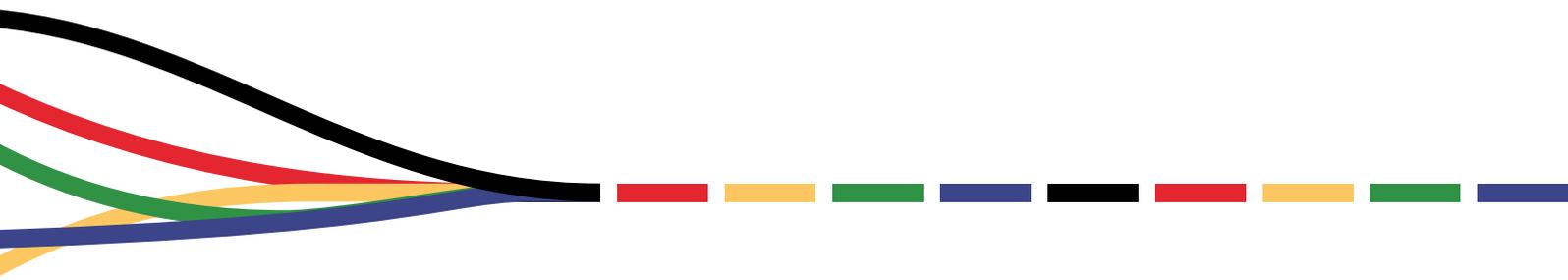


# Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação



**ProQR**

COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS  
SEM IMPACTOS CLIMÁTICOS



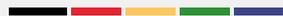
Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos(as) autores(as). Apesar disso, podem ocorrer erros com relação ao conteúdo. Dessa forma, nem a GIZ nem os(as) autores(as) podem ser responsabilizados(os) por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo, direto ou indireto, resultante do uso ou da confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo que sejam, direta ou indiretamente, resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações.

As ideias e opiniões expressas nesta publicação são dos(as) autores(as) e não refletem necessariamente a posição do Ministério da Economia e Ações Climáticas (BMWK), ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A duplicação ou reprodução do todo ou de partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais são permitidas, desde que a GIZ seja citada como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição do todo ou de partes desta publicação, é preciso de autorização escrita da GIZ.

---

\*As figuras são adaptadas das fontes bibliográficas.



## Publicado por

ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos  
Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável

### Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI

#### Ministro

Paulo César Rezende De Carvalho Alvim

#### Secretário de Empreendedorismo e Inovação

José Gontijo

#### Diretor do Departamento de Tecnologias Aplicadas

Eduardo Soriano Lousada

### Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ

#### Diretor Nacional

Michael Rosenauer

#### Diretora de Projetos

Tina Ziegler

#### Diretor substituto do ProQR

Marcos de Oliveira Costa

### Direção do ProQR

Eduardo Soriano Lousada (MCTI)

Tina Ziegler (GIZ)

### Participantes do Trabalho

#### MCTI

Rafael Silva Menezes  
Gustavo de Lima Ramos

#### GIZ

Marcos de Oliveira Costa  
Bárbara Borges  
Elizabeth Melo  
Mariana Reis

#### MME

Fábio da Silva Vinhado  
Renato Cabral Dias Dutra  
Umberto Mattei

#### Elaboração Técnica

Juliana Marreco (autora)

#### Revisão de técnica

Carmem Cecília C Galvão

#### Projeto gráfico e diagramação

João Bosco Gouveia Ramos

Junho 2022



### Contatos

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações  
Coordenação-Geral de Estratégias e Negócios  
Departamento de Tecnologias Estruturantes  
Secretaria de Empreendedorismo e Inovação  
Esplanada dos Ministérios - Bloco E - Sala 346  
70.067-900, Brasília-DF, Brasil  
+55 61 2033-7817

Deutsche Gesellschaft für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH  
SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1401 - 14º andar  
Ed. Brasília Trade Center  
70711-902 Brasília-DF, Brasil  
+55 61 2101-2170

Este estudo foi elaborado no âmbito do Projeto Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos (ProQR), realizado por meio da Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, em parceria com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Este projeto é parte da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI), apoiada pelo Ministério da Economia e Ações Climáticas (BMWK), com base em decisão do Parlamento alemão.

O Projeto ProQR tem o objetivo de criar um modelo de referência internacional para combustíveis alternativos sem impactos ambientais, para transporte aéreo e setores sem potencial de eletromobilidade.

# Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1. Projeção da demanda de biocombustíveis para aviação	17
2.2. Especificação e requisitos para combustíveis de aviação	20
3. TECNOLOGIAS PARA FABRICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO	22
3.1. Processo HEFA para produção de SAF	23
3.2. Processo Álcool para produção de SAF (ATJ)	26
3.3. Hidroprocessamento de Açúcares Fermentados (SIP-HFS)	29
3.4. Síntese de Fischer-Tropsch via Gaseificação da Biomassa (FT-SPK)	31
3.5. Síntese de Fischer-Tropsch dentro da rota BTL (via gaseificação da biomassa)	33
3.6. Inovações no processo de produção de SAF por FT	38
3.7. Matérias-primas potenciais para produção de Biocombustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF)	39
4. VIABILIDADE ECONOMICO FINANCEIRA	42
4.1. Premissas Adotadas	45
4.2. Condições de Viabilidade	54
4.3. Parâmetros reais e factíveis para escalabilidade	55
5. MERCADOS DE CARBONO	61
5.1. Volatilidade	74
5.2. O mercado de carbono no Brasil	75
5.3. Projeções dos preços	76
6. OFERTA E DEMANDA DO SAF NO BRASIL	81
7. IMPACTO NO PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO E NAS PASSAGENS AÉREAS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	115

# Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Estados participantes do CORSIA	13
<b>Figura 2.</b> Emissão de CO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> a partir de voos internacionais entre 2005 e 2050	19
<b>Figura 3.</b> Detalhe da Emissão de CO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> a partir de voos internacionais entre 2005 e 2050	19
<b>Figura 4.</b> Processo HEFA para produção de bioquerosene de aviação (+ outros <i>drop-in fuels</i> ) de biomassa oleaginosa	23
<b>Figura 5.</b> Produção de álcoois da biomassa e rotas ATJ. MTO: Metanol-To-Olefinas; MOGD: Mobil's Olefina-To-Gasolina/Destilados; ABE: Acetona-Butanol-Etanol	26
<b>Figura 6.</b> Hidroprocessamento de açúcares fermentados para bioquerosene de aviação (SAF)	29
<b>Figura 7.</b> Processos integrados de gasificação, FT, refino/hidroprocessamento para a produção de gasolina, querosene de aviação, <i>diesel</i> e eletricidade	31
<b>Figura 8.</b> Diagrama de processamento de biomassa e limpeza de gás de síntese	34
<b>Figura 9.</b> Potencial de bioenergia por cultura no Brasil	40
<b>Figura 10.</b> Demanda de combustíveis de aviação	47
<b>Figura 11.</b> Resultados do custo nivelado do SAF	53
<b>Figura 12.</b> Sensibilidades no VPL – ATJ bagaço de cana-de-açúcar	56
<b>Figura 13.</b> Sensibilidades no VPL – ATJ resíduos de madeira	56
<b>Figura 14.</b> Sensibilidades no VPL – FT com reforma de etanol	56
<b>Figura 15.</b> Sensibilidades no VPL – FT com biogás	57
<b>Figura 16.</b> Sensibilidade VPL – HEFA com óleo de fritura reciclado	57
<b>Figura 17.</b> Sensibilidade VPL – HEFA com sebo	58
<b>Figura 18.</b> Sensibilidade HEFA com resíduos de esgoto	58
<b>Figura 19.</b> Zonas de processamento de exportações criadas no Brasil	59
<b>Figura 20.</b> Total de emissões cobertas pelos mercados regulados de carbono (MtCO <sub>2</sub> )	63
<b>Figura 21.</b> Total de emissões transacionadas no mercado voluntário em agosto/21(MtCO <sub>2</sub> )	64
<b>Figura 22.</b> Preços dos créditos de carbono (US\$/mtCO <sub>2</sub> equivalente)	65

<b>Figura 23.</b> Mapa com síntese das iniciativas de mercados de carbono em 2015	68
<b>Figura 24.</b> Mapa com síntese das iniciativas de mercados de carbono em 2021	68
<b>Figura 25.</b> Evolução dos preços das permissões no âmbito do ETS-EU (US\$/mtCO <sub>2</sub> e)	71
<b>Figura 26.</b> Preços spot em negociação contínua na EEX e ICE ENDEX, em €/tCO <sub>2</sub> .	72
<b>Figura 27.</b> Preços no mercado a vista em diferentes esquemas de comercialização de emissões (€/tCO <sub>2</sub> ).	73
<b>Figura 28.</b> Preços diários em €/tCO <sub>2</sub> dos contratos futuros de dezembro (de 2021 a 2025) negociado na ICE ENDEX e do mercado à vista (spot)	74
<b>Figura 29.</b> Proposta para o Mercado Brasileiro de Carbono	76
<b>Figura 30.</b> Análise histórica e tendência nos preços das permissões para emissões de carbono no mercado europeu (€/mtCO <sub>2</sub> )	78
<b>Figura 31.</b> Resultados do VPL de cada alternativa considerando receitas dos créditos de carbono no mercado europeu	79
<b>Figura 32.</b> Metas CORSIA e Volume de emissões projetado de acordo com EPE (2021a)	82
<b>Figura 33.</b> Projeção do consumo de QAV até 2023 no Brasil	83
<b>Figura 35.</b> Evolução da Composição dos custos e despesas das empresas aéreas brasileiras (%)	91
<b>Figura 36.</b> Participação dos preços do produtor/importador, impostos e margens brutas de distribuição no preço do QAV na bomba no Brasil – voos domésticos (2020)	92
<b>Figura 37.</b> Evolução das tarifas aéreas domésticas públicas médias reais e variações anuais percentuais	93
<b>Figura 38.</b> Gráfico da regressão entre tarifa média e preço do combustível	95
<b>Figura 39.</b> Impacto nas tarifas médias da inserção de 5% de SAF na mistura do QAV, para preços de SAF	96
<b>Figura 40.</b> Estrutura de custos na aviação civil brasileira, média histórica nos últimos 10 anos	96
<b>Figura 41.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota ATJ cana-de-açúcar nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	98
<b>Figura 42.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota ATJ com resíduos de madeira nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	99

<b>Figura 43.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com captura direta do ar nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	100
<b>Figura 44.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com reforma de etanol nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	101
<b>Figura 45.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com biogás nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	102
<b>Figura 46.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota HEFA com reciclagem de óleo de fritura reciclado nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	103
<b>Figura 47.</b> Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota HEFA com sebo nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea	104

# Lista de tabelas

<b>Tabela 1.</b> Genários considerados como comparativos para estimativa de consumo de combustível e consequente emissão de NO <sub>x</sub>	18
<b>Tabela 2.</b> Especificação do querosene e gasolina de aviação [NG <i>et.al.</i> , 2021]	21
<b>Tabela 3.</b> Níveis de contaminantes requeridos para utilização do gás de síntese no processo de FT	36
<b>Tabela 4.</b> Análise técnico-econômica e de emissão das principais rotas/tecnologias de conversão de biomassa usando diferentes biomassas	44
<b>Tabela 5.</b> Percentuais da produção de derivados por rota	46
<b>Tabela 6.</b> Projeção preços combustível aviação (valores em US\$/bbl)	46
<b>Tabela 7.</b> Impostos sobre a comercialização dos combustíveis no Brasil	47
<b>Tabela 8.</b> Valores do Investimento (CAPEX) e volume de produção por rota	48
<b>Tabela 9.</b> Principais premissas técnico-econômicas adotadas	49
<b>Tabela 10.</b> Resultados das análises econômico-financeiras caso base (considerando 1,4x o <i>capex</i> de referência)	52
<b>Tabela 11.</b> Resultados das análises econômico-financeiras caso base (considerando 1,15x o <i>capex</i> de referência)	52
<b>Tabela 12.</b> Volatilidade dos preços no mercado a vista das permissões de emissões no mercado europeu	74
<b>Tabela 13.</b> Comparativo da volatilidade das permissões de emissões no mercado europeu com outros ativos	75
<b>Tabela 14.</b> Resultados das análises de sensibilidade considerando diferentes preços de carbono no mercado europeu	79
<b>Tabela 15.</b> Preço de equilíbrio do SAF e do crédito de carbono (€/mt)	80
<b>Tabela 16.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota ATJ Cana-de-açúcar e % de SAF na mistura com o QAV	84
<b>Tabela 17.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota ATJ com resíduos de madeira e % de SAF na mistura com o QAV	84
<b>Tabela 18.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota Fischer Tropcsch com captura direta do ar e % de SAF na mistura com o QAV	85

<b>Tabela 19.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota Fischer Tropcsch com reforma de etanol e % de SAF na mistura com o QAV	85
<b>Tabela 20.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota Fischer Tropcsch com biogás e % de SAF na mistura com o QAV	86
<b>Tabela 21.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota HEFA com óleo de fritura reciclado e % de SAF na mistura com o QAV	86
<b>Tabela 22.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota HEFA com sebo e % de SAF na mistura com o QAV	87
<b>Tabela 23.</b> Projeção Volume SAF (m <sup>3</sup> ) na rota HEFA com resíduos de esgoto e % de SAF na mistura com o QAV	87
<b>Tabela 24.</b> Resumo das projeções do volume de SAF por rota e matéria-prima para atendimento da meta de 1% de redução de emissões	88
<b>Tabela 25.</b> Dados usados para regressão	94
<b>Tabela 26.</b> Resultados da Regressão	94
<b>Tabela 27.</b> Impacto na parcela dos combustíveis com a mistura de 5% do SAF	97
<b>Tabela 9.</b> Referência para o custo da biomassa de cana-de-açúcar. Custos por etapa de produção na safra 2020/2021 e projeção para a safra 2021/2022.	115
<b>Tabela 10.</b> Base para premissa do custo do óleo de fritura reciclado	115
<b>Tabela 11.</b> Referência para estimativa do custo do sebo	115



# 1. INTRODUÇÃO

As pressões sobre a redução de emissões com o objetivo de conter a mudança climática são mais fortes a cada ano. Nesse sentido, todos os setores da economia serão compelidos a contribuir, buscando alternativas tecnológicas para reduzir suas emissões.

Assim, de acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2021), globalmente, a aviação produziu 915 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em 2019 (o que representa 2% do total das emissões globais). A projeção é que isso dobre até 2050, em um cenário de negócios como de costume. A indústria (por meio da *International AirTransport Association* – IATA e do *Air Transport Action Group* – ATAG) se comprometeu a reduzir em 50% as emissões de CO<sub>2</sub> até 2050.

Boa parte dessa audaciosa meta de reduções deverá ser atingida a partir dos chamados combustíveis sustentáveis de aviação (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*) ou biocombustíveis.

O Projeto ProQR visa à criação de um modelo de referência internacional para a aplicação de combustíveis alternativos sem impactos climáticos no transporte aéreo ou segmentos de transporte sem potencial de eletromobilidade.

O estudo que segue tem, como objetivo principal, uma análise de viabilidade econômica acerca das principais rotas no Brasil para produção de SAF com foco nas rotas Fisher-Tropsch (FT), HEFA e ATJ, considerando diferentes matérias-primas para implantação de plantas-piloto de produção de combustíveis sustentáveis de aviação.

Além disso, aborda aspectos acerca do desenvolvimento dos mercados de carbono e como a precificação dos créditos de carbono pode contribuir com a viabilidade e o desenvolvimento do mercado de SAF no Brasil. Simulações de oferta e demanda do SAF para atendimento aos compromissos são realizadas.

Por fim, simula impactos nos preços das passagens aéreas na aviação civil brasileira.

Dessa forma, está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se breve revisão da literatura do desenvolvimento do mercado de SAF e suas matérias-primas no Brasil. O Capítulo 3 traz as diversas rotas e matérias-primas para a produção do SAF.

A partir de referências pesquisadas no capítulo anterior, o Capítulo 4 discorre sobre a viabilidade econômico financeira de plantas para produção de SAF. Mostra, ainda, quais seriam as condições de contorno necessárias para viabilização da produção e do uso dos SAF no Brasil, bem como uma visão de potenciais subsídios necessários para garantir a viabilidade dos investimentos até que se torne em escala comercial.

O quinto capítulo aborda o desenvolvimento dos mercados de carbono, sua precificação e as tendências futuras.

O Capítulo 6 traz as projeções acerca da oferta e demanda do SAF, enquanto o sétimo capítulo aborda os impactos dos preços do SAF e sua inserção nos preços das passagens aéreas na aviação civil brasileira.

Os Capítulos 8 e 9 destinam-se às referências bibliográficas e aos anexos, respectivamente.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

O transporte aéreo contribui com a economia global como um meio de transporte rápido de produtos e pessoas para turismo, comércio e outras atividades socioeconômicas. A *International Air Transport Association* (IATA) previu crescimento de mais de 100% no número global de passageiros nos próximos 20 anos, de 2016 (3,8 bilhões) a 2037 (8,2 bilhões), com uma taxa de crescimento anual de 3,5% com base na expectativa de crescimento populacional, melhores padrões de vida e menor custo de viagens aéreas no futuro. No entanto, a previsão não levou em consideração o impacto de médio a longo prazo ocasionado pela pandemia de covid-19.

Portanto, há uma necessidade urgente de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). Rocco e Henkes (2020) colocam que, de acordo com ANP, o Brasil é o maior consumidor de combustíveis de aviação da América Latina. Os produtos destinados para uso em aeronaves no país são o querosene de aviação (QAV), a gasolina de aviação e o querosene de aviação alternativo (QAV Alternativo), sendo o mais consumido o QAV, seguido da gasolina de aviação e, por último, o QAV Alternativo, que, mesmo sendo pouco utilizado, já está presente em nosso mercado.

Com as tecnologias atuais, a maior parte da redução das emissões provavelmente virá do uso de biocombustíveis, o que, segundo relatório da ICAO (*International Civil Aviation Organization*), proporciona de 60% a 80% menos emissões de GEE no ciclo de vida (ICAO, 2021). A meta do setor de zerar emissões até 2050 irá demandar que pelo menos 70% do consumo seja de biocombustíveis. A parcela das emissões que não puder ser reduzida com o uso de biocombustíveis e novas tecnologias deverá ser compensada por meio da compra de unidades de redução certificadas (CER) no mercado de créditos de carbono.

Bioquerosene de aviação, BioQAV ou SAF pode ser definido como combustível alternativo ao combustível de aviação convencional, baseado em matérias fósseis, que é produzido de fontes biológicas ou não biológicas que não são esgotáveis. Este deve ser certificado sob os padrões de combustível de aviação ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Ele é um tipo específico de fluido cujo à composição são adicionados alguns aditivos que, por exemplo, minimizam o risco de congelamento ou mesmo explosões devido a manuseio em altas temperaturas.

Até o momento, sete rotas de produção de biocombustível foram aprovadas para mistura com combustível convencional de aviação sob ASTM D7566-21:

- querosene parafínico sintético de Fischer-Tropsch (FT-SPK), com mistura máxima permitida de 50%;
- querosene parafínico sintético de Fischer-Tropsch com aromáticos (FT-SPK/A), com mistura máxima permitida de 50%;
- ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA), com mistura máxima permitida de 50%;
- hidroprocessamento de açúcares fermentados – isoparafinas sintéticas (HFS-SIP), com mistura máxima permitida de 10%;
- querosene parafínico sintético álcool para jato (ATJ-SPK), com mistura máxima permitida de 50%;
- hidrotermólise catalítica (CHJ); com mistura máxima permitida de 50%; e
- querosene parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocessados de hidrocarbonetos e ácidos graxos (HC-HEFA-SPK), com mistura máxima permitida de 10%.

Essas rotas podem converter biomassas e matérias-primas sintéticas para biocombustíveis que podem ser misturados com combustível de aviação. A tecnologia dominante hoje são os Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (HEFA), que usam oleaginosas. Além disso, as tecnologias com maior potencial para produção em larga escala nos próximos 10 anos são: Gaseificação + Fischer-Tropsch (FT) e Álcool a Jato (ATJ). Para esse estudo, apenas as rotas ATJ, FT e HEFA serão consideradas, visto que são rotas que estão entre as que possuem maior percentual de substituição para misturas com o QAV fóssil (50%).

Segundo Rocco e Henkes (2020), para que biocombustíveis possam ser utilizados em aeronaves a jato (motores a reação), deve atender requisitos de desempenho rigorosos e específicos, além de atender aos critérios de sustentabilidade que seu uso propõe. Para viabilizar o uso destes combustíveis alternativos sem comprometer os requisitos de sustentabilidade e qualidade, a ICAO aposta nos combustíveis *drop-in*<sup>1</sup>. No texto, os autores discorrem sobre o uso do etanol, o *diesel* verde e o bioquerosene.

Rodrigues e Henkes (2021) fazem uma revisão sobre a sustentabilidade da aviação. Nesse artigo explicam o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – Mecanismo de Redução e Compensação de Emissões da Aviação Internacional*). O CORSIA é a proposta da ICAO (Organização da Aviação Civil Internacional) para implementar a pretendida redução de emissões da aviação internacional para atender tanto à missão de continuar desenvolvendo e aprimorando a aviação civil quanto ao compromisso com a redução de GEE firmado nos acordos internacionais.

O programa teve seu início operacional em 2019 com a medição das emissões de carbono pelas empresas aéreas e reporte às autoridades dos países-membros da ICAO. Essa medição prosseguiu em 2020 para, no final do período, ser estabelecida a linha de referência das emissões. Entre 2021 e 2026 acontecerá a fase-piloto (em que as emissões dos 82 estados-membros voluntários deverão ser compensadas em relação à linha de base) e primeira fase do programa que inicia em 2024, em que os estados voluntários deverão estar adaptados à regra definitiva, compensando as emissões de CO<sub>2</sub> com base no ano dado. O Brasil não se voluntariou para essas fases, sendo obrigado, como todos os países-membros da ICAO, apenas a reportar as emissões da atividade aérea internacional dos seus operadores.

A partir de 2027, a manutenção das emissões limitadas ao nível de referência, com a compensação das emissões que ultrapassarem a linha, serão obrigatórias para todos os países-membros com exceção de alguns países com participação muito pequena na atividade aérea internacional. O Brasil terá participação obrigatória nessa fase. A Figura 1 mostra quais países se comprometeram com cada fase do programa.

---

1. “Biocombustíveis *drop-in*” são biocombustíveis que podem ser misturados com combustível convencional até a proporção definida por uma especificação de combustível, que podem usar a mesma infraestrutura de abastecimento e que não requerem adaptação de avião ou turbinas.



de pesquisas para viabilização de novas matérias-primas para produção de combustíveis de aviação menos agressivos ao meio ambiente.

Para estimular a produção de biocombustíveis no Brasil, o governo brasileiro criou, em dezembro de 2016, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). O RenovaBio visa contribuir com a eficiência energética e com a redução das emissões de gases de efeito estufa, com a produção e a expansão do uso dos biocombustíveis e melhorar a participação do mercado nacional de biocombustíveis por meio de certificações.

Em 2017, foi criada a Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para a Aviação, visando apoiar o desenvolvimento do setor de bioquerosene em âmbito nacional. E, em 2018, foi lançada a Plataforma de BioQAv da Zona da Mata.

A UFMG, por exemplo, por meio de seu Laboratório de Ensaio de Combustíveis, tem trabalhado em projetos de parcerias para certificação dos biocombustíveis de aviação, em parcerias com a Boeing, com a Codemge e com o governo do Estado de Minas Gerais, bem como tem trabalhado em iniciativas de diferentes rotas de desoxigenação: pirólise catalítica e HEFA; no desenvolvimento de catalisadores residuais e de baixo custo de catalisadores sustentáveis e em processos com condições experimentais brandas: menores temperaturas e pressões, baixa dependência de  $H_2$ .

Em 2021, foi lançado o Programa Combustível do Futuro por meio do Despacho Presidencial n. 16, em 17 de maio de 2021. O Programa visa integrar políticas já existentes, dando suporte para o estabelecimento de regulação para novos combustíveis e bioenergia com captura de carbono.

Costa e Henkes (2021) abordam as alternativas de motores e energias renováveis para a aviação, pesquisando sobre a utilização de alternativas para os combustíveis fósseis no mercado aeronáutico e a evolução dos motores a reação, com o principal objetivo de minimizar ou até mesmo controlar as emissões de poluentes pelas aeronaves. Os autores mencionam que o mercado total de querosene de aviação no Brasil atual é em torno de  $6,7 \text{ Mm}^3$  e as tecnologias HEFA, ATJ e FT, certificadas pela ASTM, permitem a mistura com combustíveis renováveis em até 50%, com uma alta concentração de consumo em cerca de 30 postos de abastecimento em aeroportos.

Naslausk e Henkes (2021) também exploram diversas fontes alternativas usadas na aviação. Para esses autores, um dos maiores desafios para a implementação do biocombustível na aviação é a adaptação dos motores para se adequar a essa fonte de energia. Para um motor ser adequado em uma aeronave, é necessário que seja confiável, o mais leve possível, eficiente e econômico. É necessário confiar nele para que não haja uma falha repentina, deve ser leve de forma que a relação massa e potência seja eficaz e a economia do motor também é importante para que haja uma boa autonomia da aeronave. Abordam a possibilidade do uso de energia solar combinada a eletricidade e células de hidrogênio. Os autores apresentam diversas iniciativas do setor de aviação com o desenvolvimento de biocombustíveis, entre elas: a criação da Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação (Abraba), a definição de Metas Ambientais da Aviação Civil pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), a criação, pela Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos, da *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* (CAAFI), voltada para “melhorar a segurança energética e sustentabilidade ambiental da aviação mediante combustíveis para aviação alternativos”, a inclusão, em 2011, de biocombustíveis para a aviação em uma plataforma da *European Industrial Bioenergy Initiative*, a *Iniciativa Española de Producción y Consumo de Bioqueroseno para Aviación* (bioquerosenes), a *Iniciativa Towards a Sustainable Kerosene for Aviation*.

No Brasil, a ANP publicou a Resolução ANP n. 778/2019 e a n. 779/2019, sobre querosene de aviação. A primeira estabelece as especificações dos querosenes de aviação fóssil, alternativo e suas misturas, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional. A segunda atualiza as definições de querosene de aviação C (QAV-C) e querosene de aviação alternativo e veda a importação de QAV-C, alterando a Resolução ANP n. 17/2006 e a n. 18/2006 (ANP, 2019).

Segundo a ANP (2021), o setor de aviação trabalha com margens de lucro estreitas. Os custos com combustível representam grande parte do OPEX dessas empresas (~30-40%). Os preços do SAF são atualmente cerca de cinco vezes mais altos do que os preços do combustível convencional, conforme mostram dados sobre os preços do mercado *spot* europeu coletados.<sup>2</sup> A Agência vem trabalhando na definição dos parâmetros técnicos que garantem a adequação ao uso e na necessidade de uma harmonização em nível internacional.

De acordo com a Resolução ANP n. 778/2019, é proibida a adição de mais de um tipo de QAV alternativo ao QAV 1, bem como a mistura de diferentes tipos de QAV C. Além disso, o importador, o produtor de QAV ou QAV alternativo e o distribuidor de combustíveis de aviação deve garantir a qualidade do QAV 1, do QAV alternativo ou do QAV C a ser comercializado e emitir o Certificado da Qualidade (CQ) de amostra representativa.<sup>3</sup> E por fim, na produção do QAV1, é permitido o coprocessamento de matéria-prima convencional com até 5% em volume de mono, di e triglicerídeos, ácidos graxos livres e ésteres de ácidos graxos.

É consenso, na literatura, o potencial brasileiro na produção de biocombustíveis. O Brasil tem condições de ser um dos maiores líderes globais em produção de SAF, considerando tecnologias em etanol e demais biocombustíveis (animal e vegetal).

Além disso, alinha as especificações dos combustíveis de aviação às internacionais, originárias da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), incluindo dois novos bioquerosenes de aviação (SPK/A e ATJ) no rol de querosenes alternativos possíveis de serem misturados ao querosene fóssil. A harmonização das especificações dos combustíveis de aviação é necessária para estabelecer um padrão mínimo de qualidade em qualquer localidade em que as aeronaves, brasileiras ou não, possam abastecer (ANP, 2019).

Assim, de acordo com a Raízen (2021), para que isso aconteça, é necessário:

- Ter produto disponível na quantidade suficiente e a um custo acessível para ajudar na diminuição da emissão da pegada de carbono na indústria da Aviação;
- Criar ambiente regulatório que estimule o desenvolvimento do mercado doméstico; e
- Fomentar o desenvolvimento desta indústria para que o Brasil possa realizar sua vocação de primazia em nível global.

2. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/probioqav/participacao-social/controle-de-qualidade-anp-probioqav.pdf>.

3. De acordo com a Resolução ANP n. 778/2019: Do Certificado da Qualidade do QAV-1, do QAV alternativo e do QAV-C.

Art. 4º O importador, o produtor de QAV-1, o produtor de QAV alternativo e o distribuidor de combustíveis de aviação, quando este realizar a mistura de QAV-1 com QAV alternativo, devem garantir a qualidade do QAV-1, do QAV alternativo ou do QAV-C a ser comercializado, conforme o caso, e emitir o certificado da qualidade de amostra representativa, cujos resultados devem atender aos limites especificados no Regulamento Técnico anexo, de acordo com o tipo de combustível de aviação.

Madsen e Henkes (2021) tratam do uso dos biocombustíveis em particular do bioquerosene na aviação brasileira, assim como das matérias-primas potenciais para sua produção. O estudo chega à conclusão da necessidade de investimentos e incentivos de organismos federais para incentivar a promoção do bioquerosene no Brasil.

Vilalva (2021) estuda o potencial de aplicação do biodiesel leve de amêndoa de macaúba como combustível alternativo de aviação. Missaglia (2020) analisa a competitividade do biocombustível di-amil éter (DAE) para ser utilizado como aditivo na formulação dos biocombustíveis para aviação.

Rocco e Henkes (2020) também analisam as principais alternativas para substituir os combustíveis fósseis nas operações aéreas em território brasileiro. Peres *et al.* (2021) exploram as rotas tecnológicas para produção do SAF, utilizando os coprodutos (resíduos) da produção do biodiesel no Brasil. Os autores concluem que coprodutos da produção do biodiesel (material lignocelulósico oriundo das cascas e resíduos da colheita das oleaginosas e a glicerina) podem ser utilizados como matérias-primas para produção de SAF, por meio das rotas SPK-FT, SPK/A-FT, SPK-ATJ, SIP.

Yoshinaga *et al.* (2020) trazem revisão bibliográfica que visa discutir o cenário atual e as perspectivas futuras da produção de bioquerosene no Brasil. Madsen e Henkes (2021) discutem o uso dos biocombustíveis, em especial o bioquerosene na aviação civil no Brasil, considerando querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (FT-SPK); querosene parafínico sintetizado por hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA); açúcares fermentados hidroprocessados para isoparafinas sintéticas (HFS-SIP); querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch com aromáticos (FT-SPK/A); Álcool para Querosene Parafínico Sintético (ATJ-SPK); hidrotérólise catalítica querosene sintetizado (CH-SK, ou CHJ); hidrocarbonetos hidroprocessados, ésteres e ácidos graxos querosene parafínico sintético (HHC-SPK ou HC-HEFA-SPK).

Os querosenes de aviação alternativos, permitidos nacionalmente, são: o querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT); o querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA); o querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A); o querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ); e as isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP) (ANP, 2019, Artigo 1º, § 2º).

Madsen e Henkes (2021) apontam, como as principais matérias-primas para suprir a produção de bioquerosene no Brasil, as seguintes: camelina, cana-de-açúcar, catolé, licuri, macaúba, OGR, pinhão manso, resíduos agrícolas, lixo urbano e soja.

Souza (2019) analisa o cenário do mercado brasileiro de bioquerosene de aviação e estabelece *ranking* das oleaginosas potenciais para produção de bioquerosene HEFA em cada uma das regiões brasileiras a partir de múltiplos critérios. Os resultados obtidos mostram o seguinte *ranking* de matérias-primas por região: Norte – 1º soja, 2º palma, 3º macaúba e 4º babaçu; Nordeste – 1º soja, 2º pinhão-manso, 3º palma, 4º algodão, 5º macaúba, 6º babaçu e 7º mamona; Sul – 1º soja, 2º girassol, 3º colza e 4º algodão; Sudeste – 1º soja, 2º pinhão-manso, 3º macaúba, 4º algodão, 5º girassol, 6º mamona e 7º amendoim; Centro-Oeste – 1º soja, 2º pinhão-manso, 3º palma, 4º algodão, 5º girassol, 6º macaúba e 7º mamona.

O Brasil é internacionalmente reconhecido por sua longa experiência no uso da biomassa para fins energéticos, a começar por madeira, etanol de cana-de-açúcar e biodiesel. A bioe-

nergia moderna representa cerca de 30% da matriz energética do Brasil, país que tem longo histórico de conciliar produção de biocombustível, segurança alimentar e desenvolvimento rural. Boa parte do que o Brasil fez na área de bioenergia foi por meio de políticas de longo prazo e investimento em pesquisa associada à formação e qualificação de recursos humanos. De acordo com estudo realizado pela Boeing, Embraer e Fapesp em 2013, o país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o segundo maior produtor de soja e registra o mais baixo custo de produção de eucalipto. Essa posição assegura competitividade na produção das três culturas consideradas candidatas naturais a matérias-primas para o início de uma indústria de biocombustível de aviação no Brasil, dependendo do processo de conversão escolhido.

A produção descentralizada, embora gere o benefício da redução dos custos logísticos, traz o desafio da certificação e do controle de qualidade. De acordo com estudo realizado pela Boeing em conjunto com a Embraer, Fapesp e com a Unicamp<sup>4</sup> em 2013, o consumo de combustíveis para aviação se concentra na região sudeste do país, em geral em cidades não distantes do litoral. Por outro lado, há terras agrícolas abundantes e baratas disponíveis no interior do país, longe dos centros de consumo (distâncias maiores do que 1.000-2.000 km). Portanto, a melhoria da logística das matérias-primas e dos biocombustíveis para aviação é uma questão fundamental para a competitividade econômica dos vários *pathways* para a produção de biocombustíveis para aviação. Por outro lado, a diversidade de matérias-primas disponíveis nos locais de consumo em diferentes regiões do país pode impulsionar o uso de soluções de nicho, que tirem proveito das longas distâncias e do custo elevado da logística.

Isso também pode valer para vários pontos específicos de emissões residuais de processos industriais, oriundos da produção de aço em todo o Brasil, em geral localizados próximos de áreas urbanas e industriais.

## 2.1. Projeção da demanda de biocombustíveis para aviação

A queima de combustíveis em aeronaves representou, no ano de 2012, uma parcela de 12% do total da queima de combustíveis destinados à alguma atividade de transporte, o que representou 312,0 Mm<sup>3</sup>. No ano de 2015, 65% do combustível de aviação usado deveu-se às viagens internacionais. Esse setor cresce a taxas médias de 3% ao ano, direcionado principalmente por empresas de origem, principalmente asiáticas e africanas, de modo que se projeta, para o ano de 2050, que o consumo de querosene de aviação deve ser de, no mínimo, 750,0 Mm<sup>3</sup>. Tais valores poderiam ser maiores, todavia a evolução tanto da tecnologia de fabricação de motores, como também a de fabricação de combustíveis, além do aprimoramento das operações logísticas, reduzem esse aumento (The New York Times, 2011; ICAO, 2013; ICAO, 2016; IRENA, 2017; ICAO, 2019; JÜRGENS, *et al.*, 2019).

A seguir, a Tabela 1 mostra um conjunto desses cenários de inovações tecnológicas em aeronaves e na operação como fator contributivo no consumo de combustível e, portanto, no cálculo de emissões de poluentes decorrentes.

