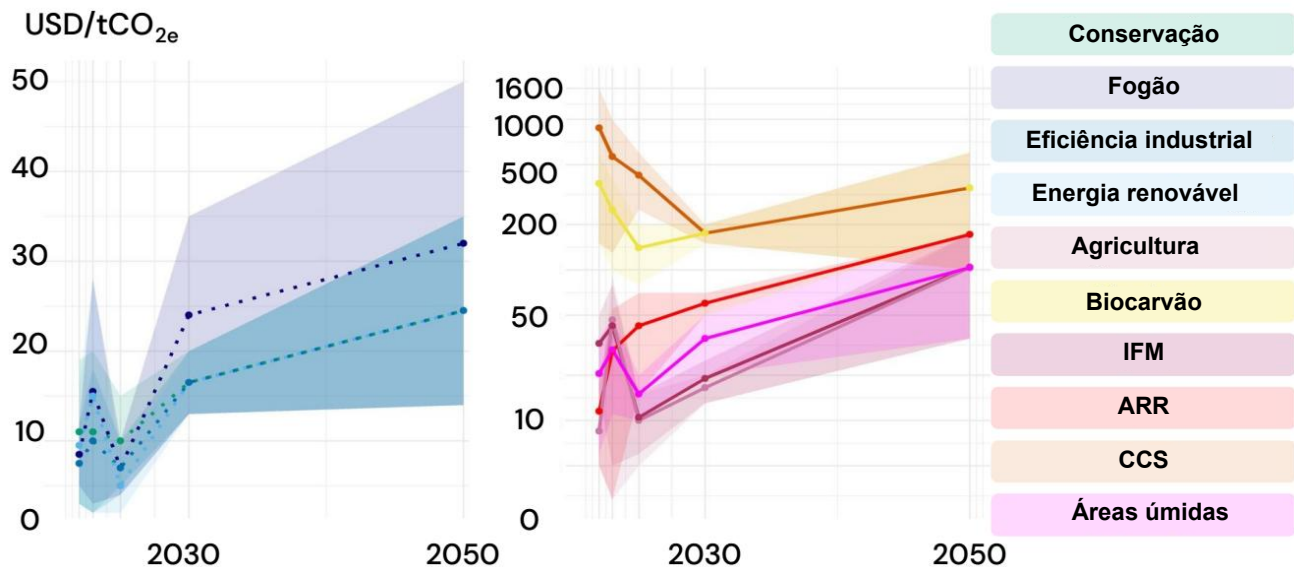
6.3.3 VCM

O principal indicador para a precificação de créditos no VCM, historicamente e no futuro, é o tipo de crédito emitido. Os créditos de prevenção são gerados por projetos que evitam emissões futuras; para os fins desta análise, divididos nas seguintes categorias: fogões (substituição de fogões ineficientes por outros mais eficientes), conservação/REDD+, energia renovável e eficiência energética. Esses tipos de projetos tendem a ter preços mais baixos porque enfrentam um excesso de oferta persistente, resultado de custos de desenvolvimento de projeto mais baixos, restrições limitadas de adicionalidade e preocupações contínuas com a integridade, o que suprime a confiança dos compradores. Por outro lado, os créditos de remoção envolvem a extração ativa de carbono da atmosfera e seu sequestro; para os fins desta análise, divididos nas seguintes categorias: CCS (Captura e Armazenamento de Carbono), biocarvão, ARR (Florestamento, Reflorestamento, Revegetação), IFM (Manejo Florestal Melhorado) e remoção por meio da implementação de práticas de acumulação de carbono ou restauração em ambientes agrícolas ou de áreas úmidas. Esses créditos apresentam custos de desenvolvimento mais elevados devido aos requisitos de tecnologia, infraestrutura, monitoramento e verificação. Consequentemente, eles alcançam preços premium impulsionados pela oferta restrita, pela crescente demanda por alta integridade e pelas preferências do mercado por sequestro de carbono de longo prazo. Essa divergência de preços é reforçada por fatores como tamanho do projeto, risco de localização, cobenefícios (por exemplo, biodiversidade, impacto social), data de emissão e reputação do desenvolvedor, mas nenhum deles supera o tipo de projeto como determinante principal. Em todos os cenários de projeção previstos, a escassez e o rigor das remoções de carbono as diferenciarão dos créditos de prevenção, consolidando seu papel como os créditos de maior valor em um mercado voluntário de carbono em maturação.

De modo geral, os preços dos créditos VCM caíram entre 2022 e 2025, para menos de US\$ 5 por tonelada de CO_{2e} para muitos projetos de redução de emissões e alguns projetos de remoção. Isso se deve ao excesso de oferta persistente de créditos de prevenção; esse excesso de oferta acumulado mantém os volumes de VCM elevados e os preços baixos, já que muitos créditos disponíveis são considerados de menor qualidade ou menos adicionais, limitando o crescimento dos preços no curto prazo. A partir de 2025, prevê-se que os preços do VCM subam de forma constante, à medida que o mercado passa por uma mudança em direção a créditos de maior integridade. O endurecimento dos critérios de qualificação, as mudanças regulatórias e os crescentes compromissos corporativos e setoriais, especialmente para remoções, impulsionam os preços para cima no longo prazo. Uma tendência contrária a essa afirmação geral é observada nos créditos de biocarvão, CCS e ARR, que começam com preços altos e diminuem à medida que as tecnologias se desenvolvem, estabilizando-se entre US\$

100 e US\$ 600 por crédito até 2050. Esses créditos exigem investimento inicial substancial em tecnologia e infraestrutura, incluindo métodos inovadores de monitoramento e verificação rigorosa para garantir a permanência do carbono e a adesão a padrões estritos de qualidade e integridade. A figura abaixo ilustra a alta e a queda dos preços dos créditos VCM.

Previsão de VCM, Prevenção (Esquerda) e Remoção (Direita)



Fontes: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF, Statista, CarbonCredits.com, Young et al., 2023, ETH Zurich
 Nota: Remoções O preço está em escala logarítmica

6.3.4 CORSIA

O preço das compensações elegíveis ao CORSIA é determinado em grande parte pelo fato de um projeto ter obtido um Ajuste Correspondente (CA). Um CA é o ajuste contábil formal exigido pelo CORSIA para garantir que uma redução de emissões transferida internacionalmente não seja contabilizada duas vezes (ou seja, uma vez pelo país anfitrião e outra pela companhia aérea que utiliza a compensação para cumprimento). As compensações que possuem um CA (ou que devem recebê-lo) são mais caras porque a oferta ainda é limitada e as companhias aéreas devem utilizá-las para cumprir as exigências do CORSIA. Com apenas alguns ajustes correspondentes atualmente em vigor, a escassez é uma das pressões mais fortes para o aumento dos preços das compensações CORSIA.

Mecanismos de seguro também afetam os preços. Esses produtos protegem a integridade ambiental e a validade regulatória das compensações elegíveis ao CORSIA. Por exemplo, a Gold Standard aprovou o seguro da Oka. Se um ajuste correspondente falhar e as compensações se tornarem inválidas para o cumprimento do CORSIA, o seguro indeniza o desenvolvedor e, conforme entendido, garante a substituição por outras compensações elegíveis. Essa cobertura de risco, por sua vez, aumenta os custos gerais.

A modelagem de cenários específicos do CORSIA com base em várias fontes³⁷⁴ sugere que o preço de mercado dos créditos elegíveis ao CORSIA aumentará substancialmente de aproximadamente US\$ 21,5 por crédito em 2025 para cerca de US\$ 50 até o final da Fase 2 do CORSIA em 2035. A variabilidade dos preços depende do equilíbrio entre as restrições de oferta e o crescimento da demanda, com cenários potenciais que variam de excesso de oferta (levando a quedas nos preços) a uma alta escalada de preços impulsionada pela demanda.

A trajetória destaca como o equilíbrio entre oferta e demanda será fundamental para a formação de preços do CORSIA na próxima década. Em um cenário de excesso de oferta, critérios generosos de elegibilidade e

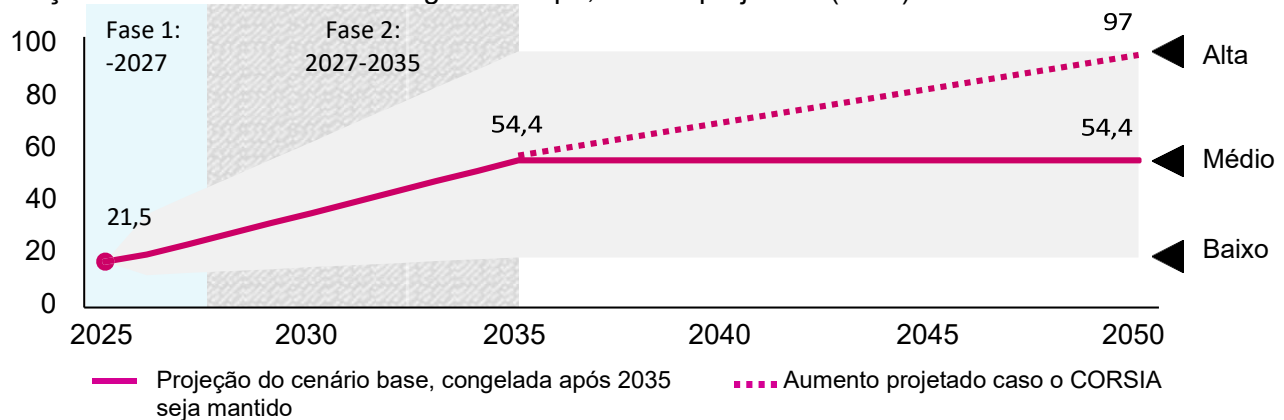
³⁷⁴ Incluindo: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF e MSCI.

fiscalização limitada pela ICAO permitem um amplo fluxo de créditos para o sistema, moderando os custos para as companhias aéreas, enquanto processos de autorização mais rigorosos e uma fiscalização mais forte da integridade poderiam restringir a emissão de projetos, ampliando a escassez e empurrando os preços para cima à medida que os requisitos de compensação se expandem na Fase 2, quando a cobertura se estende a outros grandes mercados de aviação. De modo geral, a trajetória do CORSIA até 2035 é moldada por três forças-chave: o ritmo de crescimento da aviação entre os países participantes, o grau de supervisão em torno da qualidade dos créditos e a rapidez com que novos canais de oferta entram em operação. Se a oferta mantiver uma vantagem sobre a demanda, os preços provavelmente permanecerão relativamente baixos; se as restrições se intensificarem justamente quando a demanda acelerar, os preços poderão atingir ou exceder o limite superior das faixas projetadas.

Dada a atual incerteza da ICAO em relação às fases pós-2035, a influência do esquema CORSIA não chega a moldar as trajetórias de longo prazo d, deixando a dinâmica futura a ser determinada por decisões políticas pendentes. As projeções de preço do CORSIA abaixo refletem o panorama atual dos créditos e a maturidade tecnológica, enquanto a modelagem de preço do VCM se baseia em diferentes fontes de dados e premissas de modelagem; portanto, os números não são diretamente comparáveis e podem divergir à medida que os mercados evoluem.

**Estima-se que o preço dos créditos CORSIA mais que duplique em uma década.
Grande incerteza envolve os preços de longo prazo dos créditos de carbono CORSIA**

Preço do crédito CORSIA ao longo do tempo, atual e projetado (USD)



Fonte: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., Abatable, BloombergNEF, MSCI. Análise da ICF

6.4 Créditos de carbono na América Latina e no Caribe

6.4.1 Visão geral do mercado regional

A América Latina e o Caribe têm historicamente desempenhado um papel substancial nos mercados voluntários de carbono (VCMs), respondendo por entre 13% e 23% da emissão global de créditos nos últimos 5 anos. Embora os projetos iniciais constituíssem uma combinação de atividades de energia renovável e silvicultura, a região mudou recentemente para priorizar créditos de alta qualidade, elegíveis ao CORSIA e baseados na natureza; a maior parte dos quais diz respeito aos campos da silvicultura ou da biodiversidade. A partir de 2025, os créditos na América do Sul serão gerados principalmente por meio de projetos REDD+, que visam a redução de emissões decorrentes do desmatamento e da degradação florestal, bem como a conservação, o manejo florestal sustentável e o aumento dos estoques de carbono. A Amazônia e os ecossistemas circundantes posicionam a América Latina como uma das áreas de crescimento mais críticas para compensações baseadas na natureza e de desmatamento evitado por meio do REDD+ e de projetos relacionados. No entanto, apenas uma fração desse potencial conta atualmente para o CORSIA, uma vez que os filtros de elegibilidade e os processos de autorização dos países anfitriões limitam a rapidez com que as soluções baseadas na natureza podem se traduzir em oferta em conformidade.

A importância da região é ainda mais reforçada por um ambiente político dinâmico. Vários países estão promovendo inovações relacionadas ao carbono, incluindo a introdução de impostos sobre carbono e sistemas de comércio de emissões (com México, Colômbia, Chile, Brasil e Argentina liderando nesse aspecto), reformas legais destinadas a abordar direitos de carbono e repartição de benefícios, e a evolução das Cartas de Autorização (LoAs) que determinam o uso de créditos nos termos do Artigo 6 do Acordo de Paris. Esses desenvolvimentos estão ampliando as oportunidades de mercado e ajudando a atrair investimentos para carteiras de projetos de alta qualidade.

Ao mesmo tempo, ampliar a oferta de créditos elegíveis para a aviação exigirá avanços técnicos e institucionais significativos. Atender às normas internacionais de aviação para medição, relatório e verificação (MRV) e linhas de base requer capacidades técnicas mais robustas, bem como aprovações regulatórias simplificadas que possam reduzir atrasos na entrada dos projetos no mercado. Alguns países da região têm feito progressos por meio de sistemas MRV avançados, como a estrutura de resolução de 1 hectare da Guiana. No entanto, é necessária uma adoção regional mais ampla dessas infraestruturas robustas de MRV para atender às necessidades de conformidade em evolução³⁷⁵. A eficácia com que a região lidar com esses desafios desempenhará um papel decisivo na definição do futuro da América Latina e do Caribe como um hub global para créditos de carbono.

Guiana emergiu como líder global ao ser o primeiro país a emitir LoAs (Letras de Autorização) autorizadas pelo CORSIA para créditos de carbono. Por meio de um processo colaborativo envolvendo a Architecture for REDD+ Transactions (ART), abrangendo mais de 18 milhões de hectares de floresta no país (aproximadamente 85% do território da Guiana), a Guiana emitiu créditos jurisdicionais TREES com os ajustes correspondentes, atendendo explicitamente aos rigorosos requisitos de elegibilidade do CORSIA, o que permitiria que companhias aéreas internacionais comprassem e retirassem esses créditos para fins de conformidade regulatória.

Olhando para o futuro, a oferta de créditos da região será moldada por protocolos de validação mais rigorosos e requisitos de qualidade aprimorados. Essas medidas, embora essenciais para a credibilidade, devem restringir a disponibilidade geral de créditos. Além disso, espera-se que a demanda por esses créditos seja forte, uma vez que eles se alinham tanto aos requisitos de conformidade quanto ao interesse dos compradores em soluções baseadas na natureza de alto impacto. Como resultado, a concorrência no mercado deve se intensificar, e projeta-se que os aumentos de preço continuem pelo menos até 2035. Essa dinâmica é especialmente relevante para o setor de aviação, que enfrenta obrigações de conformidade crescentes sob a estrutura do CORSIA e competirá com outros setores por um conjunto limitado de créditos elegíveis ao CORSIA.

6.4.2 Estudos de caso dos mercados de carbono

6.4.2.1 Argentina

A oferta atual de crédito na Argentina continua limitada, já que a maior parte da atividade de mercado tem alcance provincial e está em fase inicial. Surgiram alguns projetos-piloto isolados, como as iniciativas de REDD+ em províncias como Córdoba, Neuquén e Misiones³⁷⁶, mas ainda não existe um marco federal consolidado para

³⁷⁵ <https://escholarship.org/content/qt9mf72304/qt9mf72304.pdf>

³⁷⁶ <https://carbon-pulse.com/421906/>

coordenar esses esforços. Essa fragmentação reflete a estrutura de governança federal da Argentina, na qual as províncias mantêm autoridade significativa sobre a gestão dos recursos naturais. Essa dinâmica cria tanto oportunidades para experimentação local quanto riscos de inconsistência regulatória para os investidores. Dito isso, a base de recursos naturais na Argentina é vasta e oferece alto potencial futuro nos setores florestal, agrícola e energético. A concretização desse potencial depende da ampliação do pipeline de projetos e do estabelecimento de uma supervisão federal simplificada.

6.4.2.2 Brasil

O Brasil produziu o maior número de créditos de carbono da América Latina e do Caribe atualmente em circulação, representando quase um terço de todos os créditos da ALC em 2024³⁷⁷. Em 2024, o mercado brasileiro atingiu aproximadamente US\$ 2,11 bilhões e tem previsão de crescer para quase US\$ 25 bilhões até 2033³⁷⁸. Esse rápido crescimento do mercado de carbono brasileiro é impulsionado, em parte, por avanços regulatórios, incluindo o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), que estabelece regras de mercado, enfatiza padrões de conservação e restauração e permite a interoperabilidade entre mercados voluntários e regulados³⁷⁹. Embora o atual mercado de créditos do Brasil já seja extenso, o país detém a maior parcela por país da floresta da Amazônia, representando uma oportunidade significativa para aumentar a oferta de créditos e ampliar os projetos em andamento para créditos de alta qualidade, elegíveis para a aviação.

6.4.2.3 Chile

O mercado voluntário de carbono do Chile está em um período de rápido desenvolvimento, apoiado por uma estrutura regulatória robusta. O Sistema de Compensação de Emissões do Imposto Verde (SCE) do Chile permite que grandes emissores (mais de 25.000 tCO₂/ano) cumpram os requisitos do imposto sobre o carbono por meio da compra de créditos de carbono domésticos³⁸⁰. Em 2024, o SCE impulsionou a baixa contábil de mais de 4,4 milhões de créditos de carbono (um aumento em relação aos apenas 260.000 em 2023, quando a política foi introduzida pela primeira vez)³⁸¹, destacando tanto a crescente demanda quanto o papel crítico dos instrumentos de mercado no cumprimento das metas das NDCs. O Chile está bem posicionado para continuar desenvolvendo projetos de créditos de carbono; o governo chileno reconheceu as principais normas internacionais (VCS da Verra, Gold Standard, BioCarbon Registry e Cercarbono), garantindo a integridade do fornecimento e o alinhamento com os mercados globais, e resoluções legais recentes esclareceram a elegibilidade tanto de créditos certificados nacionalmente quanto internacionalmente. Um número crescente de projetos locais, especialmente nas áreas de agricultura, silvicultura e uso da terra (AFOLU), está entrando na pipeline.

6.4.2.4 Colômbia

A Colômbia possui um dos mercados domésticos de carbono mais avançados da América Latina. Sua lei de imposto sobre carbono, em vigor desde 2017, permite que as empresas compensem suas obrigações fiscais por meio da compra de créditos de projetos domésticos, estimulando o rápido desenvolvimento de projetos nos setores florestal, agrícola e de energia renovável. Graças em parte a essa política, mais de 230 projetos colombianos foram certificados desde 2002 (resultando na mitigação de mais de 231 Mt de CO₂e). No entanto, o mercado de carbono colombiano enfrentou uma queda significativa em 2023, quando o governo impôs um limite restrito ao uso de créditos domésticos para compensar apenas 50% das obrigações fiscais de imposto sobre carbono. Essa mudança de política reduziu drasticamente a demanda e pressionou os preços, levando a um excesso de oferta com aproximadamente 63,7 milhões de créditos de carbono não vendidos até o final de 2024. O preço de mercado caiu de um pico anterior de COP 22.000 (≈ USD 5,94) por crédito para uma faixa entre COP 12.000 e 16.000 (≈ USD 3,24 e 4,32)³⁸². A mudança gerou incerteza, mas também proporcionou uma oportunidade para os compradores, que agora controlam os preços.

O atual excesso de oferta e a contenção dos preços estão limitando o crescimento no curto prazo, não devido à falta de desenvolvimento de projetos ou emissões, mas porque a demanda é restringida pela formulação das políticas nacionais. As abundantes reservas florestais e a biodiversidade da Colômbia oferecem um forte potencial, particularmente para projetos de REDD+, ARR, uso da terra e energia renovável, com o ARR já em expansão e os

³⁷⁷ https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/2397/ENG_Bolet%C3%ADn%20N%C2%B05%20%E2%80%9320IALCC.pdf?sequence=4&isAllowed=y

³⁷⁸ <https://www.imarcgroup.com/brazil-carbon-credits-market>

³⁷⁹ <https://www.gov.br/planalto/en/latest-news/2024/12/president-lula-signs-law-creating-regulated-carbon-market-in-brazil>

³⁸⁰ <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099060225142533399/pdf/P179222-5f48ad48-c833-4da1-8a5c-607779bd9f30.pdf>

³⁸¹ <https://www.green.earth/news/corporate-demand-grows-for-chiles-carbon-credits>

³⁸² <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2687085-colombia-s-offset-cap-drops-carbon-market-demand>

créditos de carbono sendo vendidos nos mercados internacionais. Espera-se uma expansão à medida que mais projetos de alta integridade forem certificados por diversos padrões e o mercado de carbono amadureça e cresça. A Cercarbono, um registro nacional colombiano, recebeu aprovação condicional da Fase 1 do CORSIA para múltiplas metodologias inovadoras de remoção baseadas na natureza e antecipa a elegibilidade total para os créditos elegíveis ao CORSIA³⁸³. Essa maturidade regulatória e diversidade de projetos tornam a Colômbia líder regional em créditos de carbono.

6.4.2.5 Guiana

A Guiana se destaca na região da América Latina e do Caribe por sua liderança nos mercados jurisdicionais de carbono REDD+ com o projeto ART TREES, o único programa globalmente a ter emitido créditos de carbono TREES. Cobrindo aproximadamente 18 milhões de hectares (87% da área florestal do país), o projeto emitiu 33,47 milhões de créditos para o período de 2016 a 2020 e mais 7,14 milhões de créditos para 2021, posicionando a Guiana como o único fornecedor de créditos elegíveis ao CORSIA com Cartas de Autorização válidas em 2024. Essa iniciativa jurisdicional de REDD+ protege cerca de 21,8 bilhões de toneladas de CO₂e ao evitar o desmatamento e promover o reflorestamento, demonstrando o potencial dos países com florestas tropicais para liderar o fornecimento de créditos de carbono de alta integridade.

6.4.2.6 México

Em 2023, o México foi o primeiro país da América Latina a lançar um Sistema de Comércio de Emissões (ETS), estabelecendo limites para as emissões de carbono dos setores energético e industrial³⁸⁴. O segmento de mercado de carbono de conformidade é atualmente o maior do país, e o imposto sobre carbono levou a uma redução de 1,8 Mt de CO₂e por ano, embora o segmento de mercado voluntário de carbono esteja crescendo rapidamente³⁸⁵. O México tem metas ambiciosas de redução de GEE e pretende reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa em 35% até 2030³⁸⁶. O ETS estabelecido pelo México e a ênfase na redução de carbono consolidam sua posição como uma região-chave para o desenvolvimento futuro de projetos de compensação de carbono. Mais especificamente, como um dos principais mercados para as exportações de alimentos e produtos agrícolas dos EUA, o México está posicionado para se tornar líder em compensações de carbono por meio de projetos agrícolas e de mudança no uso da terra.

6.4.2.7 Peru

Após a aprovação do Verra VCS em 2025, é provável que o Peru continue ampliando sua oferta de desenvolvimento de projetos de carbono³⁸⁷. O Peru possui a quarta maior cobertura florestal do mundo e um potencial significativo para impulsionar extensos projetos de reflorestamento³⁸⁸. O mercado de carbono do Peru está avaliado atualmente em US\$ 0,65 bilhão e é um dos menores da América Latina; no entanto, prevê-se que cresça 40% até 2033³⁸⁹. Os setores federal e privado adotaram desde cedo protocolos de mitigação, e o Peru tem como meta atingir emissões líquidas zero até 2050. Para implementar seu mercado de conformidade, o Peru realizou um período de consulta pública exaustivo para criar regras substantivas e aumentar a conformidade. Apesar desses aspectos positivos, houve obstáculos legais, com as reduções de emissões não sendo registradas no RENAMI (Registro Nacional de Medidas de Mitigação de GEE) e o Fundo Nacional do Meio Ambiente do Peru gerenciando efetivamente os pagamentos baseados em resultados do REDD+. A fragmentação dos governos nacionais e regionais e a falta de clareza quanto à titularidade dos direitos de carbono complicam ainda mais o mercado³⁸⁸.

³⁸³ <https://www.clearbluemarkets.com/knowledge-base/cercarbono-methodology-and-procedure-updates>

³⁸⁴ https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-59.pdf

³⁸⁵ https://icapcarbonaction.com/system/files/document/201025_idb_compliancevoluntary_paperrz.pdf#:~:text=REDD+%20credits%20certified%20by%20Verra%20currently%20represent,in%20the%20region%20in%202020%20and%202021.

³⁸⁶ <https://climatepromise.undp.org/what-we-do/where-we-work/mexico>

³⁸⁷ <https://verra.org/peru-approves-verras-vcs-program-and-two-methodologies-advancing-climate-action-and-carbon-market-integrity/>

³⁸⁸ https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/infobrief/8750-Infobrief.pdf

³⁸⁹ <https://www.cognitivemarketresearch.com/regional-analysis/south-america-carbon-credits-market-report>

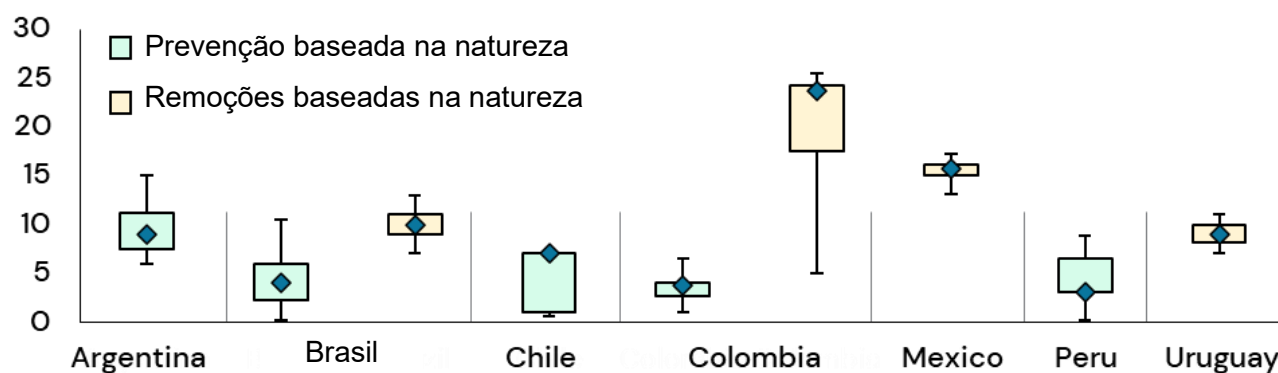
6.4.3 Preços por país

Na América Latina e no Caribe, o crédito médio de prevenção baseada na natureza varia entre US\$ 2 e US\$ 8; e o crédito médio de remoção baseada na natureza varia entre US\$ 8 e US\$ 24³⁹⁰. De acordo com dados da S&P Global Energy, em países onde ambos os tipos de crédito foram desenvolvidos, a saber, Brasil e Colômbia, as remoções baseadas na natureza são muito mais altas do que os créditos de prevenção. Isso está alinhado com as projeções globais.