4. Disponível em: <https://fapesp.br/publicacoes/plano-de-voo-biocombustiveis-brasil-pt.pdf>.

**Tabela 1.** Cenários considerados como comparativos para estimativa de consumo de combustível e consequente emissão de NO<sub>x</sub>

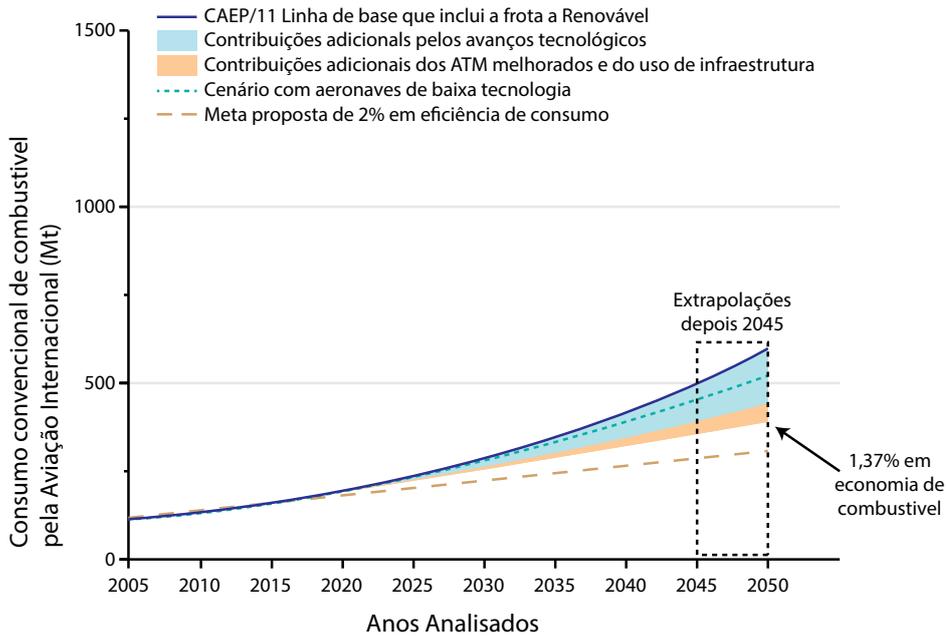
Cenário	Tecnologia de aeronaves: melhoria na queima anual de combustível da nova frota após o ano base	Tecnologia de aeronaves: melhorias nos níveis de emissão face a meta de NO <sub>x</sub> (CAEP/7)	Melhorias adicionais amplas na frota
Combustível 1: Linha de base	Ano base de produção	Não disponível	NA: manutenção da linha de base de atendimento de demanda
Combustível 2: Aeronaves de baixas tecnologias e melhorias operacionais CAEP/9 IE	Baixo: 0,96% para 2015 e daí 0,57% para 2050	Não disponível	Aplicar as melhorias adicionadas a toda a frota
Combustível 3: Aeronaves de tecnologia moderada e melhorias operacionais CAEP/9 IE	Moderado: 0,96% para 2050	Não disponível	Aplicar as melhorias adicionadas amplamente à frota
Combustível 4: Aeronaves de tecnologia avançada e melhorias operacionais CAEP/9 IE	Avançado: 1,16% para 2050	Não disponível	Aplicar as melhorias adicionadas amplamente à frota
Combustíveis 5: Ponto de vista otimista na tecnologia de aeronaves e melhorias operacionais	Otimista: 1,5% para 2050	Não disponível	Aplicar as melhorias adicionadas amplamente à frota
NO <sub>x</sub> 1: Linha de base	Não disponível	Não disponível	Não disponível
NO <sub>x</sub> 2: Aeronaves de tecnologia moderada, melhorias operacionais CAEP/9 IE e 50% das melhorias de emissões pela CAEP/7 IE	Moderado: 0,96% para 2050	50% pelo ano de 2026 na melhor expectativa	Aplicar as melhorias adicionadas amplamente à frota
NO <sub>x</sub> 3: Aeronaves de tecnologia avançada, operação CAEP/9 IE e 100% das melhorias de emissões pela CAEP/7	Avançado: 1,16% para 2050	100% pelo ano de 2026 na melhor expectativa	Aplicar as melhorias adicionadas amplamente à frota

Fonte: (ICAO, 2019).

A partir das condições na Tabela 1, traçou-se a curva de consumo de combustível de aviação entre os anos de 2005 até 2045 com extrapolações para 2050 (Figuras 2 e 3) utilizando-se os modelos *Aviation Environmental Design Tool (EADT) – U.S. Federal Aviation and Administration*; *EUROCONTROL's IMPACT*; *Manchester Metropolitan University's Future Civil Aviation Scenario Software Tool (FAST)*.

As curvas na Figura 2 mostram que, entre uma situação de melhor cenário tecnológico e uma situação com os piores, a queima de combustível estará entre 500 Mt (Cenário com menos tecnologia) e 400 Mt (melhor aplicação de recursos tecnológicos). Extrapolando-se ao ano de 2050, os valores superam as 500 Mt (sem aplicação tecnológica) e cai a pouco menos de 450 Mt (considerando todos os possíveis avanços). O consumo ainda sofria alterações de acordo com a previsão de aumento no número de passageiros e com o tipo de aeronave empregada. Os números com todas essas variações, de acordo com a Figura 3, mostram que o consumo de combustível, já em 2045, passaria das 600 Mt chegando a valores da ordem 700 Mt no ano de 2050. Consequentemente, tem-se a predição dos valores de emissão de e dentro dos cenários estudados considerando que cada 1kg combustível de aviação queimado em média 14 g de NO<sub>x</sub>, 0,8 g de SO<sub>x</sub>, 3,15 kg de CO<sub>2</sub>, 4 g de CO, 0,6 g de hidrocarbonetos (Baumi *et al.*, 2019).

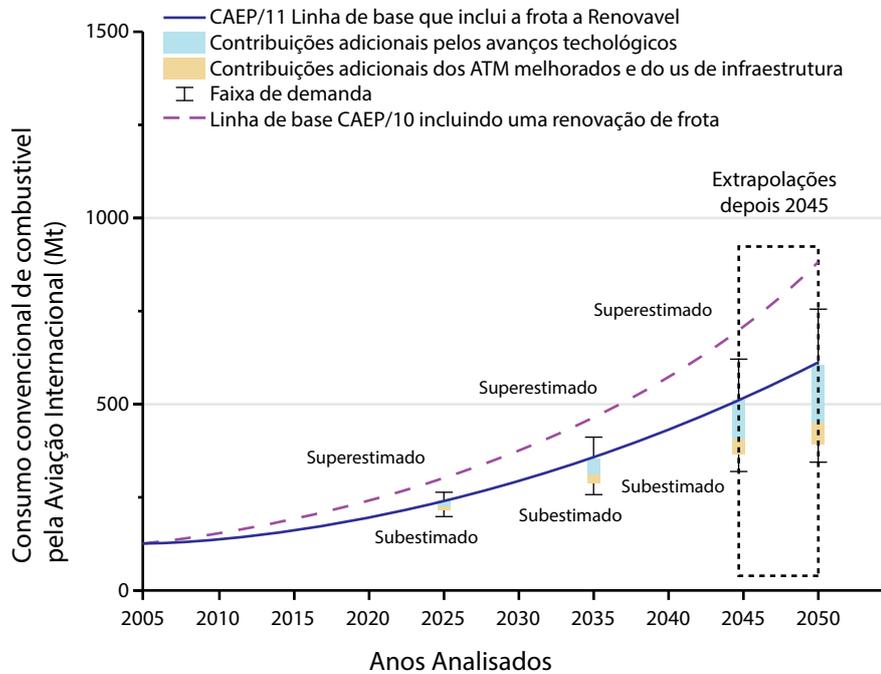
**Figura 2.** Emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> a partir de voos internacionais entre 2005 e 2050



A linha pontilhada na região da contribuição tecnológica representa o funcionamento com aeronaves de baixa de tecnologia

Fonte: ICAO, 2019.

**Figura 3.** Detalhe da Emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> a partir de voos internacionais entre 2005 e 2050



Nota: O modelo apresenta apenas o combustível queimado com base numa demanda principal e as suas variações estão de acordo com as previsões de receitas segundo, também, a demanda principal

Fonte: ICAO, 2019

Os valores absolutos mostram uma emissão de até 650 milhões de toneladas de e 2,5 Mt geradas para o ano de 2020, sendo que, no cenário sem quaisquer contribuições tecnológicas, esse número passaria de 1.500 Mt e 7,5 Mt no ano 2045, podendo ser extrapolado à quase 2.000 Mt, emitidas em 2050. Os aumentos, devidos às previsões de crescimento, fariam que as emissões de , por exemplo, variem em até 612 Mt para o ano de 2050 (ICAO, 2019). Ainda que esse contexto corresponda a apenas 2% das emissões, ele geraria aumento em preços de combustíveis e maior pressão por parte de organismos ambientais pelo controle de emissões por meio de tarifações às companhias aéreas de acordo com a emissão de carbono de suas frotas (CANTARELLA, *et al.*, 2015; CREMONEZ, *et al.*, 2015; PRUSSI, *et al.*, 2019).

Recentemente, os cenários simulados mostram uma substituição de até 2,6% no uso de querosene convencional e, conseqüentemente, a redução de 1,2% na emissão de gases estufa. Em um cenário em que apenas o combustível alternativo é empregado em toda frota, dentro das situações descritas pela Tabela 1, viu-se que a redução na emissão de atingiu 19%. Caso se cogitasse uma substituição definitiva sem quaisquer estágios intermediários, de modo a seguir a hachura azul indicada na Figura 3, seriam necessárias a construção de 295 novas grandes refinarias por ano a um custo anual entre US\$29,0 bi e US\$115,0 bi.

Em todos os cenários considerados, a condição é a alta produtividade de matéria-prima e conseqüente disponibilidade de terras para cultivo, além de se estabelecerem parâmetros melhores de projetos que visassem melhoria na conversão do querosene no motor. Variáveis externas ao processo, como a adesão ao mercado, isto é, considerando que a adesão ao novo tipo de combustível já estivesse consolidada. Em última análise, é possível suprir em 100% toda a demanda prevista de uso de bioquerosene no ano de 2050 com reduções de até 63% na emissão de gases estufa, por meio de priorização de culturas consolidadas como precursoras de bioquerosene – amiláceas, açucaradas, lignocelulósicas, gorduras, óleos e resíduos florestais (ICAO, 2019; CARVALHO, *et al.*, 2019; MENG, *et al.*, 2019; IRENA, 2017; CREMONEZ, *et al.*, 2015)

No Brasil, de acordo com a EPE (2021), a atividade do transporte de passageiros apresentou um crescimento de 5,6% a.a., quase triplicando, entre 2000 e 2019. No mesmo período, a demanda de QAV aumentou 2,2% a.a. e ocorreu especialmente devido à elevação da atividade aérea, embora a uma taxa menor que o crescimento da atividade. Esse descompasso foi devido ao sucateamento das aeronaves antigas, e também pela sua maior ocupação.

## 2.2. Especificação e requisitos para combustíveis de aviação

Os requisitos para especificação de combustível, qualidade, padrões e segurança para combustível de aviação são particularmente rigorosos. O querosene de aviação é normalmente destilado do petróleo bruto entre a faixa de ponto de ebulição de 150 °C e 300 °C, compreendendo moléculas de hidrocarboneto C8 a C16. O fluxo de destilado passa por processamento adicional para remover contaminantes, antes de ser misturado com outros fluxos de alta octanagem e aditivos para atender às especificações de desempenho de combustível de aviação. O rendimento do querosene de aviação depende, em grande parte, da qualidade e da composição da matéria-prima do petróleo bruto empregada no refino de petróleo e da demanda competitiva por outros produtos no mercado. O combustível de aviação pode ser categorizado em combustíveis para aviões comerciais e militares. O combustível de aviação mais comumente usado na aviação comercial é o tipo querosene (C8-C16), Jet A e Jet A-1, enquanto JP-8 é usado principalmente na aviação militar. O Jet B do tipo nafta, gasolina (C5-C15), é menos comum em comparação com os combustíveis para aviação do tipo querosene.

A Tabela 2 resume as especificações do combustível de aviação para Jet A / Jet A-1, JP-8 e Jet B. A principal diferença entre o combustível Jet A e Jet A-1 é o ponto de congelamento. As especificações para ASTM D1655 e DEF STAN 91-91 são quase idênticas, exceto o nível de acidez. O combustível de aviação deve atender aos requisitos descritos na ASTM D7566 (GUTIÉRRES-ATONIO *et al.*, 2018) e deve ser misturado com combustível de aviação convencional de pelo menos 50% em volume para cumprir as normas. O biocombustível misturado que atende a todos os requisitos da ASTM D7566 também será reconhecido pela ASTM D1655, bem como pelo DEF STAN 91-91.

**Tabela 2.** Especificação do querosene e gasolina de aviação [NG *et al.*, 2021]

Característica	Querosene			Nafta	
	Jet A e/ou Jet A-1		JP-8	Jet B	
Especificação	ASTM D1655	ASTM D7566	DEF STAN 91-91	MIL-DTL-83133 J	ASTM D6615
Acidez, max (mg KOH g <sup>-1</sup> )	0.1	0.1	0.015	0.015	–
Aromáticos, max (vol%)	25	25	25	25	25
Enxofre, max (wt%)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Temperatura de Destilação (°C)</i>					
10% recuperação, max	205	205	205	205	–
20% recuperação	–	–	–	–	90 (min) - 145 (max)
50% recuperação	–	–	–	–	110 (min) - 190 (max)
90% recuperação	–	–	–	–	245
Ponto de ebulição final, max	300	300	300	300	–
Ponto de centelha, min (°C)	38	38	38	38	–
Ponto de congelamento, max (°C)	-40 (Jet A); -47 (Jet A-1)	-40 (Jet A); -47 (Jet A-1)	-47	-47	-50
Densidade at 15 °C (kg m <sup>-3</sup> )	775-840	775-840	775-840	775-840	751-802
Viscosidade at -20 °C, max (cSt or mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	8	8	8	8	–
Calor líquido de combustão, min (MJ kg <sup>-1</sup> )	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8



### 3. TECNOLOGIAS PARA FABRICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO

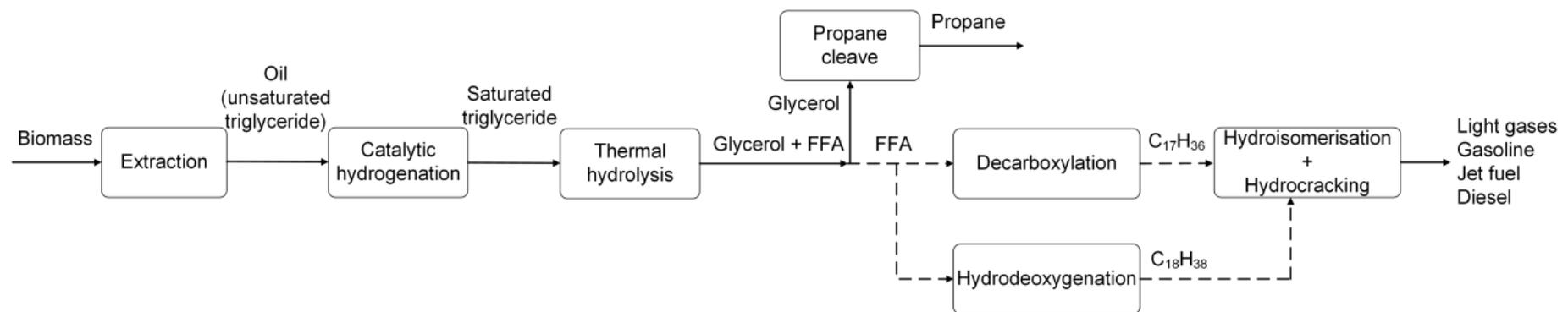
Atualmente, e nas próximas décadas, o SAF está/será representado por combustíveis *drop-in* que são compatíveis com os atuais motores de aeronaves e infraestruturas aeroportuárias, ou seja, nenhuma modificação mecânica é necessária.

No Brasil, há cinco tipos de bioquerosene aprovados pela ANP. Segundo Souza (2019), apenas o bioquerosene de aviação de iso-parafinas sintetizadas (SIP) é produzido, ainda em escala de demonstração, pela empresa Amyris do Brasil em Brotas, no estado de São Paulo, subsidiária da Amyris Biotechnologies, com sede na Califórnia. A matéria-prima utilizada no processo é a cana-de-açúcar (AMYRIS, 2016).

Esse estudo concentra-se nas tecnologias/rotas de: hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA); gaseificação seguida da Síntese Fischer-Tropsch (FT), comumente chamada de BTL (FT-SPK) e álcool à SAF (ATJ).

### 3.1. Processo HEFA para produção de SAF

**Figura 4.** Processo HEFA para produção de bioquerosene de aviação (+ outros *drop-in fuels*) de biomassa oleaginosa



Fonte: NG *et al.*, 2021.

O processo HEFA utiliza óleos vegetais, gorduras animais, resíduos de cozinha óleo, óleo de pirólise e também óleo de algas em *hydroprocessing* para formular QAv. Normalmente, 1,2 t de óleo vegetal são necessárias para produzir 1 t de combustível HEFA. O processo, mostrado na Figura 4, envolve uma série de reações para extrair ácidos graxos livres (FFA) da biomassa, seguidas por reações de isomerização (rearranjo de moléculas) e hidrocraqueamento (redução do comprimento da cadeia de carbono das moléculas) para obter SAF que atenda às especificações de combustível de aviação.

O processo começa com a extração de óleo contido na biomassa. O óleo extraído é rico em ácidos graxos e glicerídeos insaturados (que contêm em ligações duplas). Como o SAF não pode ser insaturado, a quebra das ligações duplas é feita por meio da reação de hidrogenação catalítica, formando triglicerídeos saturados. A hidrogenação é realizada a uma pressão de 0,7 a 4 bar com catalisadores de níquel a 150–220°C, enquanto a temperatura mais baixa, entre 80 a 120°C, também é possível se os catalisadores de paládio e platina forem usados (KASIKAM-PHAIBOON e KHUNJAN, 2018). Os triglicerídeos podem ser quebrados em uma molécula de glicerol e três moléculas de FFA por meio de reações de hidrólise térmica, e o glicerol é posteriormente convertido em propano pela adição de hidrogênio.

O conteúdo de oxigênio no FFA é removido por meio da reação de hidrodessoxigenação (HDO) ou descarboxilação (DCO), produzindo octadecano ( $C_{18}H_{38}$ ) e heptadecano ( $C_{17}H_{36}$ ), respectivamente. A principal diferença entre essas duas reações é que a primeira requer 9 mol de hidrogênio e gera água como subproduto, enquanto a última gera dióxido de carbono. Grande quantidade de consumo de hidrogênio em alta pressão é necessária para a reação de hidrodessoxigenação (HDO). O processo é normalmente realizado a temperaturas de 300 a 600°C, acompanhado por um catalisador heterogêneo, como NiMo sulfurado e CoMo suportado em alumina. Além do HDO, a Descarboxilação ou Decarbonilação (DCO) é outra opção de processamento para remover o conteúdo de oxigênio no FFA, pelo qual o  $CO_2$  ou CO é rejeitado em vez de  $H_2O$  como no HDO. A vantagem do DCO é que ele ocorre favoravelmente sob pressão mais baixa e, portanto, menor consumo de hidrogênio.

Parafinas de cadeia reta ( $C_{18}H_{38}$  de HDO ou  $C_{17}H_{36}$  de DCO) são produzidas; no entanto, os produtos resultantes não atendem às especificações para aplicação de combustível de aviação, como ponto de fulgor, ponto de congelamento e ponto de nuvem [43-45]. Portanto, as parafinas de cadeia linear são posteriormente processadas na reação de hidroisomerização para formar parafinas de cadeia ramificada em vista da redução do ponto de congelamento para atender ao padrão de combustível de aviação (LIU, MURATA e INABA, 2019 ; MENG *et al.* 2019). A reação de hidrocraqueamento, que ocorre sequencialmente ou simultaneamente com a hidroisomerização, também está envolvida para quebrar e saturar os hidrocarbonetos para formar querosene parafínico sintético (SPK), consistindo de comprimento da cadeia de carbono de C9 a C15. UOP, Neste Oil, AltAir e Dynamic Fuels estão entre as empresas que produzem combustível HEFA.

Recentemente, o Grupo de Processos Catalíticos e Termoquímicos (GPCATT) da UFU desenvolveu rota/tecnologia alternativa a HEFA, partindo da hidrólise direta de óleos vegetais; ou melhor, de lipídeos, crus, sem necessidade de processos de neutralização. Nas condições reacionais usadas na hidrólise e com catalisador apropriado, a glicerina reage com a água, reação APR, formando  $H_2$  *in situ*. Este posteriormente transforma os ácidos graxos insaturados em saturados que podem ser descarboxilados ou decarbonilizados (DCO) em sequência, com outro catalisador, porém na mesma condição, formando gasolina, SAF e *diesel* verde.

O principal produto derivado do processo HEFA é o diesel renovável e, em condições normais, condições de processamento, apenas cerca de 15% do rendimento líquido total consiste em combustível de aviação, a menos que o craqueamento ocorra para gerar hidrocarbonetos menores. Existem diversos incentivos políticos significativos para a produção de *diesel* renovável, fazendo que a maioria dos produtores de HEFA venda todo o seu produto como *diesel* renovável, sem ser a fração do jato. A necessidade de infraestrutura e processamento adicionais significa que a produção de SAF acaba se tornando muito mais cara do que a produção de *diesel* renovável. Como é mais fácil e barato produzir *diesel* renovável, a produção desses dois fluxos baseados no processo HEFA é mais competitiva em termos econômicos (IEA, 2021).

Ainda assim, de acordo com Souza (2019), o processo HEFA é a melhor opção a curto prazo devido ao fato de a tecnologia já estar bem desenvolvida em escala comercial, ser um processo mais simples e apresentar menores custos.

Em IRENA (2019), a tecnologia HEFA apresenta TRL (*technology readiness level*)<sup>5</sup> entre 6 e 9. Bauen *et al.* (2020) apontam que o TRL para HEFA já estaria em estágio comercial (TRL 8), sendo a tecnologia mais madura atualmente. Segundo esses autores, a maior limitação para expansão dessa tecnologia estaria na disponibilidade dos insumos. Segundo os autores, já existe planta HEFA planejada para 1.653 toneladas de SAF por ano, a maior escala entre todas as tecnologias.

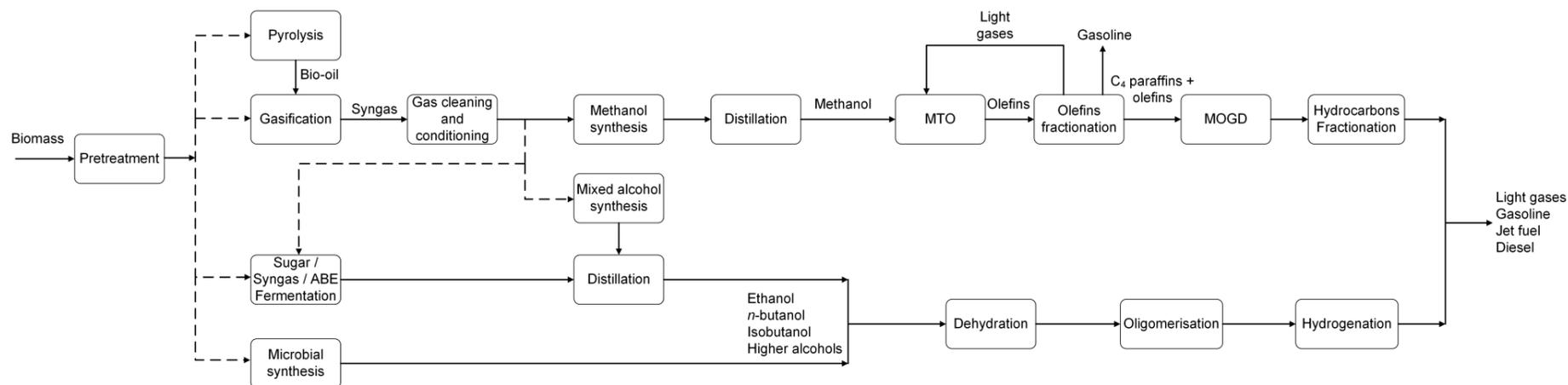
De acordo com IRENA (2019), na rota HEFA, os principais projetos-piloto são: Altair e Neste. Existe ainda o projeto da Omega Green. A biorrefinaria Omega Green será construída no Paraguai e terá capacidade total de produção de 20 mil barris por dia, produzindo uma mistura de combustíveis como HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado, também conhecido como *Diesel* Renovável), SPK (Querosene Parafínico Sintético) e Green Naphtha (usado na indústria química para fazer plástico verde, entre outros produtos).

---

5. Os níveis de prontidão de tecnologia são um método para estimar a maturidade das tecnologias durante a fase de aquisição de um programa, desenvolvido na NASA durante os anos 1970. O uso de TRLs permite discussões uniformes e consistentes sobre maturidade técnica em diferentes tipos de tecnologia. A escala vai de 1 a 9. De modo geral, pode-se definir que: ideação (TRL 1), concepção (TRL 2), prova de conceito de função crítica (TRL 3), otimização (TRL 4), prototipagem, (TRL 5) e escalonamento (TRL 6), demonstração em ambiente de produção, (TRL/MRL 7), produção (TRL 8), produção comercial (TRL 9).

### 3.2. Processo Álcool para produção de SAF (ATJ)

**Figura 5.** Produção de álcoois da biomassa e rotas ATJ. MTO: Metanol-To-Olefinas; MOGD: Mobil's Olefina-To-Gasolina/Destilados; ABE: Acetona-Butanol-Etanol



Fonte: NG *et al.*, 2021.

O processo ATJ envolve a conversão de álcool de cadeia mais curta (por exemplo, metanol, etanol, butanol) em hidrocarbonetos de cadeia mais longa (alcano C8-C16).

Existem duas rotas principais de processamento para a produção de combustível de aviação a partir do álcool: (1) metanol-para-olefinas (MTO) seguido por olefina-para-gasolina / destilado da Mobil (MOGD); (2) processamento de etanol / isobutanol / butanol / outros álcoois por desidratação, oligomerização e hidrogenação. O álcool pode ser produzido a partir da biomassa por termoquímica, como gaseificação e pirólise ou rotas bioquímicas, como fermentação. Tecnologia emergente, como síntese microbiana na produção de álcool, também está se tornando atraente. Um diagrama esquemático conceitual que mostra essas várias estratégias de processamento da produção de combustível para aviação a partir de biomassa é fornecido na Figura 5.

O metanol pode ser convertido em combustível de aviação por MTO seguido pelo MOGD, como mostrado na Figura 5, cujas tecnologias foram desenvolvidas pela Exxon-Mobil. UOP / Hydro também possui uma licença para sua tecnologia MTO. O metanol é enviado para o reator de leito fluidizado MTO que é operado a 482°C e 1 bar usando catalisador ZSM-5, e os produtos gerados são metano (1,4% em peso), parafinas C2-C4 (6,5% em peso), olefinas C2-C4 (56,4% em peso) e gasolina C5-C11 (35,7% em peso). Essa mistura de produtos da unidade MTO é fracionada na unidade de fracionamento de olefinas para obtenção de gases leves, gasolina e olefinas.

Gases leves são reciclados para a unidade MTO para aumentar o rendimento do produto. A gasolina é separada da coluna de fracionamento como único produto. As olefinas são posteriormente processadas na unidade MOGD, um reator de leito fixo operando a 400°C e 1 bar com a presença do catalisador ZSM-5. Os produtos da unidade MOGD contêm gases leves (3% em peso), gasolina (15% em peso) e destilado (82% em peso). A unidade de fracionamento MOGD fornece as frações de gases leves (C1-C4), gasolina (C5-C11), querosene / querosene (C11-C13) e diesel (C14 +) como produtos finais do MTO e MOGD integrados.

A transformação de álcoois em combustível de aviação também pode ser realizada por meio de desidratação, oligomerização e hidrogenação, como mostrado na Figura 5. Os álcoois são desidratados primeiro para formar alcenos a pressão <14 bar e temperatura de 288–343°C. Catalisadores ácidos, como catalisador à base de alumina, zeólitas ZSM-5, zeólitas do tipo  $\gamma$  e resinas ácidas Amberlyst podem ser empregados na reação de desidratação. A próxima etapa é o processo de oligomerização onde moléculas de alceno são combinadas para formar hidrocarbonetos de cadeia mais longa, como dímeros, trímeros e tetrâmeros, ocorrendo a 100°C usando catalisador Amberlyst-35 ou Nafion. Os dímeros são geralmente reciclados para obter maior rendimento de trímeros e tetrâmeros que fornecem olefinas C12-C16 para o combustível de aviação. A última etapa, a hidrogenação, envolve a saturação de olefinas para produzir querosene parafínico com fornecimento externo de hidrogênio e catalisador PtO<sub>2</sub>.

Segundo Bauen *et al.* (2020), as rotas ATJ são atraentes, pois podem converter vários tipos de álcoois (como etanol, metanol e isobutanol) a partir de ampla gama de fontes em combustível de aviação, bem como outros hidrocarbonetos. Adicionalmente, a rota AtJ oferece flexibilidade logística porque a planta de catálise de álcool não precisa ser colocada com a produção de álcool, e os álcoois podem ser convenientemente transportados e armazenados. A principal fraqueza desta via pode ser a seletividade da produção de combustível de aviação.

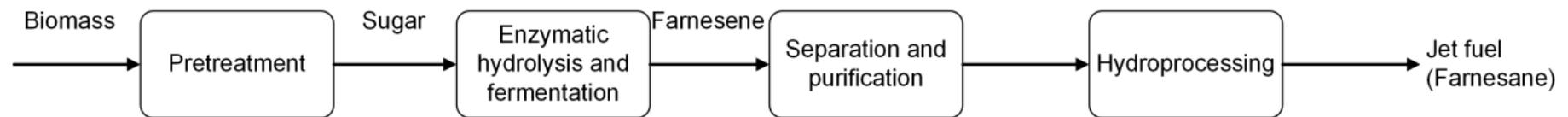
De acordo com IRENA (2019), na rota ATJ os principais projetos piloto são: Raízen (cana-de-açúcar 1G / 2G para etanol), Gevo (milho para butanol), Poet (milho para etanol), Clariant (milho 1G e palha 2G para etanol), Lanzatech (resíduos sólidos urbanos para etanol), Biogy (síntese catalítica de álcoois) e PNNL (desidratação/oligomerização/hidrogenação).

Em 2014, a Lufthansa assinou um acordo com a Gevo para avaliar e testar seu combustível ATJ para uso na aviação comercial. Isso mostra o crescente interesse da ATJ no mercado de combustível para aviões.

De acordo com IRENA (2019), a maturidade dessa rota estaria em TRL 4-7. Bauen *et al.* (2020) sugerem TRL entre 6-7. A maior planta planejada tem escala de 82 mil toneladas de SAF/ano.

### 3.3. Hidroprocessamento de Açúcares Fermentados (SIP-HFS)

**Figura 6.** Hidroprocessamento de açúcares fermentados para bioquerosene de aviação (SAF)



Fonte: NG *et al.*, 2021

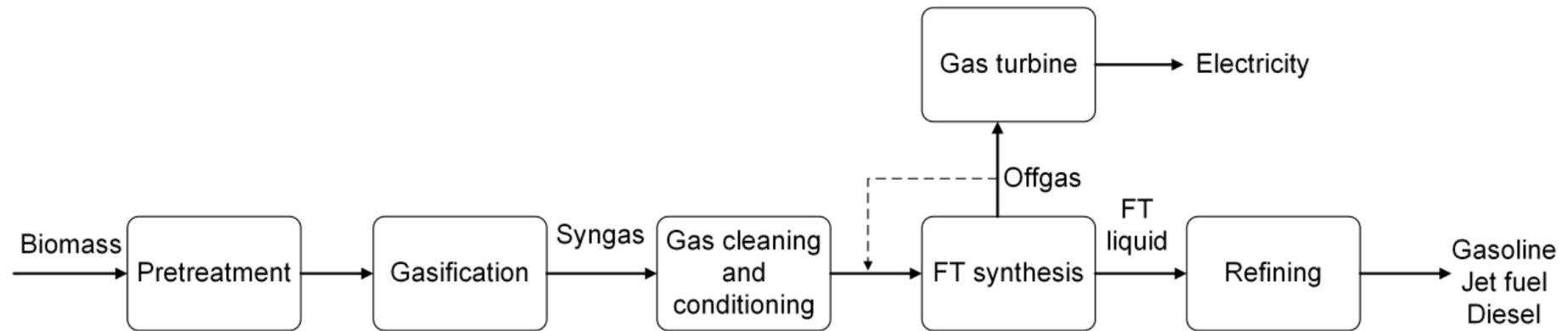
A Figura 6 mostra a via de conversão biológica de biomassa em iso-parafinas sintéticas (SIP) (também conhecidas como “açúcares diretos para hidrocarboneto” (DSHC)) combustível de biojato. O processo envolve (1) uma etapa de pré-tratamento para separar os açúcares da lignina; seguido por (2) conversão de açúcares em farneseno ( $C_{15}H_{24}$ ) por meio de hidrólise enzimática e fermentação; (3) separação sólido-líquido e recuperação de farneseno; e finalmente (4) hidroprocessamento para farnesano ( $C_{15}H_{32}$ ) que é o combustível biojet.

Essa tecnologia, comercializada pela Amyris e Total, usa uma cepa de *S. cerevisiae* (PE-2) no processo de fermentação para produzir farneseno pela via do mevalonato. O rendimento do farneseno pode chegar a 16,8% com uma produtividade de  $16,9 \text{ g/L}^{-1}\text{d}$  com recuperação de 95% após a separação. Este combustível de hidrocarboneto pode ser misturado em até 10% com combustível de aviação convencional e foi certificado pela ASTM em 2014. A AMYRIS está atualmente desenvolvendo um DSHC integrado com a aspiração de atingir 2 \$/L de farneseno por meio do projeto MegaBio.

De acordo com IRENA (2019), a maturidade dessa rota estaria em TRL 5-7. Bauen *et al.* (2020) concordam com TRL entre 5-7. A maior planta planejada tem escala de 81 mil toneladas de SAF/ano.

### 3.4. Síntese de Fischer-Tropsch via Gaseificação da Biomassa (FT-SPK)

**Figura 7.** Processos integrados de gasificação, FT, refino/hidroprocessamento para a produção de gasolina, querosene de aviação, *diesel* e eletricidade



Fonte: NG *et al.*, 2021.

A Síntese de Fischer-Tropsch pode ser acoplada a vários processos de conversão de biomassa, como gaseificação, pirólise e liquefação, para produzir combustível sintético. Esta revisão se concentrará na rota de gaseificação-FT, uma vez que é a rota comercial e certificada para a produção de combustível de aviação. Uma revisão detalhada de biomassa para tecnologias de produção de combustível líquido FT pode ser encontrada em Ail e Dasappa (2016).

A gaseificação converte materiais carbonosos, como biomassa em gás de síntese sob alta temperatura (ou seja, normalmente acima de 800°C). Gás de Síntese (Syngas) contém principalmente CO e H<sub>2</sub>, que são blocos de construção importantes para a síntese de líquido FT. A integração da gaseificação de biomassa com a síntese e refino FT, mostrada na Figura 7, permite a produção de combustível de aviação mais limpo e de alta qualidade. Normalmente, 5-6 t de biomassa pode dar 1 t de combustível líquido FT.

A qualidade do syngas é crítica para a síntese FT e mais rigorosa do que para outras aplicações. Consequentemente, a limpeza de syngas é um passo fundamental para garantir a produção eficiente de combustíveis líquidos. A escolha da tecnologia de gaseificação pode reduzir a extensão da limpeza necessária, mas deverá ser equilibrada com o seu custo. A gaseificação à plasma produz o gás de síntese mais limpo e possui maior flexibilidade nas especificações da matéria-prima. No entanto, tem o maior custo operacional. Em contrapartida, tecnologias mais simples e baratas de gaseificação produzem um gás de síntese de qualidade inferior requerendo processos de limpeza mais extensa. Deve-se notar que a produção de gás de síntese a partir do gás natural, que exige limpeza limitada de gás de síntese, pode contribuir com mais de 50% do custo de investimento, que deverá aumentar quando são utilizadas matérias-primas como biomassa. Embora as tecnologias de limpeza de syngas não apresentem desafios técnicos significativos, podem representar uma parcela importante nos investimentos. Encontrar um equilíbrio em termos de qualidade e custo para cada etapa é essencial (IEA, 2021).

A síntese FT produz hidrocarbonetos com vários comprimentos de cadeia de carbono, incluindo hidrocarbonetos leves (C1-C4) que são gases leves e podem ser usados diretamente na turbina a gás para gerar calor e energia ou refinados em GLP; nafta (C5-C10) e querosene (C10-C16), que podem ser misturados à gasolina e ao combustível de aviação; destilado (C14-C20) que pode ser refinado em combustível *diesel*; e ceras (C20+) que podem ser hidro-craqueadas para formar *diesel*.

Uma das vantagens relevantes do líquido FT é que ele é completamente isento de enxofre e contém uma quantidade mínima de aromáticos em comparação com a gasolina e o *diesel*, o que, conseqüentemente, causa menos poluição ao meio ambiente. Este fator, junto com a necessidade de evitar o envenenamento do catalisador, por sua vez, implica que a exigência da alimentação para a síntese de FT é mais rigorosa. Portanto, o gás de síntese deve ser limpo para estar livre de sólidos, alcatrões, nitrogênio e compostos contendo enxofre, bem como outros contaminantes que podem causar incrustação no equipamento. A limpeza do Syngas ainda permanece uma questão importante para o sistema integrado de gaseificação de biomassa com síntese de FT e isso requer mais desenvolvimento para garantir um padrão de limpeza satisfatório da alimentação de FT ao mesmo tempo em que se obtém redução de custo significativa.

A síntese de FT tem operado comercialmente principalmente pela Shell (Bintulu na Malásia; e Qatar) usando gás de síntese à base de gás natural e pela Sasol (África do Sul) usando gás de síntese à base de carvão. A maioria das tecnologias de gaseificação de biomassa-FT ainda es-

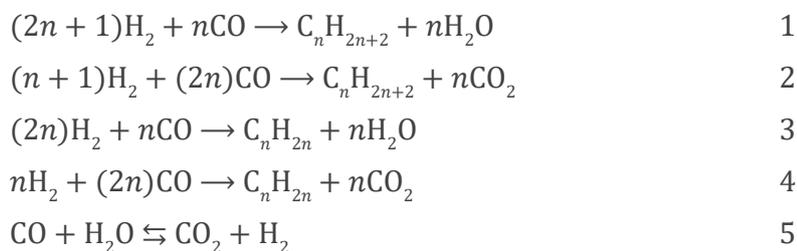
tão em fase de demonstração, como o projeto BioTfuel da Total (França), Velocys / Red Rock Biofuels (Áustria e EUA) e o projeto Syndi`ese-BtS da CEA / Air Liquide (França). Podemos também mencionar o projeto BioValue, em curso dentro da chamada H2020.

A primeira planta comercial de gaseificação de biomassa e FT, a Sierra BioFuels Plant, foi construída pela Fulcrum Bioenergy em Nevada, EUA (com operação prevista para 2020), e é capaz de produzir 42 ML/y (11 Mgal/y) de óleo cru sintético de 175 kt/y de matéria-prima de resíduos sólidos urbanos (RSU). IRENA (2019) aponta que os principais projetos-piloto nessa rota são: Red Rock (resíduos de madeira) e Fulcro (resíduos sólidos urbanos).

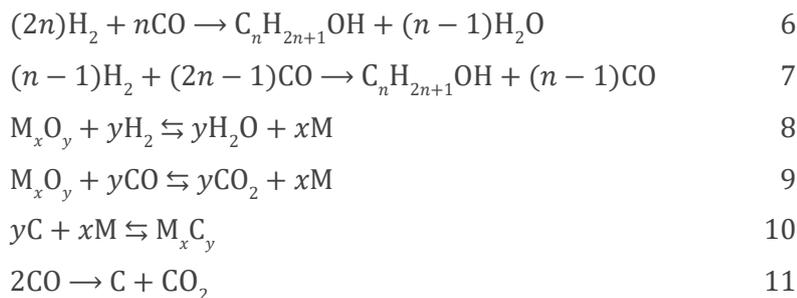
Ainda de acordo com IRENA (2019), a maturidade da rota por FT estaria em TRL 7-8. Bauen *et al.* (2020) avaliam essa rota como TRL 6. Segundo os autores, ainda que seja uma rota comercialmente madura para carvão ou *gas to liquids*, a rota de base biológica só agora está se aproximando do TRL 7-8. A maior planta planejada tem escala de 225 mil toneladas de SAF/ano. Os desafios enfrentados por esta rota são a viabilidade econômica da redução de escalas adequadas para biomassa e sistemas baseados em resíduos e a concepção de processos e catalisadores mais adequados para pequena escala, incluindo seletividade de catalisador e a eficiência geral dos sistemas integrados.

### 3.5. Síntese de Fischer-Tropsch dentro da rota BTL (via gaseificação da biomassa)

A FT é a principal rota de produção de SAF. A produção de combustíveis por FT envolve uma série de reações químicas que produzem uma grande variedade de hidrocarbonetos desde alcanos, conforme as equações (1 e 2), a óleos, conforme as equações (3 e 4) e, também, uma reação de *shift* dada pela equação (5) que são consideradas como principais (WANG, *et al.*, 2016).



Ainda se observam reações que competem com as anteriores para formação de álcoois conforme as equações (6 e 7), processos de redução e oxidação catalítica de acordo com as equações (8 e 9), formação de carbetos metálicos de acordo com a equação (10) e a reação de Bourdard segundo a equação (11).





(Syngas) que alimentará o reator de FT. O gaseificador opera com misturas de 95% de e vapor e um combustor acoplado para a produção de energia e a reação pode se dar tanto a baixa temperatura (500-800°C) ou mesmo a altas temperatura (até 1300°C).

Os dois processos de gaseificação são atrativos. O de baixa temperatura pelos menores custos de capital e boa transferência de energia observada em gaseificadores de leito fluidizado, enquanto o processo à alta temperatura é atrativo pela alta conversão de carbono, o baixo conteúdo de metano e hidrocarbonetos de cadeias longas (FENGQUI, *et al.*, 2011). Em termos de mistura, o oxigênio pode ser alimentado puro, com ar ou mesmo uma mistura de 50% com ar e, preferencialmente, sob pressões de até 25 bar. Por fim, a configuração de leito circulante tem sido a mais adotada por causa da produtividade alcançada e compatibilidade das baixas pressões de alimentação (HAMELINCK, *et al.*, 2004). O Syngas produzido contém maiores impurezas do que os gases utilizados no processo GTL e deve ser submetido à purificação antes de alimentar o reator.

Ao sair do gaseificador, o Syngas contém: compostos orgânicos não desejados classificados como BTX (benzeno, toluenos e xilenos), TARS (hidrocarbonetos de cadeia longa) e hidrocarbonetos leves; impurezas inorgânicas; compostos inertes ao processo; metais volatilizados, pó e fuligem. Os hidrocarbonetos de cadeia longa são produzidos em concentrações de 10 g/m<sup>3</sup> (1-5% da biomassa alimentada), incrustam as paredes das tubulações a jusante do processo e incrustam os poros dos catalisadores por causa da condensação. Esses compostos poderiam apenas ser removidos ou mesmo quebrados em cadeias menores e serem fontes de e . Os hidrocarbonetos leves, por sua vez, poderiam ser fonte de energia no processo e poderiam ser obtidos por reforma do gás de síntese. Os BTX, que contabilizam 0,5% (vol/vol) do gás de síntese, entopem rapidamente os filtros de carvão ativado devendo ser removidos com prioridade. As impurezas inorgânicas são causadoras de corrosões de equipamentos, principalmente se condensados devido a processos de aumento de pressão ou redução de temperatura.

Por fim, os inertes atuam inibindo a produção de C5+. Diante disso, considera-se a opção de limpeza a seco ou a úmido dos gases complementada por um processo de reforma do Syngas (HAMELINCK, *et al.*, 2004). Na limpeza úmida, já ao sair do gaseificador, o gás de síntese passa por uma etapa de remoção de sólidos por filtragem ou por uma torre de resfriamento utilizando água para remoção (FENGQUI, *et al.*, 2011) que o faz decair a 40°C. A parte seguinte é a de remoção de TARS, BTX por meio de uma coluna de absorção que utiliza óleo para tal. Nela, os compostos indesejáveis saem pela parte de baixo e o óleo utilizado é recuperado em uma segunda coluna de dessorção e reutilizado. O Syngas, livre desses compostos indesejados, pode ser opcionalmente submetido a uma etapa de reforma cujos objetivos são a geração de energia segundo a equação (1) da formação de metano e o ajuste da relação , segundo a equação (5) de *water-gas shift*. Por fim, o , aminas e bases , ácidos e são removidos por sequência por operações de dessorção e absorção (TIJMENSEN, *et al.*, 2002; HAMELINCK, *et al.*, 2004; DONJING, *et al.*, 2020; OLUMIDE, *et al.*, 2017; LEE, *et al.*, 2020; SHAH, *et al.*, 2017; NOH, *et al.*, 2018; ANDRIANI, *et al.*, 2014; HE, *et al.*, 2018).

No processo realizado à seco, as temperaturas nas operações unitárias são maiores em relação àquelas do processo úmido e, assim como no processo úmido, o gás alimentado deve ser livre do mesmo contaminante.

A primeira etapa do processo de limpeza a seco é o craqueamento dos TARS provenientes do gaseificador, de modo gerar compostos menores que servirão como fonte de energia para o

processo em si. Passa-se à etapa de reforma (tanto a vapor como a seco), porém a remoção dos compostos inorgânicos se dá por reações em leitos catalisados. O pode ser removido do leito utilizando-se de metais suportados em estruturas amínicas ou mesmo em leitos de carvão ativado (ANDRIANI, *et al.*, 2014; NIYA, *et al.*, 2016; KASIKAMPHAIBOON, *et al.*, 2018; MARCOBERARDINO, *et al.*, 2018; GUTIÉRREZ, *et al.*, 2017; YANG, *et al.*, 2011; HAHN, *et al.*, 2015). Os compostos sulfídricos são removidos por reações de hidrólise em presença e catalisadores metálicos (Zn, Cu), ou zeólitas ou ainda por sistemas de membranas, assim como os compostos ácidos (MICOLI, *et al.*, 2013). A operação pode ser seguida à de remoção de ou acontecer simultaneamente a essa (LEE, *et al.*, 2020; ZHAO, *et al.*, 2013; LIU, *et al.*, 2019; VAZIRI, *et al.*, 2019; SHAH, *et al.*, 2017; FRILUND, *et al.*, 2020; FRILUND, *et al.*, 2020).

Atingidas as especificações (Tabela 3), o gás de síntese é enviado à unidade de reação comumente composta de um reator (leito fixo, lama agitado, recirculante etc.) e uma etapa da hidrocraqueamento após. Pode-se ainda ocorrer sistemas de cogeração de hidrogênio por meio de unidade de absorção por *swinging* de pressão, por exemplo.

**Tabela 3.** Níveis de contaminantes requeridos para utilização do gás de síntese no processo de FT

Contaminante	Fase Gasosa
Poeiras, chars e cinzas	0 ppb
Metais alcalinos	< 10 ppb
TARS	Abaixo do ponto de orvalho à pressão do reator de FT, causa envenenamento do catalisador. Portanto, 1 ppm (V)
BTX	Abaixo do ponto de orvalho à pressão do reator de FT
Haletos inorgânicos (HCl, HBr, HF)	< 10 ppb
Compostos nitrogenados	< 1 ppm V < 20 ppb total de N
Compostos sulfurados	< 1 ppm V < 10 ppb total de S

Fonte: (HAMELINCK, *et al.*, 2004)

O reator opera entre temperaturas de 230-260°C e pressões entre 5 e 10 bar em leito catalisado. De acordo com o descrito pelas equações (1-11), dois tipos de correntes, uma contendo hidrocarbonetos leves (C1-C4) e outra contendo as ceras e frações mais pesadas (C5-C20), saem de R2 (Figura 8), porém restringe-se, de acordo com a quantidade de carbono, que compostos desejáveis são os que possuem mais do que 10 átomos na estrutura, ou seja, o metano e compostos com tamanhos próximos devem ser evitados ou, ainda que produzidos, serem submetidos a etapas posteriores (Figura 8) de processamento ou mesmo retornados à alimentação do reator. A corrente contendo os hidrocarbonetos maiores alimenta diretamente a unidade de hidrotreatamento (R3). Essa etapa consiste em três subestágios: hidrodessoxigenação, hidrocraqueamento, hidroisomerização e separação. Ao final da última etapa, os hidrocarbonetos já desisomerizados e quebrados são encaminhados ao processo de destilação para obtenção do QAV (GUTIÉRRES-ATONIO, *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o estudo de catalisadores seria importante de modo a suprimir essas etapas e ainda retirar de cena a etapa R3 e, assim, os produtos a partir do reator R2 já poderiam ser, em maioria, encaminhados à unidade destiladora. Por vezes, a baixa eficiência observada na planta de produção é atribuída a essa etapa de hidrocraqueamento, portanto o emprego de catalisadores adequados reduziria sua necessidade (MENG, *et al.*, 2019).

Os catalisadores mais comuns para a FT são os metais Co, Ru e Fe que pertencem grupo VIII na tabela periódica. Os catalisadores de cobalto promovem maior rendimento e possuem tempo de vida maior se comparados aos de ferro e produzem alcanos predominantemente lineares. O preparo, entretanto, do cobalto exige maior critério, pois deve-se fazê-lo em suporte que promova adequada dispersão, visto que sua composição neles é algo como 5% e 30% (m/m). Deve-se, ainda, considerar para os sistemas de cobalto uma otimização entre custo e atividade. O Rutênio (Ru), apesar de seu alto custo que o limita para aplicações em escala industrial, é considerado o mais ativo dos catalisadores em processos de FT, pois o processo químico pode-se dar a baixas temperaturas, produzindo hidrocarbonetos de alto peso molecular (BALONEK, *et al.*, 2010; KHODAKOV, *et al.*, 2007; DE CASTRO, *et al.*, 2004). A partir daqui dá-se uma atenção ao uso do ferro (Fe) como catalisador. Esse, devido ao baixo custo, é usado mais comumente do que os demais metais, porém o Fe é mais susceptível à desativação por oxidação ou por deposição de coque.

Catalisadores, a base de ferro, promovidos por metais alcalinos e outros metais de transição (Cu, Ru, Zn, Mn), têm sido utilizados industrialmente por muitos anos para a FT (JAGER, *et al.*, 1995). Esses catalisadores, apesar de serem menos ativos e estáveis do que os catalisadores a base de cobalto, são mais seletivos à hidrocarbonetos pesados em faixas de temperaturas de reação e razões de alimentação maiores. Vale ressaltar que estas condições reacionais são mais encontradas quando o gás de síntese é obtido do carvão ou da biomassa. Todavia, catalisadores de ferro são mais susceptíveis à reação de deslocamento d'água (water-gas shift – WGS), que pode ser inibida termodinamicamente com a presença de na carga (DRY, 1996; JIN, *et al.*, 2000).

A maioria dos metais utilizados recentemente para a FT é preparada por técnicas de precipitação. Catalisadores de ferro, todavia, podem ser preparados por meio da coprecipitação ou fundindo-se óxidos, e o uso de suporte também exerce influência forte no desempenho catalítico das fases ativas. Os suportes tradicionalmente usados são óxidos inertes, tais como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , todavia, resultados interessantes têm sido reportados quando se utiliza óxidos redutíveis, tais como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{NiO}$  (KUNIMORI, *et al.*, 1984; SOARES, *et al.*, 1993). Tal efeito foi avaliado em catalisador de ferro (5%, em peso) suportados em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Não se verificou, todavia, a influência do teor desse e das condições reacionais, principalmente, em temperaturas maiores de reação. Nessas condições, observava-se aumento significativo da seletividade à hidrocarbonetos de cadeia longa quando os catalisadores são submetidos, antes da reação de FT, a temperaturas de redução elevadas. Em contrapartida, há uma diminuição da atividade catalítica explicada pela migração de espécies parcialmente reduzidas do suporte para a superfície do metal ativo ou pela interação entre esses dois efeitos. Tal efeito, conhecido como efeito SMSI (*Strong Metal-Support Interaction*), pode ser destruído, parcialmente, durante a reação mediante a presença de água formada no decorrer dessa quando os catalisadores estão suportados em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , predominantemente, quando comparados àqueles suportados em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (CAGNOLI, *et al.*, 2002).

Primeiramente, a síntese de FT foi estudada desenvolvendo-se como consequência o processo e catalisadores a base de cobalto e óxido de nióbio (DE CASTRO, *et al.*, 2004; FABIANO, *et al.*, 2006). Posteriormente, realizou este estudo, porém com o processo em leito fixo de catalisador (DOS SANTOS, *et al.*, 2012). No último estudo, agora feito no PPG-Biocombustíveis, a ação do cobre e do potássio como promotores ao catalisador (SILVA, U., 2019) foi avaliada. Os resultados demonstraram grande potencial que esse sistema tem para o desenvolvimento de sistema catalítico baseado em ferro e óxido de nióbio na produção de hidrocarbonetos em uma faixa seletiva, por exemplo, a do querosene de aviação, sem que haja necessidade de etapas posteriores de hidrocraqueamento e isomerização de ceras (hidrocarbonetos de cadeia longa formada pela FT tradicional).

### 3.6. Inovações no processo de produção de SAF por FT

Várias são as tentativas de novas rotas para produções das cadeias carbônicas desejadas que resultam em sucesso. O processo de produção de destilados intermediários a partir de ceras por meio de FT, por exemplo, as fraciona para obter uma fração leve entre as temperaturas de 350°C e 400°C. Põe-se, então, a fração pesada para ferver sobre a leve. A fração pesada é misturada com uma pequena parte da fração leve. A mistura resultante é hidrotratada na presença de um catalisador apropriado de hidrotratamento. O efluente resultante é hidroisomerizado na presença de um catalisador de metais do grupo VIII e uma zeólita (IZM-2). Ao menos uma porção da fração leve é sujeita ao hidrocraqueamento/isomerização. O efluente resultante é fracionado para que se obtenha uma fração de destilado intermediário (HERALD, *et al.*, 2020).

Um aparato que inclui um reator de hidrefinamento, um separador aquecido, uma coluna de reciclo, um reator de hidrocraqueamento, um reator de hidroisomerização e uma segunda coluna de reciclo, nessa ordem foi concebido para produção de *diesel* e querosene de aviação (SAF) por meio de FT. O reator de hidrefinamento em fluxo contínuo. Ao separador quente conecta-se à saída de óleo separado e o produto do hidrefinamento como entrada. À saída da primeira coluna de reciclo está o óleo residual não hidrefinado, uma parte do *diesel* produzido e o óleo separado de entrada conectado à mesma corrente que sai desse equipamento. A primeira câmara de mistura inclui uma entrada de hidrogênio circulante, a respectiva saída da mistura resultante e uma fração de óleo residual conectada a saída (ZHAO, *et al.*, 2017).

Métodos de reforma para combustível verde de aviação também são descritos na literatura internacional. Em um, o método compreende a reação de biomassa numa zona de reação para formar uma mistura de n-parafinas e parafinas isomerizadas. A mistura em questão é separada em, ao menos, uma fração de parafínicos leves e outra pesada. A porção de parafínicos leves é reformada para disponibilizar uma mistura de aromáticos renováveis, da qual uma alíquota será misturada à fração leve de parafínicos e de pesados resultando, então, em combustível de aviação altamente renovável (FREY, *et al.*, 2014).

Outra referência descreve invenção sobre um combustível destilado que mistura prioritariamente parcelas parafínicas e moderadamente aromáticas. Essa combinação proporciona excelentes propriedades de combustão em motores a *diesel* e a jato, devido ao alto conteúdo parafínico. Os compostos aromáticos presentes possuem características adequadas ao motor, prevenindo vazamento, deterioração das partes de borracha que vedam os motores ajudando a manter a pressão hidráulica. Esse combustível é preparado por meio de um produto de FT que é posteriormente hidroprocessado sob condições que garantem a formação de certa quantidade de aromáticos (MILLER, *et al.*, 2007).

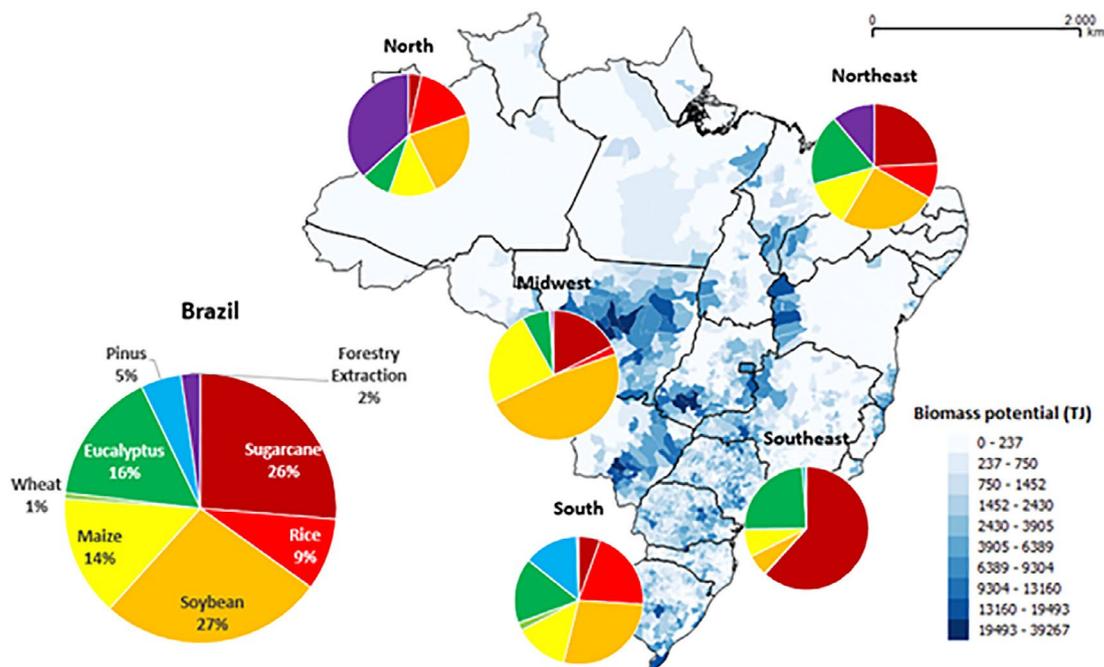
### 3.7. Matérias-primas potenciais para produção de Biocombustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF)

Ampla gama de matéria-prima de biomassa pode ser explorada para combustível de bio-combustíveis. Isso inclui culturas energéticas, resíduos florestais e agrícolas, óleo de cozinha usado, palha, resíduos de madeira e resíduos sólidos urbanos. Outras culturas de alimentos / rações de primeira geração, como colza, cana-de-açúcar, milho, óleo de palma e soja também podem ser usadas, mas não serão incluídas na presente revisão. Na Tabela 4, apresenta-se uma comparação em termos de produtividade usando as principais rotas de produção de SAF de diferentes matérias-primas de biomassa e resíduos orgânicos que não estão em concorrência com o mercado de alimentos / rações no que diz respeito às oportunidades e barreiras a serem exploradas na produção de SAF.

Do ponto de vista da tecnologia, qualquer matéria-prima com propriedades ou características compatíveis com tipos específicos de tecnologia pode ser implantada. Conforme mostrado na Tabela 4, a maior parte da matéria-prima de biomassa lignocelulósica (por exemplo, resíduos agrícolas e florestais, plantações de madeira e plantações de energia) pode ser processada em tecnologias de gaseificação-FT, ATJ e pirólise. Matéria-prima oleosa, como óleo de cozinha usado e culturas energéticas (por exemplo, pinhão-manso e camelina) é mais adequada para ser processada usando a tecnologia HEFA. Nos casos dessas matérias-primas, como o óleo reciclado ou mesmo do reaproveitamento da gordura do esgoto, as matérias-primas tendem a ser mais heterogêneas. Assim, pré-tratamentos mais extensos provavelmente serão necessários para evitar a inibição do catalisador a jusante e outros impactos, como a corrosão devido ao baixo pH de algumas dessas matérias-primas.

Carvalho *et al.* (2019) apontam para um potencial total de biomassa de 3.932 PJ/ano. Esse potencial está concentrado principalmente no sul do Brasil (33%), regiões sudeste (28%) e centro-oeste (27%), que contêm áreas agrícolas maiores (Figura 9). Soja e cana-de-açúcar, as culturas mais importantes no país, que juntas, respondem por cerca de 56% do total área cultivada. Os resíduos dessas culturas correspondem juntos a quase metade (53%) do potencial total estimado. Os resíduos de eucalipto representam 16% do potencial, seguido pelo milho (14%) e arroz (9%).

Figura 9. Potencial de bioenergia por cultura no Brasil



Fonte: Carvalho *et al.*, 2019

Os autores apontam ainda os principais locais com melhores potenciais para produção de SAF no Brasil em termos de proximidade da produção da biomassa e localidades de manuseio e consumo do SAF. São Paulo é apresentada como a localidade de maior densidade energética, em função das culturas de cana-de-açúcar. A implantação de biorrefinarias em SP reduziria as restrições de logística e custos de transporte.

Do ponto de vista ambiental, o uso de culturas de alimentos/rações em SAF pode resultar em mudança indireta do uso da terra, bem como impacto sobre os preços dos alimentos e ambientes locais com irrigação, pesticidas e fertilizantes. Portanto, é desejável utilizar matéria-prima que reduziria o impacto ambiental. De acordo com o *European Aviation Environmental Report 2019*, o uso de matéria-prima de biomassa lignocelulósica (por exemplo, resíduos agrícolas e florestais, plantações de madeira e plantações de energia) no processo de gaseificação-FT e óleo de cozinha usado no processo HEFA, dá o maior economia direta de GEE de mais de 80% em comparação com a linha de base de combustível de aviação fóssil de  $89\text{g CO}_2\text{e MJ}^{-1}$ .

Segundo Bellaver e Zanotto (2004), as gorduras e óleos animais são triglicerídeos com ácidos graxos variados, podendo ser sólidos ou líquidos. No Brasil, não existe classificação das gorduras animais, e estas são chamadas de óleos de aves, suínos, bovinos e de peixes e são gerados nos frigoríficos e abatedouros.

Um dos principais problemas da utilização de resíduos gordurosos, como matéria-prima, é a sua baixa qualidade. Isto ocorre por contaminação com água, formando emulsões, com sólidos orgânicos não graxos e inorgânicos, bem como pela deterioração dos triglicerídeos, que forma ácidos graxos livres e incrementa o índice de acidez. Existe ainda a questão do alto teor de ni-

trogênio. Haveria a necessidade de um processo de hidrogenação o que demandaria o uso de catalizadores avançados tais como platina e paládium encarecendo os custos da produção.

De acordo com Oliveira *et al.* (2014), em relação apenas aos efluentes de estações de tratamentos de esgotos (ETEs), o Brasil tem potencial para a geração de 220 milhões de litros de biodiesel ao ano, cálculo que toma como base apenas o tratamento de 42% do esgoto gerado no País.

Os resíduos gordurosos de caixa de gordura, por sua vez, apresentam altos teores de matéria graxa (em torno de 80%), ainda que se apresentem na forma de emulsão com água e necessitem de extração por processo de desmulsificação. Em algumas ETEs, mas principalmente em aterros, os coletores de material de caixa de gordura e fossas descarregam seus veículos.

Após passar por um separador água/óleo, a gordura segregada neste equipamento é inserida processada por aquecimento entre 60 e 70°C e posterior adição do sal na proporção de 10% m/v. A agitação é feita por borbulhamento de ar, dada a grande quantidade de impurezas sólidas na matéria-prima – que poderia levar ao travamento de um agitador mecânico. Após 60 minutos de repouso para a separação água/gordura, esse material é destilado. O custo desse processamento, considerando aquecimento e agitação à base de eletricidade a partir da tarifa da Light para consumidores A4 verdes, fora do horário de tarifa de ponta de dezembro de 2021, de R\$ 438,02/MWh sem ICMS, PIS e Cofins, e sal cotado na Sal Cisne a R\$ 2/kg incluindo o frete, representa R\$ 727/t de ácidos graxos, sem a amortização do equipamento.

O custo evitado de transporte e destinação final no aterro sanitário reduz R\$ 115,34/t, na região metropolitana do Rio de Janeiro. Com isso, o custo de obtenção desse ácido graxo é de R\$ 611,68/t.

Nesse estudo, serão analisadas as seguintes matérias-primas: sebo bovino, reciclagem de óleo de fritura (UCO – “*used cooking oil*”) e gordura do esgoto na rota HEFA; cana-de-açúcar e resíduos de madeira na rota ATJ, fermentação do etanol e biogás na rota FT e captura direta do ar na rota FT.

## 4. VIABILIDADE ECONOMICO FINANCEIRA

Conforme mencionado anteriormente e mostrado na Tabela 4, há uma variedade de matérias-primas (biomassa) e tecnologias que podem ser implantadas para a produção de SAF. De acordo com a estimativa do Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), o custo de produção de SAF pode variar significativamente de 0,88 €/l ou 1,0 US\$/l (resíduos de gorduras e óleos via HEFA) a 3,44 €/l ou 3,9 US\$/l (HFS), que representa 2 a 8 vezes o preço do combustível fóssil para aviação. Nessa revisão, as informações sobre a capacidade de produção e rendimento do SAF, custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX), preço mínimo de venda do combustível (MFSP) e emissões de GEE foram coletadas de várias fontes (atualizadas para 2019), apresentadas na Tabela 4. Os estudos de caso de diferentes biomassas (matérias-primas) e capacidade de produção foram categorizados nas quatro principais rotas/tecnologias certificadas, ou seja, SPK-FT, HEFA, ATJ e HFS.

O desempenho econômico das rotas de produção SAF é mais indicado pelo MFSP (equivalente ao custo de produção), que representa o preço de venda mínimo viável do combustível no qual um investimento atinge o ponto de equilíbrio, ou seja, MFSP inferior significa que o investimento é mais promissor e competitivo. As informações apresentadas na Tabela 4 mostram que o MFSP médio da rota HEFA é o mais baixo, ou seja, 1,2 US\$/l (1,07-1,32 US\$/l), que é atribuído principalmente ao seu alto rendimento de produção (> 1000 l/t de carga seca) e custos de capital relativamente mais baixos (~ 0,34 US\$/l). Ambas as rotas FT (0,92-2,59 US\$/l) e ATJ (0,75-2,77 US\$/l) mostram MFSP médio semelhante a 1,76 US\$/l.

O MFSP médio mais alto pode ser encontrado na rota HFS, ou seja, 4,27 US\$/l (2,17-6,36 US\$/l). Os valores médios de MFSP foram derivados considerando apenas os estudos de caso relatados nos últimos cinco anos (2015-2019), principalmente porque a tecnologia e o custo estão evoluindo significativamente e, portanto, a maior parte do custo estimado antes deste período é frequentemente maior. O tipo de matéria-prima e a tecnologia adotada para a produção de SAF têm forte influência no MFSP. Por exemplo, o uso de culturas energéticas na síntese FT resultaria em MFSP mais alto (2,15 US\$/l) em comparação com o uso de RSU ou resíduos agrícolas (1,53 e 1,98 US\$/l, respectivamente) na mesma capacidade. Uma tendência similar pode ser observada no caso do ATJ em que as culturas energéticas fornecem o maior MFSP (2,77 US\$/l) em comparação com a cana-de-açúcar, resíduos agrícolas e grãos de milho (1,86, 2,71 e 1,86 US\$/l, respectivamente). Estudos anteriores descobriram que a rota de gaseificação-FT é altamente intensiva em capital, do qual o custo de capital contribui com 50-75% para os custos totais de produção em comparação com 20-50% no caso do ATJ.

No entanto, o custo da matéria-prima para gaseificação-FT (10-35% dos custos totais de produção) é menor do que a rota ATJ (15-60%). HEFA é uma tecnologia relativamente mais madura, amplamente adotada e mais próxima da comercialização total; portanto, não é surpreendente que o custo de capital esteja entre os mais baixos. No entanto, uma redução adicional no MFSP não é prevista, visto que o alto custo da matéria-prima para HEFA (por exemplo, óleos vegetais e resíduos) domina o custo de produção.

Em termos de impacto ambiental, o SAF pode reduzir potencialmente de 20 a 95% das emissões de GEE em comparação direta com o combustível de aviação de petróleo, dependendo da matéria-prima e das tecnologias utilizadas. Vale ressaltar que existe uma forte correlação entre as emissões de GEE e a matéria-prima aplicada. Por exemplo, o óleo vegetal usado na rota HEFA resulta em maiores emissões de GEE em comparação com outras matérias-primas e tecnologias. Isso é atribuído principalmente às emissões de mudança indireta do uso da terra (ILUC) que são causadas pelo aumento da conversão da terra para a produção de combustível de aviação, que está em competição com o setor de alimentos e a aplicação de biocombustível em estradas. Também pode ser visto que a utilização de matéria-prima de biomassa lignocelulósica, como resíduos florestais e agrícolas e cavacos de madeira, pode resultar em menores emissões de GEE. Geralmente é difícil comparar o impacto ambiental, como as emissões de GEE, pois muitas vezes são feitas suposições inconsistentes em diferentes estudos de caso.

**Tabela 4.** Análise técnico-econômica e de emissão das principais rotas/tecnologias de conversão de biomassa usando diferentes biomassas

Matéria-Prima	Capacidade de Produção (MI/a)	Rendimento (Base seca na carga)		Custo de Capital (CAPEX)		Custo Operacional (OPEX)	Preço mínimo de venda (MFSP)	Emissão direta de GEE	Emissões ILUC
		L/t	GJ/t	MUS\$(\$/l)	MUS\$/a(US\$/l)				
Resíduos Florestais	1305	271	-	678(0,65)	793(0,27)		0,92	3,6	-
Madeira	251	114	5,32	577(2,30)	99,9(0,40)		0,79	18,0	-
Lixo Urbano (RSU)	230	148	-	(1,24)	(0,28)		1,53	14,8	-
Resíduos Agrícolas	230	148	-	(1,24)	(0,73)		1,98	6,3	-
Culturas de energia	230	148	-	(1,24)	(0,90)		2,15	11,7	12,0
Óleo de Palma	230	1111	-	0,34	0,79		1,13	33,7	231,0
Óleo de Fritura	935	1025	-	874	(1,19)		1,32	19,4	-
Óleo de soja	230	1060	-	1,35(0,59)	181(0,78)		1,08	31,4	-
Etanol à SAF									
Cavacos madeira	98,6	136	-	479	85,2(0,86)		0,75	1,6	-
Grão de milho	230	432	-	(1,07)	(0,79)		1,86	65,0	14,0
Cana-de-açúcar	230	580	-	0,79	(1,07)		1,86	48,1	17,0
Resíduos agrícolas	230	321	-	2,20	0,51		2,71	14,9	-
Resíduos agrícolas	114	212	-	1973(17,4)	137(1,20)		2,17	25,0	-
Cana-de-açúcar	61	370	-	1,98	2,32		4,29	65,1	-

Fonte: adaptado de Ng *et al.*, 2021.

A análise econômico-financeira será realizada com base em dados provenientes da pesquisa realizada. Como todas as tecnologias ainda são muito recentes, não existe ainda histórico que permite ter um nível elevado de confiança nos dados encontrados. Será utilizado o método do fluxo de caixa descontado, considerando para tanto como receitas não somente o custo evitado dos QAV convencional, mas também incluindo um ganho através de um custo sombra para a tonelada de carbono equivalente emitida.

Serão calculados os seguintes indicadores: Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa interna de retorno modificada (TIR-M), Valor Presente líquido (VPL) e *Payback* (período de recuperação do capital), custo nivelado do SAF, equivalente ao preço mínimo de venda do combustível (MFSP), e também o custo de carbono necessário para viabilizar cada rota.

Nesse sentido, cada uma das alternativas terá ao final um custo do carbono evitado, que poderá ser colocado em um gráfico, representando uma curva de custo marginal de abatimento das emissões (Curva MACC – *Marginal abatement cost curve*). Uma MACC é um gráfico que indica o custo marginal de redução de emissões para quantidades variáveis de reduções de emissões.

Motta *et al.* (2012) afirmam que pesquisadores e formuladores de políticas têm utilizado amplamente as curvas de custos marginais de abatimento que contrastam os custos marginais de abatimento com o total de emissões abatidas.

Ainda conforme Motta *et al.* (2012), de maneira geral, as curvas MACC podem ser estimadas com uma abordagem tecnológica ou baseadas em modelos. As curvas MACC de abordagem tecnológica representam uma tentativa de descrever os custos de abatimento e a quantidade de medidas potenciais de abatimento, baseando-se nas práticas já utilizadas e/ou em projetos de engenharia, enquanto as curvas derivadas de modelos econômicos são baseadas no cálculo dos modelos *bottom-up* ou *top-down*.

Nas curvas de abordagem tecnológica, os custos são ordenados desde a tecnologia mais barata até a mais cara, associando-as aos níveis incrementais de redução das emissões.

#### 4.1. Premissas Adotadas

Foram analisadas as seguintes tecnologias e matérias-primas: ATJ com bagaço de cana, ATJ com resíduos de madeira, FT com captura direta, HEFA com óleo de fritura reciclado, HEFA com sebo animal e HEFA com gordura de esgoto.

As premissas macroeconômicas foram extraídas das projeções do ITAU BBA.<sup>6</sup>

A variabilidade de cada projeto (rota tecnológica e matéria-prima) leva a adequações de processos que justificam a imensa variação nas referências de investimento encontradas na literatura.

Os valores dos investimentos foram baseados em Kleina *et al.* 2018; NG *et al.* (2021), Yao *et al.* (2017), Pavlenko (2019) e Schmidt *et al.* (2018). Para cada rota tecnológica, foram levantados valores do *capex* por litro. A premissa adotada é uma média das referências encontradas para cada

6. Disponível em: <https://www.itaubba.com.br/itaubba-pt/analises-economicas/projecoes>. Acesso em: 20 dez. 2021.

rota, corrigida pelo câmbio do ano de referência para reais, e acrescida de 40% (no pior cenário), que seriam custos de tropicalização/adequação dos projetos. Ou seja, custos de terreno, obras civis, impostos de importação, ICMS, PIS/Cofins, mão de obra, licenciamentos e demais instalações necessárias no *site*. O valor parte de estudos realizados para projetos de hidrogênio verde atualmente. No caso do uso dos resíduos de esgoto com a rota HEFA, foi considerado um *capex* duas vezes o médio pela necessidade de processos mais avançados hidrogenação pelo alto teor de nitrogênio da matéria-prima, que demandaria processos com usos de catalizadores avançados.