Os dados apresentados na figura abaixo limitam-se aos dados de créditos de carbono da S&P Global Energy, que se referem a um preço de compra, venda ou transação relatado para um crédito de carbono específico, coletado junto aos participantes do mercado. Esses dados não abrangem todos os créditos de carbono emitidos mundialmente, razão pela qual há lacunas notáveis (por exemplo, a ausência de créditos de prevenção baseados na natureza no México), e o número de dados por país e tipo de crédito varia de 4 a 155. O gráfico é apresentado aqui para fornecer informações direcionais sobre preços comparativos.

Os preços dos créditos de carbono variam por país e tipo

Preço do crédito por tipo e país – 2024 (USD/tCO_{2e})



Fontes: S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc., análise da ICF

Nota: As linhas indicam o intervalo total, enquanto as barras representam o intervalo interquartil

6.5 Estratégia e recomendações

6.5.1 Governos da América Latina e do Caribe

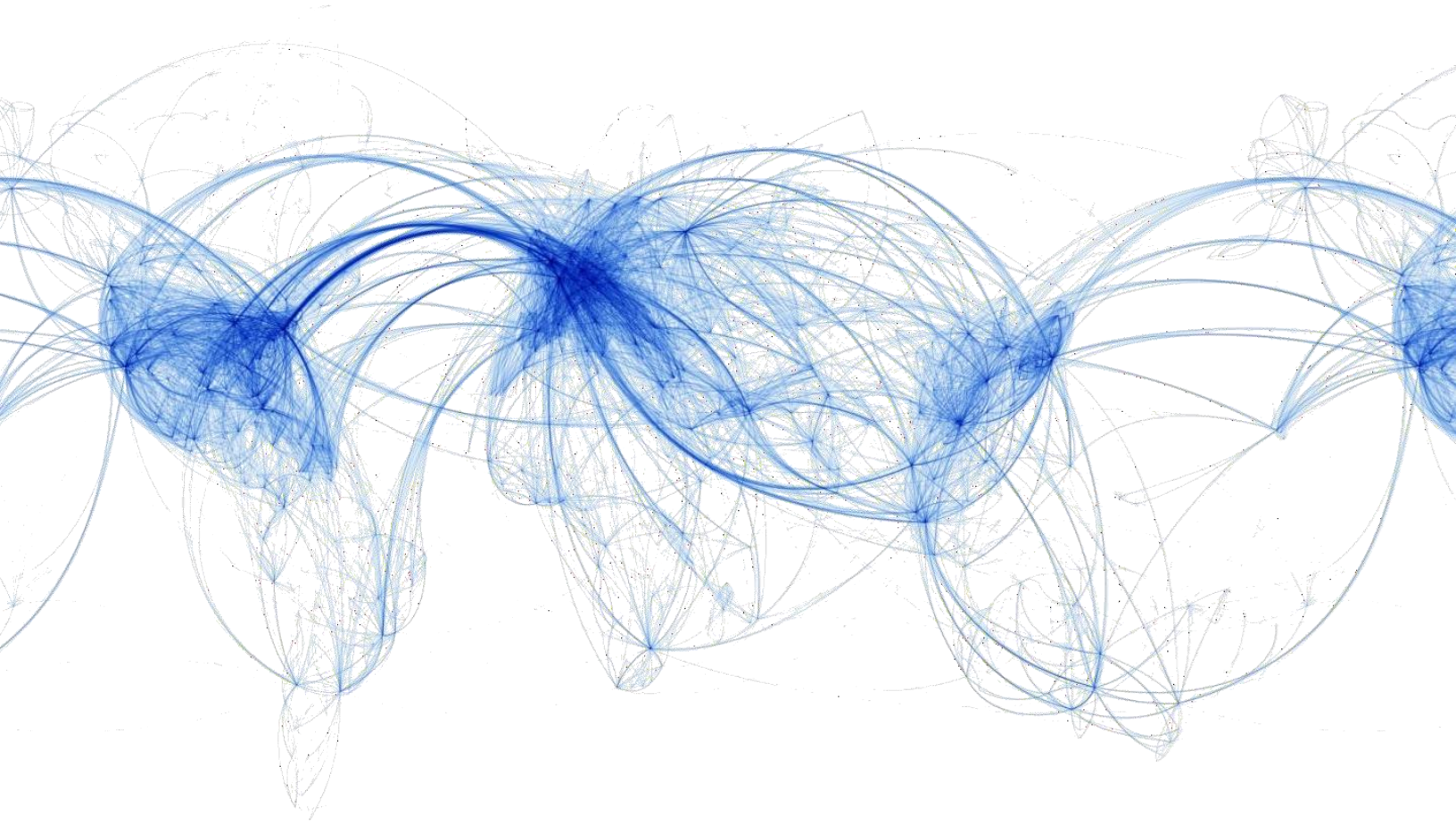
A América Latina e o Caribe estão entrando em uma fase decisiva no desenvolvimento de mercados de carbono nacionais e regionais, com implicações diretas para o setor de aviação. A crescente demanda por créditos de alta qualidade tem criado pressão cada vez maior sobre a oferta limitada de créditos elegíveis ao CORSIA; impulsionada pelos compromissos de NDC em nível nacional, regimes de conformidade emergentes, como impostos sobre carbono e sistemas de comércio, e a concorrência de outros setores, como a indústria marítima. Ao mesmo tempo, o VCM está mudando para padrões de maior integridade e uma parcela crescente de créditos de remoção de dióxido de carbono (CDR), que acarretam custos mais altos, mas são essenciais para o cumprimento das metas climáticas de longo prazo. Nesse contexto, os governos regionais devem fortalecer suas estruturas de mercado e regulatórias para garantir o desenvolvimento contínuo de projetos de créditos de carbono, enquanto a ALTA e suas companhias aéreas membros desempenham um papel ativo na garantia do acesso a créditos escassos e, adicionalmente, no desenvolvimento de estratégias robustas de mitigação de carbono.

³⁹⁰ S&P Global Energy, ©2025 pela S&P Global Inc.

- 1. Desbloqueie créditos simplificando os processos de LoA e esclarecendo os direitos de carbono.** Vários gargalos regulatórios restringem atualmente a capacidade da região de ampliar a oferta de créditos. De importância primordial, atrasos no processo de emissão de LoAs por países individuais impedem a aprovação de projetos e limitam que créditos, de outra forma elegíveis ao CORSIA, cumpram integralmente as exigências do Acordo de Paris. A priorização e simplificação desse processo aumentariam imediatamente a oferta de créditos e garantiriam maior consistência com os compromissos do Acordo de Paris. É importante ressaltar que inventários nacionais de carbono transparentes podem permitir que os países quantifiquem e monetizem os resultados de mitigação, atraiam investimentos e retenham receitas. Além disso, legislação governamental que esclareça a posse da terra, os direitos de carbono e as regras de repartição de benefícios é vital para reduzir o risco para os investidores e salvaguardar a participação da comunidade. Estruturas jurídicas mais robustas que reconheçam os direitos de propriedade de carbono ampliam o pipeline de projetos e garantem a distribuição equitativa de benefícios, ao proporcionar direitos de propriedade e uso claros e exigíveis sobre os recursos de carbono florestal. Essa clareza reduz as incertezas e os riscos para investidores e desenvolvedores de projetos, incentivando assim o início e a ampliação de projetos de carbono florestal.
- 2. Apoiar a expansão de mercados de carbono de alta qualidade.** Os créditos de carbono de alta qualidade geralmente exigem custos iniciais mais elevados devido a padrões rigorosos e requisitos adicionais. Os governos regionais podem ajudar a eliminar barreiras financeiras e ampliar os mercados de carbono adotando incentivos financeiros, como créditos fiscais, títulos verdes e a destinação de receitas provenientes de impostos sobre o carbono. Essas medidas melhoram a viabilidade dos projetos ao compensar impostos devidos, mobilizar capital privado em grande escala para investimento em condições favoráveis para projetos de créditos de carbono de alta qualidade e apoiar explicitamente iniciativas do mercado de carbono, incluindo capacitação, assistência técnica, MRV, desenvolvimento de infraestrutura e programas de cobenefícios para as comunidades locais. Juntos, esses mecanismos criam um ambiente econômico estável que estimula a participação dos setores público e privado e promove o desenvolvimento do mercado de carbono.
- 3. Fortalecer as estruturas de MRV e a inovação.** A expansão das estruturas nacionais de MRV é outra área crítica para o desenvolvimento dos governos latino-americanos, já que o acompanhamento robusto das reduções de emissões e das remoções de carbono sustenta tanto a integridade ambiental quanto a credibilidade internacional dos créditos de carbono. Sem protocolos de MRV transparentes e padronizados, preocupações em torno de greenwashing, linhas de base exageradas e adicionalidade falha podem prejudicar o mercado. Para remediar isso, os governos podem ampliar as tecnologias de MRV digital (D-MRV), usando a Guiana como modelo. O governo guianense, em parceria com especialistas acadêmicos e técnicos internacionais, desenvolveu um dos sistemas MRV mais avançados da região, integrando múltiplas formas de imagens de sensoriamento remoto para monitorar mudanças florestais com resolução de 1 hectare.
- 4. Harmonizar padrões por meio da colaboração regional.** Outro caminho de alto potencial para o desenvolvimento de mercados de carbono é a colaboração entre governos regionais, uma vez que a fragmentação na América Latina enfraquece a eficiência e a confiança no mercado, ao mesmo tempo em que aumenta os custos de transação. Iniciativas multinacionais, como o Carbon Pricing in the Americas, a Aliança do Pacífico e o Fórum de Carbono da América Latina e do Caribe, já estabeleceram essa base. Ir além de esquemas fragmentados, projeto a projeto, em direção a padrões compartilhados pode melhorar a integridade ambiental, limitar o vazamento entre fronteiras e criar mercados mais líquidos e atraentes para investimentos por meio da coerência de políticas. Esse alinhamento também pode apoiar a interoperabilidade entre sistemas nacionais, aumentar a transparência e a comparabilidade dos créditos e reduzir os custos administrativos e de transação para governos, desenvolvedores de projetos e compradores. O alinhamento de metodologias, padrões de MRV e salvaguardas de repartição de benefícios pode ajudar os países a reunir recursos, evitar duplicações e ampliar o acesso à demanda internacional (especialmente nos termos do Artigo 6º do Acordo de Paris). O intercâmbio regional de conhecimentos e plataformas conjuntas também poderiam acelerar a capacitação em países que são recém-chegados ao comércio de conformidade ou à regulamentação voluntária do mercado.
- 5. Capacitar as autoridades nacionais para facilitar ainda mais a elegibilidade das soluções regionais de mitigação no âmbito do CORSIA.** Os governos devem fortalecer e capacitar as autoridades nacionais

designadas para se envolverem de forma mais proativa com os processos e órgãos técnicos da ICAO, a fim de facilitar que as abundantes soluções de mitigação da região, incluindo REDD+, AFOLU e soluções mais amplas baseadas na natureza, possam ser reconhecidas no âmbito do CORSIA com salvaguardas ambientais e sociais adequadas. O reforço da capacidade técnica e o envolvimento regional coordenado podem ajudar a alinhar metodologias, estruturas de salvaguardas e processos de autorização com os requisitos do CORSIA, abrindo o acesso à demanda da aviação internacional e, ao mesmo tempo, preservando a integridade ambiental e os interesses nacionais.

7 Por que é necessária uma abordagem regional para a América Latina e o Caribe?



Principais resultados:

- As estruturas globais de emissões líquidas zero são inadequadas para aplicação na região da ALC, pois a região enfrenta condições únicas.
- Estabelecer uma trajetória regional unificada é complexo devido às diferenças substanciais entre os países. Uma gama de trajetórias possíveis oferece aos governos e às partes interessadas opções que refletem melhor as circunstâncias nacionais.
- Todas as rotas para emissões líquidas zero estão associadas a implicações econômicas substanciais, destacando a necessidade de apoio coordenado dos governos nacionais para mitigar custos e salvaguardar a conectividade.

7.1 Escopo e metodologia

7.1.1 Escopo

A análise apresentada nesta seção combina todos os elementos descritos no relatório, incluindo atividade de tráfego, melhorias na frota, melhorias de eficiência operacional e a disponibilidade e preços de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e créditos de carbono. Esses elementos são combinados para modelar roteiros de emissões líquidas zero específicos por país com base em diferentes alavancas de cenários, que são então agregados ao nível regional. Cada opção alcança emissões líquidas zero até 2050, refletindo a ambição da ALTA e de seus membros. Todas as entradas seguem as metodologias rigorosas descritas ao longo deste relatório, e as opções e impactos descritos neste capítulo incorporam um amplo envolvimento das partes interessadas para garantir o alinhamento com as realidades da região da ALC.

7.1.2 Metodologia

O modelo de cenário construído para este estudo aloca medidas de abatimento para cada país em todos os anos de 2025 a 2050 para cumprir as metas de redução de emissões e os percentuais de mistura de SAF, a fim de ilustrar os impactos de diferentes rotas de redução de emissões para a região. As medidas são atribuídas com base no menor custo de abatimento, sujeito à disponibilidade, conforme estabelecido nos capítulos anteriores. O modelo leva em conta as restrições do mundo real e opera por meio de quatro fases sequenciais de alocação, seguidas por um ciclo de feedback que se ajusta às mudanças na demanda da aviação causadas pelas medidas de redução de emissões.