Tendo em vista a grande incerteza nos *inputs* a análise será baseada em cenários. O cenário mais otimista considera o valor das referências acrescido de apenas 15% a título de contingências. O cenário pessimista deverá considerar o acréscimo de 40% conforme explicitado no parágrafo anterior.

A produção de SAF de cada rota foi ajustada para atender a necessidade de redução de emissões conforme mandato proposto. E, além disso, foram estimadas saídas dos demais produtos do processo de refino, tais como *diesel*, nafta e GPL, tomando-se como referência os valores mencionados em IEA (2021). Os valores adotados estão representados na Tabela 5 a seguir:

**Tabela 5.** Percentuais da produção de derivados por rota

Derivados	HEFA	FT	ATJ
QAV	55%	50%	76%
Diesel	36%	25%	7%
Nafta	4%	15%	10%
GLP	5%	10%	7%

Fonte: IEA, 2021

As premissas de projeção dos preços de venda de cada produto foram obtidas conforme estimativas da EPE, no PNE 2050, conforme Tabela 6 a seguir:

**Tabela 6.** Projeção preços combustível aviação (valores em US\$/bbl)

Derivados	2025	2030	2035	2040	2045
QAV	98	99	100	100	103
Diesel	98	101	103	103	105
Nafta	82	82	83	83	84
GLP	36	37	37	37	39

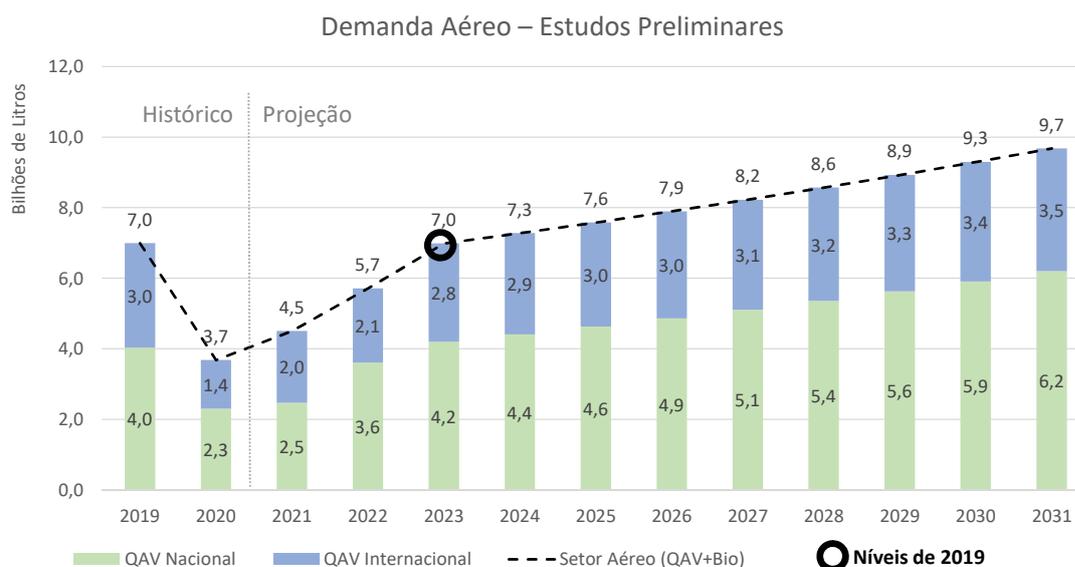
Fonte: EPE. PNE 2050.

Ainda de acordo com a EPE (2021), é projetado um crescimento para a demanda total de QAV de 2,7% a.a.; e da demanda nacional 3,7% a.a.; partir de 2023, considerando um crescimento da demanda doméstica de QAV a uma taxa de 5% a.a., para um crescimento do PIB de 3% a.a.

O Querosene de Aviação (QAV), atualmente um dos fluidos mais usados como combustível, é produzido por meio do processamento de petróleo cru. O fluido gerado é altamente viscoso, rico em hidrocarbonetos alifáticos, de cadeia longa, e por compostos de enxofre (S).

O consumo global anual de combustível de aviação é de aproximadamente 300 Mt (2017). O rápido crescimento na indústria da aviação sugere que o aumento da demanda global por combustível de aviação é esperado nas próximas décadas e foi projetado que aumentará mais do que o dobro até 2050. Além disso, estima-se que haverá a entrada do SAF na matriz energética brasileira, a partir do ano de 2027, atingindo cerca de 90 mil m<sup>3</sup> em 2030, que corresponde a uma participação no mercado de aproximadamente 1% da demanda total de combustível de aviação, com linhas aéreas específicas adotando rotas tecnológicas certificadas, conforme ilustrado na Figura 10 a seguir.

**Figura 10.** Demanda de combustíveis de aviação



Fonte: EPE. BEN, 2021.

A EPE também foi a fonte de consulta sobre os impostos que incidem sobre os combustíveis. Foram considerados os seguintes impostos:

**Tabela 7.** Impostos sobre a comercialização dos combustíveis no Brasil

Impostos	QAV R\$/m <sup>3</sup>	Biodiesel R\$/m <sup>3</sup>	GLP/Nafta R\$/m <sup>3</sup>
PIS/Pasep	12,69	26,41	29,85
Cofins	58,51	121,59	137,85
ICMS	10%	12%	15%

Fonte: EPE. 2020b.

O ICMS nos principais centros consumidores de combustíveis de aviação do Brasil (região sudeste) é 25% em sua alíquota cheia, exceto no Rio de Janeiro que é 13%. No entanto, diversos estados propuseram medidas que reduziram essas alíquotas como forma de incentivar o setor aéreo. Com isso, a alíquota do Rio de Janeiro baixou de 13% para 7%. Em São Paulo, de 25% para 12%. Em Minas Gerais, de 25% para 11%, podendo chegar a 6% em casos específicos. Por isso, para fins dos cálculos de viabilidade do SAF, foi adotada uma tarifa média de 10%. Para o

*diesel* foi considerado 12%, tomando-se como base o ICMS sobre biodiesel nas capitais onde estão os aeroportos de maior movimento no país. E para a nafta e GPL, foi considerada uma alíquota de 15% com base na alíquota do GPL para o sudeste também.

Os consumos específicos de cada matéria-prima por rota foram baseados em ICCT (2019) e Kleina *et al.* (2018). Como o SAF deve possuir as mesmas características do QAV fóssil, foi adotada uma densidade de 0,8075kg/l e um poder calorífico de 42,8 MJ/kg.

As emissões do ciclo de vida por rota e matéria-prima foram adotadas conforme ICAO (2021), exceto para as alternativas de HEFA com esgoto, FT com reforma de etanol e FT biogás, em que não haviam valores disponíveis na ICAO. Para a rota de FT com reforma de etanol, a referência foi baseada em Bressanin *et al.* (2020). Para as o HEFA com esgoto e FT com biogás, foram feitas estimativas conforme dados de cada matéria-prima, conforme será apresentado na sequência.

Foi adotada uma curva de desembolso em quatro anos para construção do projeto, considerando desembolsos de 15%; 49%, 35% e 10%.

Os valores dos investimentos e a quantidade de litros de SAF produzidos por ano para cada alternativa são apresentados na Tabela 8 a seguir:

**Tabela 8.** Valores do Investimento (CAPEX) e volume de produção por rota

Rota de Produção	Matéria-Prima	Capex Cenário Pesimista (x1,4)(MM US\$)	Capex Cenário Otimista (x1,15) (MM US\$)	Produção SAF (MM litros/ano)
ATJ	Cana-de-açúcar	208,1	170,6	78,67
ATJ	Resíduos de Madeira	238,3	195,4	69,62
FT	Captura Direta de CO <sub>2</sub> do ar	397,9	326,2	56,25
FT	Etanol	407,4	334,1	57,60
FT	Biogás	344,0	282,6	54,04
HEFA	Reciclagem de óleo de fritura	69,3	56,9	56,81
HEFA	Sebo	78,3	64,2	64,96
HEFA	Resíduos de esgoto	25,4	20,8	11,07

Fonte: Elaboração própria

Para a rota de FT, baseando no estudo feito por Bressanin *et al.* (2020), foi considerada um projeto de biorrefinaria baseado na integração de uma tecnologia termoquímica com a biorrefinaria de cana-de-açúcar 1G (1G2G) que processa cana-de-açúcar e eucalipto. Com isso, durante a entressafra da cana-de-açúcar, cavacos de madeira de eucalipto alimentam a rota de conversão termoquímica para manter a mesma capacidade de processamento o ano todo. A via termoquímica 2G considerada inclui a gaseificação de material lignocelulósico e a posterior conversão de gás de síntese em biocombustíveis líquidos por meio da síntese de FT. A eletricidade é coproduzida em um sistema de energia de ciclo combinado.

As eficiências de energia nesse processo combinado são ligeiramente superiores às relatadas na literatura para sistemas termoquímicos semelhantes.

A composição do material residual da cana-de-açúcar (palha e bagaço) e cavacos de madeira de eucalipto como matéria-prima é relativamente semelhante em relação aos seus teores de carbono, hidrogênio e oxigênio. A operação termoquímica 2G tolera biomassas como matéria-prima. Em Bressanin *et al.* (2020), para os parâmetros para inventários do ciclo de vida foi usado o CanaSoft. Todo o sistema de produção de biomassa está incluído na avaliação, compreendendo operações de pré-plantio, preparo do solo, plantio mecanizado, cultivo, colheita mecanizada e transporte de biomassa até o local industrial.

A quantidade de palha da cana-de-açúcar é estimada em 140 kg (massa seca) por tonelada de colmo de cana de açúcar. Considera-se 50% da recuperação da palha, sendo que 4,8% é coletado com colmos de cana como impurezas vegetais e o restante é recuperado compactado em fardos.

Para a rota de FT a partir do biogás, foi considerado um *capex* ligeiramente menor do que nas alternativas com captura direta do ar ou na rota do etanol, tendo em vista a necessidade menor de investimentos nesse processo e na limpeza do gás de síntese.

O custo do biogás foi estimado em R\$0,66/m<sup>3</sup>, a partir de um biogás produzido a partir de resíduos de soja, que teriam um percentual de metano de 60%.

A Tabela 9 abaixo sintetiza as principais premissas adotadas nas análises econômicas.

**Tabela 9.** Principais premissas técnico-econômicas adotadas

ROTA	Matéria-Prima	LSf (gCO <sub>2</sub> e/MJ)	Custo Matéria-Prima R\$/t	Capex (R\$/l)	Consumo Específico (t fuel/t feedstock)	Opex (8%Capex) - R\$/l
ATJ	Cana-de-açúcar	31,30	260	11,06	0,13	0,88
ATJ	Resíduos de Madeira	23,80	150	14,31	0,26	1,14
FT	Captura Direta de CO <sub>2</sub> do ar	8,30	150	19,45	0,35	1,56
FT	Etanol	10,20	177	19,45	0,11	1,56
FT	Biogás	5,00	909	17,51	0,35	1,40
HEFA	Reciclagem óleo fritura	13,9	5.431	3,47	0,83	0,28
HEFA	Sebo	22,5	7.000	3,47	0,83	0,28
HEFA	Resíduos de esgoto	-321,0	1.410	6,94	0,83	1,39

Fonte: elaboração própria

O custo da cana-de-açúcar foi estimado a partir de dados do [site https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/ativos\\_cana\\_campo\\_futuro\\_Marco2021.pdf](https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/ativos_cana_campo_futuro_Marco2021.pdf). O custo dos resíduos de madeira foi estimado considerando o preço do eucalipto plantado (madeira seca). O óleo de fritura reciclado foi estimado como sendo 80% do custo do óleo de soja e os dados foram obtidos a partir do histórico das cotações do óleo bruto para 2021 em São Paulo, de acordo com *site* da Abiove (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais) para o estado de São Paulo. Dessa forma, foi considerado um valor de R\$6.764/t acrescido de R\$20/t considerando um frete de 150 km. O custo do sebo foi estimado a partir do [site https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/boi/sebo](https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/boi/sebo).

A estimativa do custo das gorduras de esgoto foi mais difícil, por ainda não haver um mercado constituído para elas.

Segundo Bellaver e Zanotto (2004), as gorduras e os óleos animais são triglicerídeos com ácidos graxos variados, podendo ser sólidos ou líquidos. No Brasil, não existe classificação das gorduras animais, e estas são chamadas de óleos de aves, suínos, bovinos e de peixes e são gerados nos frigoríficos e abatedouros.

Um dos principais problemas da utilização de resíduos gordurosos, como matéria-prima é a sua baixa qualidade. Isso ocorre por contaminação com água, formando emulsões, com sólidos orgânicos não graxos e inorgânicos, bem como pela deterioração dos triglicerídeos, que forma ácidos graxos livres e incrementa o índice de acidez.

Os resíduos gordurosos de caixa de gordura, por sua vez, apresentam altos teores de matéria graxa (em torno de 80%), ainda que se apresentem na forma de emulsão com água e necessitem de extração por processo de desemulsificação. Em algumas ETEs, mas principalmente em aterros, os coletores de material de caixa de gordura e fossas descarregam seus veículos.

Após passar por um separador água/óleo, a gordura segregada neste equipamento é inserida e processada por aquecimento entre 60 e 70°C e posterior adição do sal na proporção de 10% m/v. A agitação é feita por borbulhamento de ar, dada a grande quantidade de impurezas sólidas na matéria-prima, que poderia levar ao travamento de um agitador mecânico. Após 60 minutos de repouso para a separação água/gordura, esse material é destilado. O custo desse processamento, considerando aquecimento e agitação à base de eletricidade a partir da tarifa da Light para consumidores A4 verdes, fora do horário de tarifa de ponta de dezembro de 2021, de R\$ 438,02/MWh sem ICMS, PIS e Cofins, e sal cotado na Sal Cisne a R\$ 2/kg incluindo o frete, representa R\$ 727/t de ácidos graxos, sem a amortização do equipamento.

O custo evitado de transporte e destinação final no aterro sanitário reduz R\$ 115,34/t, na região metropolitana do Rio de Janeiro. Com isso, o custo de obtenção desse ácido graxo é de R\$ 611,68/t. A gordura do esgoto está MUITO diluída. Para obter o *free fat acid* (FFA) necessário ao processamento, há um custo da ordem de R\$ 611,68/t (sem impostos). Mas é importante considerar que o FFA é consumido na penúltima etapa do fluxograma de produção do SAF por HEFA, o que precisa ser considerado nos custos.

Como cada 1,2 t de insumo produz 1 t de SAF por HEFA, 83,3% de eficiência de conversão, a matéria-prima já remete o custo do SAF para R\$ 734,02/t. A esse custo é preciso ainda adicionar a margem e os impostos. Com isso, o preço final estimado ficou em R\$1.300/t.

Como a linha de base da gordura presente no esgoto, nas cidades onde há tratamento, é o aterro sanitário, essa gordura se decomporá na forma de biogás, com 55% de metano, cujo GWP (*Global Warming Potential*) é mais que 20 vezes o do CO<sub>2</sub>, mesmo havendo um *flare*, com eficiência típica de 20%.

Por isso, o aproveitamento da gordura mitiga metano e o CO<sub>2</sub> do QAV (como todos os outros SAFs). De acordo com Ehrig (1991), a geração de metano é de 1,021 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg lipídeo seco, com densidade de 0,716 kg/m<sup>3</sup>.

Se consideramos que o GWP do metano em 100 anos é de 28, a emissão bruta seria de 20,47 kg CO<sub>2</sub> eq/kg lipídeo seco. A esse valor descontam-se 20% de emissão no *flare*, resultando em uma emissão líquida de 16,4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg ácido graxo. Considerando o poder calorífico inferior do biodiesel de ácido graxo, 9.256 kcal/kg, chega-se a uma emissão evitada de -0,42 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ (para 100 anos). Desse valor, faz-se o desconto das emissões do consumo de energia no processo, de 115kwh para produção de 576kg de ácido graxo, e considerando a emissão média brasileira de 0,3tCO<sub>2</sub>/MWh, que daria 1,55 g CO<sub>2</sub>e/MJ; e a emissão do pior caso de HEFA, que seria de g CO<sub>2</sub>e/MJ; chega-se a um saldo de -321 g CO<sub>2</sub>e/MJ. Nesse caso, as emissões evitadas com o SAF nessa rota seriam 17.050 MJ/l. Nesse caso, adotou-se que as emissões seriam iguais a zero, visto que não

No caso do uso do biogás no processo de FT, estima-se uma emissão de 5gCO<sub>2</sub>e/MJ, medida que não considera a redução das emissões indiretas.

Quanto à estrutura de capital, adotou-se financiamento conforme condições do FINAME Inovação do BNDES. A estrutura de capital irá depender dos condições de cobertura do serviço da dívida, (ICSD>1,2) e a alavancagem máxima permitida seria de 90%. O custo dessa dívida seria TLP + 0,9% + 1,5% (risco cliente). A consideração de 1,5% para risco do cliente foi validada com o BNDES e seria o melhor cenário possível, para um cliente que tenha grau de investimento. Dessa forma, essa seria a premissa mais otimista. Foi adotado o prazo máximo de 20 anos com quatro anos de carência. Com isso, o custo da dívida fica em torno de 7,4% ao ano real.

Foram também considerados custos fixos como um percentual do *capex*, tal como sugerido por Carvalho *et al.* (2019). Dessa forma foram adotados os seguintes percentuais:

Custo	% do Investimento
Seguros	0,5%
Manutenção	5,5%
Suprimentos	0,3%
Operação	0,7%
Contingências	10%
TOTAL	8%

O percentual de 8% do *capex* foi adotado para todas as alternativas, exceto para a rota de HEFA com uso do resíduo de esgotos, que foi adotado um percentual de 20%, justificado pela necessidade do uso de catalizadores avançados para o processo de hidrogenação.

O custo do capital próprio foi estimado em 9,5% ao ano real, considerado adequado tendo em vista riscos associados a inovação, regulamentação, tecnologia e até mesmo fornecimento da biomassa que tem que ser suportados pelo investidor. Essa taxa seria adequada para um projeto-piloto, mas poderia chegar a 12% em casos de projetos de escala comercial.

O custo médio ponderado de capital nessa estrutura fica em 7,9% ao ano real. Além disso, foi considerado um índice de cobertura do serviço da dívida mínimo de 1,2. Com essa restrição em alguns casos, não haveria condições de alavancagem de 75%. A alavancagem máxima permitida pela linha do FINAME Inovação seria de 90%, mas isso estaria sujeito a condições de cobertura do serviço da dívida, o que não acontece em casos de EBITDA negativo.

O volume de SAF considerado foi o suficiente para atender à obrigatoriedade dos operadores nacionais no âmbito do CORSIA.

Além disso, foi adotada uma premissa do preço de venda do SAF a um valor 20% acima do preço do QAV fóssil. Isso pode ser justificado uma vez que seria um combustível sem emissões de gases de efeito estufa, a exemplo do que acontece com o biodiesel no país. Atualmente o preço do biodiesel está em R\$6,54/l enquanto o preço do *diesel* fóssil, antes da mistura, está em R\$3,34/l. Com isso, a premissa para preço de venda do SAF é de R\$4,704/l.

Os resultados ainda preliminares (sujeitos a revisões e validações das premissas) são apresentados na Tabela 10 e na 11 a seguir:

**Tabela 10.** Resultados das análises econômico-financeiras caso base (considerando 1,4x o *capex* de referência)

Rota de Produção	Matéria-Prima	VPL (MM US\$)	TIR	TIR-M	Payback (anos)	MAC (US\$/tCO <sub>2</sub> e)	LCF Euro/l	LCF US\$/1	Demanda insumo t/ano	Alavancagem máxima
ATJ	Cana de açúcar	(58,7)	0,119%	4,77%	21,8	55,0	0,93	1,07	484.393,54	55%
ATJ	Resíduos de madeira	(45,6)	2,59%	6,18%	18,2	41,7	0,90	1,04	216.212,98	65%
FT	Captura direta CO <sub>2</sub> do ar	(1.059,5)			0,0	1.122,6	4,39	5,08	493.380,29	0%
FT	Etanol	(226,3)		0,34%	0,0	226,7	1,72	1,99	439.218,41	25%
FT	Biogas	(209,8)		0,46%	0,0	215,0	1,70	1,97	124.668,11	15%
HEFA	Reciclagem de óleo de fritura	(45,6)		-0,44%	0,0	47,2	0,93	1,07	58.965,28	10%
HEFA	Sebo	(161,1)			0,0	170,6	1,20	1,39	66.590,87	0%
HEFA	Resíduos esgoto	6,4	21,29%	13,28%	7,4	(5,5)	0,60	0,69	10.709,45	90%

Fonte: Elaboração própria

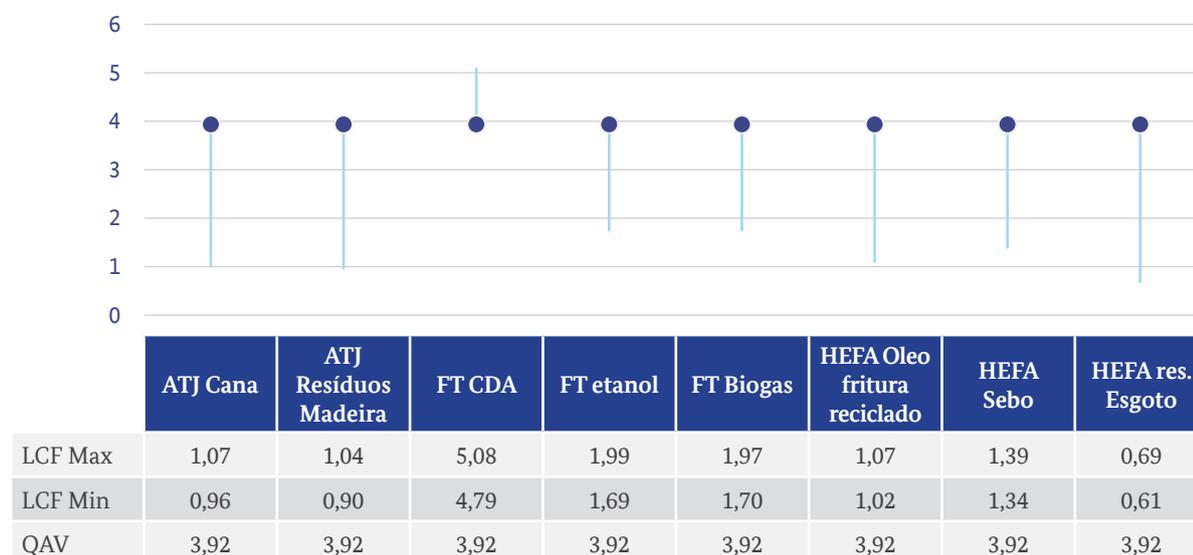
**Tabela 11.** Resultados das análises econômico-financeiras caso base (considerando 1,15x o *capex* de referência)

Rota de Produção	Matéria-Prima	VPL (MM US\$)	TIR	TIR-M	Payback (anos)	MAC (US\$/tCO <sub>2</sub> e)	LCF Euro/l	LCF US\$/1	Demanda insumo t/ano	Alavancagem máxima
ATJ	Cana de açúcar	(29,0)	3,496%	6,68%	17,0	26,5	0,83	0,96	484.393,54	65%
ATJ	Resíduos de madeira	(10,8)	7,103%	8,45%	13,8	9,5	0,78	0,90	610.671,62	80%
FT	Captura direta CO <sub>2</sub> do ar	(1.001,8)			0,0	1.061,4	4,14	4,79	493.380,29	0%
FT	Etanol	(167,3)		1,55%	0,0	165,7	1,46	1,69	439.218,41	30%
FT	Biogas	(157,4)		0,20%	0,0	157,7	1,47	1,70	124.668,11	25%
HEFA	Reciclagem de óleo de fritura	(35,3)			0,0	36,2	0,88	1,02	55.422,94	15%
HEFA	Sebo	(149,7)			0,0	158,6	1,16	1,34	63.379,03	0%
HEFA	resíduos esgoto	9,5	29,776%	15,12%	6,0	(8,2)	0,53	0,61	10.709,45	90%

Fonte: Elaboração própria

A análise dos resultados mostra que praticamente todas as rotas se mostram inviáveis com as premissas adotadas, com custos do SAF que fariam de 20% a 647% acima do custo do QAV fóssil, exceto no caso da produção a partir de resíduos de esgoto que apresentam custos mais competitivos e foi a única alternativa a apresentar viabilidade econômica, como pode ser visualizado na Figura 11 a seguir.

**Figura 11.** Resultados do custo nivelado do SAF



Fonte: elaboração própria

A produção por HEFA com sebo fica menos atrativa do que as demais, em função do preço do sebo.

De acordo com o canal bioenergia, a demanda por sebo bovino aumentou em 2020 diante da maior necessidade de usar produtos de higiene com a pandemia do covid-19 e biodiesel, o que resultou em ganhos contínuos de preços até o mês de outubro, quando o produto bateu na casa dos R\$ 6,01/kg, valorização de 155,7% comparado com janeiro/2020. Em dezembro de 2021, o preço chegou a R\$7,00/kg. Vale ressaltar que o valor médio antes da pandemia estava em torno de R\$2,5/kg. No entanto, mesmo considerando que o sebo volte a valores pré-pandemia, o QAV a partir do sebo ainda seria a alternativa menos viável entre as estudadas.

A rota HEFA com uso da gordura proveniente do tratamento de esgotos é a única que apresentou viabilidade. A principal razão que justifica tal fato é a seguinte: a consideração de emissões evitadas de metano nos aterros (que seriam a destinação final dessas gorduras no caso base) fez que o fator de emissões do ciclo de vida ficasse negativo em  $-321 \text{ gCO}_2 \text{ e/MJ}$ . Isso impactou a necessidade de um volume extremamente mais baixo de SAF para atendimento as metas (apenas 11 milhões de litros/ano, contra 55 milhões no caso da reciclagem do óleo de fritura).

Na hipótese de considerarmos que as emissões do ciclo de vida fossem nulas, o resultado também seria negativo: (VPL = -17 MMUSD, TIR = 0,4%; TIR-M = 5,23%; Payback = 20,5 anos; (Marginal abatement cost – MAC) = 10,3 US\$/l e LCF = 0,8 US\$/l; com alavancagem máxima de 59%). Ainda assim, considera-se que seria um resultado extremamente interessante e que essa rota deveria ser mais bem estudada. Existem, de fato, questões acerca dela que precisam de maior aprofundamento, tais como a questão se o HEFA suporta enxofre e em qual participação.

O esgoto tem 500 ppm de S e é possível baixar para 100 ppm de S. Para o biodiesel, são requeridos 10 ppm de S. Qual deveria ser o parâmetro de enxofre no processo HEFA para gerar um SAF dentro das especificações? Que adequações no processo seriam necessárias?

## 4.2. Condições de Viabilidade

A seguir, são apresentadas as sensibilidades em cada modelo que tornariam os investimentos nessas plantas viáveis.

Tendo em vista a importância do valor total do investimento na viabilidade de todas as rotas, a primeira condição seria avaliar qual seria a redução necessária no *capex* para se atingir a viabilidade.

Para as rotas ATJ, seria necessária uma redução do *capex* estimado de 38% no caso da cana-de-açúcar ou de 26% no caso da madeira. Nas rotas de FT, como o peso do investimento é ainda maior, a redução necessária para viabilidade chega a 77% no caso do biogás, 71% no caso do etanol; e nenhuma redução do *capex* viabiliza o caso da captura direta de CO<sub>2</sub>. No caso da HEFA, seria necessária uma redução de 83% para o *capex* no caso do uso do óleo de fritura reciclado. No caso do sebo, o custo deste é o principal ofensor na viabilidade do projeto, e nenhuma redução no *capex* é capaz de tornar a rota viável.

Dessa forma, as análises que seguem concentram-se nas rotas em que otimizações de investimentos e custos de matérias-primas apresentam oportunidades para trazer pilotos a uma viabilidade aceitável.

Fazendo uma análise tipo *ceteris paribus*, ou seja, mantendo todos os demais parâmetros constantes, e variando somente os custos das matérias-primas, seria necessário uma redução de 66% no preço do bagaço de cana para viabilizar a rota ATJ com cana. A rota ATJ com madeira não seria viável apenas com otimização do custo dos resíduos da madeira. O mesmo acontece com as rotas de FT, em que a participação do *capex* no custo final do SAF é tão importante que, mesmo se a matéria-prima custasse zero, ainda assim não seria possível atingir a viabilidade. No caso da rota HEFA com óleo de fritura reciclado, se for possível a obtenção do óleo na planta com uma redução de 20% no preço considerado<sup>7</sup> o projeto se viabilizaria. Assim, seria necessário conseguir um óleo de fritura reciclado que seja obtido no *site* de produção do SAF a R\$4.339/t, o que representa uma redução de 36% no valor do óleo refinado.

No caso da HEFA baseado em sebo, o custo do sebo de R\$7/kg claramente inviabiliza essa rota.

Outra análise possível fica em torno das eficiências dos processos que precisam ser avaliadas tecnicamente, ou seja, qual deveria ser a redução do consumo específico (aumento de eficiência) que traria cada rota para a viabilidade.

Nesse caso, seria necessário aumento de eficiência de 193% para a alternativa ATJ com bagaço. Para as rotas ATJ com resíduos de madeira, FT, não haveria redução do consumo específico que traria viabilidade. No caso da HEFA com reciclagem do óleo de fritura, um aumento de 25% poderia viabilizar o processo e, para HEFA com sebo, o ganho deveria ser de 62%.

7. Valor base do óleo de fritura reciclado foi de 80% do valor do óleo de soja refinado, acrescido de R\$20/t de frete. (R\$6764/t \*80% +R\$20/t).

Como cada uma dessas análises foi feita em um modo *ceteris paribus*, ou seja, considerando tudo mais constante, naturalmente uma combinação de otimizações poderia ser viável. Mas, tendo em vista os valores extremos necessários para viabilidade de cada variável, não é possível acreditar na viabilidade das rotas FT no médio prazo. Para a alternativa HEFA com sebo, a probabilidade de se conseguir um sebo a valores tão menores que os de mercado atuais torna essa rota pouco passível de otimizações para viabilidade.

No entanto, essas análises apontam para foco nas rotas HEFA com esgoto, HEFA com óleo de fritura reciclado e ATJ com bagaço de cana e com resíduos de madeira de eucalipto plantado, para estudos mais aprofundados com potencial de viabilidade para planta-piloto.

### 4.3. Parâmetros reais e factíveis para escalabilidade

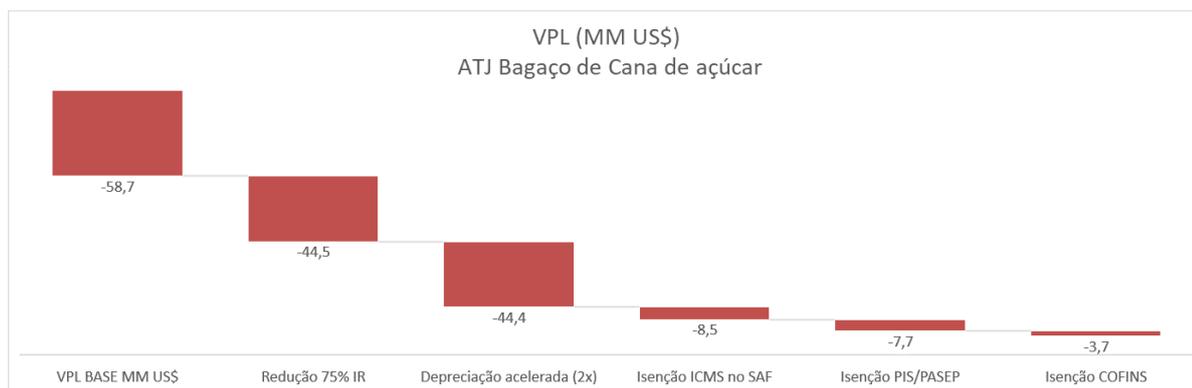
Uma série de medidas de incentivo, combinadas a otimizações técnicas, poderia facilitar a atratividade desses investimentos pelo setor privado. Naturalmente, deve-se ter em conta os riscos devidos às incertezas regulatórias, riscos tecnológicos e de mercado desses combustíveis.

Entre esses benefícios, tais como aqueles existentes, por exemplo, para projetos na área da Sudene (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste) que assegura redução de 75% do IRPJ e adicionais não restituíveis pelo prazo de 10 anos; reinvestimento de 30% do IRPJ; depreciação acelerada e desconto do PIS/Pasep e da Cofins; e até isenção do IRPJ (válido apenas para setores baseados em tecnologia digital e voltados para inclusão digital) poderiam ser adotados como políticas de incentivo para o SAF.

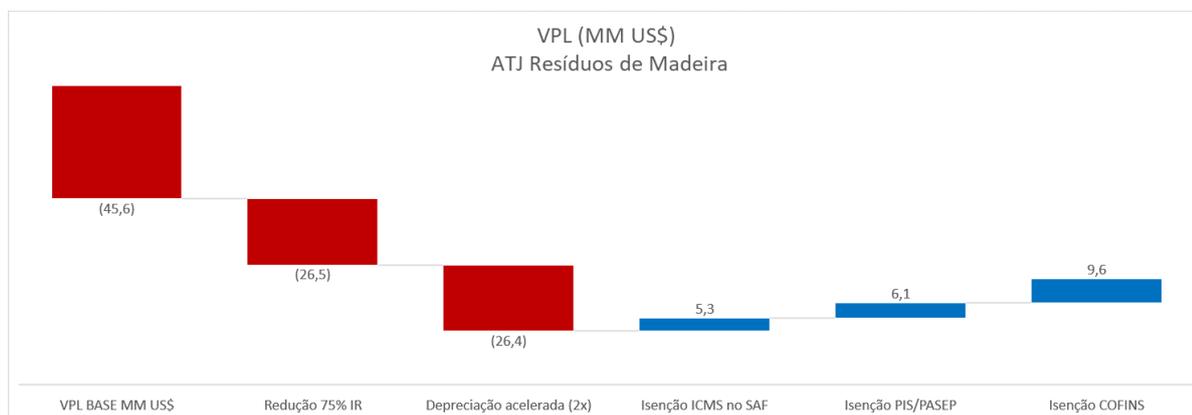
Então, inspirado nos possíveis benefícios a serem conquistados, cada resultado (VPL) de cada rota foi simulado na seguinte sequência (e considerando benefícios adicionais):

1. Redução de 75% do imposto de renda de pessoa jurídica por 10 anos a partir da entrada em operação (2027).
2. Depreciação acelerada em 2x, ou seja, considerando que o prazo para depreciação dos ativos passaria de 20 para 10 anos.
3. Isenção do ICMS (alíquota zerada).
4. Isenção do PIS/Pasep.
5. Isenção da Cofins. Os resultados são apresentados por rota/matéria-prima nas Figuras 12 a 18 a seguir.

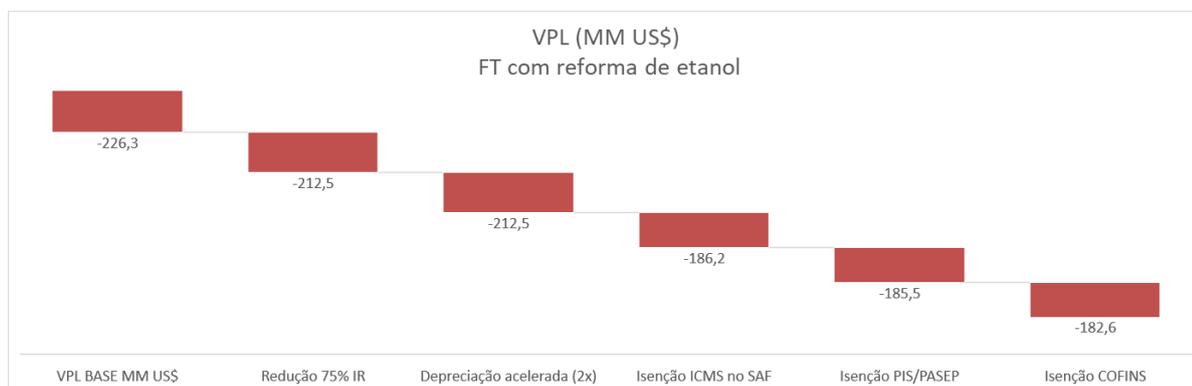
No caso do ATJ com bagaço de cana-de-açúcar, a implementação dos itens 1 a 5 cumulativos praticamente viabiliza o projeto, o que poderia ser atingido por otimizações mínimas do *capex* (-2,33%).