1. *Tráfego, tecnologia e operações*: A primeira fase calcula as emissões anuais da aviação para cada país e aplica melhorias tecnológicas e operacionais para estimar as emissões remanescentes e a demanda atualizada por combustível de aviação.
2. *Alocação doméstica de SAF*: Cada país recebe SAF suficiente para atingir metade de sua meta anual de mistura³⁹¹. O SAF é alocado com base no menor custo de abatimento das combinações matéria-prima/tecnologia disponíveis localmente. As alocações nesta primeira execução do modelo utilizam matéria-prima doméstica e mantêm ou aumentam o uso anualmente, refletindo a continuidade da produção uma vez que as instalações estejam operacionais.
3. *Alocação regional de SAF*: O SAF restante necessário para atingir a mistura desejada é agregado entre todos os países e alocado a partir de um pool regional de matérias-primas remanescente após a alocação doméstica. O SAF é alocado com base no menor custo de abatimento, com as parcelas distribuídas proporcionalmente às necessidades não atendidas de SAF de cada país. O crescimento da produção deve permanecer estável ou constante para cada rota de matéria-prima e tecnologia.
4. *Abatimento das emissões residuais*: Após as alocações de SAF, as emissões restantes são tratadas utilizando as opções de menor custo disponíveis, tipicamente créditos de carbono. Todos são extraídos de um pool

³⁹¹ Um limite de 50% equilibra a segurança energética doméstica com a integração regional, permitindo que os países mantenham o controle sobre o fornecimento de SAF enquanto se beneficiam da otimização regional

regional e estão sujeitos à disponibilidade.

5. **Impacto na demanda da aviação e nova simulação:** Uma vez concluídas todas as fases, o modelo avalia como o preço adicional decorrente dos combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e dos créditos de carbono afeta a demanda da aviação. Isso é feito no nível das rotas, incluindo fluxos de tráfego doméstico, regional e internacional com diferentes níveis de sensibilidade ao preço. Utiliza-se o preço médio do SAF por país na ALC, juntamente com o cenário de adoção do SAF e um preço médio regional dos créditos de carbono. A demanda por SAF em outras regiões baseia-se em mandatos e metas implementados e anunciados para refletir os requisitos de abastecimento do SAF em voos internacionais. Essas mudanças atualizam as estimativas de demanda de combustível e emissões, e o modelo reexecuta todas as fases de alocação para refinar as distribuições de SAF e abatimento de emissões, garantindo que o resultado final reflita as realidades econômicas da conquista das emissões líquidas zero.

7.2 Referências globais

Iniciativas de redução de emissões na aviação estão avançando em todo o mundo, mas as estratégias devem refletir as circunstâncias regionais. Embora o objetivo global de emissões líquidas zero no setor da aviação seja compartilhado, as rotas diferem devido a variações em recursos, infraestrutura e condições econômicas.

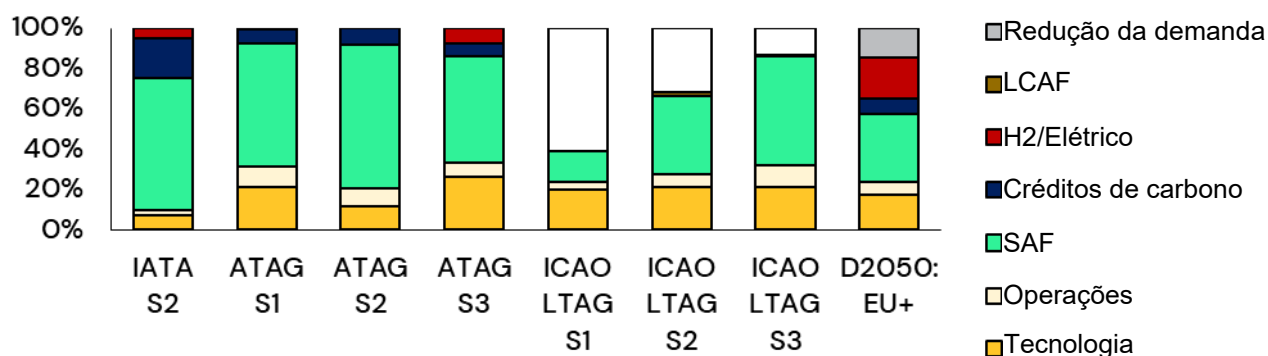
A região da ALC oferece oportunidades e desafios únicos. Ela se beneficia de recursos naturais abundantes, o que permite compensações baseadas na natureza, e possui disponibilidade significativa de matéria-prima e acesso a energia renovável relativamente barata. No entanto, como economia emergente, a conectividade regional é vital para o crescimento, e muitas áreas da região dependem da aviação para conectividade básica na ausência de substitutos confiáveis. A aviação também contribui substancialmente para o emprego e o valor econômico. Qualquer aumento nos custos do transporte aéreo terá um impacto mais forte sobre a demanda por transporte aéreo em comparação com as regiões desenvolvidas. Outras restrições regionais incluem acesso limitado a capital privado, estruturas regulatórias menos maduras e lacunas em conhecimento técnico.

Em contrapartida, a Europa e a América do Norte possuem mercados de aviação estabelecidos, maior capacidade de investimento e apoio governamental mais forte às políticas climáticas. Essas vantagens possibilitam tecnologias avançadas, estratégias progressivas de redução de emissões e estruturas regulatórias robustas que facilitam a integração de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e o desenvolvimento do mercado de carbono.

Os roteiros do setor diferem nas expectativas quanto ao desenvolvimento tecnológico, incluindo aeronaves a hidrogênio e elétricas, técnicas operacionais como voos em formação e avanços em SAF que influenciam o custo em relação ao combustível convencional. Alguns roteiros excluem o impacto das medidas de abatimento sobre a demanda, e outros não atingem as emissões líquidas zero. A figura abaixo ilustra as diferenças entre vários roteiros do setor.

Os roteiros do setor variam em estratégias de abatimento

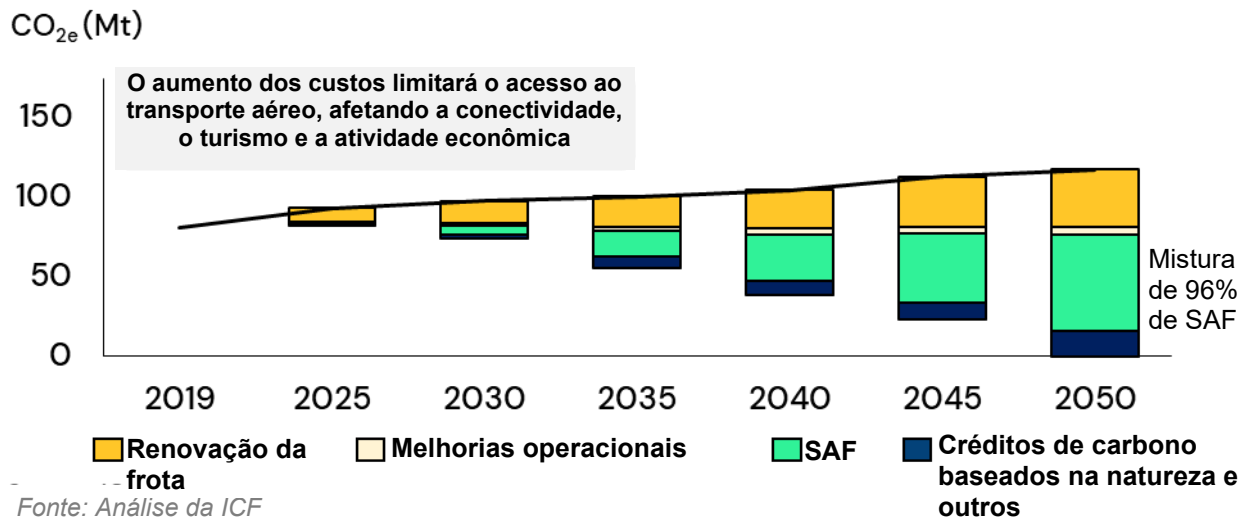
% de abatimento em 2050



Fonte: IATA

Entre os cenários globais com maior uso de SAF está o LTAG S3 da OACI, que tem como meta uma mistura de 96% de SAF até 2050, como parte de sua ênfase na mitigação dentro do setor e na minimização das emissões residuais. Alcançar isso globalmente requer rápida ampliação da tecnologia, investimento de capital significativo, cadeias de abastecimento robustas e fluxos comerciais abertos. Um caso de mistura de 96% de SAF aplicado à região da ALC é ilustrado na figura abaixo, o que teria implicações para a conectividade, o turismo e a atividade econômica, especialmente em áreas onde a aviação é a única opção viável de transporte.

Cenário hipotético (alinhado à meta de mistura de SAF da LTAG da OACI S3) e por que isso significa que é necessária uma abordagem diferente para a região



No entanto, atingir uma mistura de 96% de SAF na ALC apresenta muitos desafios, incluindo investimento de capital substancial, a construção e rápida ampliação de instalações de produção de SAF em toda a região e o desenvolvimento de cadeias de abastecimento intrarregionais eficientes para garantir a disponibilidade consistente de combustível. Os custos aumentariam significativamente. Sem apoio econômico substancial, as companhias aéreas precisariam repassar essas despesas aos consumidores, aumentando os preços das passagens e reduzindo a demanda em cerca de 30% em 2050. A perda potencial no valor econômico da aviação é estimada em aproximadamente 156 bilhões de dólares neste cenário³⁹². Os formuladores de políticas e as partes interessadas do setor devem ponderar esses impactos ao elaborar estratégias de redução de emissões para preservar a conectividade e a resiliência econômica, ao mesmo tempo em que avançam nas metas de emissões líquidas zero. **Metas globais, como uma mistura de 96% de SAF, são irrealistas para o contexto econômico e social da região. Em vez disso, as abordagens devem ser adaptadas para preservar a conectividade regional e impulsionar o desenvolvimento econômico, sem deixar de apoiar o progresso em direção às metas de emissões líquidas zero.**

7.3 Cenários para a América Latina e o Caribe

7.3.1 Resultados

Alcançar as emissões líquidas zero na ALC envolverá custos significativos, independentemente da rota escolhida. Existem múltiplas opções para o progresso, e cada uma requer uma análise cuidadosa das realidades econômicas e operacionais. A renovação da frota e as melhorias operacionais têm historicamente reduzido as emissões e continuam promissoras, especialmente com o apoio governamental. A renovação da frota poderia reduzir a queima de combustível e as emissões de CO₂ em 30% ao ano até 2050, enquanto melhorias operacionais poderiam adicionar mais 3,3% a 11,3%, dependendo do nível de apoio (6,8% no cenário de ambição média). Embora essas medidas reduzam os custos com combustível, elas exigem investimento substancial e colaboração entre as partes interessadas.

³⁹² Incluindo contribuições diretas, indiretas, induzidas e relacionadas ao turismo

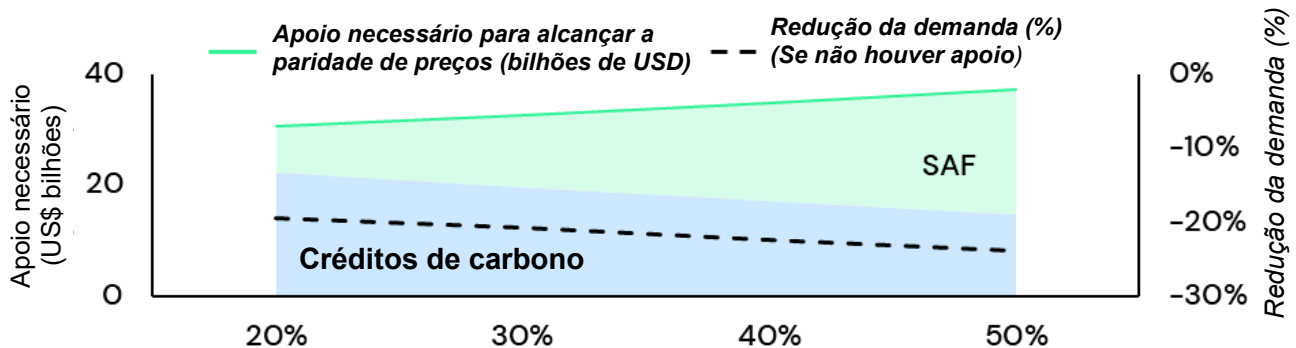
No entanto, essas estratégias por si só não podem garantir as emissões líquidas zero. O SAF e os créditos de carbono são essenciais para lidar com as emissões residuais, e ambos acarretam custos que não podem ser recuperados por meio das reduções do consumo de combustível. A região abrange países com níveis variados de atividade econômica, foco governamental e desenvolvimento tecnológico, tornando difícil uma abordagem uniforme. Esta análise, portanto, apresenta uma gama de opções, permitindo que governos e partes interessadas estabeleçam metas específicas. Todos os cenários exigem apoio financeiro às companhias aéreas para compensar os custos dos SAF e dos créditos de carbono; caso contrário, o setor enfrentará graves impactos econômicos se as metas sustentáveis forem cumpridas.