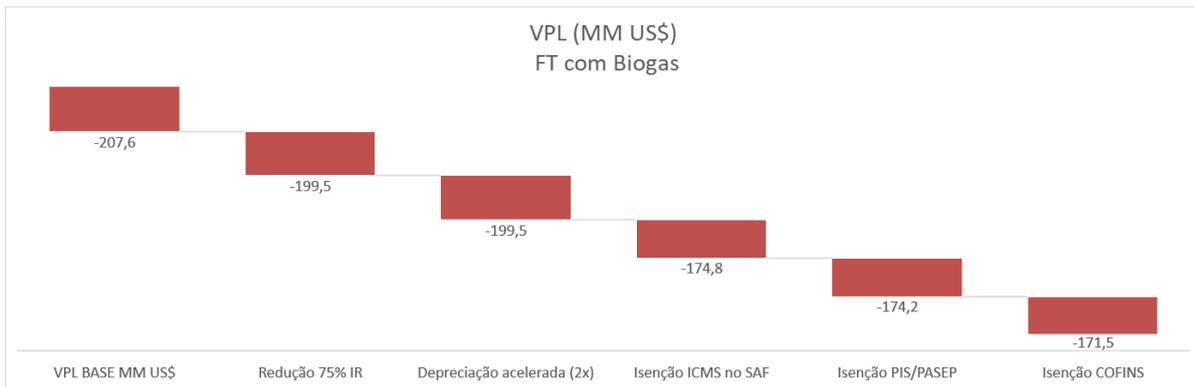
**Figura 12.** Sensibilidades no VPL – ATJ bagaço de cana-de-açúcar

Já para o ATJ com resíduos de madeira, representado na Figura 13, com benefícios de redução do imposto de renda, depreciação acelerada e isenção do ICMS, já seria atingida a viabilidade do projeto.

**Figura 13.** Sensibilidades no VPL – ATJ resíduos de madeira

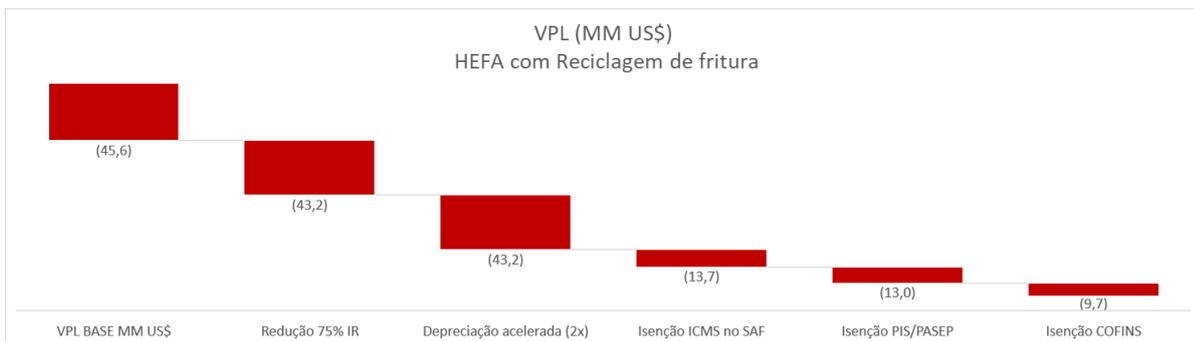
Nos processos de FT para a captura direta do ar, a ordem de grandeza do VPL negativo impede que quaisquer benefícios sejam capazes de tornar o projeto viável. Isso também se observa com a rota de FT com reforma de etanol e com biogás que, mesmo após todos os benefícios, ainda apresentam um VPL negativos em US\$ 182 milhões e US\$ 171 milhões, respectivamente, como pode ser visto nas Figuras 14 e 15 a seguir.

**Figura 14.** Sensibilidades no VPL – FT com reforma de etanol

**Figura 15.** Sensibilidades no VPL – FT com biogás

Nesses casos, o investimento de capital é o principal fator a ser aprimorado. Isso acontece ainda pela baixa maturidade tecnológica do processo que não dá escala comercial. Todas as etapas do processo envolvem equipamentos caros, consumo de energia e riscos de maturidade elevados.

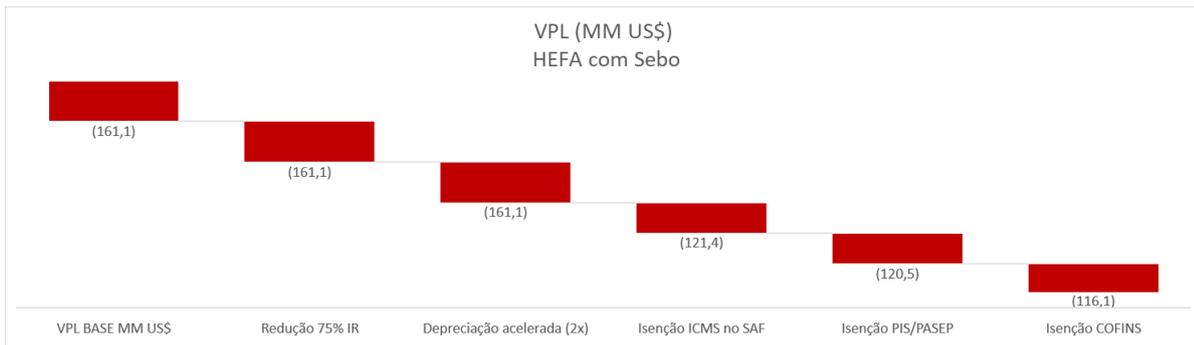
Os resultados obtidos para a rota HEFA com reciclagem de óleo de fritura (Figura 16) mostraram-se bastante interessantes, ainda que não sejam positivos ao final do pacote de benefícios.

**Figura 16.** Sensibilidade VPL – HEFA com óleo de fritura reciclado

Com todos esses benefícios, uma redução de 23% no investimento poderia trazer essa alternativa para viabilidade. Soma-se a isso o fator de sustentabilidade por meio do uso do óleo de fritura reaproveitado, sem impactos de competição com o uso da terra para fins alimentares e evitando o seu descarte incorreto, o que poderia contaminar solos e corpos de água.

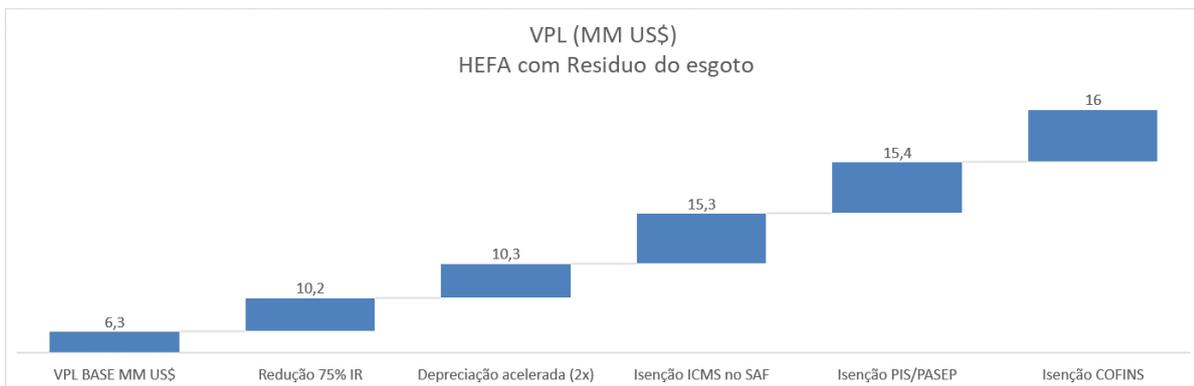
Isso também acontece com a alternativa do uso do sebo: mesmo considerando todos os benefícios, o projeto ainda apresentaria um VPL negativo da ordem de US\$ 116 milhões, conforme pode ser visto na Figura 17. Nesse caso, nenhuma redução do *capex* com todos os benefícios considerados poderia viabilizar o projeto.

Figura 17. Sensibilidade VPL – HEFA com sebo



Finalmente, a Figura 18 mostra o impacto da cadeia de benefícios no único projeto que havia apresentado viabilidade no caso base, que seria a rota HEFA a partir da gordura extraída a partir do processo de tratamento de esgoto. Vale lembrar que a viabilidade inicial desse processo consiste nas emissões evitadas na formação do metano que aconteceria caso essa gordura fosse depositada em aterros sanitários. Assim, ao evitar essas emissões, já haveria ganhos independentemente das emissões evitadas na aviação propriamente dita. Com isso, a necessidade de volume de SAF fica muito menor que nas demais rotas pelo diferencial entre as emissões do uso do QAV e da rota de SAF selecionada.

Figura 18. Sensibilidade HEFA com resíduos de esgoto



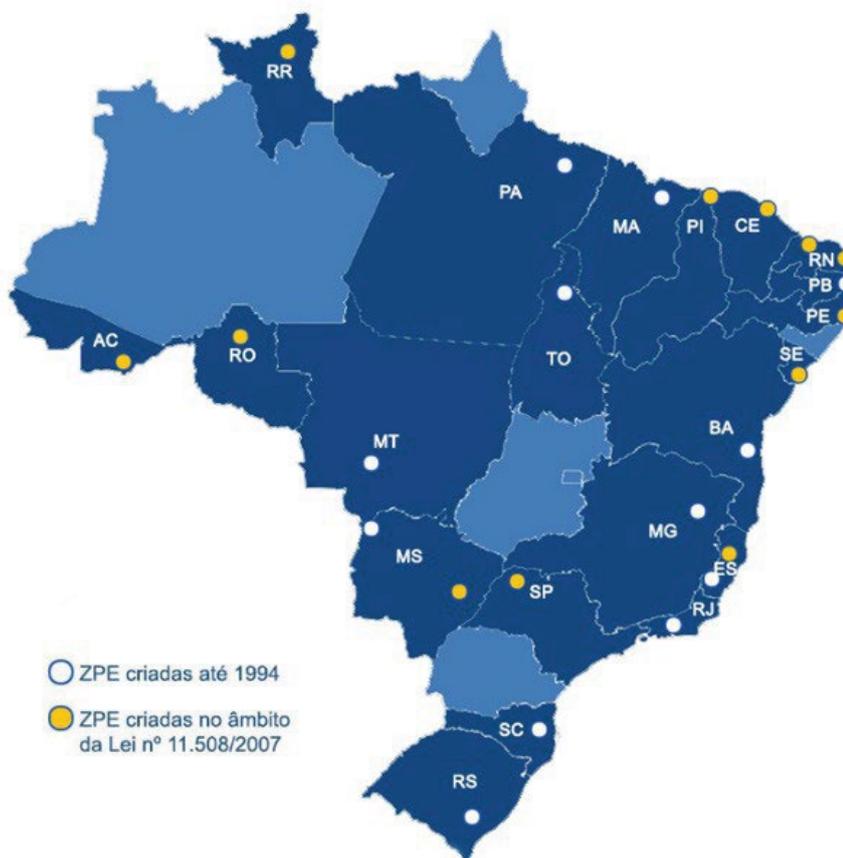
Outro ponto importante a ser ressaltado é que essa rota com resíduos de esgoto ainda não foi testada e carece de estudos mais aprofundados no próprio processo, tendo em vista questões como, por exemplo, do conteúdo de enxofre e da acidez da matéria-prima. Tais incertezas foram, de certa forma, contempladas com a multiplicação do *capex* por 2 com a majoração do *opex* (20% do *capex* contra 8% das demais alternativas estudadas).

A análise de todos os gráficos apresentados entre as Figuras 12 e 18 mostra que, em termos de efetividade do benefício, a isenção do ICMS é a que apresenta maior contribuição na viabilidade dos projetos.

Finalmente, existem outras condições e políticas públicas que permitiriam alavancar ou acelerar o processo de produção de SAF no Brasil, como, por exemplo, a monetização dos créditos de carbono advindos do uso do SAF.

Uma delas, por exemplo, seria a instalação da planta-piloto, por exemplo, em Zonas de Processamento de Exportação (ZPE).<sup>8</sup> As ZPEs caracterizam-se como áreas de livre comércio com o exterior, destinadas à instalação de empresas voltadas para a produção de bens a serem comercializados no exterior, sendo consideradas zonas primárias para efeito de controle aduaneiro. As empresas que se instalam em ZPE têm acesso a tratamentos tributários, cambiais e administrativos específicos. Para o Brasil, além do esperado impacto positivo sobre o balanço de pagamentos decorrente da exportação de bens e da atração de investimentos estrangeiros diretos, há benefícios como a difusão tecnológica, a geração de empregos e o desenvolvimento econômico e social. No Brasil, atualmente existem 14 ZPE autorizadas e encontram-se em efetiva implantação, tal como representado na Figura 19 a seguir.

**Figura 19.** Zonas de processamento de exportações criadas no Brasil



Fonte: Ministério da economia. <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/zpe>

8. O regime aduaneiro especial das ZPE foi instituído no País pelo Decreto-Lei n. 2.452, de 29 de julho de 1988. Na época, esse instrumento legal autorizou ao Poder Executivo a criar ZPE por meio de edição de decreto presidencial. Para traçar a orientação da política das ZPE, estabelecer requisitos, analisar propostas, entre outras atividades, o normativo criou o Conselho Nacional das Zonas de Processamento de Exportação (CZPE).

Em 2007, o referido Decreto-Lei foi revogado pela Lei n. 11.508/2007, que manteve a competência do Conselho para definir as normas, os procedimentos e os parâmetros do programa, segundo os quais os agentes envolvidos devem balizar suas ações. Para regulamentar a Lei n. 11.508/2007, foram publicados o Decreto n. 9.993/2019, que dispõe sobre o CZPE, e o n. 6.814/2009, que dispõe sobre o regime tributário, cambial e administrativo das ZPE.

Nessas áreas, é possível contar com benefícios conforme descritos na Lei Federal n. 11.508/2007, que asseguram benefícios, tais como suspensão dos impostos e contribuições abaixo nas importações ou aquisições no mercado interno de bens e serviços:

- Imposto de Importação (II);
- Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI);
- Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS);
- Cofins-Importação;
- Programa de Integração Social/Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP);
- PIS/PASEP-Importação; e
- Adicional de Frete para Renovação da Marinha Mercante (AFRMM).

No entanto, entre as 14 ZPE autorizadas, a única em funcionamento atualmente é a ZPE/CE em Pecém, ou seja, infelizmente, ainda não existe nenhuma ZPE no sudeste (exceto no Espírito Santo, mas ainda não está operacional) onde está concentrado o maior consumo de QAV. Mas condições semelhantes poderiam ser criadas por meio de políticas de incentivo à produção do SAF no país. De fato, tais benefícios tendem a ser menos criticados que a criação de subsídios.

Sobre isso, sabe-se que, somente graças às políticas públicas e aos programas de subsídios ao álcool e ao biodiesel, o Brasil se tornou uma referência mundial em termos de biocombustíveis. Tais programas alavancam o desenvolvimento tecnológico tanto da produção como do uso desse combustível, aumentando a segurança dos investidores, reduzindo riscos e, com isso, os custos dos capitais envolvidos. A correta sinalização de uma política pública robusta e consistente é essencial para o desenvolvimento dos combustíveis sustentáveis da aviação no Brasil.

Conforme apontado por Goddard e Meier (2021), investir na capacidade de refinaria SAF é atualmente percebido como investimento de altíssimo risco e baixa atratividade. Como são investimentos de porte muito grande, não seriam considerados por empresas de menor porte. Sendo uma atividade de refino, caberia mais às próprias empresas do setor de petróleo e gás, que tem expertise no setor. As principais empresas de petróleo e gás têm negócios lucrativos de querosene e têm consciência que o SAF canibalizaria, portanto evitando tais investimentos até que se tornem atraentes ou mesmo compulsórios. Hoje, também é percebido como muito arriscado para investidores do tipo infraestrutura, e as companhias aéreas/aeroportos não têm força financeira (particularmente pós-covid-19).

Os principais riscos são:

- As tecnologias permanecem não comprovadas em escala comercial;
- Ultrapassagens dos custos de capital que são extremamente elevados na primeira onda de novas refinarias (*first of a kind*);
- Baixa competitividade de custo quando comparado aos QAV;
- Risco de que o hidrogênio ou a propulsão elétrica substituam os motores a jato na década de 2040, resultando em apenas uma vida útil de 20 a 25 anos para os ativos da SAF; e
- Vida útil dos ativos ainda incerta, e sujeita a disrupções tecnológicas.

É importante reconhecer que, se as principais empresas de petróleo e gás decidirem agir, um capital significativo poderá ser trazido rapidamente para suportar, dada a média anual de *capex* da refinaria pré-covid-19. Grandes empresas de petróleo agora têm fundos de energia emergentes ou novos e estão aguardando incentivos e oportunidades para alavancar novos investimentos.



## 5. MERCADOS DE CARBONO

Crescentes efeitos do aquecimento provocado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa impõem uma urgência nas ações para conter a mudança climática. Dessa forma o custo da mitigação é crucial para descarbonizar as economias, e isso passa pela precificação de carbono, juntamente com outras políticas e regulamentos de apoio.

De acordo com Banco Mundial (2021), a precificação do carbono é um instrumento que capta os custos das externalidades das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Externalidades seriam basicamente os custos das emissões pelos quais o público paga, como danos às plantações, custos com saúde por ondas de calor e secas e perda de propriedade por inundações e aumento do nível do mar – e os vincula às suas fontes por meio de um preço, geralmente na forma de um preço sobre o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido.

A precificação do carbono ajuda a transferir o ônus dos danos causados pelas emissões de GEE para aqueles que são responsáveis por eles e que podem evitá-los, além de oferecer um incentivo adequado às ações que são capazes de fornecer alternativas às atividades que emitem. Em vez de ditar quem deve reduzir as emissões, onde e como, o preço do carbono fornece um sinal econômico para os emissores e permite que eles decidam transformar suas atividades e reduzir suas emissões ou continuar emitindo e pagando por suas emissões.

Com isso, o objetivo ambiental global é alcançado da forma mais flexível com menor custo para a sociedade. A fixação de um preço adequado nas emissões de GEE é fundamental para internalizar o custo externo das mudanças climáticas e na definição de incentivos econômicos para o desenvolvimento limpo e sustentável. Além disso, contribui para mobilizar os investimentos financeiros necessários para estimular a tecnologia limpa e a inovação, alimentando novos motores de crescimento econômico de baixo carbono.

Podemos classificar os mercados de carbono em dois tipos: mercados de conformidade e mercados voluntários. Os mercados de conformidade envolvem permissões de emissões de carbono vinculadas sob uma estrutura regulatória. Mercados voluntários envolvem créditos gerados de projetos que reduzem, evitam ou removem o dióxido de carbono que pode ser retirado para compensar as emissões.

Existem diversos instrumentos que irão tornar possível a sistematização do mercado de carbono. Um Mecanismo de Comercialização de Emissões (MCE) é um sistema em que os emissores podem negociar unidades de emissão para cumprir suas metas de redução. Ao criar oferta e demanda por unidades de emissão, um MCE estabelece um preço de mercado para as emissões de GEE. Com isso, fornece a certeza sobre o impacto ambiental, mas o preço permanece flexível. As emissões globais atuais de GEE totalizam 51 GtCO<sub>2</sub>e, sendo que 9,8% dos quais são cobertos por MCEs (ou seja, mercados de conformidade) globalmente.

Uma redução nas emissões anuais de 19 GtCO<sub>2</sub>e até 2030 é estimada como necessária para limitar o aquecimento global a 2 °C. Atualmente 14 GtCO<sub>2</sub>e anuais da meta necessária de reduções não são cobertos por um MCE.

Outro instrumento que viabiliza esse mercado é a taxaço do carbono, que define diretamente um preço sobre o carbono, ou seja, um preço por tCO<sub>2</sub>e (tonelada de dióxido de carbono equivalente). Difere de um MCE, uma vez que o resultado da reduço de emissões da taxaço de carbono não é predefinido, mas o preço do carbono é. Ao contrário do MCE, a taxaço garante o preço do carbono no sistema econômico contra um resultado ambiental incerto.

Um mecanismo de compensação designa as reduções de emissões de GEE de atividades baseadas em projetos ou programas, que podem ser vendidas internamente ou em outros países. Os programas de compensação emitem créditos de carbono de acordo com um protocolo contábil e possuem registro próprio. Créditos de carbono compensam emissões de GEE emitidas em outros lugares ao apoiar financeiramente projetos que evitem, reduzem ou sequestram emissões de carbono. Um crédito de carbono (ou compensação de carbono) representa o equivalente a uma tonelada de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.

Por fim, a precificação interna de carbono é uma ferramenta que uma organização usa internamente para orientar seu processo de tomada de decisão em relação aos impactos, riscos e oportunidades das mudanças climáticas.

Existem dois tipos de mercado de carbono: mercados voluntários e mercados regulados tipo “*cap and trade*”.<sup>9</sup> O mercado regulado é alinhado com o Acordo de Paris e estabelecido entre países como artigo 6º, visando à transferência internacional e cooperação de créditos de carbono. O livre comércio de compensações de carbono sob um esquema global poderia reduzir os custos do Acordo de Paris em até 33% até 2030.

Assim, a precificação internacional de carbono refere-se a iniciativas de precificação de carbono que têm potencial para cobrir todo o mundo. Isso inclui:

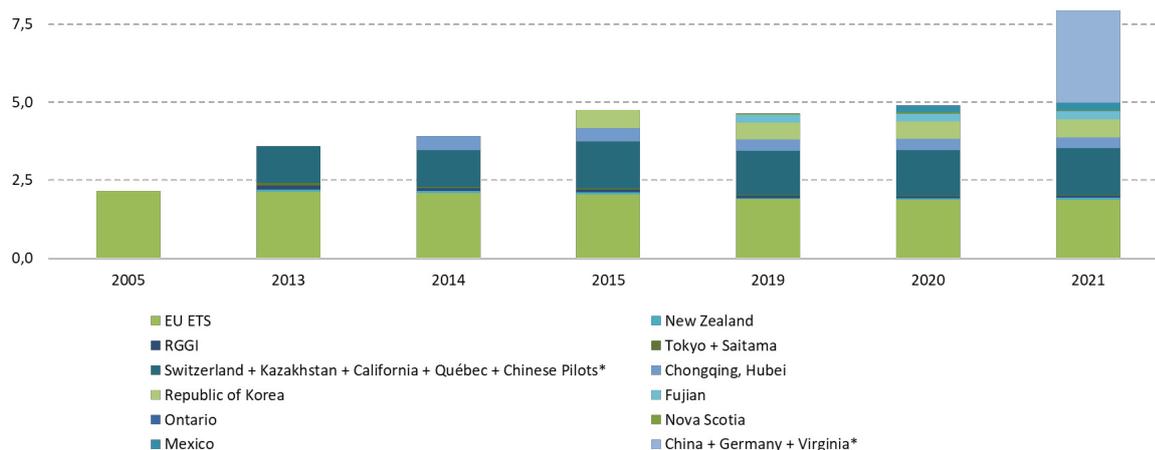
- Iniciativas no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC):
  - Comércio Internacional de Emissões (IET) é um MEC internacional criado com a intenção de permitir que os países listados no Anexo I da UNFCCC alcancem reduções de emissões ao menor custo;
  - Implementação Conjunta (JI) e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL); que são mecanismos sob o Protocolo de Quioto segundo os quais entidades das Partes listadas no Anexo I da UNFCCC poderiam participar de projetos de baixo carbono e obter créditos em troca;
  - Novas abordagens ao abrigo do artigo 6º do Acordo de Paris.
- Iniciativas fora da UNFCCC:
  - O mercado voluntário de carbono;
  - Financiamento climático baseado em resultados (RBCF); e
  - Iniciativas setoriais globais.

9. No “*cap and trade*”, uma autoridade central (Governo) define um limite para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) que pode ser emitido. O limite é alocado ou vendido a empresas sob a forma de licenças de emissões (permissões). As empresas são obrigadas a manter um volume de licenças equivalentes às suas emissões e, para tanto, podem comprar e vender permissões.

A precificação internacional do carbono decolou com a introdução dos mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Kyoto (JI e MDL). Olhando para o futuro, a precificação do carbono pode desempenhar um papel fundamental para realizar as ambições do Acordo de Paris e implementar as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs).

Em 2021, o mercado regulado de carbono já cobria 22% das emissões globais. A Figura 20 a seguir mostra a evolução desse mercado.

**Figura 20.** Total de emissões cobertas pelos mercados regulados de carbono (MtCO<sub>2</sub>)

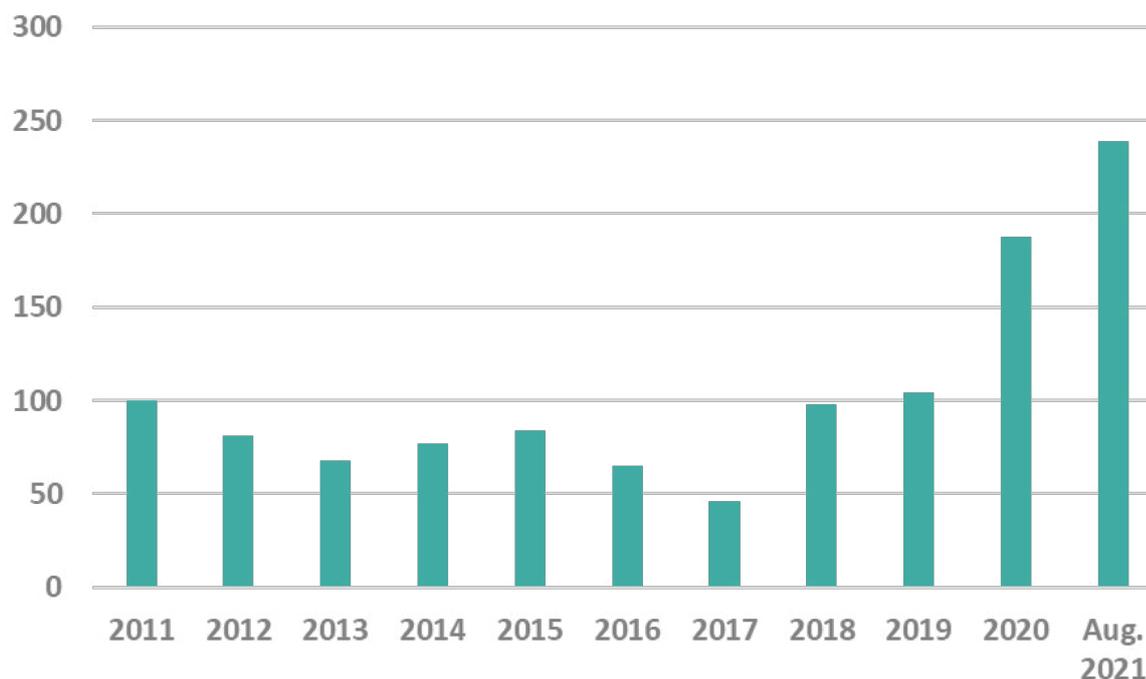


Fonte: ICAP – “Emissions Trading Worldwide 2021”, 2021.

O mercado voluntário atende às necessidades das empresas que voluntariamente decidem reduzir sua pegada de carbono usando compensações, empresas que compram permissões de organizações terceirizadas que certificam a integridade ambiental. O mercado depende da confiança entre desenvolvedores de projetos e compradores, com graus variados de verificação.

Esse mercado de compensação voluntária já atingiu US\$ 748 milhões em ago./2021 com crescimento significativo desde 2019. Em 2016, o volume de créditos negociados nos mercados voluntários totalizou 63 MtCO<sub>2</sub> e no valor de US\$ 191 milhões, representando queda de 24% em relação aos 84 MtCO<sub>2</sub> e de créditos negociados em 2015.

Dados recentes da Ecosystem Market mostram crescimento da ordem de 140% entre 2018 e 2021 no volume de emissões transacionadas no mercado voluntário, como ilustrado na Figura 21. Em 31 de agosto de 2021, os mercados voluntários de carbono já haviam registrado US\$ 748,2 milhões referentes a 239,3 milhões de créditos, cada um representando uma tonelada de dióxido de carbono equivalente, refletindo aumento de 58% no ano. De agosto de 2021 já foram adicionados US\$258 milhões enquanto o volume transacionado já aumentou em 298,4 milhões de tCO<sub>2</sub> em janeiro de 2022.

**Figura 21.** Total de emissões transacionadas no mercado voluntário em agosto/21(MtCO<sub>2</sub>)

Fonte: Ecosystem Marketplace, 2022. Disponível em: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2021/>.

O mercado voluntário de carbono (MVC) ganhou as manchetes em 2021 com transações recorde e preços de crédito crescentes, e todos os sinais apontam para um 2022 igualmente robusto. Em meados de setembro, o provedor de dados ambientais Ecosystem Marketplace provocou um frenesi quando informou que o MVC estava a caminho de atingir US\$ 1 bilhão em transações anuais em 2021. Dois meses depois, a organização sem fins lucrativos confirmou que o mercado havia realmente batido esse número. Em estudo recente, Blaufelder *et al.* (2021) avaliam que o mercado voluntário pode chegar a valer US\$50 bilhões em 2030.

Nesse mesmo estudo, os autores ressaltam que dados limitados de preços tornam difícil para os compradores saber se estão pagando um preço justo e para os fornecedores gerenciarem o risco que assumem ao financiar e trabalhar em projetos de redução de carbono sem saber quanto os compradores pagarão pelos créditos de carbono. Ainda assim, a McKinsey estima que a demanda global anual por créditos de carbono pode atingir até 1,5 a 2,0 gigatoneladas de dióxido de carbono (GtCO<sub>2</sub>) até 2030 e até 7 a 13 GtCO<sub>2</sub> até 2050.

O aumento na demanda por créditos de carbono voluntários foi desencadeado por uma corrida corporativa para cumprir as metas do Acordo de Paris de 2015. O acordo climático histórico busca limitar o aquecimento global a bem abaixo de 2 °C, com uma meta aspiracional de 1,5 °C.

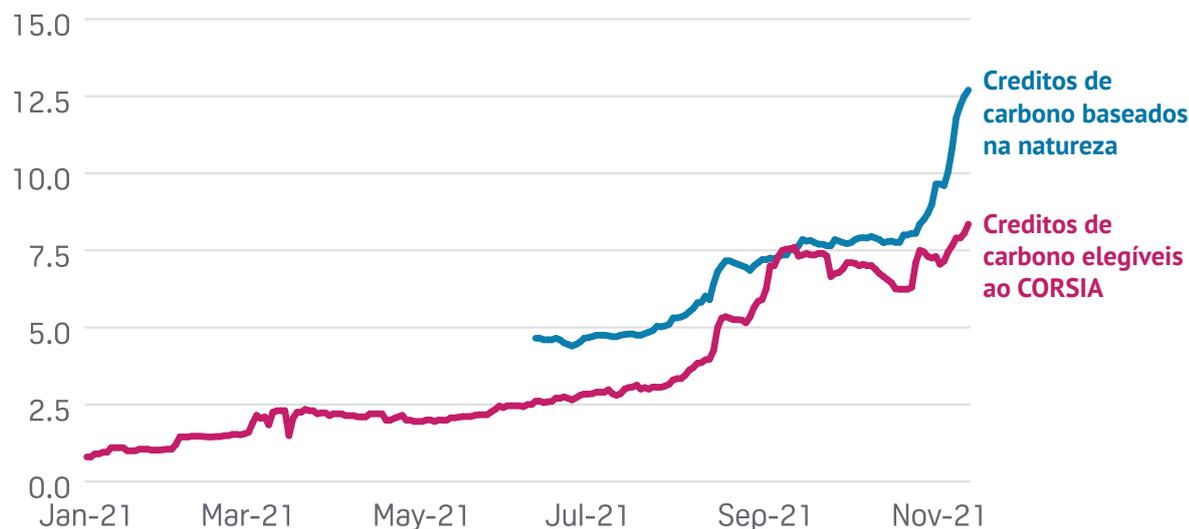
Pelo menos um quinto das 2.000 maiores empresas públicas do mundo se comprometeram a atingir as metas de zero líquido até 2050.

De acordo com as avaliações diárias do OPIS (*Oil Price Information Service*), o preço médio dos créditos de REDD+<sup>10</sup> Voluntários saltou cerca de US\$ 7,50/mt nos últimos 12 meses, mais que dobrando. O custo médio das safras de 2017 a 2021 atingiu alta de US\$ 13,25/mt no início de dezembro, após iniciar 2021 em uma baixa de US\$ 5,73/mt. Assim como os créditos REDD+, as compensações elegíveis ao CORSIA (CEO OPIS) aumentaram mais de US\$ 8/mt em 2021. A avaliação diária do CEO da OPIS atingiu alta de US\$ 9,04/mt em meados de novembro, após iniciar o ano em um mínimo de 80,5 centavos/mt.

De acordo com artigo no IHS (2022), para atender à crescente demanda por créditos de carbono voluntários, a CBL Markets da Xpansiv lançou novos contratos de comércio de emissões, dobrando seu alcance de mercado com a expansão do MVC este ano. Além disso, o chefe de carbono global da CBL, Rene Velasquez, disse, este mês, que foi um ano significativo para a plataforma de câmbio global com o lançamento de dois novos contratos spot – CBL GEO para compensações elegíveis para CORSIA e CBL N-GEO para créditos florestais emitidos pela Vera com uma Certificação CCB. Ainda no mesmo artigo, mencionam que o Bank of America (BofA) também está otimista com o desenvolvimento do mercado. Em setembro de 2021, um relatório do Bank of America Global Research projetou que o mercado global de compensação de carbono pode se expandir 50 vezes até 2050 para facilitar as metas líquidas de zero. Atingir essas metas exigiria cerca de 7,6 gigatoneladas de compensações ou remoções de CO<sub>2</sub>.

O preço médio transacionado até novembro de 2021 era de US\$3,37/mtCO<sub>2</sub>e. De acordo com a S&P Global Platts, os preços de crédito de carbono elegível para CORSIA (CEC) subiram 944% em 2021, com o valor atrelado a US\$ 8,35/mt no fechamento de 10 de novembro, em comparação com 80 centavos/mt em 4 de janeiro, como ilustrado na Figura 22 a seguir.

**Figura 22.** Preços dos créditos de carbono (US\$/mtCO<sub>2</sub> equivalente)



Fonte: S&P Global Platts, 2021.

10. REDD+ é um incentivo desenvolvido no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) para recompensar financeiramente países em desenvolvimento por seus resultados de redução de emissões de gases de efeito estufa provenientes do desmatamento e da degradação florestal, considerando o papel da conservação de estoques de carbono florestal, manejo sustentável de florestas e aumento de estoques de carbono florestal (+). A sigla vem de Redução de Emissões provenientes de Desmatamento e Degradação florestal.

Os preços dos créditos de carbono baseados na natureza, por sua vez, aumentaram 173% em 2021, para US\$ 12,70/mt em 10 de novembro, em comparação com US\$ 4,64/mt quando a avaliação foi lançada em 14 de junho.

Segundo a Blaufelder *et al.* (2021), em relatório da McKinsey, espera-se que a demanda total por créditos de carbono voluntários aumente em um fator de pelo menos 15 até 2030, e até 100 até 2050, de acordo com a Força-Tarefa liderada pelo setor privado para escalar os mercados voluntários de carbono.

No entanto, vários fatores podem dificultar a mobilização de toda a oferta potencial e trazê-la ao mercado. O desenvolvimento de projetos teria de acelerar a um ritmo sem precedentes. Todos os projetos vêm com riscos e muitos tipos podem ter dificuldades para atrair financiamento devido ao longo tempo entre o investimento inicial e a eventual venda de créditos. Uma vez que esses desafios sejam considerados, a oferta estimada de créditos de carbono cai para 1 a 5 GtCO<sub>2</sub> por ano até 2030.

O mercado voluntário de carbono de hoje carece da liquidez necessária para um comércio eficiente, em parte porque os créditos de carbono são altamente heterogêneos. Cada crédito possui atributos associados ao projeto subjacente, como o tipo de projeto ou a região onde foi realizado. Esses atributos afetam o preço do crédito, pois os compradores valorizam atributos adicionais de forma diferente. No geral, a inconsistência entre os créditos significa que combinar um comprador individual com um fornecedor correspondente é um processo demorado e ineficiente realizado no balcão. A padronização dos contratos é imprescindível para a maturação desse mercado.

Há necessidade de uma infraestrutura resiliente e flexível para permitir que o mercado voluntário de carbono funcione de forma eficaz: para acomodar a listagem e negociação de alto volume de contratos de referência, bem como contratos que refletem um conjunto limitado e consistentemente definido de atributos adicionais. Isso, por sua vez, apoiaria a criação de produtos financeiros estruturados para desenvolvedores de projetos.

A infraestrutura pós-negociação, composta por câmaras de compensação e meta-registros, também é necessária. As câmaras de compensação apoiariam o desenvolvimento de um mercado de futuros e forneceria proteção contra inadimplência da contraparte. Os meta-registros forneceria serviços de custódia para compradores e fornecedores e permitiriam a criação de números de emissão padronizados para projetos individuais (semelhante ao International Securities Identification Number, ou ISIN, no mercado de capitais).

Para Blaufelder *et al.* (2021), há um ceticismo no uso de créditos na descarbonização visto que alguns analistas questionam se as empresas reduzirão amplamente suas próprias emissões se tiverem a opção de usar mecanismos de compensação. As empresas beneficiar-se-iam de orientações claras sobre o que constituiria um programa de compensação ambientalmente saudável como parte de um esforço geral para emissões líquidas zero. Princípios para o uso de créditos de carbono ajudariam a garantir que a compensação de carbono não impeça outros esforços para mitigar as emissões e resulte em mais reduções de carbono do que ocorreria de outra forma.