A figura abaixo apresenta o impacto anual sobre a demanda resultante do alcance das emissões líquidas zero em 2050 em níveis de mistura de SAF que variam de 20% a 50%, juntamente com o nível correspondente de apoio necessário para mitigar esses impactos. Em um cenário de mistura de 20% de SAF, as emissões residuais terão que ser compensadas por meio da aquisição de créditos de carbono, incluindo remoções de carbono por meio de tecnologias de engenharia. Nesse cenário, os custos totais para as companhias aéreas são estimados em 30,5 bilhões de dólares, ou cumulativamente 224 bilhões de dólares, e a redução da demanda é projetada em aproximadamente 19,5% na ausência de apoio financeiro. Embora essa abordagem reduza as necessidades imediatas de capital para a infraestrutura de produção de SAF, ela exerce pressão sobre os mercados de créditos de carbono e pressupõe a disponibilidade de tecnologias de remoção de carbono em grande escala.

É importante mencionar que um cenário de mistura 100% SAF implica a substituição completa do querosene de aviação convencional por SAF. Isso requer investimentos extensivos em capacidade de produção de SAF, cadeias de abastecimento de matéria-prima e infraestrutura de apoio. O custo para as companhias aéreas é substancial, com despesas totais estimadas em 50,4 bilhões de dólares em 2050 e 518 bilhões de dólares cumulativamente, e a redução da demanda projetada em 31,4% sem apoio. Mesmo com a adoção total do SAF, os créditos de carbono continuam sendo necessários, pois a redução média de GEE com o SAF em 2050 é estimada em 82%, deixando emissões residuais que devem ser tratadas para atingir as emissões líquidas zero. Os impactos de cada cenário de mistura de SAF, incluindo implicações na demanda e impactos econômicos, estão resumidos na figura e na tabela abaixo. Uma mistura de 50% de SAF, por exemplo, ainda requer grande investimento e pode resultar em uma redução média da demanda por transporte aéreo de 24%.

Nível de apoio governamental e necessidades de investimento em 2050 e redução da demanda para a mistura de SAF e mecanismos de carbono

Apoio necessário em bilhões de dólares (esquerda) e redução da demanda em % (direita). O eixo horizontal mostra a mistura regional de SAF em 2050.



Fonte: Análise da ICF

Tabela 59: Impacto na demanda e custo das medidas de redução de emissões (anual em 2050)

Mistura de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Créditos de carbono necessários (Mt CO ₂ /ano)	92,4	83,4	74,1	64,9
Custo dos créditos de carbono (US\$ bilhões/ano)	22,2	19,7	17,2	14,6
Custo do prêmio do SAF (bilhões de dólares/ano)	8,3	12,9	17,8	22,7

Custo total (bilhões de dólares/ano)	30,5	32,6	34,9	37,3
Impacto de redução da demanda (%/ano) ³⁹³	-19,5	-20,7	-22,4	-24,0

A tabela abaixo apresenta o número acumulado de passageiros que não voaram entre 2030 e 2050 nesses cenários, juntamente com o nível de apoio necessário para mitigar esse impacto.

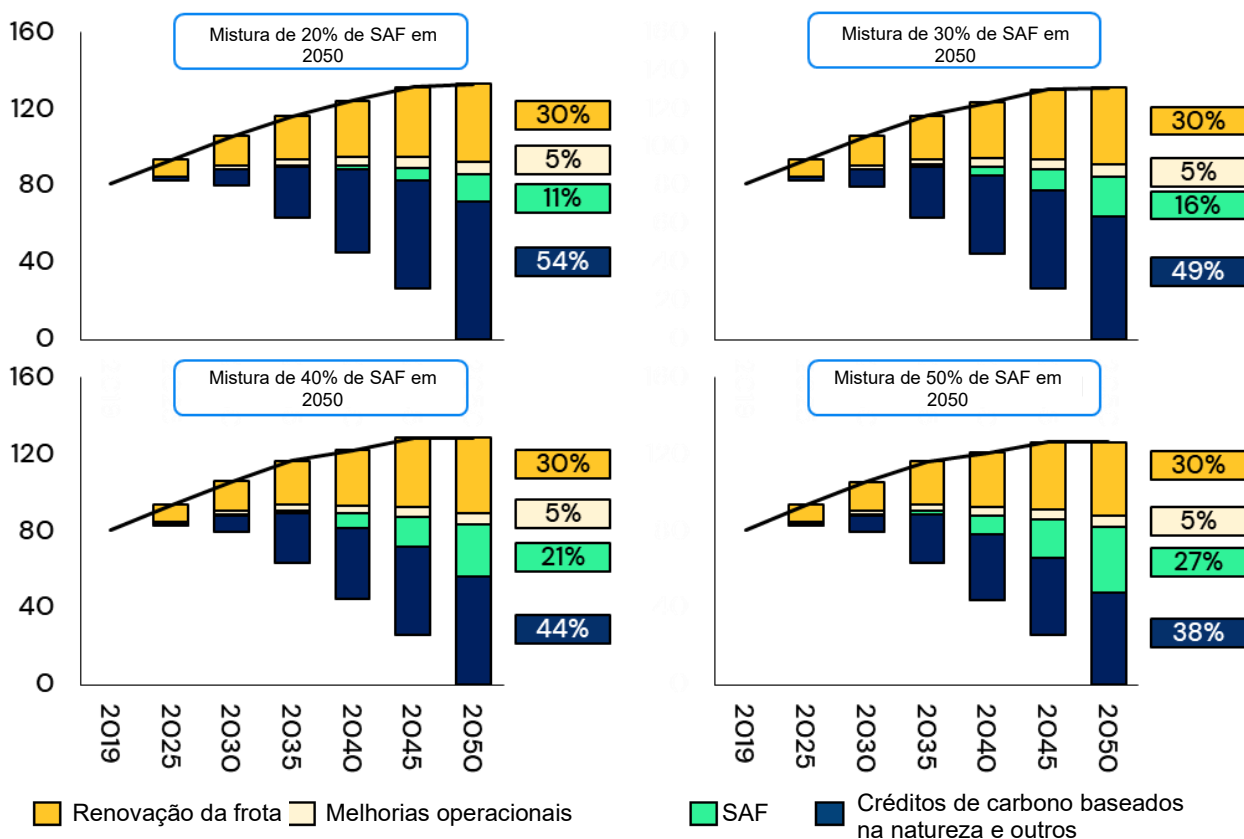
Tabela 60: Impacto na demanda e custo das medidas de redução de emissões (acumulado de 2030 a 2050)

Mistura de SAF (2050)	20%	30%	40%	50%
Passageiros não transportados (milhões) ³⁹⁴	1.287	1.385	1.526	1.681
Apoio necessário (bilhões de dólares)	224	242	262	284

Uma faixa de mistura de SAF de 20% a 50% até 2050, complementada por créditos de carbono, poderia representar uma rota viável para a ALC. Com apoio, essa faixa equilibra a viabilidade econômica, os requisitos de infraestrutura e os impactos na demanda, ao mesmo tempo em que apoia o progresso rumo às emissões líquidas zero dentro dessa faixa de mistura de 20% a 50%.

Rotas ilustrativas de descarbonização para o setor de aviação da América Latina e do Caribe atingir as emissões líquidas zero até 2050

Milhões de toneladas de CO₂e



Fonte: Análise da ICF

Nota: A linha de base inclui a redução da demanda

³⁹³ Medido em termos de redução do número de assentos em voos de partida

³⁹⁴ Medido em número de assentos em voos de partida

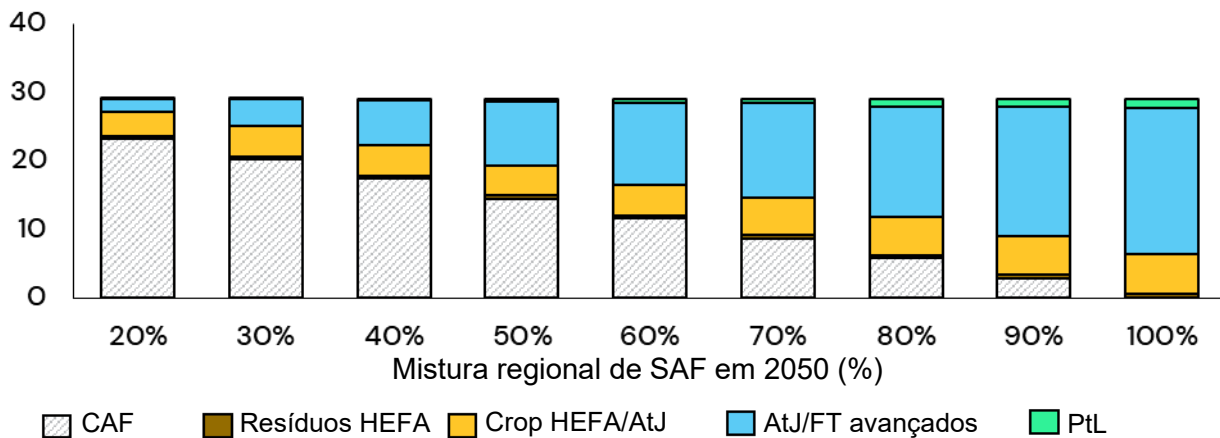
7.3.2 Discussão

7.3.2.1 Mistura regional de querosene de aviação e custo de abatimento por mistura de SAF

A combinação de rotas de matéria-prima e tecnologia de SAF utilizadas para atender a cada requisito de mistura depende tanto do custo de abatimento quanto da disponibilidade de matéria-prima. Em níveis mais baixos de mistura, o SAF de origem agrícola predomina, derivado principalmente do etanol de cana-de-açúcar devido ao seu custo de abatimento relativamente baixo e à disponibilidade projetada em aumento. À medida que a oferta se torna mais restrita ou quando os países precisam cumprir parte da meta de mistura utilizando matérias-primas de origem doméstica, opções mais avançadas tornam-se necessárias. Nessas condições, volumes significativos de SAF AtJ produzidos a partir de resíduos florestais e agrícolas entram na mistura. Embora o PtL continue mais caro do que o AtJ à base de resíduos ao longo deste estudo, pequenas quantidades surgem em países com opções limitadas à base de resíduos. A figura abaixo destaca a composição do querosene de aviação da região em 2050 por cenário de mistura de SAF.

O aumento na adoção de SAF é atendido predominantemente pelo SAF AtJ avançado

Abastecimento de querosene de aviação (Mt)



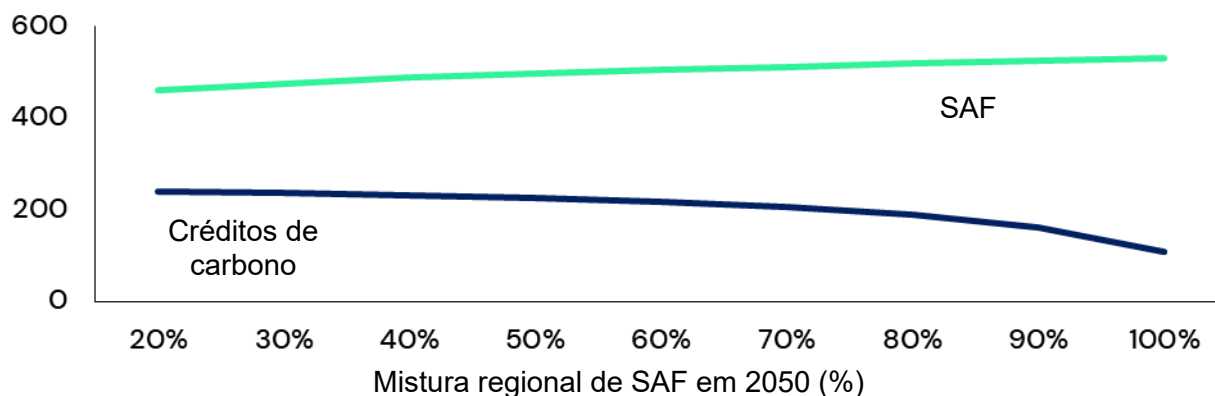
Fonte: Análise da ICF

À medida que aumenta a dependência de SAF de custo mais elevado, o custo médio ponderado de abatimento sobe com a exigência de mistura. Do ponto de vista das companhias aéreas, projeta-se que o preço por galão de SAF atinja US\$ 6,08 em 2050 com uma mistura de 20%, US\$ 6,47 com uma mistura de 50% e US\$ 6,77 com uma mistura de 100%. Essas médias ocultam variações substanciais entre os países, impulsionadas pela disponibilidade de matéria-prima e pelas condições econômicas. Por exemplo, com uma exigência de mistura de 50%, espera-se que os preços do SAF nas Bahamas excedam os do Brasil em mais de 20% em 2050, principalmente como resultado de restrições de matéria-prima.

Os custos dos créditos de carbono seguem um padrão oposto. À medida que os requisitos de mistura de SAF diminuem, o volume de créditos de carbono necessários aumenta e seu preço sobe. Isso se deve à redução da oferta de créditos e de remoções baseadas na natureza, o que força uma maior dependência das remoções artificiais, mais imaturas e caras. Os custos médios ponderados de abatimento para SAF e créditos de carbono em todos os níveis de mistura de SAF, de 20% a 100%, em 2050 são apresentados na figura abaixo.

O custo de abatimento tanto dos SAF quanto dos créditos de carbono aumenta com o uso, à medida que as opções mais baratas se esgotam e as mais caras se tornam necessárias

Custo de abatimento ponderado em 2050 por uso de SAF em USD por tCO₂e



Fonte: Análise da ICF

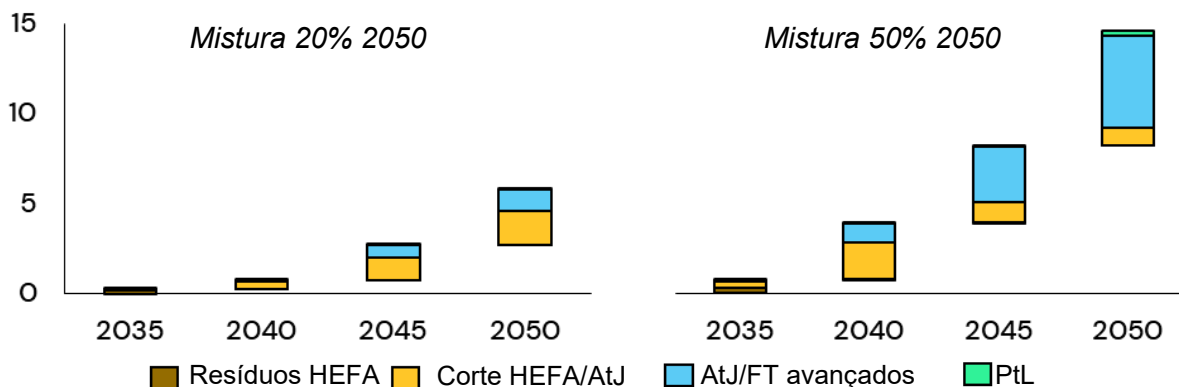
Nota: O preço de abatimento do SAF baseia-se no prêmio do SAF

7.3.2.2 A evolução da composição do SAF e do custo de abatimento ao longo do tempo

A composição do SAF também evolui significativamente ao longo do tempo. Em todos os cenários destacados, os volumes iniciais são dominados pelo HEFA de resíduos, derivado principalmente do UCO, devido ao seu baixo custo de abatimento de emissões e disponibilidade imediata. No entanto, o fornecimento de UCO é limitado na ALC, e o crescimento além dos volumes iniciais é restrito. À medida que a demanda por SAF ultrapassa a oferta baseada em UCO, o SAF AtJ derivado do etanol de cana-de-açúcar começa a entrar na composição, representando a segunda opção de menor custo de abatimento de emissões com escalabilidade substancial. Ao contrário do SAF HEFA à base de resíduos, o AtJ à base de safras continua a crescer de forma constante ao longo do tempo. Esse crescimento é sustentado pelo aumento da produção de etanol de cana-de-açúcar e pela capacidade dos países com oferta doméstica limitada de importar daqueles com capacidade excedente. Nos anos posteriores, o SAF AtJ à base de resíduos torna-se um contribuinte essencial, suprimindo as necessidades residuais à medida que as rotas de matéria-prima com tecnologia mais avançada amadurecem e ganham escala. Essa progressão reflete as realidades globais, nas quais é improvável que as tecnologias maduras de SAF alcancem uma implantação imediata em grande escala.

O HEFA de resíduos e o AtJ/FT à base de safras provavelmente permanecerão como as rotas dominantes até a década de 2040, dentro da faixa de metas de mistura analisada

Abastecimento incremental de SAF por tipo (Mt)

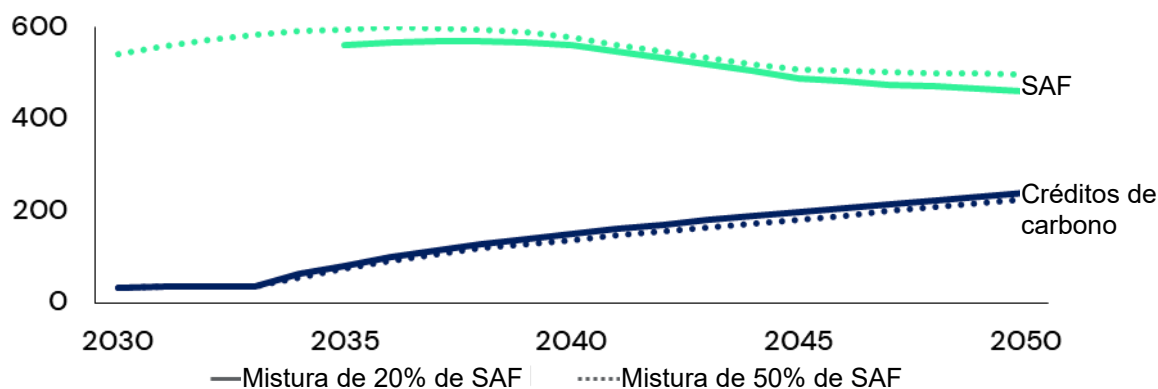


Fonte: Análise da ICF

A trajetória do custo de abatimento para o SAF aumenta inicialmente à medida que as opções de tecnologia de matéria-prima de baixo custo se esgotam e a dependência muda para tecnologias mais caras. No entanto, à medida que essas tecnologias amadurecem, as melhorias de eficiência na produção aumentam, a logística se torna mais simplificada e a intensidade de carbono do SAF diminui, o custo de abatimento das rotas avançadas diminui nos anos posteriores. Em contrapartida, espera-se que o custo de abatimento dos créditos de carbono aumente de forma constante ao longo do tempo. Essa tendência é impulsionada pela redução da oferta e pelo aumento da demanda, o que exige o uso de remoções projetadas de custo mais elevado para atingir as metas de emissões residuais.

Embora os custos de abatimento do SAF permaneçam mais altos do que os dos créditos de carbono, a diferença diminui com o tempo

Custo de abatimento ponderado em USD por tCO₂e



Fonte: Análise da ICF. A linha contínua representa um cenário com uma mistura de 20% de SAF em 2050, e a linha pontilhada representa 50%.

7.3.2.3 O impacto das melhorias de eficiência operacional

Até 2050, as melhorias de eficiência operacional poderiam reduzir as emissões anuais da aviação na ALC em 3,3% a 11,3%. Embora este capítulo aplique uma estimativa de cenário médio de 6,8%, os resultados reais poderiam ser consideravelmente menores ou maiores, dependendo da ambição das partes interessadas, do alinhamento regulatório e do ritmo do desenvolvimento tecnológico. A diferença entre as trajetórias de melhoria baixa e alta corresponde a 9,4 Mt de CO₂e anualmente até 2050. Sem essas melhorias, as companhias aéreas precisariam depender mais fortemente de medidas que não geram reduções do consumo de combustível, especificamente maior consumo de SAF e compras mais elevadas de créditos de carbono, para compensar o déficit a cada ano.

Em um cenário de mistura de 50% de SAF, a diferença entre a quantidade necessária de SAF e créditos de carbono para atingir melhorias operacionais de 11,3% em vez de 3,3% resultaria em uma economia anual de US\$ 3,6 bilhões até 2050, destacando que a eficiência operacional é um elemento crítico de qualquer rota de emissões líquidas zero e não pode ser considerada opcional. Para concretizar esse potencial, é necessário que governos, reguladores, companhias aéreas, aeroportos, prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs) e fornecedores de tecnologia trabalhem juntos sob regulamentações claras, incentivos alinhados, investimentos direcionados e um compromisso comum com a colaboração e a transparência de dados. Para que isso aconteça na prática, a região precisa harmonizar procedimentos, modernizar a infraestrutura física e digital, adotar tecnologias eficazes e construir uma cultura em que a eficiência operacional seja tratada como uma responsabilidade compartilhada. Sem essas bases, o progresso permanecerá desigual e a região enfrentará uma maior dependência de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e créditos de carbono. Quando esses elementos se unirem, a eficiência operacional poderá reduzir os custos de combustível das companhias aéreas, fortalecer as operações diárias e diminuir o impacto geral de se atingir as emissões líquidas zero.

7.3.2.4 O impacto da redução de riscos dos SAF

O desenvolvimento tecnológico global será um dos fatores mais decisivos na definição do custo, da viabilidade e dos impactos da meta de emissões líquidas zero na ALC. Embora os cenários de mistura de SAF apresentados anteriormente pressuponham uma trajetória de preços moderada, com reduções moderadas no custo de

abatimento ao longo do tempo, os resultados reais dependerão da rapidez com que as tecnologias avançadas amadurecerem e da eficácia com que as curvas de aprendizado globais forem aproveitadas.

Se a adoção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) atingir 50% do consumo total de querosene de aviação até 2050, as economias de escala e a implantação acelerada de tecnologia poderão proporcionar reduções de custo muito maiores do que as previstas nos cenários de linha de base. À medida que as instalações de produção se expandirem e as cadeias de abastecimento se tornarem mais eficientes, as necessidades de despesas de capital diminuirão, as condições de financiamento melhorarão e os custos operacionais cairão. Por outro lado, se o desenvolvimento do SAF ficar para trás, os custos para as companhias aéreas poderão aumentar. Para ilustrar isso, foi desenvolvido um cenário que pressupõe melhorias mais rápidas em tecnologia e custos, no qual as despesas de capital diminuem em 20%, as taxas de juros de dívida e capital próprio em 15% e as alíquotas de imposto de renda corporativo, matéria-prima e serviços públicos em 10% em relação à linha de base. Um cenário que pressupõe melhorias mais lentas em tecnologia e custos aplica as mudanças opostas, destacando a sensibilidade dos custos às condições tecnológicas e financeiras globais. No cenário utilizado neste estudo, o custo de abatimento de emissões com SAF em 2050 cai para aproximadamente US\$ 498 por tonelada de CO₂e. Com base nos cenários de melhorias mais rápidas e mais lentas, esse valor poderia variar de US\$ 450 a US\$ 550, com uma diferença de custo anual correspondente para as companhias aéreas de US\$ 4,7 bilhões sob uma mistura de 50%. Essas faixas reforçam o papel crítico do desenvolvimento tecnológico global na mitigação das pressões econômicas sobre o setor.

Alcançar essas reduções exigirá ações coordenadas em várias frentes. Os governos devem criar ambientes propícios que atraiam investimentos e acelerem a inovação. Parcerias público-privadas serão essenciais para compartilhar riscos e mobilizar capital para instalações de demonstração que validem novas tecnologias e acelerem a comercialização. A colaboração internacional também é fundamental para harmonizar normas, facilitar fluxos comerciais abertos para matérias-primas e SAF e garantir que as economias emergentes se beneficiem do progresso global, em vez de ficarem para trás.

O impacto do desenvolvimento tecnológico global vai além da redução de custos. Ele fortalece a resiliência das estratégias de redução de emissões, permitindo flexibilidade no abastecimento de matérias-primas, melhorando a eficiência da produção e reduzindo a dependência de créditos de carbono. Também impulsiona melhorias operacionais que podem gerar bilhões em economias e diminuir os impactos na demanda. Para a região da ALC, aproveitar esses avanços por meio de políticas proativas, investimento em instalações de demonstração e cooperação regional será essencial para atingir as metas de emissões líquidas zero, ao mesmo tempo em que se salvaguarda a conectividade e o crescimento econômico. Sem essas medidas, a região corre o risco de enfrentar custos mais altos, acessibilidade reduzida e progresso mais lento em direção à sustentabilidade.

7.3.2.5 O equilíbrio entre integração regional e a concretização dos benefícios domésticos dos

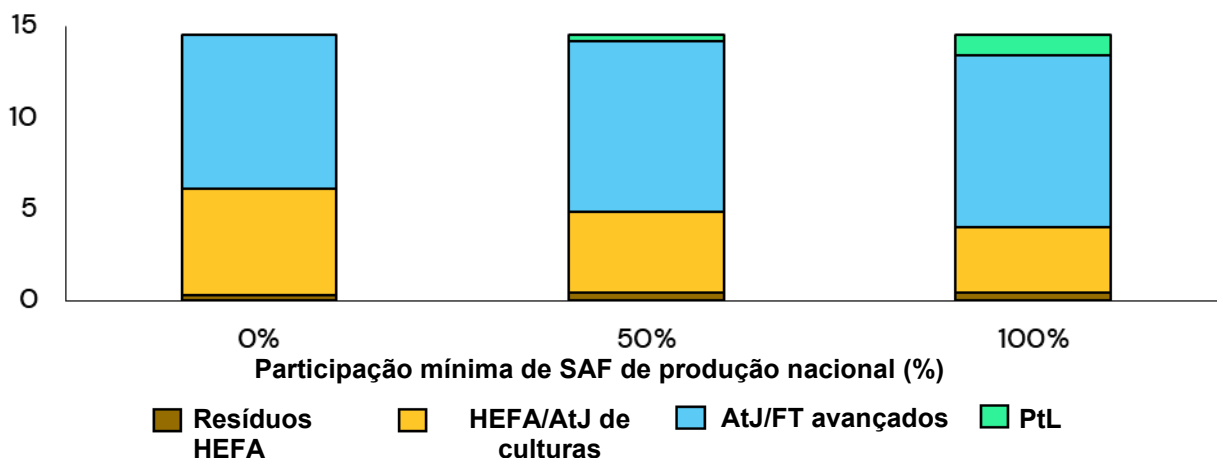
SAF

Dada a grande variação nos custos de produção de SAF e na disponibilidade de matéria-prima entre os países da região da ALC, é importante equilibrar os benefícios potenciais para cada país com as oportunidades que a integração regional oferece para reduzir custos e melhorar a resiliência geral do abastecimento. Uma consideração importante é a segurança energética, que, neste contexto, refere-se a garantir que cada país tenha acesso confiável aos SAF sem se tornar excessivamente dependente de importações ou vulnerável a interrupções no abastecimento. A produção doméstica pode gerar valor econômico ao criar empregos, estimular investimentos e reduzir a exposição à volatilidade dos preços globais, enquanto abordagens regionais podem aumentar a eficiência, distribuir riscos e apoiar um mercado mais estável. Juntas, uma abordagem equilibrada pode ajudar os países a fortalecer a resiliência contra riscos geopolíticos e manter a competitividade de longo prazo no setor de aviação.