Existe ainda o Financiamento Climático Baseado em Resultados (FCBR), que é uma forma de financiamento em que os fundos são desembolsados ao destinatário após a obtenção de um conjunto pré-acordado de resultados relacionados à projetos que irão contribuir para a redu-

ção de emissões de GEF. O Banco Mundial possui programas para esse tipo de financiamento que são o *Carbon Initiative for Development (Ci-Dev)* e o *Pilot Auction Facility for Methane and Climate Change Mitigation (PAF)*.

No setor aéreo, o CORSIA é uma iniciativa global de compensação de carbono que visa estabilizar emissões líquidas da aviação internacional nos níveis de 2020; e quaisquer emissões adicionais acima dos níveis de 2020 devem ser compensadas. Segundo o Banco Mundial (2021), o CORSIA tem potencial para gerar demanda da ordem de 2,5 GtCO<sub>2</sub>e entre 2021 e 2035, o que é comparável ao volume acumulado de créditos de Kyoto emitidos até o momento.

Há ainda iniciativas de um número crescente de organizações (empresas e governos) que passam a adotar a precificação interna de carbono para orientar seu processo de tomada de decisão, e com metas de descarbonização. Tais empresas passam a adotar um valor para a tonelada de carbono evitada em suas análises de projetos que contribuam para a redução de emissões de GEF.

Dados mais recentes do CDP<sup>11</sup> de 2020 mostram aumento de 80% em apenas cinco anos no número de empresas que adotam a precificação interna de carbono, com mais de 2.000 empresas divulgando o uso atual ou planejado de precificação interna de carbono.

Mais de 2.000 empresas – incluindo mais de 100 empresas da Fortune Global 500 com uma receita total anual de cerca de US\$ 7 trilhões – informaram, ao CDP, em 2017, que estão atualmente usando um preço interno de carbono ou planejam fazê-lo nos próximos dois anos. Dessas empresas, 853 informaram ao CDP que estão usando um preço interno do carbono. Outras 1.159 declararam que planejam implementar a precificação interna do carbono ao longo do curso de 2021-2022. No geral, a maioria das empresas usa a precificação interna de carbono para atingir um ou mais de três objetivos principais: impulsionar o investimento de baixo carbono, eficiência energética e mudança de comportamento interno.

De acordo com o Banco Mundial (2021), os preços corporativos de carbono em uso relatados apresentam imensa faixa de variação, desde US\$ 0,01/tCO<sub>2</sub>e a US\$ 909/tCO<sub>2</sub>e. O Pacto Global das Nações Unidas pediu que as empresas adotem um preço interno de carbono de, pelo menos, US\$ 100/tCO<sub>2</sub>e até 2020, o que será necessário para manter as emissões de GEE consistentes com um caminho de 1,5-2 °C.

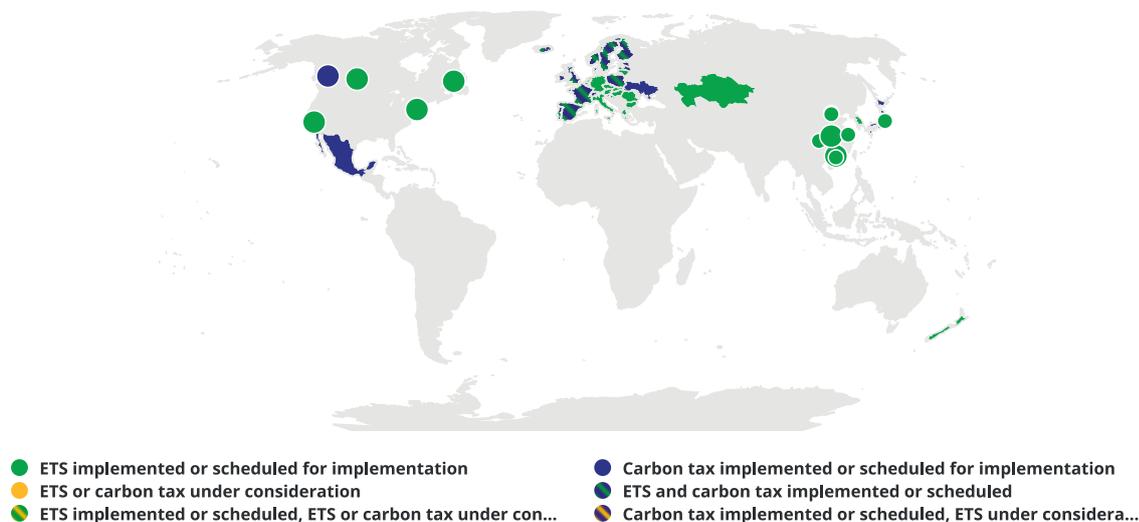
O desenvolvimento das iniciativas para consolidação dos mercados de carbono tem avançado rapidamente nos últimos cinco anos. A Figura 23, extraída da base de dados do Banco Mundial, mostra as iniciativas existentes em 2015. A Figura 24 que segue já mostra a evolução dessas iniciativas em 2021.

De acordo com o Banco Mundial (2022), atualmente 65 iniciativas de mercado de carbono foram implementadas globalmente e, em 2021, tais iniciativas foram responsáveis por 11,65Gt-CO<sub>2</sub>e, o que representa 21,5% das emissões globais de gases de efeito estufa.

11. O CDP é uma organização sem fins lucrativos que opera o sistema global de divulgação para que investidores, empresas, cidades, estados e regiões gerenciem seus impactos ambientais. Em 2021, 131.180 empresas divulgaram seus resultados de emissões por meio do CDP.

**Figura 23.** Mapa com síntese das iniciativas de mercados de carbono em 2015

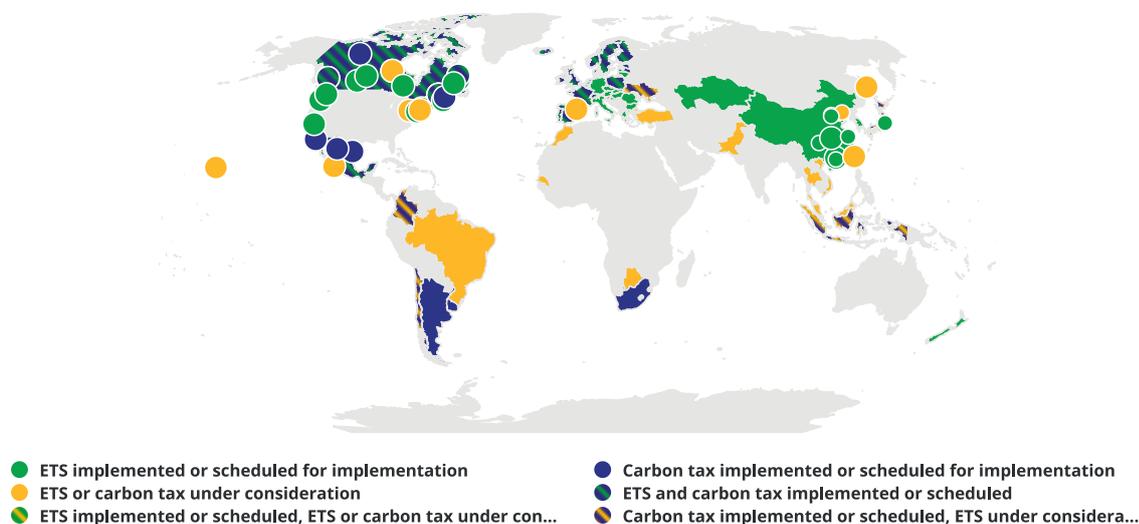
Summary map of regional, national and subnational carbon pricing initiatives



Fonte: World Bank 2022.

**Figura 24.** Mapa com síntese das iniciativas de mercados de carbono em 2021

Summary map of regional, national and subnational carbon pricing initiatives



Fonte: World Bank 2022

As iniciativas são classificadas em Mecanismos de Comercialização de Emissões (MCE) e Taxação de Carbono (TC). Ao todo, são atualmente 50 iniciativas no âmbito MCE, sendo que 30 já estão implementadas. E, no âmbito da taxaçoão do carbono, seriam 43 iniciativas das quais 34 já implementadas. A descrição, o *status* e a contribuição de cada uma dessas iniciativas pode ser consultado no *dashboard* do Banco Mundial no endereço: [https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map\\_data](https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data).

No que diz respeito a mecanismos de créditos de carbono, 25 mecanismos foram implementados até 2021 e seis estão em desenvolvimento.

Introduzido em 2005, como a resposta coletiva europeia ao Protocolo de Kyoto (1997), o ETS (European Trading Scheme) é um instrumento da política da UE (União Europeia) contra as alterações climáticas. Atribui um preço ao CO<sub>2</sub> que as entidades sujeitas a obrigações de cumprimento podem libertar para a atmosfera, com o objetivo geral de reduzir as emissões líquidas de gases com efeito de estufa. Funciona com base no princípio “*cap and trade*”.

O ETS opera em todos os países da UE, bem como na Noruega, na Islândia e em Liechtenstein e limita o volume total de emissões de GEE das instalações cobertas pelo esquema. A cada ano, o limite é reduzido de forma incremental, de modo que uma redução linear das emissões de 2,4% a.a aconteça.

Atualmente abrange mais de 11.000 instalações de uso intensivo de energia e companhias aéreas que operam entre esses países e tem como alvo aproximadamente 45% das emissões de gases de efeito estufa da UE, principalmente CO<sub>2</sub>, mas também N<sub>2</sub>O e PFCs.

Desde a sua criação em 2005, reduziu as emissões em 21% e pretende atingir uma redução de 43% até 2030. A implementação desse sistema é dividida em períodos de negociação distintos ao longo do tempo, denominado de fases.

A primeira fase ETS-EU aconteceu entre 2005 e 2007 e tratava-se de um piloto com alocação livre. A segunda fase, entre 2008 e 2012, aconteceu com o primeiro compromisso de redução e conformidade de limites de emissões. A fase 3, entre 2013 e 2020, considerou um limite de redução de emissões de 1,74% ao ano, com limite único em toda UE nos leilões. A fase 4, atual, vai de 2021 a 2030 e impõe redução de emissões de 2,2% ao ano, com permissões para 2021 de 1.571 MtCO<sub>2</sub>. Estamos atualmente na fase 4, que começou em 1º de janeiro de 2021 e será concluída em 2030. A partir de 2021, mais de 57% do *cap* deverá ser transacionado em leilões.

O mercado primário de licenças de emissão consiste em leilões em que, além das empresas e operadores com obrigações de participação, são acessíveis a outros agentes do mercado, tais como instituições de crédito, empresas de investimento, fundos, empresas de comercialização de mercadorias sem obrigações de redução), desde que, como licitantes, atendam aos requisitos de admissão relevantes estabelecidos no Regulamento de Leilões 1031/2010 (artigos 18 e 19) – que garante acesso justo e aberto a todos os participantes do leilão. Os requisitos de admissão do Regulamento de Leilões exigem, entre outros, que todas as entidades que não sejam compradores de conformidade estejam estabelecidas na UE e a abertura de uma conta no registro da União, a nomeação de pelo menos um representante do licitante, a existência de arranjos técnicos e também o cumprimento dos requisitos de admissão das plataformas de leilões (por exemplo, comprovação de confiabilidade pessoal e qualificação profissional, reconhecimento como participante de negociação pela câmara).

Na UE, a maioria dos Estados-Membros aderiu conjuntamente ao mercado regulamentado alemão EEX como plataforma comum para leiloar as licenças no âmbito do Sistema Europeu de Comércio de Emissões (EU ETS – *European Union Emissions Trading Scheme*) definido na Diretiva ETS. Leilões separados são organizados pela EEX em nome da Alemanha e da Polónia.

Na EEX são realizados leilões de dois tipos de licenças: licenças da UE e licenças de aviação da UE. Os leilões ocorrem diariamente de acordo com um calendário fixo. Uma licença permite a emissão de uma tonelada de equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Em janeiro de 2019, foi introduzida uma Reserva de Estabilidade de Mercado (REM) para lidar com o excedente de licenças, bem como um mecanismo de ajuste da oferta para aumentar a resiliência do sistema a grandes choques. O sistema funciona de acordo com regras predefinidas, que adaptam os volumes dos leilões alterando o número total de licenças em circulação.

Existe um mercado secundário composto por (1) contratos com vencimento diário, denominados “*daily futures*” ou “*spot*”; (2) futuros com vencimentos diversos; e (3) opções sobre futuros. Todos os derivativos têm um tamanho de contrato padronizado de 1.000 permissões (ou seja, 1.000 toneladas de CO<sub>2</sub>). Três plataformas de negociação europeias oferecem um mercado secundário no mercado de carbono da UE: EEX na Alemanha, ICE Endex na Holanda e Nasdaq Oslo na Noruega. O mercado secundário de carbono da UE na ICE migrou totalmente do local de negociação ICE Futures Europe do Reino Unido para a entidade holandesa ICE Endex em junho de 2021, e as permissões sob o ETS do Reino Unido estão desde então disponíveis para negociação na ICE Futures Europe.

O mercado secundário desempenha papel importante ao fornecer, aos compradores, a oportunidade de adquirir permissões ainda que não tenham os requisitos para participação no mercado primário. Esse último também conta com instituições financeiras que atuam diretamente em nome de seus clientes ou que pretendem vender licenças no mercado secundário, o que contribui para a sua liquidez.

Uma comparação de dados recentes sobre posições em aberto nas três plataformas de negociação EEX, Nasdaq Oslo e ICE Endex mostra que esta última representa a maior parte dos contratos pendentes. Quase 45% da participação em aberto no ICE Endex está concentrada em futuros de vencimento em dezembro de 2021.

Além do EU ETS, sistemas nacionais ou subnacionais estão sendo operados ou estão em desenvolvimento no Canadá, na China, no Japão, na Nova Zelândia, na Coreia do Sul, na Suíça, no Reino Unido e nos Estados Unidos.

Com 8,1 bilhões de toneladas em 2020, o volume total negociado de licenças de emissão na UE foi quatro vezes maior que o volume negociado na América do Norte, o segundo maior mercado. Apesar de sua contínua expansão, a ESMA (*European Securities and Markets Authority*) observa que o tamanho do mercado de carbono é pequeno em comparação, por exemplo, com os mercados multitrilionários de petróleo e gás.

A proporção da atividade de comércio no mercado de balcão do mercado de carbono obrigatório é marginal (em contraste com os créditos de carbono voluntários que são negociados). Assim, ao contrário de outros mercados de derivativos, o mercado de carbono é quase inteiramente negociado em mercados regulamentados e compensado em contrapartes centrais.

O ETS representa o maior mercado mundial de licenças de emissão com base no volume de negócios. A Figura 25 que se segue apresenta a evolução dos preços no ETS-EU, que chegou a atingir preço recorde de US\$101,16/mtCO<sub>2</sub>e em dezembro de 2021. Importante considerar que, a partir de 2021, não são previstas compensações. Nota-se que a mudança na taxa de crescimento dessa curva é nítida a partir dos eventos da pandemia de covid-19 e da COP26.

**Figura 25.** Evolução dos preços das permissões no âmbito do ETS-EU (US\$/mtCO<sub>2</sub>e)

Fonte: Bloomberg

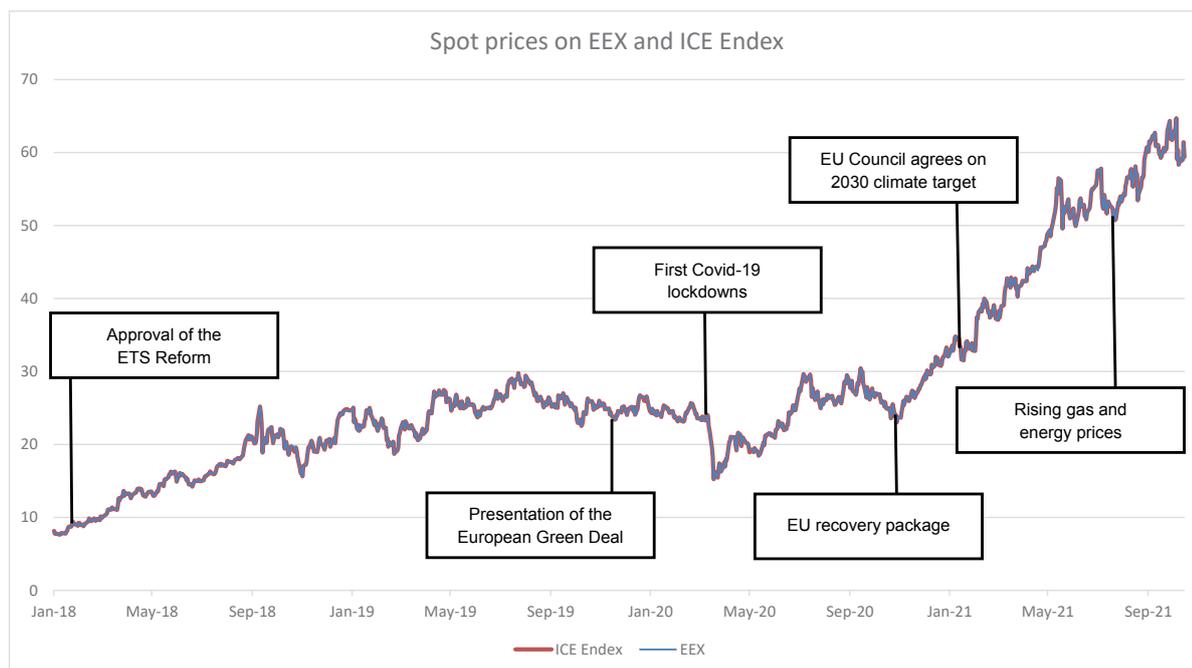
Recentemente, o sistema de comércio de emissões da China veio *on-line* – o maior mercado de carbono no mundo, abrangendo inicialmente cerca de 4.000 MtCO<sub>2</sub> ou 30% de suas emissões de GEE, de acordo com o Valor.<sup>12</sup> O foco inicial no setor de energia abrange 40% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2021. O mercado chinês permite até 5% de compensações de suas emissões verificadas.

O Reino Unido e a Alemanha lançaram mercados nacionais de carbono e mecanismos de taxaço foram implementados na Holanda e em Luxemburgo.

A COP 26 teve contribuição muito importante na regulamentação do mercado de carbono, definido a comercialização de créditos de carbono entre países, considerando ajustes correspondentes (dupla contagem) nos compromissos climáticos dos países excluindo REDD+. Os países devem descontar créditos vendidos na prestação de contas das metas de redução de emissões. Essa regulamentação abre caminho para definição de um preço global de carbono.

O mercado secundário, atualmente, concentra-se no ICE Endex, embora algumas negociações também ocorram no EEX. Comparando os preços de liquidação diários de ambas as operadoras (Figura 26), não se observam grandes diferenças e os *spreads* geralmente permanecem abaixo de 0,01 €/tCO<sub>2</sub>, sugerindo a ausência de oportunidades de arbitragem.

12. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/um-so-planeta/china-abre-mercado-nacional-de-carbono-veja-por-que-mundo-inteiro-esta-de-olho-1-25112600>.

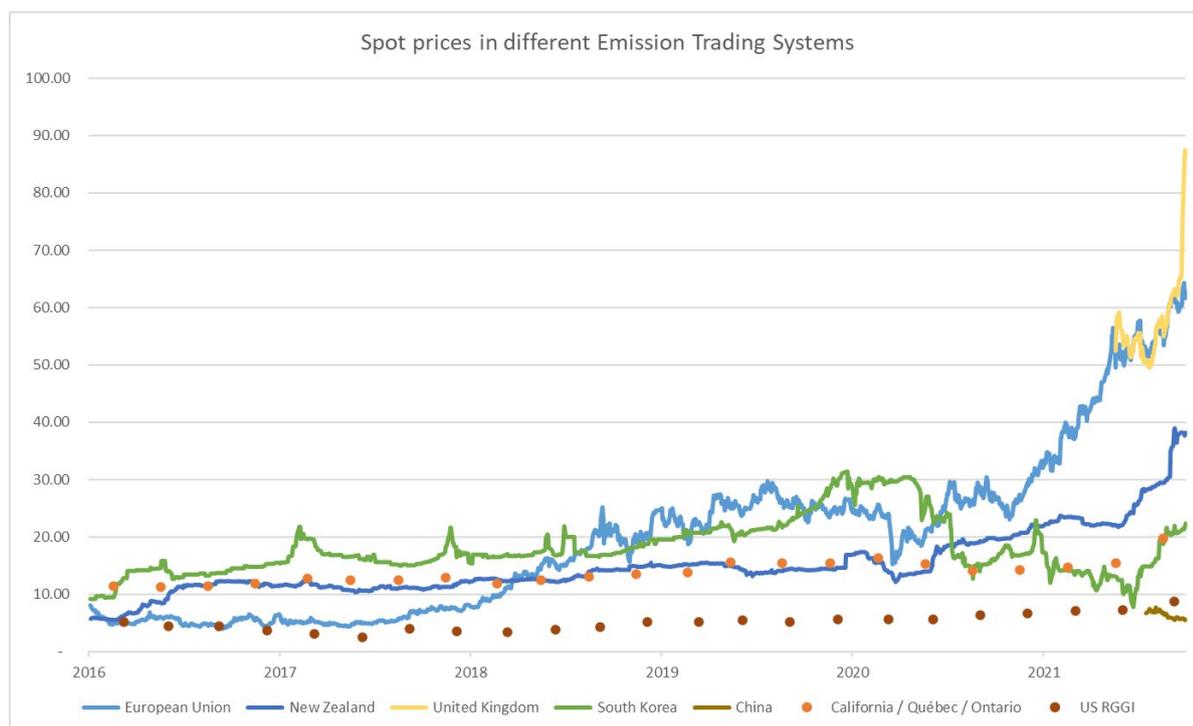
**Figura 26.** Preços spot em negociação contínua na EEX e ICE ENDEX, em €/tCO<sub>2</sub>.

Fonte: Refinitiv

A Figura 27 compara a evolução dos preços de várias iniciativas desde 2016. Diferentes sistemas estavam precificando as emissões de forma relativamente semelhante há cinco anos (~10 €/tCO<sub>2</sub>) e foram por vários anos seguindo a mesma tendência ascendente (até março de 2020). Os preços do carbono no mercado europeu ficaram atrás dos preços em várias outras regiões, refletindo um superávit das permissões de emissões da UE até 2018, em antecipação ao impacto da Reserva de Estabilidade do Mercado (REM) e de outros fatores subjacentes. A pandemia afetou os mercados com a redução da atividade econômica e, conseqüentemente, da demanda global de energia. Com isso, os preços despencaram de 23 para 15 €/tCO<sub>2</sub> em apenas alguns dias. No entanto, os preços voltam a subir novamente, apoiados pela REM e por estímulos fiscais. Novas metas de redução de emissões em toda a UE anunciadas no final de 2020 impulsionaram ainda mais o mercado.

O movimento de aumento dos preços foi também catalisado pelos aumentos dos preços do gás natural e da energia elétrica que acabaram por aumentar a atratividade do carvão como substituto na produção de eletricidade.

A combinação de uma redução mais rápida do que o esperado nas permissões com o aumento da demanda levou a um aumento acentuado nos preços das permissões, conforme pode ser visto na Figura 27, que compara diversos instrumentos de comercialização de emissões.

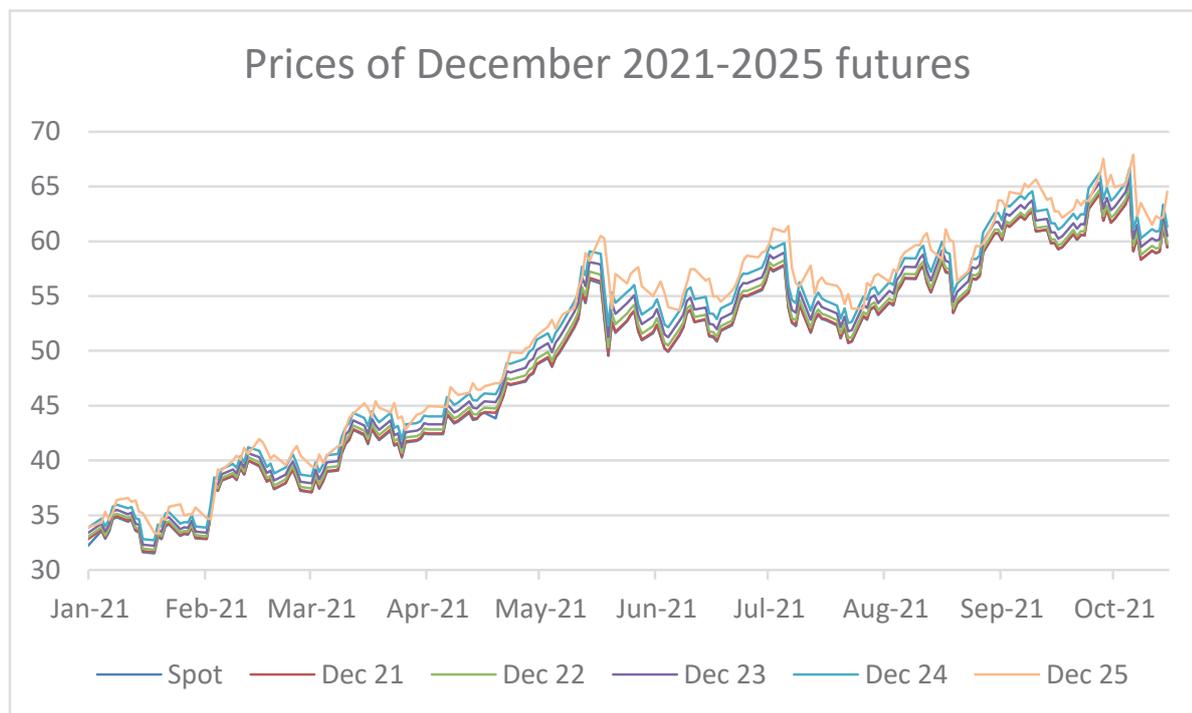
**Figura 27.** Preços no mercado a vista em diferentes esquemas de comercialização de emissões (€/tCO<sub>2</sub>).

Fonte: ESMA, 2021.

A diferença de preços verificada entre os preços no mercado à vista e os preços futuros tem sido mínima, como pode ser visto na Figura 28. Nota-se, também, que os preços à vista e futuros aumentaram em conjunto, refletindo expectativas de que os preços provavelmente não cairão significativamente no longo prazo.

Há praticamente uma estabilidade do *spread* entre preços à vista e futuro. A principal razão para isso é que as licenças excedentes podem ser mantidas para cobrir necessidades futuras, visto que o custo de “armazenar” as licenças é pequeno, o que acarreta forte ligação entre os preços à vista e futuros.

**Figura 28.** Preços diários em €/tCO<sub>2</sub> dos contratos futuros de dezembro (de 2021 a 2025) negociado na ICE ENDEX e do mercado à vista (spot)



Fonte: Refinitiv

## 5.1. Volatilidade

A volatilidade histórica dos preços *spot* das permissões de emissões no mercado europeu calculada pela ESMA (2021) é apresentada na Tabela 12 a seguir.

**Tabela 12.** Volatilidade dos preços no mercado à vista das permissões de emissões no mercado europeu

Medida	Volatilidade histórica	Volatilidade Intradia
Antes Março/2020	47%	0.07
Após Março/2020	73%	0.17

Fonte: ESMA, 2021

A ESMA utiliza duas medidas de volatilidade. A volatilidade intradiária é considerada mais confiável que a volatilidade histórica, uma vez que a primeira contabiliza informações dentro do dia sobre preços altos e baixos. O mesmo estudo faz um comparativo da volatilidade das permissões no mercado europeu com diversos ativos, como apresentado na Tabela 13 seguinte.

**Tabela 13.** Comparativo da volatilidade das permissões de emissões no mercado europeu com outros ativos

ETS	Capital Próprio	Títulos Dívida Corporativa	Títulos da Dívida Governo	Petróleo	Gás Natural	Carvão	Ouro
2,8%	1,2%	0,2%	0,3%	3,2%	4,7%	2,2%	1,0%

Fonte: ESMA, 2021.

O estudo da ESMA observa que, embora essa volatilidade dos preços das permissões para emissões no mercado europeu sejam bastante superiores aos títulos de dívidas de empresas ou mesmo títulos públicos, é comparável à volatilidade de *comodities* tais como o petróleo, o gás natural, o carvão e o ouro. Para muitos ativos de energia como os citados anteriormente, aumentos acentuados nos preços à vista geralmente resultam em reversão à média com a inclinação da curva, sinalizando a rapidez com que se espera que isso ocorra. No entanto, a análise histórica dos preços de permissões não aponta para uma tendência de reversão à média, de modo que não haveria expectativa de inversão na curva para preços futuros, mostrando uma tendência de alta nos preços futuros.

## 5.2. O mercado de carbono no Brasil

O Brasil atualmente está discutindo seu marco regulatório para o mercado de carbono. O Projeto de Lei (PL) n. 528/2021 regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), determinado pela Política Nacional de Mudança do Clima – Lei n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009. A criação do MBRE está prevista na lei que instituiu a Política Nacional de Mudança do Clima (Lei n. 12.187/09), e é uma recomendação do Protocolo de Quioto. A proposta regulamenta um mercado novo, tendo, como principais pontos, natureza jurídica, registro, certificação e contabilização dos créditos de carbono. Também fixa um prazo (cinco anos) para o governo regulamentar o programa nacional obrigatório de compensação de emissões de GEE.

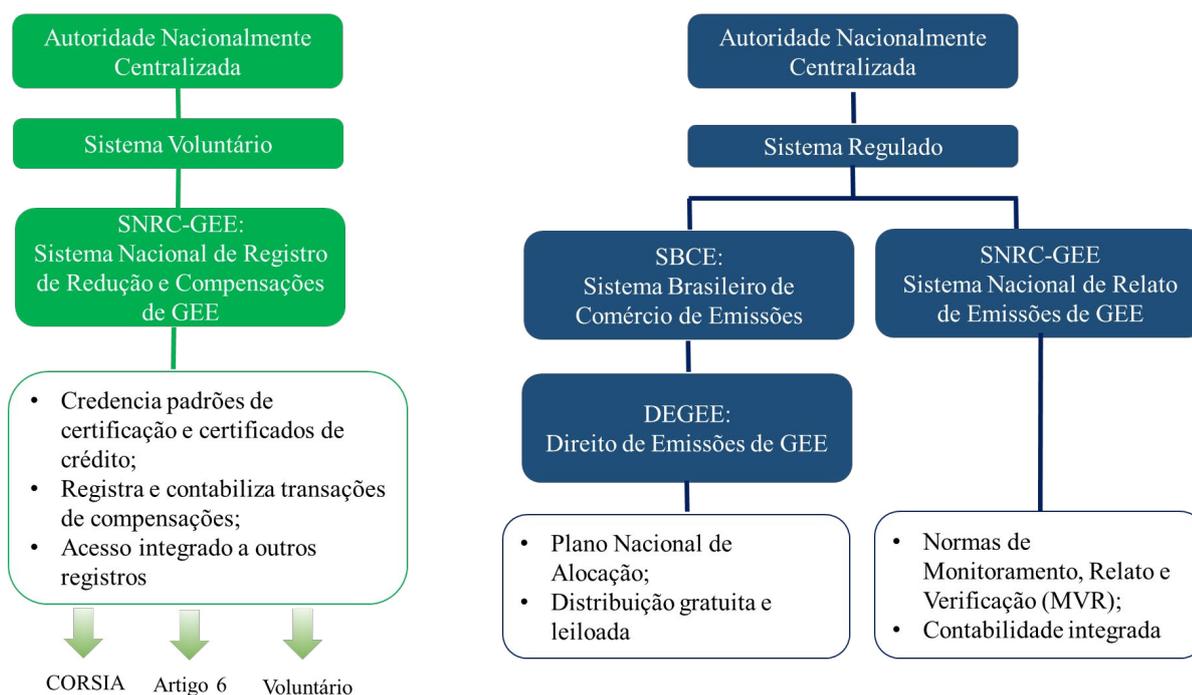
O texto prevê a criação de um mercado voluntário de créditos de carbono, que se destina à negociação com empresas ou governos que não possuem as metas obrigatórias de redução de GEE, mas desejam compensar o impacto ambiental das suas atividades. Eles poderão investir em projetos que visam reduzir as emissões de carbono na atmosfera.

As transações no mercado voluntário serão isentas de PIS, Cofins e CSLL.

Todos os projetos de redução de GEE e as negociações dos créditos de carbono serão registrados por um sistema eletrônico, gerido pelo Instituto Nacional de Registro de Dados Climáticos (INRDC), órgão de natureza privada fiscalizado pelo Ministério da Economia, que indicará parte da diretoria.

O Marco Regulatório em discussão prevê um sistema regulado e um voluntário, como pode ser visto na Figura 29 a seguir.

Figura 29. Proposta para o Mercado Brasileiro de Carbono



Fonte: CEBDS Seminário Marco Regulatório

Tendo em vista que o EU ETS é o mercado mais desenvolvido até o presente momento, para fins deste estudo será considerada a possibilidade de monetização dos ganhos das emissões evitadas com o consumo do SAF no mercado de emissões europeu. Dessa forma, o próximo tópico trata das projeções de preços futuros nesse mercado.

### 5.3. Projeções dos preços

De acordo com a S&P Global (2022), esforços para reformar o Sistema de Comércio de Emissões da UE estão enfrentando uma batalha difícil em 2022, incluindo uma proposta de expansão para o transporte marítimo que ocorre durante uma crise de custos de energia na Europa que ameaça diminuir a disposição de aceitar regulamentações ambientais mais rigorosas.

Tendo em vista a maturidade do mercado e os inúmeros fatores externos que podem interferir no avanço desse mercado, a utilização de séries históricas não seria adequada a uma projeção de preços futuros. Isso em grande parte porque os preços passados se referem a outra condição de obrigatoriedades nacionais, que impactam a liquidez, volumes iniciais muito pequenos e perspectiva de mudanças de regras nos anos que virão.

No EU ETS, após um pico de US\$102,24/mt (€90,75/mt) em 8 de dezembro, levando a pedidos de intervenção para conter o que alguns veem como especulação financeira excessiva, os preços recuaram para €79,38/mt em 20 de dezembro, registrando ganho de 136% em 2021.

Ainda que as autoridades da EU afirmem que não há divisões reais entre os Estados-Membros sobre a meta principal de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> sob o EU ETS em 61% até 2030 em relação

aos níveis de 2005, existem resistências de alguns setores, tais como o do transporte marítimo; e uma proposta para eliminar gradualmente as permissões gratuitas para setores industriais a partir de 2026; e estabelecer novo mercado paralelo de carbono para edifícios e transportes.

O fim da alocação gratuita é importante, porque traria exposição às indústrias intensivas em emissões ao custo total das permissões de carbono pela primeira vez.

A CE quer eliminar gradualmente as licenças gratuitas e substituí-las por um Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono que aplicaria uma tarifa sobre o teor de carbono das importações da UE de ferro e aço, eletricidade, cimento e fertilizantes. O efeito disso nessas indústrias seria um aumento nos custos de produção justamente em um momento que as economias já sofrem com a pandemia global e com a crise de preços de energia aguda ligada à escassez de gás natural na Europa em 2021.

De fato, de acordo com a Reuters (2022), a continuação dos altos preços do gás, impulsionada por preocupações com o fornecimento da Rússia, em função da guerra entre a Rússia e a Ucrânia e o destino do novo gasoduto Nord Stream 2 da Rússia para a Alemanha, reforçam pressões sobre os preços das permissões de carbono. Os preços do gás natural na Europa dispararam 75%, na primeira semana de março de 2022 com perspectivas das sanções aplicadas ao fornecimento russo de matérias-primas energéticas, país que fornece 40% do gás consumido na Europa. O Poder Executivo da UE estuda impor um teto temporário ao preço do gás natural para conter a disparada no custo da energia em seus Estados-Membros. O anúncio chega após Estados Unidos e Reino Unido terem dito que vão zerar suas importações de gás e petróleo da Rússia por causa da guerra na Ucrânia, medida que deve pressionar o preço de *commodities* de energia no mercado internacional.

No último dia 3 de março de 2022, o preço do barril de petróleo fechou aos US\$ 110 no mercado britânico, depois de chegar a encostar nos US\$ 120 durante a sessão.

Há, ainda, o pacote de julho de 2021, que incluiu uma proposta para estabelecer novo mercado autônomo para emissões de CO<sub>2</sub> de edifícios e combustíveis de transporte. O novo MCE visa cobrar carbono na distribuição de combustíveis a partir de 2026 e, ao contrário de outros setores, não incluirá permissões de carbono gratuitas para fornecedores de combustível.