A figura abaixo ilustra as diferenças entre cenários em que o mínimo doméstico de SAF — a parcela de SAF que deve ser obtida localmente para atingir uma meta de mistura de 50% em 2050 — é definido em 0% versus 100%. No cenário sem mínimo doméstico, o SAF derivado de etanol de cana-de-açúcar, gás residual industrial e resíduos florestais por meio de rotas AtJ é totalmente utilizado em toda a região, pois essas matérias-primas oferecem os menores custos de abatimento até 2050. No entanto, o gás residual industrial tem disponibilidade limitada, de modo que o etanol de cana-de-açúcar e os resíduos florestais, juntamente com o etanol de milho AtJ, dominam o uso regional de SAF nesse cenário. O SAF PtL não é utilizado nesse caso porque seu custo de abatimento permanece mais alto do que todas as outras opções.

A integração regional total resulta na substituição de todo o SAF PtL e de algumas rotas avançadas pelo SAF de base vegetal, mas pode comprometer a segurança energética

Abastecimento do SAF em 2050 com uma mistura de 50% pela participação (Mt)



Fonte: Análise da ICF.

Quando o mínimo nacional é fixado em 100%, o panorama muda significativamente. O uso de resíduos florestais e etanol de milho AtJ diminui drasticamente, pois esses recursos estão concentrados em países específicos. Os resíduos agrícolas AtJ, que estão distribuídos de forma mais uniforme pela região, tornam-se a matéria-prima dominante até 2050. Os países que não dispõem de HEFA suficiente ou de matéria-prima compatível com AtJ dependem fortemente do PtL para atender à sua demanda por SAF.

As implicações de custo desses dois cenários são substanciais. Alcançar as emissões líquidas zero com uma mistura de 50% de SAF proveniente inteiramente do mercado interno custaria significativamente mais — US\$ 3,8 bilhões a mais em 2050 — do que um cenário com integração regional total. Além disso, as disparidades entre os países tornam-se pronunciadas sob um requisito mínimo doméstico. Por exemplo, o custo médio de abatimento de emissões do SAF no Brasil em 2050 é cerca de 33% menor do que a média regional devido ao seu abundante suprimento de etanol de cana-de-açúcar, que oferece o menor custo de abatimento.

Para equilibrar essas considerações, esta análise utiliza um mínimo doméstico de 50% que permite aos países evitar a dependência excessiva de SAF de alto custo, ao mesmo tempo em que distribui benefícios econômicos e apoia a segurança energética. Sob essa abordagem, o uso de SAF em toda a região em 2050 é impulsionado principalmente por resíduos florestais, etanol de cana-de-açúcar e resíduos agrícolas AtJ, com contribuições menores de UCO, gorduras animais, gases residuais industriais, MSW e PtL espalhadas por diferentes países.

8 Conclusões



O transporte aéreo é a base da conectividade e do crescimento econômico na ALC. A geografia extensa da região e as comunidades dispersas tornam a aviação indispensável para a conectividade entre famílias e amigos, o comércio, o turismo e o acesso a serviços essenciais. Em 2023, o setor contribuiu com 3,6% do PIB e sustentou quase 3% do emprego. Espera-se que a demanda de passageiros cresça de forma constante até 2050.

O setor de aviação na ALC está comprometido com a redução de emissões. As companhias aéreas da região da ALC realizaram investimentos significativos e avançaram na redução de suas emissões por meio de medidas como a renovação da frota e a eficiência operacional. No entanto, as metas de redução de emissões devem ser equilibradas com a garantia da acessibilidade e da conectividade. As ações climáticas não podem ocorrer às custas da acessibilidade, uma vez que o transporte aéreo continua sendo vital para o crescimento inclusivo e a competitividade em uma região onde as alternativas são limitadas e as distâncias são significativas.

A frota é uma das medidas mais eficazes para reduzir as emissões enquanto se promove o crescimento econômico. Aeronaves mais novas proporcionam melhorias notáveis na eficiência de combustível, nos custos operacionais das companhias aéreas e no desempenho ambiental, gerando benefícios tanto para as companhias aéreas quanto para os passageiros. Manter o ritmo da renovação da frota permitirá que a região continue reduzindo a intensidade de emissões enquanto apoia o crescimento do tráfego. As transportadoras aéreas da ALC já comprometeram investimentos substanciais em estratégias de substituição da frota.

A eficiência operacional representa uma medida imediata e custo-efetiva para reduzir as emissões, mas requer colaboração entre as partes interessadas e apoio dos governos. O aprimoramento das operações por meio de medidas de eficiência e planejamento de aeronaves, iniciativas aeroportuárias e em solo, e otimização do perfil de voo oferecem economias significativas em combustível e emissões. Alcançar essas melhorias requer ação coordenada de governos, prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs) e aeroportos, bem como investimentos em sistemas modernizados e processos simplificados.

Os caminhos globais mais ambiciosos são irrealistas para a região. É necessária uma abordagem adaptada à região para atingir as metas de sustentabilidade e, ao mesmo tempo, preservar a conectividade, refletindo o princípio da UNFCCC de responsabilidade comum, mas diferenciada. Medidas fora do setor e estratégias de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) devem refletir as realidades nacionais, a sensibilidade aos preços e a maturidade do mercado. A alta dependência de opções de abatimento caras poderia prejudicar a conectividade em uma região onde os passageiros são altamente sensíveis ao preço e as alternativas ao transporte aéreo são limitadas. São necessários caminhos pragmáticos que equilibrem medidas dentro do setor com mecanismos de créditos de carbono confiáveis e bem regulamentados, mantendo a conectividade e a competitividade.

O SAF é uma das principais medidas dentro do setor com potencial de longo prazo para a descarbonização da aviação, mas várias barreiras econômicas, tecnológicas, políticas e regulatórias devem ser superadas. A ALC tem potencial para se tornar uma parte importante da indústria global de SAF, aproveitando matérias-primas locais, criando empregos e melhorando a segurança de abastecimento de combustível. No entanto, há muito pouca produção na ALC no momento da redação deste artigo, com apenas um pequeno volume de capacidade de coprocessamento e nenhuma instalação independente. Refletindo o estágio inicial de desenvolvimento da indústria de SAF na ALC, os preços indicativos também têm sido mais altos do que em outras regiões. A ampliação da produção exigirá políticas de apoio, investimento em infraestrutura de suporte e mecanismos para minimizar o impacto dos preços sobre os passageiros. O foco regional e o alinhamento com os requisitos dos mercados de exportação podem proporcionar a demanda bancável necessária para atingir os objetivos desejados. A integração regional de arcabouços de políticas públicas e padrões de sustentabilidade poderia melhorar ainda mais a eficiência do mercado.

Vários ecossistemas críticos estão localizados na ALC, e preservá-los e restaurá-los é essencial. A região abriga alguns dos ecossistemas mais extensos e críticos do mundo, oferecendo oportunidades para compensações de alta qualidade e soluções baseadas na natureza que proporcionam benefícios ambientais e sociais. Mercados de carbono bem projetados e integrados regionalmente podem canalizar investimentos para conservação, biodiversidade e desenvolvimento comunitário, ao mesmo tempo em que apoiam a transição mais ampla para a aviação sustentável.

Alcançar a redução das emissões da aviação na ALC exigirá uma ação coordenada entre todas as partes interessadas e deverá refletir as realidades regionais. Melhorias operacionais representam uma das oportunidades mais imediatas e de custo-efetivo, mas a concretização desses ganhos depende de uma colaboração mais estreita entre governos, prestadores de serviços de navegação aérea (ANSPs), aeroportos e companhias aéreas. A longo

prazo, as reduções de emissões precisarão ser apoiadas por um equilíbrio entre a ampliação gradual do uso de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) e a utilização de créditos de carbono de alta qualidade. Dada a sensibilidade aos custos e a maturidade desigual do mercado, essas rotas devem ser cuidadosamente calibradas para reduzir as emissões, preservando ao mesmo tempo a acessibilidade, a conectividade e a competitividade.



Apêndice

Apêndice

Apêndice A: O papel do coprocessamento

O coprocessamento é uma técnica utilizada nas operações de refinaria que combina matérias-primas renováveis, como óleos residuais, gorduras e certos tipos de biomassa, com insumos convencionais à base de combustíveis fósseis para produzir combustíveis com menor intensidade de carbono do que o querosene de aviação padrão. A abordagem aproveita a infraestrutura energética e a tecnologia existentes nas refinarias, permitindo assim que o setor de energia comece a realizar a descarbonização do combustível de aviação com modificações relativamente modestas em suas instalações. Esse método permite a integração gradual de materiais renováveis na mistura de combustíveis, que pode ser ajustada dependendo do fornecimento de matéria-prima, da demanda e dos requisitos regulatórios. O coprocessamento oferece várias vantagens em comparação com instalações independentes de SAF:

1. Ao utilizar os ativos atuais, as refinarias podem prevenir as despesas de capital substanciais normalmente associadas à construção de instalações dedicadas a SAF, facilitando uma adoção mais rápida e o aumento da escala de produção.
2. A flexibilidade do coprocessamento é ainda mais reforçada por sua capacidade de acomodar uma variedade de matérias-primas renováveis, permitindo que as instalações se adaptem à disponibilidade de recursos locais e às flutuações do mercado. As matérias-primas para o coprocessamento podem incluir óleos de cozinha usados, gorduras animais e resíduos agrícolas, embora sua adequação dependa de sua composição química e dos requisitos de processamento. O processo contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida.
3. A mistura de insumos renováveis e derivados de combustíveis fósseis permite que as refinarias otimizem a produção de combustível sem interromper as cadeias de abastecimento estabelecidas, tornando o coprocessamento uma forma pragmática de transição para combustíveis de aviação de menor carbono.

Apesar dessas vantagens, o coprocessamento enfrenta várias limitações:

1. Uma das principais restrições é a limitação técnica quanto à proporção de matéria-prima renovável que pode ser incorporada aos fluxos da refinaria. O excesso de conteúdo renovável pode afetar o desempenho do catalisador, a integridade do equipamento e a qualidade do produto, restringindo assim a quantidade de combustíveis fósseis que podem ser substituídos. Atualmente, o coprocessamento está limitado a uma proporção de mistura de 5% de matérias-primas renováveis em uma refinaria de petróleo convencional. Há trabalhos em andamento para avaliar o aumento dessa proporção de mistura de 5% para 30%, aumentando ainda mais o volume potencial de coprocessamento¹. No entanto, mesmo com esse aumento potencial (ainda em avaliação), as quantidades de SAF produzidas por meio do coprocessamento serão limitadas.
2. Apesar dos menores requisitos de capital e custos de produção, o SAF coprocessado ainda é afetado pela dinâmica do mercado e **seu preço para as companhias aéreas permanece alto em comparação com o querosene de aviação** (pelo menos 3 a 4 vezes mais caro atualmente).
3. Os requisitos de certificação e rastreabilidade introduzem complexidade adicional, pois sistemas robustos devem estar em vigor para documentar a origem, a proporção de mistura e os detalhes de processamento das matérias-primas renováveis, a fim de atender aos padrões de sustentabilidade e às estruturas regulatórias. Essas necessidades de rastreamento são especialmente importantes para garantir que o SAF coprocessado atenda às especificações internacionais exigidas para uso na Aviação.
4. A contabilização das emissões ao longo do ciclo de vida é outro desafio para o coprocessamento. A mistura de várias fontes de carbono introduz incerteza na quantificação das reduções de emissões líquidas e pode complicar o cumprimento das obrigações de relatórios ambientais. O impacto geral do coprocessamento na sustentabilidade está intimamente ligado às características e à origem das matérias-primas renováveis. **Algumas matérias-primas, como certos tipos de óleos vegetais ou biomassa, podem apresentar riscos indiretos à sustentabilidade, incluindo mudança no uso da terra, impactos na biodiversidade e competição por recursos com outros setores.**

5. A integração técnica de materiais renováveis pode exigir modificações nas operações de refinaria, como mudanças na seleção de catalisadores, ajustes nas condições de processo e práticas de manutenção aprimoradas. Essas complexidades operacionais podem resultar em custos adicionais e exigir treinamento contínuo da equipe e desenvolvimento de expertise.
6. Como o coprocessamento produz um combustível que contém componentes renováveis e fósseis e, atualmente, só pode ser misturado em 5%, as reduções de emissões são inerentemente limitadas em relação às rotas de SAF 100% renováveis. Isso posiciona o coprocessamento como uma solução de transição, adequada para reduções de intensidade de carbono no curto prazo, mas improvável de proporcionar a redução profunda de emissões necessária para atingir as metas de redução de emissões da aviação de longo prazo.

De modo geral, o coprocessamento oferece uma rota para que as refinarias comecem a produzir SAF em escala e avancem gradualmente em direção aos objetivos de sustentabilidade. Seus principais pontos fortes são a capacidade de utilizar ativos existentes, responder com flexibilidade aos mercados de matéria-prima e facilitar uma transição mais suave dos combustíveis fósseis para combustíveis alternativos. A abordagem também apoia a penetração precoce do SAF no mercado e permite que as refinarias atendam às pressões regulatórias e de mercado emergentes por combustíveis de menor carbono. No entanto, à medida que os padrões da indústria evoluem e que o fornecimento e a viabilidade de matérias-primas renováveis melhoram, espera-se que plataformas de produção dedicadas, capazes de gerar SAF a partir de insumos 100% renováveis, se tornem cada vez mais importantes para alcançar reduções generalizadas e de longo prazo nas emissões da aviação.

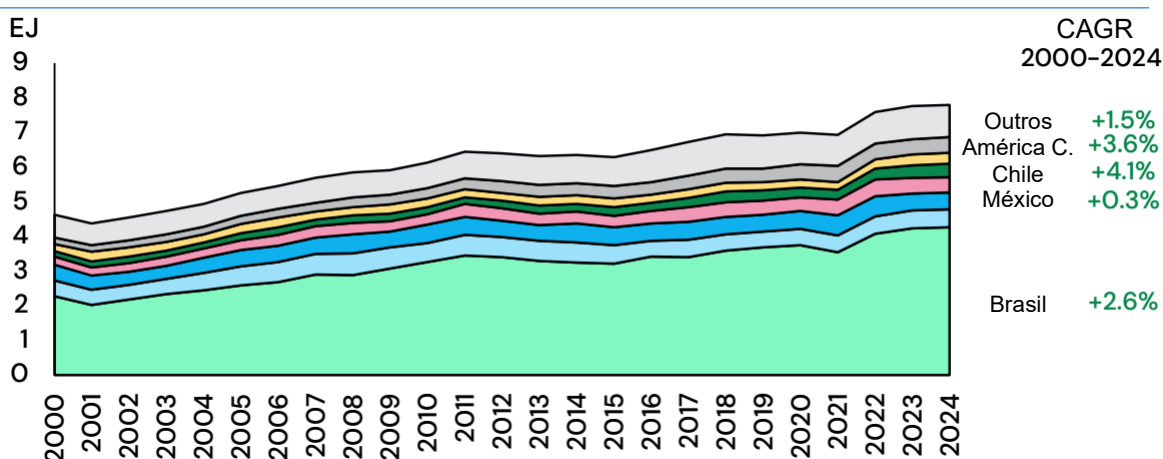
Apêndice B: Panorama da eletricidade renovável e potencial para PtL na região

A região da ALC se estabeleceu como líder em energia renovável, com fontes renováveis e hidrelétricas representando 62% da geração total de eletricidade em 2024³⁹⁵. Essa penetração substancial das energias renováveis na geração de eletricidade excede significativamente a média global de 32%, posicionando a região como um modelo para a transição para a energia limpa e sugerindo um forte potencial para a ampliação do SAF que depende de eletricidade renovável.

Desde 2000, a capacidade renovável da região expandiu-se a uma taxa média anual de 2,9%, dominada pelo Brasil. O Brasil tem contribuído com mais da metade do fornecimento de energia renovável da região nas últimas duas décadas.

Em 2024, as energias renováveis representaram 87% da geração de eletricidade do Brasil — quase três vezes a média global de 32%. Essa alta participação da energia renovável indica que o Brasil, e potencialmente outros países da região, poderiam desempenhar um papel na viabilização de rotas para o SAF a partir de biocombustíveis de petróleo (PtL) no longo prazo, dada a necessidade de grandes volumes de eletricidade renovável.

O fornecimento de energia renovável na ALC tem crescido de forma constante ao longo do tempo (2000-2024)



Fonte: Energy Institute, análise da ICF

O sucesso do Brasil em atingir uma participação tão elevada de energias renováveis deve-se principalmente à sua robusta base hidrelétrica e à rápida expansão da energia solar e eólica nos últimos anos. A participação da energia hidrelétrica tem flutuado de ano para ano na última década, em meio a condições climáticas variáveis, situando-se em 55% da eletricidade do Brasil em 2024, em comparação com uma média de 63% em 2013³⁹⁶. Enquanto isso, a participação da energia eólica, solar e de outras fontes renováveis tem crescido rapidamente nos últimos anos, atingindo 32% em 2024. Países como o Chile e a Colômbia também registraram um crescimento significativo desde 2000. Essas tendências destacam o potencial de vários países da ALC de aproveitar sua crescente capacidade de energia renovável para a produção de SAF no futuro, tanto para uso doméstico quanto para projetos voltados para a exportação.

Apesar das melhorias na infraestrutura elétrica e da crescente integração da energia renovável, o acesso à eletricidade continua sendo um desafio na região. Em 2023, o acesso geral à eletricidade ficou em 97%, com alguns países chegando perto de 100%³⁹⁷. No entanto, algumas áreas ainda enfrentam desafios com a cobertura e a qualidade do serviço, sendo que áreas rurais e bairros carentes frequentemente enfrentam acesso instável à eletricidade. A América Central e o Caribe, por exemplo, apresentam taxas de acesso à eletricidade abaixo da média, de cerca de 92% e 83%, respectivamente, enquanto o crescimento da taxa de acesso na região não melhorou na última década.

As perdas na rede elétrica da região são, em média, de 16%, em comparação com 6% nos países da OCDE. Em 2019, estimava-se que as interrupções no fornecimento de energia durassem 16 vezes mais do que na União Europeia e ocorressem com 10 vezes mais frequência, enquanto as conexões

³⁹⁵ Revisão Estatística da Energia Mundial do Instituto de Energia, 2025

³⁹⁶ <https://ember-energy.org/latest-insights/brazil-rises-as-g20-renewables-powerhouse/>

³⁹⁷ <https://www.iea.org/commentaries/bottom-up-energy-transitions-managing-the-rise-of-energy-communities-in-latin-america>

ilegais generalizadas à rede em áreas urbanas continuam a causar perdas não técnicas. Superar essas restrições será essencial para que a eletricidade renovável vá além de atender às necessidades básicas e apoie tecnologias transformadoras, como o PtL SAF.

A elevada participação da eletricidade renovável na ALC oferece uma base sólida para a transição energética e indica potencial para apoiar a futura produção de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF), particularmente por meio de rotas PtL que dependem de eletricidade renovável. Isso é ainda mais enfatizado pelo fato de alguns países já estarem estabelecendo metas ambiciosas para SAF PtL, como o Chile, indicando o desejo da região de aproveitar o potencial de eletricidade renovável³⁹⁸. **A concretização desse potencial exigirá melhorias contínuas na confiabilidade da rede, diversificação das fontes renováveis e um alinhamento cuidadoso entre os desenvolvimentos do setor energético e as necessidades emergentes de produção de combustíveis.**

³⁹⁸ https://vuelo limpio.cl/wp-content/uploads/2024/10/Chile_SAF_Roadmap_2050_.pdf

Apêndice C: Análise de elasticidade

Para projetar o crescimento do tráfego a longo prazo e avaliar as possíveis mudanças na demanda decorrentes de aumentos nos preços das passagens associados a medidas de redução de carbono, este estudo se baseia em estimativas de elasticidade produzidas pela UdeSA (Universidad de San Andrés). O estudo fornece estimativas específicas para a região sobre como a demanda por transporte aéreo responde a mudanças nos preços das passagens e nos níveis de renda.

No contexto da modelagem da demanda da aviação, dois tipos de elasticidades são particularmente relevantes. A elasticidade-preço da demanda mede como o volume de passageiros responde às mudanças nas tarifas aéreas, enquanto a elasticidade-renda da demanda captura como a demanda por transporte aéreo evolui à medida que a atividade econômica cresce. Esses parâmetros permitem que as projeções de tráfego incorporem tanto o crescimento econômico quanto as possíveis reduções da demanda decorrentes de preços mais altos das passagens.

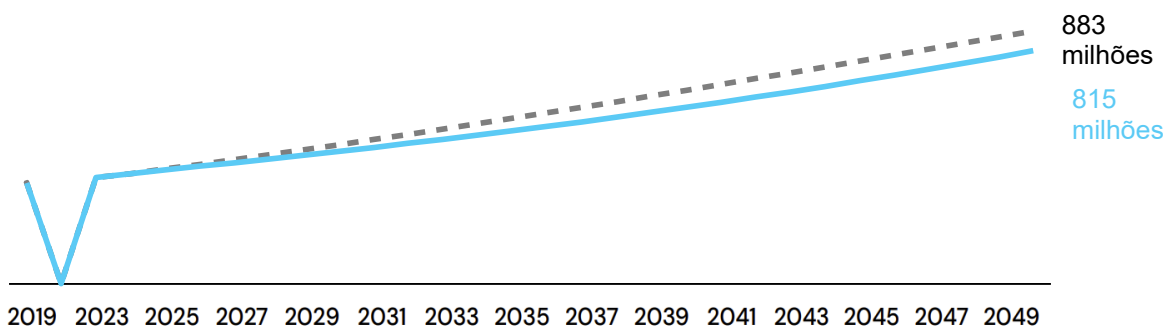
O estudo da UdeSA estima essas elasticidades utilizando um modelo econométrico de painel em nível de rota, baseado em uma especificação log-log, o que permite que os coeficientes estimados sejam interpretados diretamente como elasticidades. A análise é conduzida utilizando um conjunto de dados em painel que abrange o período de 2014 a 2024 (excluindo 2020) no nível origem-destino-mês. Os mercados são definidos como combinações de pares de aeroportos e meses, permitindo que o modelo capture tanto as características específicas das rotas quanto as variações sazonais na demanda. O conjunto de dados combina informações detalhadas sobre transporte aéreo fornecidas pela ALTA com informações adicionais da Cirium e de fontes macroeconômicas internacionais. As principais variáveis da aviação incluem volumes de passageiros, tarifas médias, RPKs, ASKs, capacidade de assentos, tipo de aeronave e participações de passageiros por ponto de origem, agregadas por companhia aérea, rota e mês. Variáveis macroeconômicas, como PIB per capita e população, são obtidas do banco de dados World Economic Outlook do FMI para garantir a comparabilidade entre os países.

Como as decisões de precificação das companhias aéreas podem responder às condições da demanda, o estudo aborda a potencial endogeneidade entre tarifas e volumes de passageiros utilizando uma abordagem de variáveis instrumentais. Em particular, os preços do querosene de aviação obtidos da S&P Global Energy (em interação com a distância da rota) são utilizados como instrumentos baseados em custos para isolar variações exógenas nas tarifas que não estão relacionadas a flutuações de demanda de curto prazo. Controles adicionais, incluindo indicadores sazonais, variáveis macroeconômicas e medidas de concorrência de mercado, são incorporados para garantir uma estimativa robusta.

A estimativa produz tanto elasticidades de preço quanto elasticidades de renda para a região. Para fins de comparação, esta análise também faz referência a estimativas de elasticidade anteriores publicadas pela IATA em um estudo global realizado em 2008. No entanto, esses valores são utilizados apenas como referência indicativa, uma vez que as estimativas da IATA foram derivadas utilizando uma metodologia e um conjunto de dados diferentes.

A análise de elasticidade de renda adaptada à região resulta em uma redução de 7,7% no número anual de passageiros em partida até 2050

Previsão do tráfego aéreo de passageiros em partida (milhões por ano)

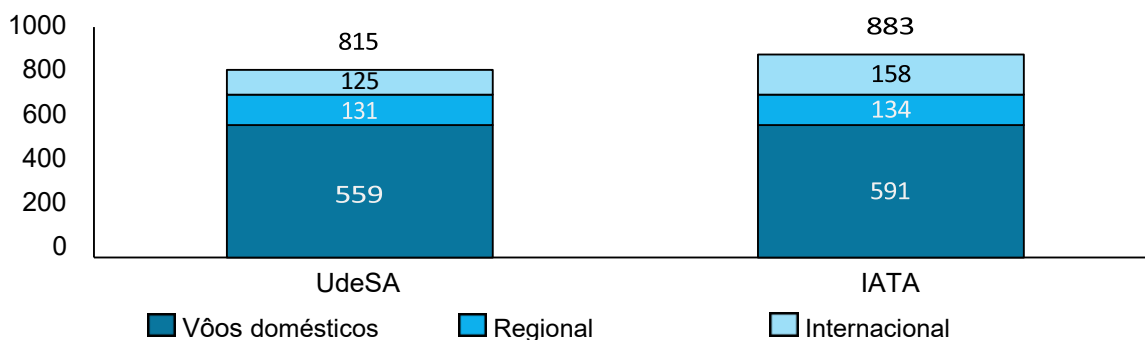


Fonte: IATA, UdeSA, análise da ICF

A aplicação dos parâmetros de elasticidade da IATA resulta em um nível de tráfego projetado de aproximadamente 883 milhões de passageiros em partida da região da ALC até 2050. O uso das elasticidades específicas da região estimadas pela UdeSA resulta em uma projeção ligeiramente menor, de cerca de 815 milhões de passageiros em partida, refletindo a alta sensibilidade dos passageiros ao preço identificada na análise econométrica regional.

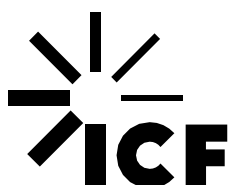
O tráfego internacional é o mais afetado pela aplicação da elasticidade de renda adaptada regionalmente, com uma redução de 21% em comparação com o uso dos valores de elasticidade global da IATA

Passageiros aéreos de partida por categoria de destino (milhões por ano – 2050)



Fonte: UdeSA, IATA. Análise da ICF

Como as estimativas da UdeSA são derivadas de um conjunto de dados que abrange especificamente a América Latina e o Caribe e incorporam condições de mercado mais recentes, elas são utilizadas como principais dados de elasticidade para este estudo.



icf.com

 twitter.com/ICF

 [linkedin.com/company/ICF-International](https://www.linkedin.com/company/ICF-International)

 [facebook.com/ThisIsICF](https://www.facebook.com/ThisIsICF)

 [#thisisicf](https://www.instagram.com/thisisicf)

A ICF (NASDAQ:ICFI) é uma empresa global de consultoria e serviços digitais com mais de 9.000 funcionários em tempo integral e parcial, mas não somos consultores comuns. Na ICF, analistas de negócios e especialistas em políticas trabalham em conjunto com estrategistas digitais, cientistas de dados e profissionais criativos. Combinamos experiência incomparável no setor com recursos de engajamento de ponta para ajudar as organizações a resolver seus desafios mais complexos. Desde 1969, clientes dos setores público e privado têm trabalhado com a ICF para lidar com as mudanças e moldar o futuro. Saiba mais em [icf.com](https://www.icf.com).