A crise no fornecimento e os altos preços do gás, combinados com uma recente decisão de elevar as metas climáticas da UE para 2030, formaram uma “tempestade perfeita” no mercado de carbono da EU. Florian Rothenberg,<sup>13</sup> em entrevista para o site Euractiv (2021), prevê um preço de carbono de € 90/mt no final da década.

Para a Bloomberg (2021), é possível alta de até 50% nos preços de carbono no mercado europeu no horizonte de 2030. Analistas da Bloomberg apostam em preço de € 85/mt, uma vez que os futuros de carbono na região dobraram em dois anos para mais de 55 euros devido às expectativas de que as reformas para alinhar o mercado com metas climáticas mais rígidas para 2030 tornarão as permissões de emissão mais escassas. A nova projeção de preços da Comissão Europeia, incluída em uma análise da revisão planejada do Sistema de Comércio de Emissões do bloco, ainda é inferior às previsões da maioria dos analistas de carbono.

13. Florian Rothenberg é analista dos mercados de energia e carbono da UE na ICIS, uma empresa independente de serviços de inteligência de *commodities*.

As projeções da UE comparam-se com um preço de 108 euros por tonelada em 2030, previsto por Florian Rothenberg, pesquisador da Bloomberg New Energy Finance. Alguns fundos de *hedge* haviam previsto preços acima de €100 em 2022, valores que foram verificados em 8 de dezembro de 2021. Segundo o *site* Trading Economics, os preços das permissões de carbono da UE aumentaram €10,09 ou 12,51% desde o início de 2022 de acordo com a negociação de um contrato por diferença (CFD) que acompanha o mercado de referência. Em 15/2/2022 o preço estava sendo cotado a €90,83/mt. Em 20 de maio de 2022 as permissões de carbono da UE foram negociadas a €80,60/mt. Olhando para o futuro, estimam que seja negociado a €83,74 em 12 meses, conforme pode ser observado na Figura 30 que se segue.

**Figura 30.** Análise histórica e tendência nos preços das permissões para emissões de carbono no mercado europeu (€/mtCO<sub>2</sub>)



Fonte: Trading Economics, 2022.

Dessa forma, parece ser um consenso que, no horizonte de 2030, os preços do carbono no mercado europeu estejam em torno de € 80/mt a € 100/mt.

Tendo em vista as grandes incertezas no mercado no longo prazo e a necessidade de consideração da remuneração das emissões evitadas pelo uso dos SAF, serão realizadas análises considerando dois cenários para os preços do carbono. No cenário mais otimista, será adotado um preço de € 95/mt, em linha com o que os especialistas preveem no final de 2022. O cenário pessimista representa um cenário de fracasso na estratégia global de manter o nível de aquecimento abaixo de 2 °C, em linha com o acordo de Paris. Para esse cenário, será usado um preço de carbono de € 18/mt, em linha com a média histórica desde 2005.

Como não há definição de quais impostos deverão incidir sobre a receita dos créditos de carbono adquirida no mercado europeu, vamos admitir que tal receita é líquida de impostos.

Dessa forma, assumindo uma receita adicional advinda da monetização desses créditos de carbono com todas as demais premissas de cada alternativa adotadas nas análises do Capítulo 4, seriam obtidos os ganhos apresentados nas coluna 4 (VPL (cenário otimista), com Receita de € 95/mt) e na coluna 5 (VPL (cenário pessimista), com Receita de € 18/mt). O impacto pode

ser observado pela comparação com os resultados dos casos base que não consideram a venda dos créditos de carbono representados na coluna 2 e da Tabela 14 a seguir.

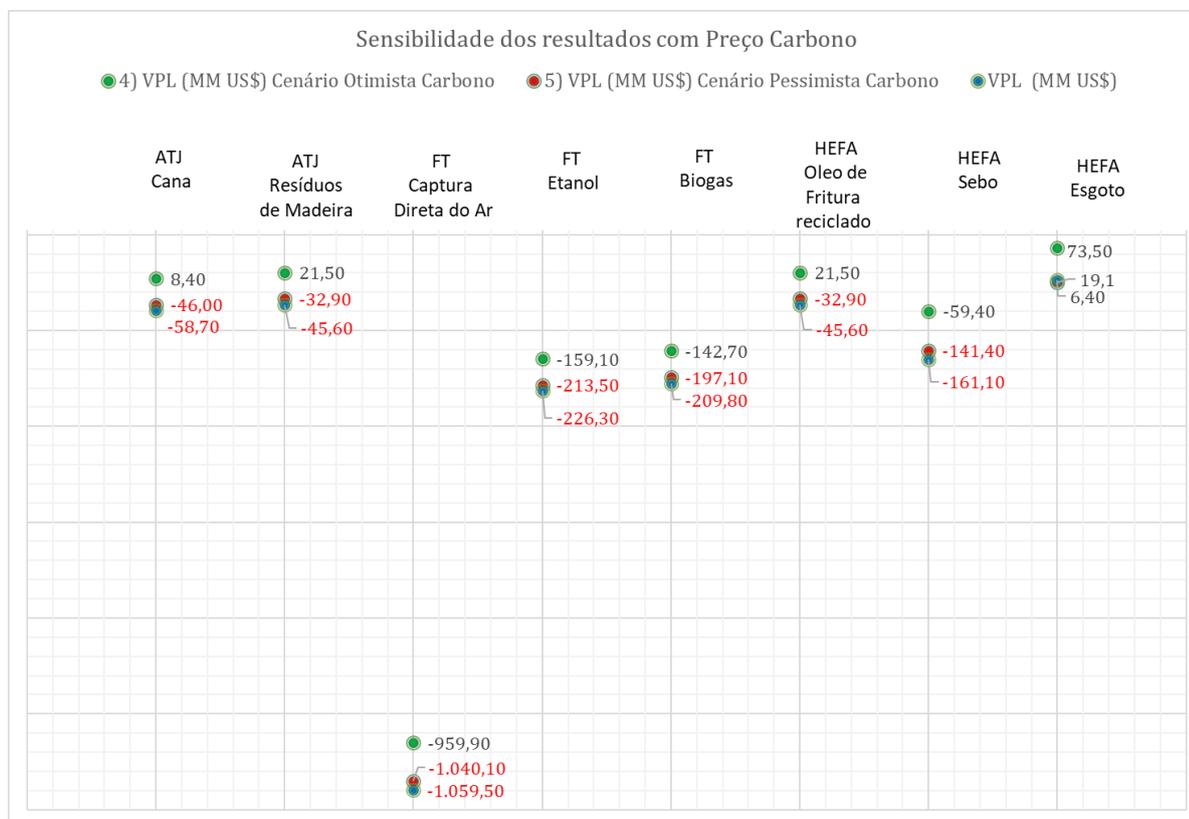
**Tabela 14.** Resultados das análises de sensibilidade considerando diferentes preços de carbono no mercado europeu

1) Rota	2) Matéria- Prima	3) VPL (MM USD) Caso Base	4) VPL (MM US\$) Cenário Otimista Carbono	5) VPL (MM US\$) Cenário Pessimista Carbono	6) Produção SAF (MM litros/ano)
ATJ	Cana-de-açúcar	(58,7)	8,4	(46,0)	78,67
ATJ	Resíduos de Madeira	(45,6)	21,5	(32,9)	69,62
FT	Captura de CO <sub>2</sub> do ar	(1.059,5)	(959,9)	(1.040,1)	56,25
FT	Etanol	(226,3)	(159,1)	(213,5)	57,60
FT	Biogás	(209,8)	(142,7)	(197,1)	54,04
HEFA	Reciclagem de Óleo Fritura	(45,6)	21,5	(32,9)	60,40
HEFA	Sebo	(161,1)	(59,4)	(141,4)	58,26
HEFA	Resíduos de Esgoto	6,4	73,5	19,1	11,10

Fonte: elaboração própria

A Figura 31 ilustra graficamente os mesmos resultados da Tabela 14.

**Figura 31.** Resultados do VPL de cada alternativa considerando receitas dos créditos de carbono no mercado europeu



Fonte: elaboração própria

Os resultados mostram que nas rotas ATJ com cana ou resíduo de madeira, e na HEFA com óleo de fritura reciclado o cenário otimista da comercialização desses créditos de carbono viabilizariam as alternativas. O cenário pessimista de um preço para o carbono de € 18/mt, não viabilizaria nenhuma das alternativas, de modo que a decisão de investimento não seria alterada.

Essa conclusão poderia também ser estendida à questão do mercado voluntário, que apresenta preços ainda tão baixos que não seriam capazes de viabilizar nenhuma alternativa.

A Tabela 15 abaixo mostra qual seria o preço de carbono de equilíbrio para a venda dos créditos de carbono que viabilizam cada rota. O preço de equilíbrio é aquele que torna o VPL igual a zero, ou seja, garante a rentabilidade exata do custo de capital.

Mostra também qual deveria ser o preço de equilíbrio de venda do SAF para cada cenário considerando que o carbono evitado seja vendido a € 18/mt (cenário pessimista) e € 95 /mt (cenário otimista)

**Tabela 15.** Preço de equilíbrio do SAF e do crédito de carbono (€/mt)

		LCF US\$/1 para cenário otimista Carbono	LCF US\$/1 para cenário pessimista Carbono	Preço do Crédito de Equilíbrio (€/mt)
ATJ	Cana-de-açúcar	0,82	1,02	83,17
ATJ	Resíduos de Madeira	0,77	0,99	64,55
FischerTropsch (FT)	Captura CO <sub>2</sub> do ar	4,73	5,01	1163,00
FischerTropsch (FT)	Etanol	1,65	1,93	320,31
FischerTropsch (FT)	Biogás	1,62	1,91	297,04
HEFA	Reciclagem de óleo fritura	0,75	1,01	64,55
HEFA	Sebo	1,11	1,34	179,05
HEFA	Resíduos de esgoto	(1,06)	0,36	(8,99)

Fonte: Elaboração própria

## 6. OFERTA E DEMANDA DO SAF NO BRASIL

O objetivo desse capítulo consiste na elaboração de cenários de oferta e demanda de SAF no Brasil, considerando o teor de mandato de SAF necessário para atendimento aos compromissos de descarbonização.

O CORSIA é o programa da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) para a redução e compensação de emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos voos internacionais. Seu objetivo é atingir o crescimento neutro de carbono, ou seja, que as emissões sejam estabilizadas nos níveis observados em 2020, sem que o setor aéreo precise parar de crescer.

De acordo com a Anac, o objetivo do programa é garantir que a aviação cumpra seu papel no esforço global no combate à mudança climática, ao mesmo tempo em que reduz os custos incorridos pelo transporte aéreo com a aquisição de créditos de carbono; via de regra, os créditos são emitidos por outros setores da economia que possuem alternativas mais eficientes e baratas de reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub> do que o próprio setor aéreo.

O Brasil não se voluntariou para as fases iniciais do programa, sendo obrigado, como todos os países-membros da ICAO, apenas a reportar as emissões da atividade aérea internacional dos seus operadores. Mas, a partir de 2027, a participação do país é obrigatória na terceira fase do programa, que limita as emissões ao nível de referência, com a compensação das emissões que ultrapassarem a linha. Assim, a partir do ano de 2027, as emissões internacionais de operadores brasileiros, acima dos níveis observados na média do biênio de 2019-2020, deverão ser compensadas com a aquisição de créditos de carbono ou por meio do uso de combustíveis elegíveis ao CORSIA, em especial os combustíveis sustentáveis de aviação. A Anac é o órgão responsável no Brasil pela implementação do CORSIA e pela fiscalização dos operadores aéreos.

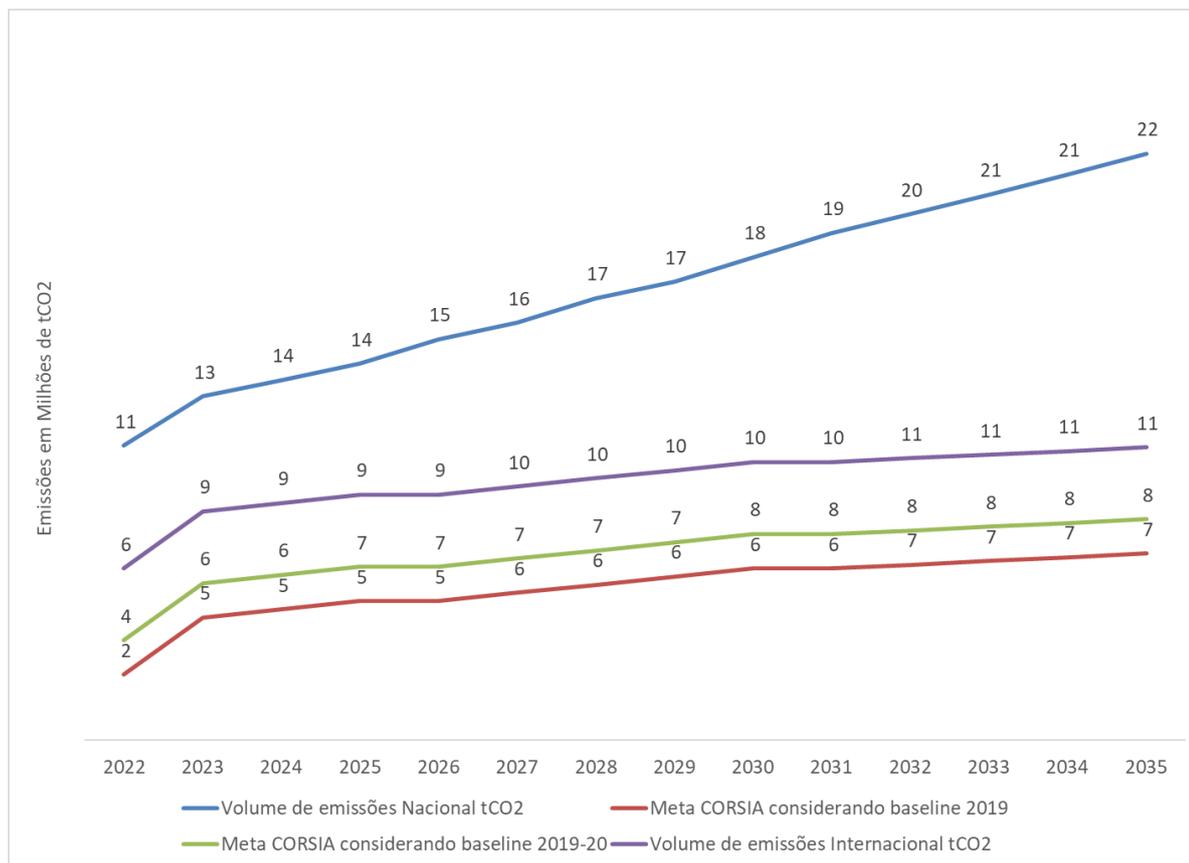
A Resolução n. 496, de 28 de novembro de 2018,<sup>14</sup> contém as diretrizes que os operadores brasileiros devem seguir para cumprir com os requisitos do programa. De acordo com essa Resolução, as emissões referentes aos anos de 2019 e 2020 comporão a linha de base de emissões de CO<sub>2</sub> dos operadores aéreos nacionais. Até o presente momento, no *site* da Anac, só foram publicados inventários de emissões atmosféricas da Aviação Civil para até o ano de 2019. Tendo em vista o impacto da pandemia particularmente sobre o ano de 2020, serão considerados dois cenários: um em que a linha de base é apenas 2019, e o segundo, mais agressivo, considera a média de 2019-2020. Há, no momento, discussões particularmente na União Europeia sobre qual será a linha de base a ser adotada.

Assim, para metas do CORSIA, de acordo com dados publicados pela Anac, na hipótese da linha de base ser considerada como as emissões de 2019, a meta seria de 4MM toneladas de CO<sub>2</sub>. Se considerarmos que a linha de base deverá ser a média das emissões de 2019 e 2020, a meta seria de 2,7MM t CO<sub>2</sub>. Essa média fica muito distorcida, e muito mais desafiadora, pelo volume de voos inferior em 2020 em decorrência da pandemia. No ano de 2020, as emissões totais no

14. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2018/resolucao-no-496-28-11-2018>.

setor aéreo no Brasil foram de apenas 1,4MM t CO<sub>2</sub>, representando apenas 35% do volume das emissões de 2019. Assim, considerando os valores meta do CORSIA, seriam necessárias reduções de 5,5MM t CO<sub>2</sub> (linha de base 2019) ou 6,8 MM t CO<sub>2</sub> (linha de base 2019-2020) em 2027 nos voos internacionais. A figura a seguir ilustra exatamente as emissões previstas a partir do consumo do QAV fóssil conforme projeções da EPE e as metas do CORSIA.

**Figura 32.** Metas CORSIA e Volume de emissões projetado de acordo com EPE (2021a)



Fonte: Elaboração própria

Para os voos nacionais, deverá valer a indicação da política pública que está sendo desenvolvida nesse momento.

O PNE 2031 assume, como premissa, a inserção do SAF no Brasil atualizando as projeções do PNE 2030, considerando os desdobramentos advindos da pandemia da covid-19, cujos impactos no setor de biocombustíveis deverão ser observados com mais intensidade no curto prazo. De acordo com o PNE 2031, o QAV foi o combustível mais afetado pela pandemia. Embora os efeitos nos voos domésticos tenham sido minorados em 2021, muitos países ainda mantêm restrições para visitantes internacionais, afetando a demanda por esses voos. No início de 2022, a variante Omicron voltou a afetar o setor aéreo, ainda que de forma menos intensa que em outras ondas da pandemia.

A EPE (2022c) publicou, em fevereiro de 2022, um relatório sobre as perspectivas do mercado brasileiro de combustíveis no curto prazo, no qual faz uma projeção do consumo de QAV até 2023, conforme Figura 33 seguinte.

**Figura 33.** Projeção do consumo de QAV até 2023 no Brasil

Fonte: EPE, 2022c.

Nesse estudo, projeta trajetória crescente, lenta e gradual de recuperação do consumo de QAV, de modo a alcançar os níveis pré-pandemia apenas em 2023. Além dos efeitos da crise sanitária, o consumo de QAV também foi afetado pelo aumento dos preços das passagens aéreas, pelo real desvalorizado, e também pelos impactos na renda *per capita* da população, com comprometimento do poder de compra. A partir daí, considera crescimento de 0,7% até 2031, e 3,7% a.a de 2031 até 2045, como proposto no PNE 2050.

Em termos de preços, estima-se que o prêmio do QAV em face do petróleo Brent se eleve para níveis pré-pandemia nos próximos anos. No longo prazo, o aumento da eficiência das aeronaves e a introdução de combustíveis alternativos *drop-in* deverão limitar o crescimento da demanda deste combustível, com o início da redução do seu prêmio em face do Brent em 2030.

Para projeção do consumo do QAV, foram utilizados valores das projeções da EPE, que assumem premissas das projeções da produção brasileira de petróleo, da produção nacional de líquidos de gás natural, derivada das projeções de gás natural e dos preços internacionais de petróleo e derivados e da demanda brasileira de derivados, incluindo o fornecimento de QAV para aeronaves abastecidas no Brasil bem como premissas relacionadas às características do parque nacional de refino e da infraestrutura de transporte de petróleo e derivados, às especificações de qualidade de combustíveis, aos mandatos de biocombustíveis, e aos investimentos previstos em refino no Brasil.

A partir da projeção do volume de QAV, foi estimado o volume de SAF conforme as reduções por rota e matéria-prima. Foram construídos cenários de volume de SAF considerando redução de emissões variando entre 1% e 10% em relação às emissões totais do consumo de QAV fóssil nos voos nacionais. Dessa forma, foi calculado o volume de SAF necessário para evitar de 1% a 10% dessas emissões. Os resultados são apresentados nas Tabelas 16 a 23 a seguir:

**Tabela 16.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota ATJ Cana-de-açúcar e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,54%	78.666	83.293	86.378	91.005	95.633	99.171	102.840	106.645	110.591
2%	3,08%	157.331	166.586	172.756	182.010	191.265	198.342	205.681	213.291	221.183
3%	4,63%	235.997	249.879	259.133	273.016	286.898	297.513	308.521	319.936	331.774
4%	6,17%	314.662	333.172	345.511	364.021	382.530	396.684	411.361	426.582	442.365
5%	7,71%	393.328	416.464	431.889	455.026	478.163	495.855	514.202	533.227	552.956
6%	9,25%	471.993	499.757	518.267	546.031	573.795	595.026	617.042	639.872	663.548
7%	10,80%	550.659	583.050	604.645	637.036	669.428	694.197	719.882	746.518	774.139
8%	12,34%	629.324	666.343	691.023	728.042	765.061	793.368	822.723	853.162	884.730
9%	13,88%	707.990	749.636	777.400	819.047	860.693	892.539	925.563	959.809	995.322
10%	15,42%	786.655	832.929	863.778	910.052	956.326	991.710	1.028.403	1.066.454	1.105.913

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 16 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota ATJ cana-de-açúcar será de 78,6 a 786,6 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,54% a 15,4% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 17.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota ATJ com resíduos de madeira e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,37%	69.617	73.712	76.442	80.537	84.632	87.763	91.011	94.378	97.870
2%	2,73%	139.233	147.423	152.883	161.074	169.264	175.527	182.021	188.756	195.740
3%	4,10%	208.850	221.135	229.325	241.610	253.896	263.290	273.032	283.134	293.610
4%	5,46%	278.466	294.847	305.767	322.147	338.528	351.053	364.042	377.512	391.480
5%	6,83%	348.083	368.558	382.209	402.684	423.160	438.816	455.053	471.890	489.349
6%	8,19%	417.699	442.270	458.650	483.221	507.791	526.579	546.063	566.267	587.219
7%	9,56%	487.316	515.982	535.092	563.758	592.423	614.343	637.074	660.645	685.089
8%	10,92%	556.933	589.693	611.534	644.294	677.055	702.106	728.084	755.023	782.959
9%	12,29%	626.549	663.405	687.975	724.831	761.687	789.870	819.095	849.401	880.829
10%	13,65%	696.166	737.117	764.417	805.368	846.319	877.633	910.105	943.779	978.699

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 17 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota ATJ com resíduos de madeira será de 69,6 a 696 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,36% a 13,6% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 18.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota Fischer Tropcsch com captura direta do ar e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,10%	56.245	59.554	61.760	65.068	68.377	70.907	73.530	76.251	79.072
2%	2,21%	112.491	119.108	123.519	130.136	136.753	141.813	147.060	152.502	158.144
3%	3,31%	168.736	178.662	185.279	195.204	205.130	212.720	220.591	228.752	237.216
4%	4,41%	224.981	238.216	247.038	260.273	273.507	283.627	294.121	305.003	316.288
5%	5,51%	281.227	297.770	308.798	325.341	341.884	354.533	367.651	381.254	395.360
6%	6,62%	337.472	357.323	370.558	390.409	410.260	425.440	441.181	457.505	474.433
7%	7,72%	393.717	416.877	432.317	455.477	478.637	496.346	514.711	533.756	553.505
8%	8,82%	449.963	476.431	494.077	520.545	547.014	567.253	588.242	610.006	632.577
9%	9,93%	506.208	535.985	555.836	585.613	615.390	638.160	661.772	686.257	711.649
10%	11,03%	562.454	595.539	617.596	650.682	683.767	709.066	735.302	762.508	790.721

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 18 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na rota Fischer Tropcsch com captura direta do ar será de 56 a 562 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,10% a 11% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 19.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota Fischer Tropcsch com reforma de etanol e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,13%	57.602	60.990	63.249	66.637	70.025	72.616	75.303	78.089	80.979
2%	2,26%	115.203	121.980	126.497	133.274	140.051	145.233	150.606	156.179	161.957
3%	3,39%	172.805	182.970	189.746	199.911	210.076	217.849	225.909	234.268	242.936
4%	4,52%	230.406	243.959	252.995	266.548	280.102	290.465	301.212	312.357	323.915
5%	5,65%	288.008	304.949	316.244	333.185	350.127	363.082	376.516	390.447	404.893
6%	6,78%	345.609	365.939	379.492	399.822	420.152	435.698	451.819	468.536	485.872
7%	7,91%	403.211	426.929	442.741	466.459	490.178	508.314	527.122	546.625	566.851
8%	9,04%	460.812	487.919	505.990	533.096	560.203	580.931	602.425	624.715	647.829
9%	10,16%	518.414	548.909	569.239	599.734	630.228	653.547	677.728	702.804	728.808
10%	11,29%	576.015	609.898	632.487	666.371	700.254	726.163	753.031	780.893	809.786

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 19 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na rota Fischer Tropcsch com reforma de etanol será de 57,6 a 576 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demanda uma mistura que varia de 1,13% a 11,3% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 20.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota Fischer Tropcsch com biogás e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,06%	54.036	57.214	59.333	62.512	65.690	68.121	70.642	73.255	75.966
2%	2,12%	108.071	114.429	118.667	125.024	131.381	136.242	141.283	146.510	151.931
3%	3,18%	162.107	171.643	178.000	187.536	197.071	204.363	211.925	219.766	227.897
4%	4,24%	216.143	228.857	237.333	250.048	262.762	272.484	282.566	293.021	303.863
5%	5,30%	270.179	286.071	296.667	312.560	328.452	340.605	353.208	366.276	379.828
6%	6,36%	324.214	343.286	356.000	375.071	394.143	408.726	423.849	439.531	455.794
7%	7,42%	378.250	400.500	415.333	437.583	459.833	476.847	494.491	512.787	531.760
8%	8,48%	432.286	457.714	474.667	500.095	525.524	544.968	565.132	586.042	607.725
9%	9,54%	486.321	514.929	534.000	562.607	591.214	613.089	635.774	659.297	683.691
10%	10,60%	540.357	572.143	593.333	625.119	656.905	681.210	706.415	732.552	759.657

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 20 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na rota Fischer Tropcsch com biogás será de 54 a 540MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,06% a 10,6% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 21.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota HEFA com óleo de fritura reciclado e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,10%	60.439	63.995	66.365	69.920	73.475	76.194	79.013	81.937	84.968
2%	2,21%	120.879	127.989	132.730	139.840	146.951	152.388	158.026	163.873	169.937
3%	3,31%	181.318	191.984	199.095	209.760	220.426	228.582	237.039	245.810	254.905
4%	4,41%	241.758	255.979	265.459	279.680	293.901	304.776	316.053	327.746	339.873
5%	5,51%	302.197	319.973	331.824	349.601	367.377	380.970	395.066	409.683	424.841
6%	6,62%	362.636	383.968	398.189	419.521	440.852	457.164	474.079	491.620	509.810
7%	7,72%	423.076	447.963	464.554	489.441	514.328	533.358	553.092	573.556	594.778
8%	8,82%	483.515	511.957	530.919	559.361	587.803	609.552	632.105	655.493	679.746
9%	9,93%	543.955	575.952	597.284	629.281	661.278	685.746	711.118	737.430	764.714
10%	11,03%	604.394	639.947	663.648	699.201	734.754	761.940	790.131	819.366	849.683

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 21 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na rota HEFA com óleo de fritura reciclado será de 60 a 604 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,10% a 11,0% do SAF no QAV fóssil.

**Tabela 22.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota HEFA com sebo e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,10%	68.256	72.271	74.947	78.962	82.977	86.048	89.231	92.533	95.957
2%	2,21%	136.511	144.541	149.895	157.925	165.955	172.095	178.463	185.066	191.913
3%	3,31%	204.767	216.812	224.842	236.887	248.932	258.143	267.694	277.599	287.870
4%	4,41%	273.023	289.083	299.789	315.850	331.910	344.190	356.925	370.132	383.827
5%	5,51%	341.278	361.353	374.737	394.812	414.887	430.238	446.157	462.665	479.783
6%	6,62%	409.534	433.624	449.684	473.774	497.865	516.286	535.388	555.198	575.740
7%	7,72%	477.789	505.895	524.632	552.737	580.842	602.333	624.620	647.731	671.697
8%	8,82%	546.045	578.165	599.579	631.699	663.820	688.381	713.851	740.263	767.653
9%	9,93%	614.301	650.436	674.526	710.662	746.797	774.428	803.082	832.796	863.610
10%	11,03%	682.556	722.707	749.474	789.624	829.774	860.476	892.314	925.329	959.566

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 22 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na rota HEFA com sebo será de 68 a 683 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,10% a 11,03% do SAF no QAV fóssil.

Por fim, a Tabela 23 mostra que o volume de SAF em 2027 para rota SAF na HEFA com resíduos de esgoto será de 11 a 111 MM de litros para mandatos de 1% a 10% de reduções de emissões. Esses valores demandam uma mistura que varia de 1,10% a 11,3% do SAF no QAV fóssil. Tendo em vista que esses resultados representam um ponto muito diferente dos demais, seria preciso explorar melhor essa rota, particularmente no que diz respeito às emissões evitadas.

**Tabela 23.** Projeção Volume SAF (m<sup>3</sup>) na rota HEFA com resíduos de esgoto e % de SAF na mistura com o QAV

% Redução de Emissões	% SAF na mistura	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1%	1,10%	11.052	11.702	12.136	12.786	13.436	13.933	14.448	14.983	15.537
2%	2,21%	22.104	23.404	24.271	25.571	26.872	27.866	28.897	29.966	31.075
3%	3,31%	33.156	35.107	36.407	38.357	40.308	41.799	43.345	44.949	46.612
4%	4,41%	44.208	46.809	48.542	51.143	53.743	55.732	57.794	59.932	62.150
5%	5,51%	55.260	58.511	60.678	63.929	67.179	69.665	72.242	74.915	77.687
6%	6,62%	66.312	70.213	72.814	76.714	80.615	83.598	86.691	89.899	93.225
7%	7,72%	77.364	81.915	84.949	89.500	94.051	97.531	101.139	104.882	108.762
8%	8,82%	88.417	93.618	97.085	102.286	107.487	111.464	115.588	119.865	124.300
9%	9,93%	99.469	105.320	109.220	115.072	120.923	125.397	130.036	134.848	139.837
10%	11,03%	110.521	117.022	121.356	127.857	134.358	139.330	144.485	149.831	155.375

Fonte: Elaboração própria

Em linhas gerais, a exceção da rota HEFA com resíduos de esgoto, que apresenta um potencial de redução de emissões muito acima das demais ao evitar o metano, todas as demais rotas necessitariam um volume de SAF que varia em torno de 25 milhões de litros entre 2027 e 2035. Sendo que as rotas Fischer Tropsch apresentam uma necessidade menor de SAF para atender ao mesmo nível de emissões, conforme pode visualizado na síntese apresentada na Tabela 24 a seguir.

**Tabela 24.** Resumo das projeções do volume de SAF por rota e matéria-prima para atendimento da meta de 1% de redução de emissões

ROTA	Matéria-Prima	Volume SAF (milhões litros) em 2027	Volume SAF (milhões litros) em 2035
ATJ	Cana-de-açúcar	~78	~106
ATJ	Resíduos de Madeira	~70	~98
FischerTropsch (FT)	Captura de CO <sub>2</sub> do ar	~56	~79
FischerTropsch (FT)	Etanol	~58	~81
FischerTropsch (FT)	Biogás	~54	~76
HEFA	Reciclagem de óleo fritura	~57	~80
HEFA	Sebo	~65	~91
HEFA	Resíduos de esgoto	~11	~16

Para cada rota e matéria-prima de SAF o percentual de emissões evitadas é variável, nos casos estudados podendo variar de no mínimo 64,8% no caso da ATJ com cana-de-açúcar, podendo chegar a 100% na rota HEFA com resíduos de esgoto, ou 94,4% na FT com biogás.

Importante destacar que um gargalo no atendimento das metas tanto do CORSIA quanto da política nacional consiste nas dificuldades na oferta do SAF nos volumes necessários.

As projeções de oferta de SAF passam pelos valores dos mandatos e pela projeção do consumo do QAV.

No Plano Decenal de 2031, a EPE estima que a sua entrada de SAF na matriz energética brasileira ocorra a partir de 2027, atingindo cerca de 130 mil m<sup>3</sup> em 2031. Ainda de acordo com o PDE2031, isso corresponde a uma participação no mercado de 1,4% da demanda total de combustível de aviação, sendo aplicáveis a rotas aéreas específicas, considerando as tecnologias certificadas. O PDE 2031 não apresenta o racional desse número, seja sobre qual a rota adotada ou matéria-prima, tornando difícil a comparação com os resultados obtidos no presente estudo.

De acordo com a EPE (2021), embora não estejam previstos projetos para uma produção significativa de SAF, há um estudo para instalação de uma planta-piloto no Ceará, com implantação de uma rede de energia elétrica renovável (eólica ou solar), para produzir hidrogênio e bioquerosene de aviação, com as especificações superiores às exigidas pela regulação mundial.

Ainda de acordo com a EPE (2021), entre seus diferenciais, destaca-se que será uma planta móvel, podendo ser transportada para aeroportos com dificuldade de abastecimento, como os regionais. Foi estabelecida importante articulação entre governos (alemão e brasileiro), Academia e iniciativa privada, para o desenvolvimento de uma tecnologia disruptiva e de impacto neutro para o meio ambiente e para a sociedade. No Brasil, foi lançado, em 19 de fe-

vereiro de 2021, no estado do Ceará, o projeto do Hub de Hidrogênio, em parceria do governo do estado com a Federação de Indústrias do Ceará (Fiec) e a Universidade Federal do Ceará. O projeto pretende transformar o estado em grande polo de produção do biocombustível, com vistas tanto para o consumo interno quanto para exportação.

Com isso, a EPE estima apenas unidade produtora associada à produção de HVO, bionafta e GPL de 400mil m<sup>3</sup>/dia, sendo que 35% seriam para SAF, volume ainda muito aquém das necessidades advindas do mandato (51milhões de litros/ano, para uma necessidade de 138 milhões de litros em 2027!)

Ainda de acordo com a EPE, existem desafios industriais e econômicos para que o SAF possa ser competitivo em relação ao querosene de aviação de origem fóssil, no Brasil e no mundo.



## 7. IMPACTO NO PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO E NAS PASSAGENS AÉREAS

De acordo com a ABEAR (2020), o elemento mais importante de ineficiência econômica das empresas aéreas brasileiras reside no preço do Querosene de Aviação (QAV), que é entre 30% e 40% mais caro do que nos Estados Unidos. As três principais razões são: política de paridade de preços de importação seguida pela Petrobras (67% do custo total), tributação elevada (26%) e distribuição ineficiente e oligopolizada (6%).

As estatísticas da ICAO (ICAO, 2022) apuraram a queda do tráfego mundial de passageiros. O tráfego global de passageiros se recuperou modestamente em 2021, com a mais recente análise de impacto econômico da ICAO do COVID-19 na aviação civil revelando que o número de passageiros em todo o mundo foi de 2,3 bilhões ou 49% abaixo dos níveis pré-pandemia (2019), acima da queda de 60% observada em 2020. Em particular o tráfego internacional foi fortemente afetado pela pandemia.

A análise estatística visa conhecer as variáveis que impactam na demanda do transporte aéreo no Brasil em determinado ambiente social, tecnológico, econômico e geográfico. Para tanto, são usados modelos econométricos que se apoiam em ferramentas estatísticas como a análise de regressão.

As previsões são comumente feitas admitindo-se por hipótese que as relações entre as variáveis permaneçam constantes. Essa ressalva é importante visto que, com os efeitos da pandemia, a partir de 2020, houve uma ruptura nas séries históricas, gerando *outliers*, que distorcem os resultados dos modelos econométricos.

Outro ponto importante é ressaltar que a definição da tarifa não é meramente a adição de uma margem sobre os custos. As tarifas são definidas por uma medida de receita global. De fato, as tarifas são definidas por variáveis que envolvem além das margens econômicas e operacionais a partir da demanda por cada rota. Assim, no limite, a tarifa é feita por quem compra e não quem vende. Um exemplo disso foi o aumento na demanda com a redução dos preços das passagens conquistada após a liberação tarifária.

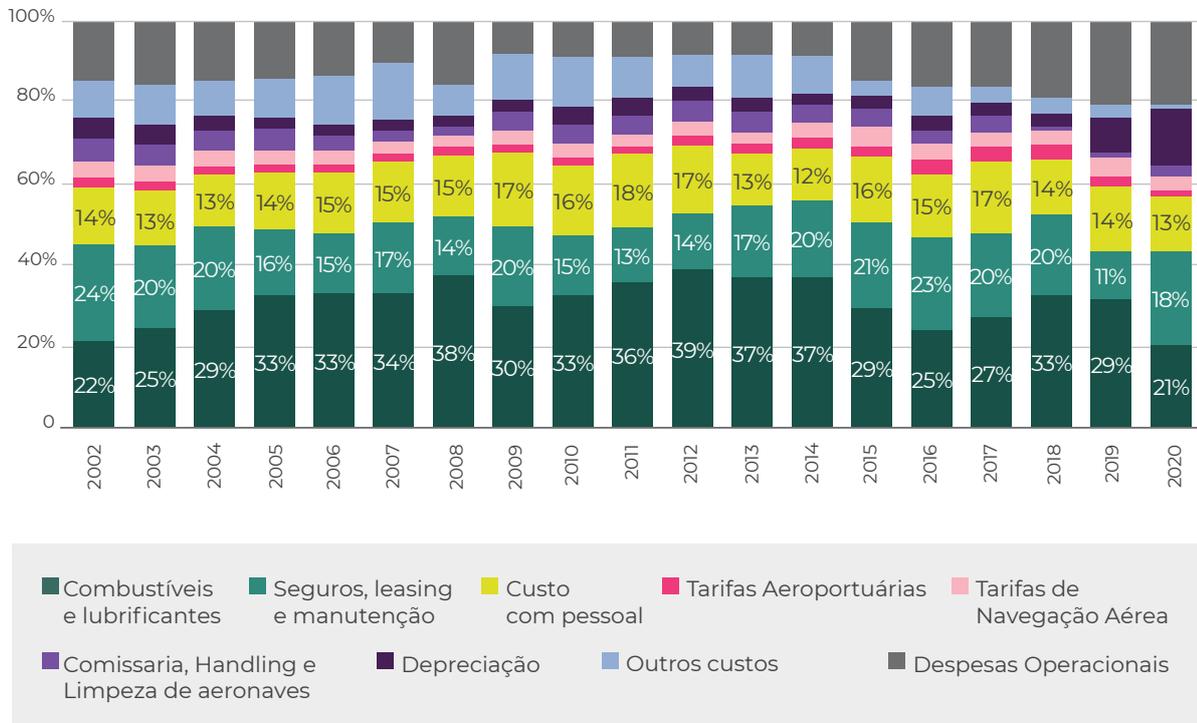
Os principais custos para estabelecimento das margens econômicas são os custos de combustíveis e lubrificantes, de pessoal, de tarifas aeroportuárias, de seguros, de *leasing* e manutenção e de depreciação. A composição desses custos no custo total não é constante ao longo do tempo como pode ser visto na Figura 35 a seguir. O efeito pode ser explicado por questões tais como o próprio modelo de precificação do QAV adotado pela Petrobras,<sup>15</sup> quanto por questões cambiais que afetam os custos do *leasing* e dos combustíveis.

---

15. A precificação atual do QAV tem origem na Lei n. 9.478/1997. O Brasil ainda segue o modelo de precificação da época (preço de paridade de importação praticado por países importadores de petróleo) quando o país importava mais que 96% do petróleo que refinava. Em 2019, o Brasil importou menos que 14% do petróleo que utilizou, ou seja, o Brasil está muito mais próximo do modelo de país autossuficiente, que estabelece preços a partir dos seus custos, do que de importador.

A análise da Figura 35 mostra que, em 2020, a participação dos custos de combustíveis teve uma queda significativa ao sair de uma média em torno de 30%, chegando a 21% em 2020.

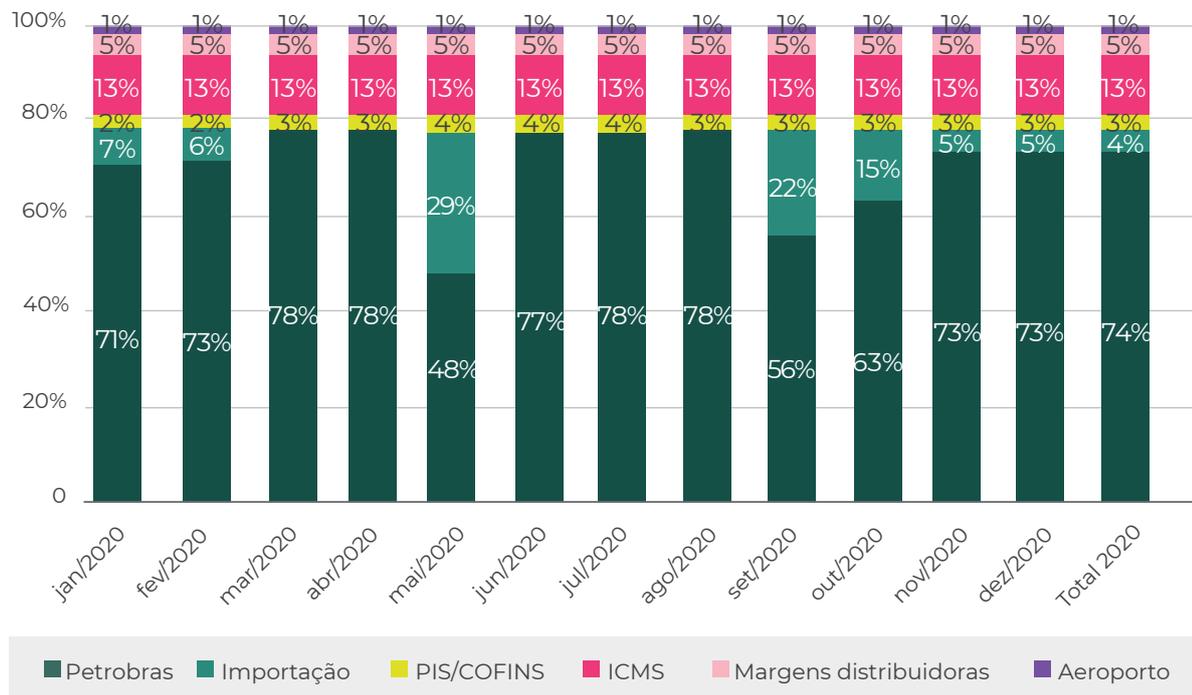
**Figura 35.** Evolução da Composição dos custos e despesas das empresas aéreas brasileiras (%)



Fonte: ABEAR, 2020.

Há ainda questões de impostos e margens que são considerados na formação das tarifas. A tributação é um dos principais fatores que destroem a competitividade do setor em comparações internacionais. No último ano, de acordo com a ABEAR (2020), o impacto final dos tributos foi de cerca de 26% do preço do QAV na bomba, como pode ser observado na Figura 36.

**Figura 36.** Participação dos preços do produtor/importador, impostos e margens brutas de distribuição no preço do QAV na bomba no Brasil – voos domésticos (2020)



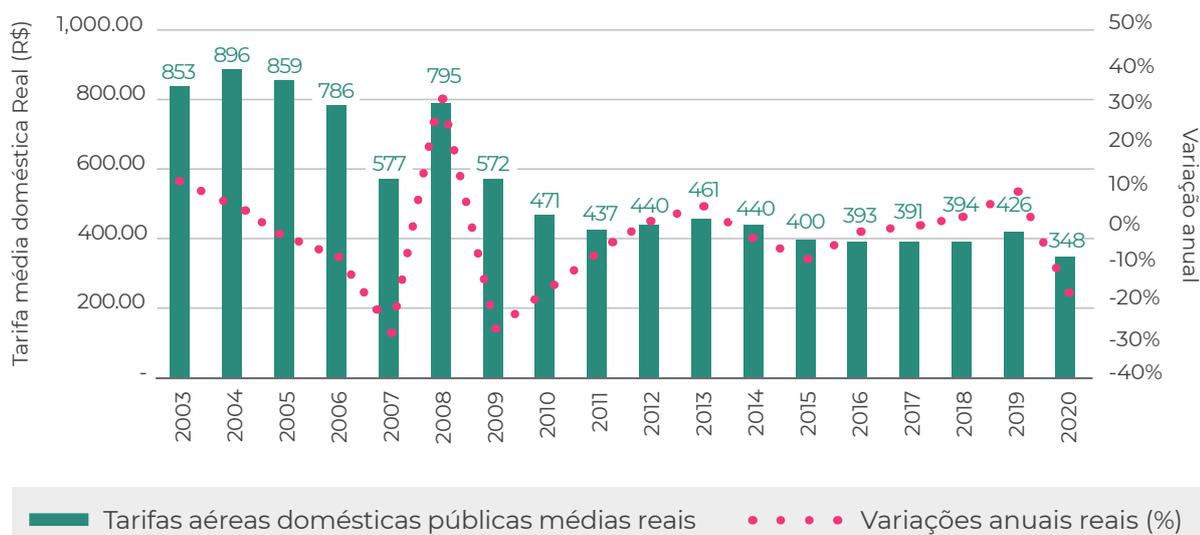
Fonte: ABEAR, 2020.

No que diz respeito à demanda, o relatório Panorama 2020 da ABEAR conclui que a queda da demanda de passageiros transportados pagos em voos domésticos, ocorrida entre 2019 e 2020, foi decorrente da combinação de fatores econômicos (retração do PIB e diminuição das tarifas médias por quilômetro voado, ou *Yield*) e comportamentais (medo da exposição ao contágio e aumento da etapa média de voo), com redução de 53% em função da covid-19, -10% em função da redução do PIB, um aumento de 10% advindo de redução das tarifas, -30% em função de mudanças de comportamento explicadas por exemplo pelo teletrabalho e redução de viagens corporativas e eventos, e uma redução de 7% na etapa média.

No caso dos voos internacionais, os efeitos da pandemia resultaram em uma retração de -71%; enquanto a queda do PIB representou -9% e as variáveis comportamentais e discricionárias foram responsáveis por -69% na demanda.

O resultado combinado dos voos domésticos e internacionais teve uma queda de 57% na demanda entre 2019 e 2020 (ver Figura 37).

Figura 37. Evolução das tarifas aéreas domésticas públicas médias reais e variações anuais percentuais



Fonte: ABEAR, 2020.

A liberação tarifária ocorrida no mercado doméstico a partir de 2002 e no mercado internacional em 2008 para a América do Sul e gradativamente para os demais mercados a partir de 2009, somada ao aumento da oferta advindo da adoção de aeronaves com mais assentos, foi capaz de mostrar uma redução significativa nos patamares das tarifas aéreas, democratizando o acesso e descolando passageiros do transporte rodoviário, favorecendo o aumento da demanda.

Para fins de avaliação do impacto da inserção do SAF no QAV por meio de um mandato, em linha com o que é feito na ABEAR para avaliações sobre impactos diversos na demanda, ou seja, modelos de regressão. A fim de eliminar o efeito causado pela pandemia, foram adotados dados entre novembro de 2019 a dezembro de 2019.

Diversas combinações de dados foram simuladas em regressões, para que se avaliasse a alternativa que apresentava melhor ajuste estatístico, medido tanto pelo coeficiente de correção ( $r^2$ ), quanto pela estatística P. Foram realizadas as seguintes simulações:

1. Tarifa média mensal; preço do QAV em Reais por litro;
2. Tarifa média mensal; preço do QAV em Reais por litro; cambio;
3. Tarifa média mensal; preço do QAV em Reais por litro; cambio e Rendimento real médio do trabalho principal em Reais;

A alternativa que apresentou melhores resultados foi a 1, em uma regressão linear em que a tarifa média é função do preço do QAV.

Os dados usados para essa regressão, apresentados na Tabela 25 a seguir.

Tabela 25. Dados usados para regressão

Mês	Tarifa média mensal (R\$)	Preço médio distribuição QAV (R\$/l)
nov./18	623,6817	5,706
dez./18	650,2564	5,079
jan./19	596,7545	4,951
fev./19	586,0107	4,732
mar./19	573,3394	4,868
abr./19	669,7623	5,272
maio/19	685,4132	5,817
jun./19	653,8873	5,697
jul./19	650,0685	5,309
ago./19	661,7374	5,356
set./19	645,3767	5,210
out./19	675,8919	5,304
nov./19	626,299	5,412
dez./19	667,3777	5,208

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (tarifa média mensal) e ANP (preço médio do QAV)

Os resultados da regressão considerando logaritmos naturais são apresentados na Tabela 26 e na Figura 38 a seguir:

Tabela 26. Resultados da Regressão

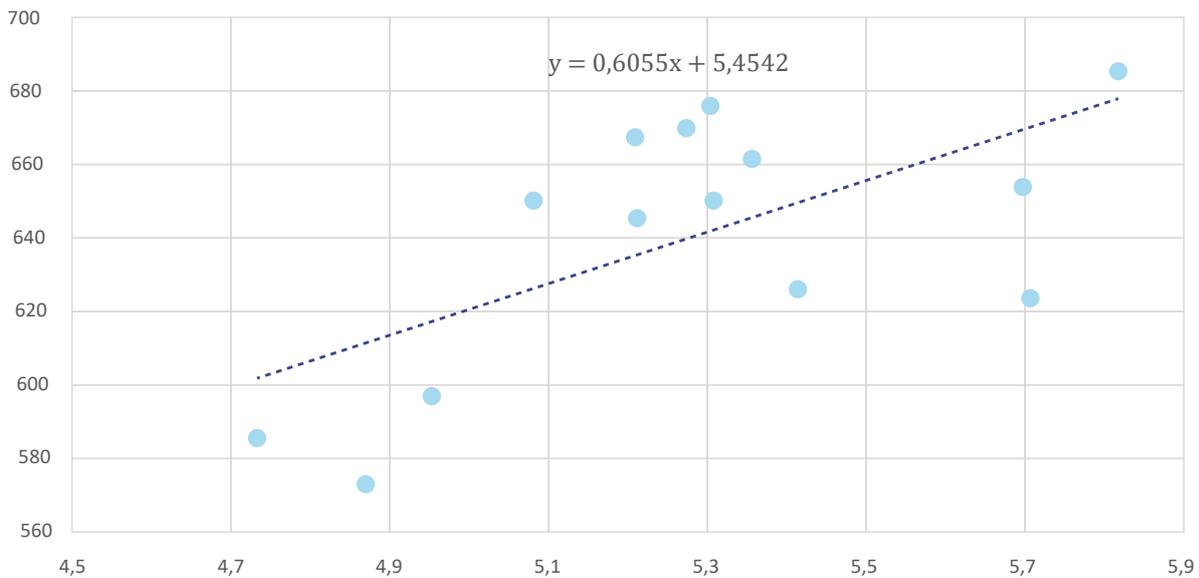
Estatística de regressão	
R múltiplo	0,657892119
R-Quadrado	0,432822041
R-quadrado ajustado	0,385557211
Erro padrão	0,043223526
Observações	14

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	5,454181404	0,332821	16,38774	1,41E-09	4,729027	6,17933563	4,729027	6,179336
Preço QAV	0,60552178	0,200099	3,026116	0,010542	0,169544	1,04149926	0,169544	1,041499

O erro padrão significa que aproximadamente 95% das observações devem estar dentro de mais/menos 2\*erro padrão da regressão em relação à linha de regressão, que é também uma aproximação para um intervalo de previsão de 95%. Se nossa exigência seja que as previsões estejam dentro de +/- 5% do valor real, o erro padrão, S, deve ser < ou = a 2,5 para produzir um intervalo de previsão suficientemente estreito de 95%.

A análise do erro padrão da regressão ( $s = 0,043223526$ ) mostra que a distância média entre os pontos de dados da linha ajustada é de cerca de apenas 0,04% da tarifa, o que demonstra elevado nível de confiança nas projeções realizadas por esse modelo.

**Figura 38.** Gráfico da regressão entre tarifa média e preço do combustível



Fonte: elaboração própria

Dessa forma, a estimativa do impacto no preço da tarifa advindo de aumento no QAV advinda da inserção do SAF poderia ser estimada pela seguinte equação:

$$\text{Tarifa média (R\$/l)} = 0,6055\text{QAV} + 5,4542$$

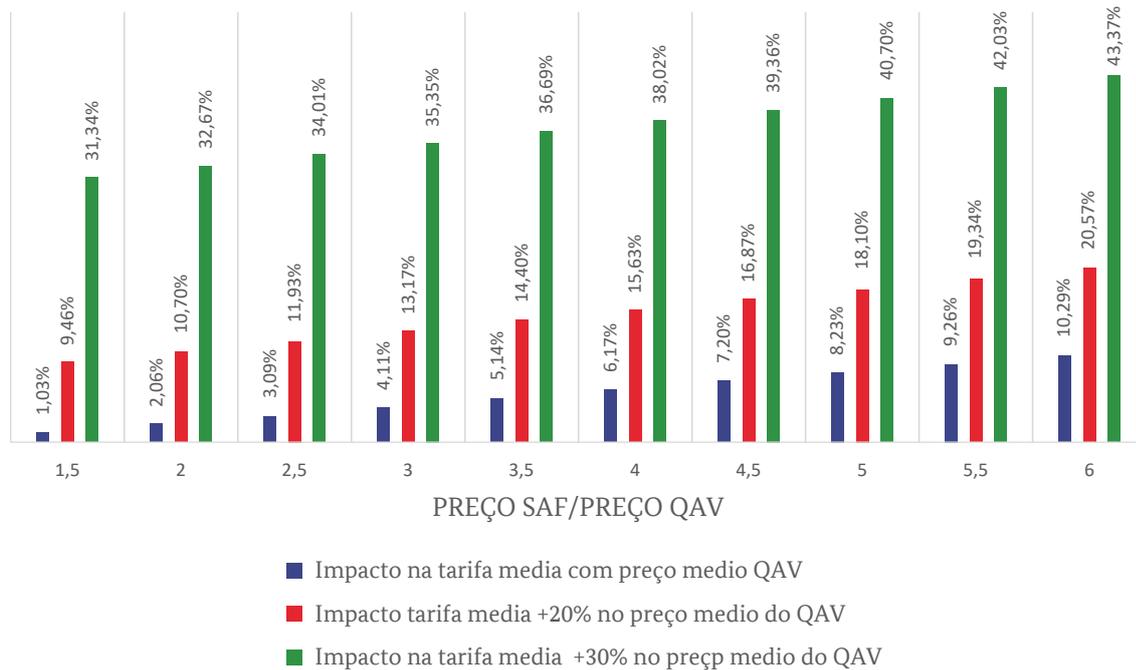
A análise da elasticidade mostra que, em geral, um aumento de 1% no custo do combustível causaria um aumento de 0,6% na tarifa final.

Considerando um mandato de inserção de 5% de SAF no QAV e entendendo que o SAF poderia custar de 1,5 a 6 vezes o valor do QAV, para o preço médio atual do QAV de R\$4,491/l, o impacto na tarifa final poderia chegar a 10,29% no caso do SAF custar seis vezes o valor do QAV.

Esse impacto pode ser maior se consideramos um aumento sobre o preço atual do QAV, que está em um patamar historicamente mais alto atualmente. Por exemplo, na hipótese de um aumento do preço QAV em relação ao preço base atual de R\$4,49/l de 20%, e considerando que o SAF custe seis vezes mais que o preço do QAV, o impacto na tarifa para 5% de inserção no QAV seria de 20,57%. E, na hipótese de um aumento de 30% no preço base do QAV em relação ao preço atual e um SAF com custo de seis vezes o do QAV, e mistura com 5% de SAF, o impacto poderia chegar a 43,37%, como pode ser observado na Figura 39 a seguir. Importante que, nesses casos, o impacto é sempre sobre o preço da tarifa média atual baseada nas informações da Anac.

Outra ressalva que se faz necessária quanto a esse método econométrico para estimativa do impacto no preço das passagens refere-se à limitação para obtenção do histórico. A série de preços mensais com apenas 14 observações limita a qualidade da regressão. Por outro lado, uma série mais longa, por um lado, poderia melhorar a qualidade da estatística, por outro, poderia contaminar mais com efeitos macroeconômicos indiretos.

Figura 39. Impacto nas tarifas medias da inserção de 5% de SAF na mistura do QAV, para preços de SAF

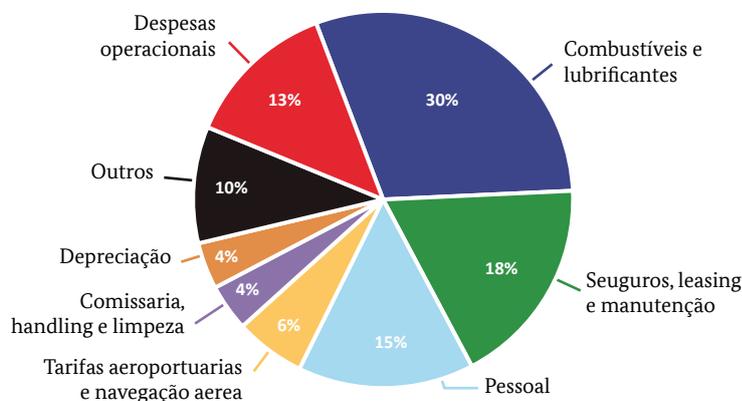


Fonte: elaboração própria

A fim de fazer um cheque de consistência nos resultados obtidos tendo em vista as limitações apresentadas acima, imagine que a formação da tarifa seja por meio de um modelo de custos acrescidos de uma margem, ou seja, desconsiderando que a tarifa seja formada por fatores exógenos, tais como oferta e demanda, concorrência na rota com outros operadores, concorrência em relação ao transporte rodoviário etc.

Nessa situação, a partir da estrutura de custos, poderíamos avaliar qual o impacto da mistura de 5% de SAF no QAV fóssil convencional nos custos totais. A partir de dados da ABEAR, esses custos são divididos conforme mostra a Figura 40.

Figura 40. Estrutura de custos na aviação civil brasileira, média histórica nos últimos 10 anos



Fonte: Elaboração própria a partir de ABEAR (2020)

A Tabela 27 a seguir mostra qual seria o impacto de um aumento da parcela dos combustíveis nos custos totais. Assim, por exemplo, se houver a inserção do SAF que custe seis vezes mais do que o QAV fóssil, a parcela de combustíveis nos custos, que historicamente está em 30%, poderia chegar a 38%.

**Tabela 27.** Impacto na parcela dos combustíveis com a mistura de 5% do SAF

Custo do SAF/QAV	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
Novo custo QAV+SAF	31%	32%	32%	33%	34%	35%	35%	36%	37%	38%

Fonte: Elaboração própria

Mantendo a margem constante das tarifas sobre os preços, ou seja, o incremento do custo decorrente da mistura no SAF no combustível seria integralmente repassado por meio das tarifas, entende-se que o impacto seria, no máximo, de 8% na tarifa final. Vale ressaltar que, na revisão da literatura realizada, em termos internacionais, o SAF custaria no máximo seis vezes o valor do QAV fóssil. Esse percentual de 8% é bastante coerente com os 10,29% encontrados na metodologia da regressão utilizada, pela análise estatística do preço do QAV com as tarifas médias.

O mesmo racional foi adotado para cada uma das rotas e matérias-primas, considerando adições de SAF de acordo com os valores calculados para reduções de emissões variando entre 1% e 10%.

A fim de exemplificar o que foi feito, vamos detalhar o exemplo do ATJ com cana-de-açúcar.

Partindo de um volume de QAV estimado para 2027 de 5.100.000.000 litros, foi calculado o volume de emissões nesse ano pela seguinte equação:

$$\text{Volume de emissões} = \text{Fator de emissões do QAV} \times \text{Poder Calorífico} \times \text{Densidade}$$

$$\text{Volume de emissões} = 89 \text{ g CO}_2/\text{MJ} \times 42,8 \text{ MJ/kg} \times 0,8075 \text{ kg/l} / 10^6$$

A divisão por  $10^6$  ao final é para que o volume seja em t CO<sub>2</sub>/l.

Assim, o volume de emissões para 2027 seria de 15.687.238 t CO<sub>2</sub>. Assim, a redução de 1% das emissões equivale a um volume de emissões de 156.872 t CO<sub>2</sub>. O cálculo do volume de SAF é feito pela seguinte equação:

$$\text{Volume de SAF} = \text{Volume de emissões a ser reduzido conforme \% estabelecido} / ((\text{valor de referência do fator de emissões do QAV fóssil} - \text{Fator de emissões totais do SAF (LSf)}) \times \text{Poder Calorífico} / 10^6)$$

$$\text{Volume de SAF} = 1\% / ((89 \text{ g CO}_2/\text{MJ} - 31,3 \text{ g CO}_2/\text{MJ}) \times 34,56 \text{ MJ/l} / 10^6)$$

$$42,8 \text{ MJ/kg} \times (0,8075 \text{ kg/l}) = 34,56 \text{ MJ/l}$$

$$\text{Volume de SAF} = 78.665.511 \text{ litros}$$

A partir desse volume, é estimada a representatividade em face da demanda nacional = 78.665.511 litros/5.100.000.000 litros = 1,54%

Para o cálculo do impacto do preço na passagem aérea, foi utilizada a seguinte equação:

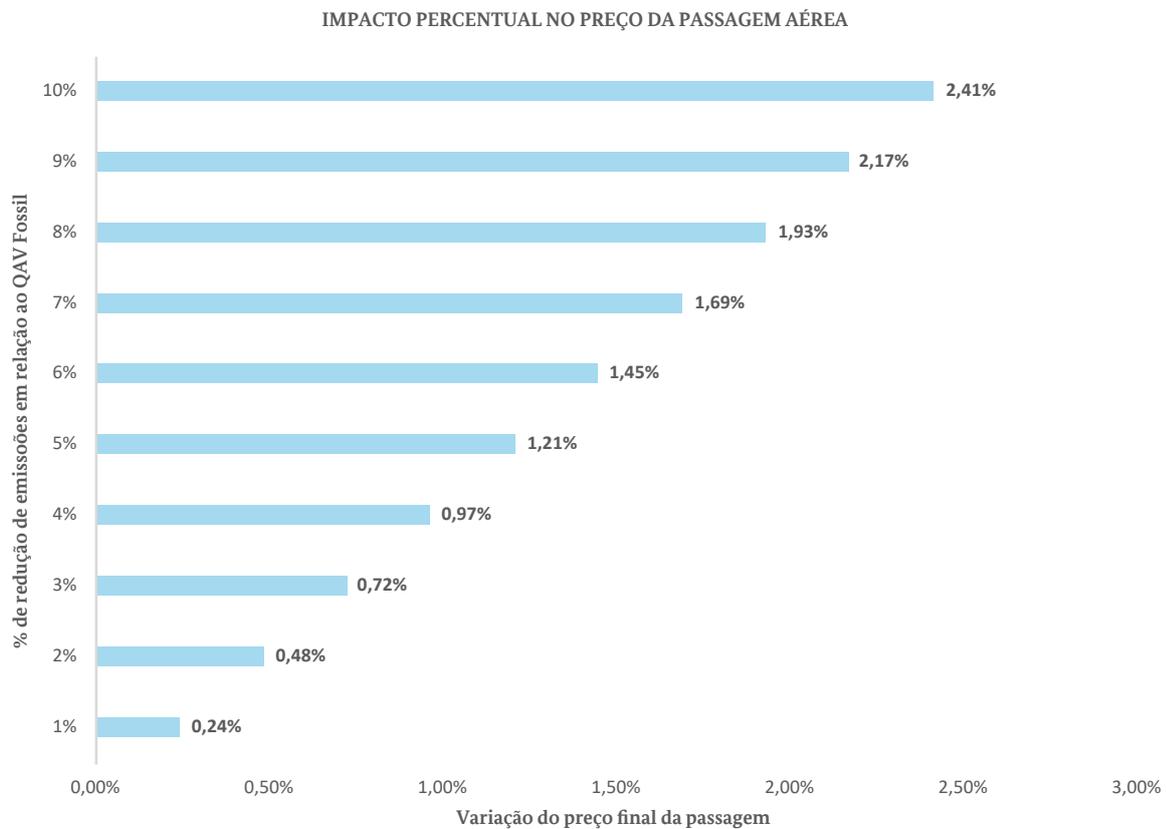
$$\text{Impacto \% no preço} = \text{Proporção de QAV fóssil} \times \text{Preço do QAV fóssil} + \text{Proporção do SAF} \times \text{Preço SAF} \times \text{Participação do combustível nos custos totais}$$

$$\text{Impacto \% no preço} = (1 - 1,54\% \times 3,86765\text{R\$/l}) + (1,54\% \times 1,07\text{USD/l} \times 5,5 \text{ R\$/USD}) / 3,86765\text{R\$/l} - 1 \times 30\%$$

$$\text{Impacto \% no preço} = 0,24\%$$

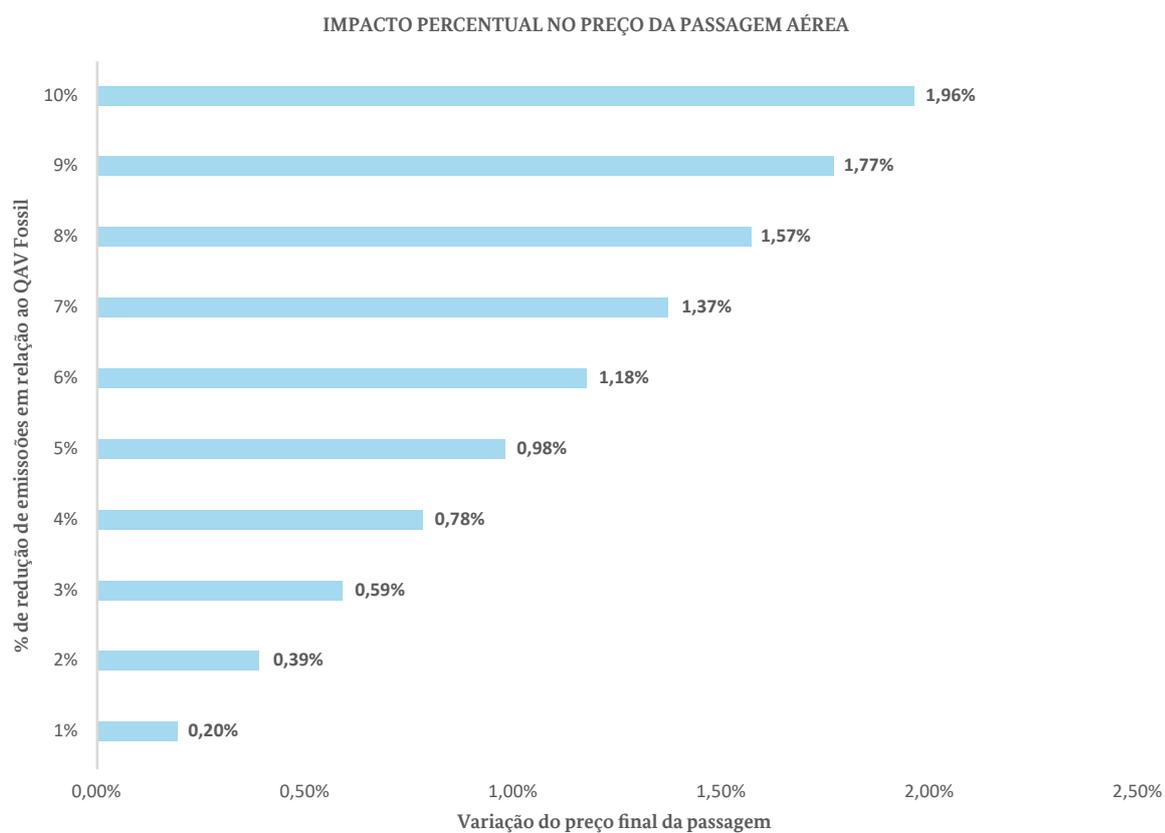
Os resultados são apresentados nas Figuras 41 a 47 a seguir.

**Figura 41.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota ATJ cana-de-açúcar nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



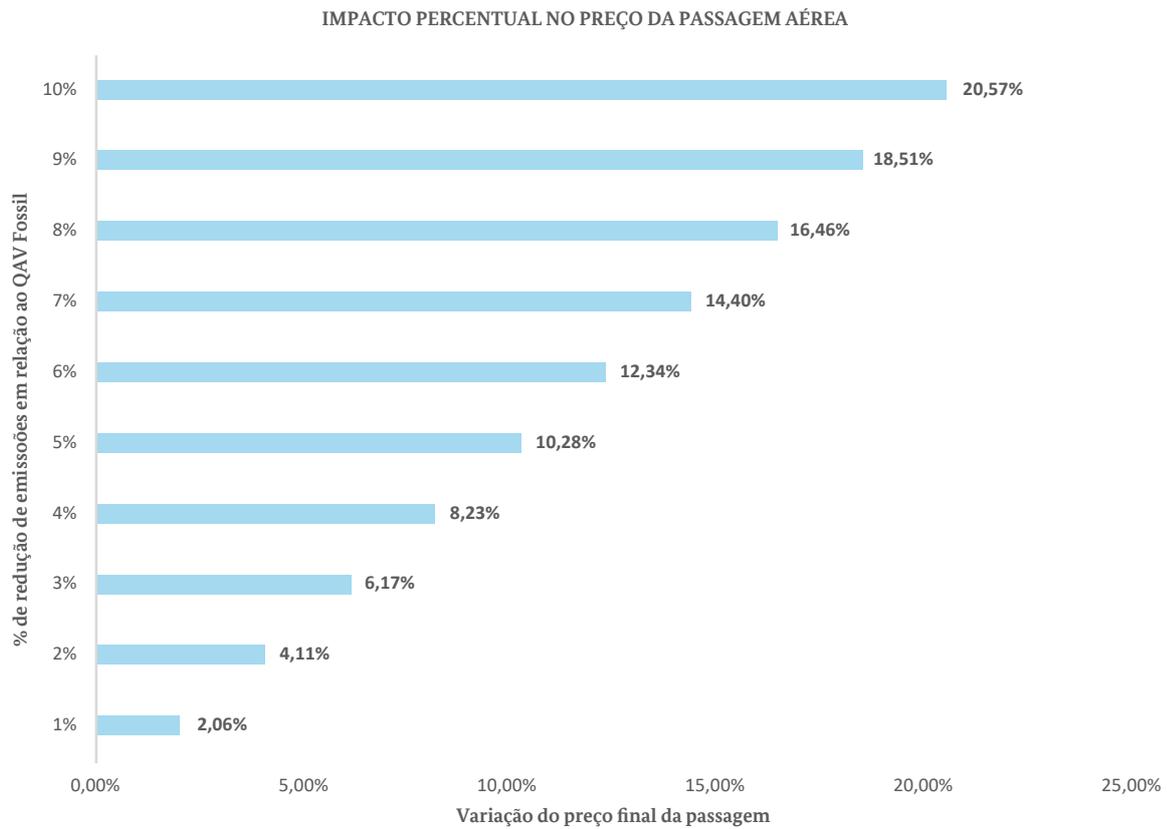
Fonte: Elaboração própria

**Figura 42.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota ATJ com resíduos de madeira nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



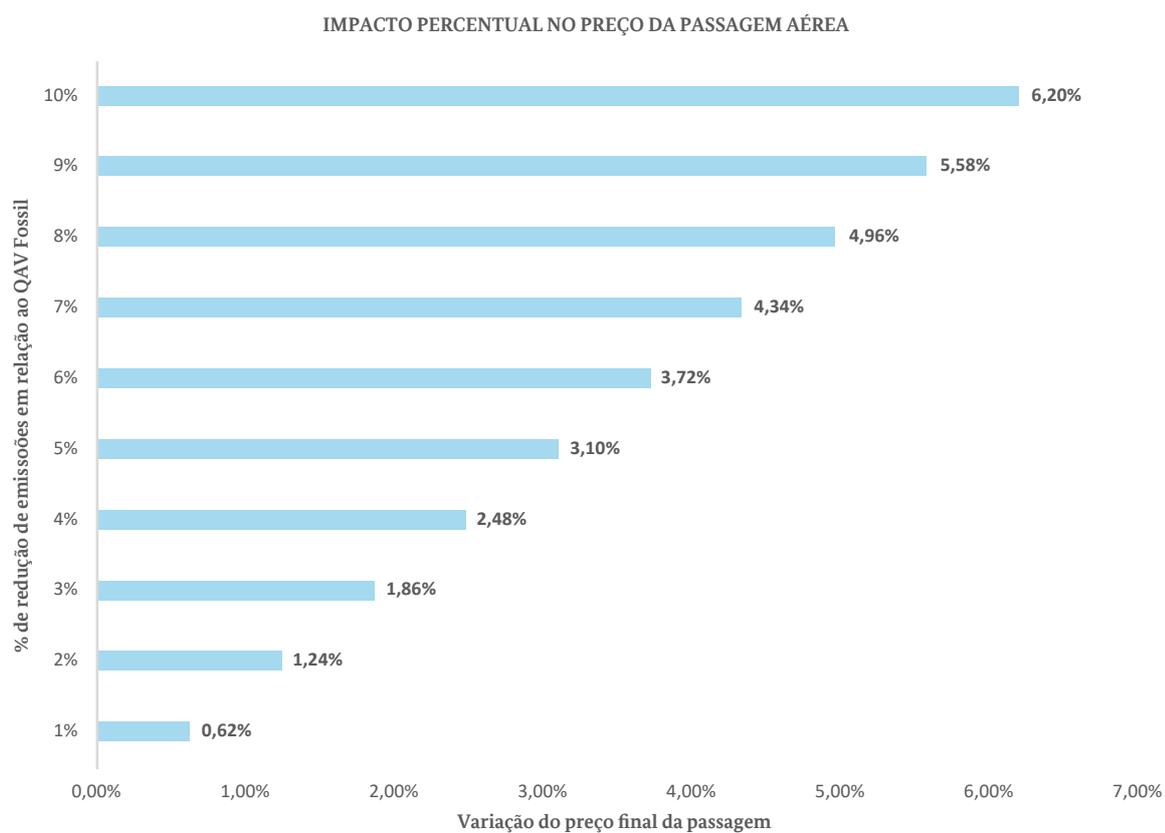
Fonte: Elaboração própria

**Figura 43.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com captura direta do ar nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



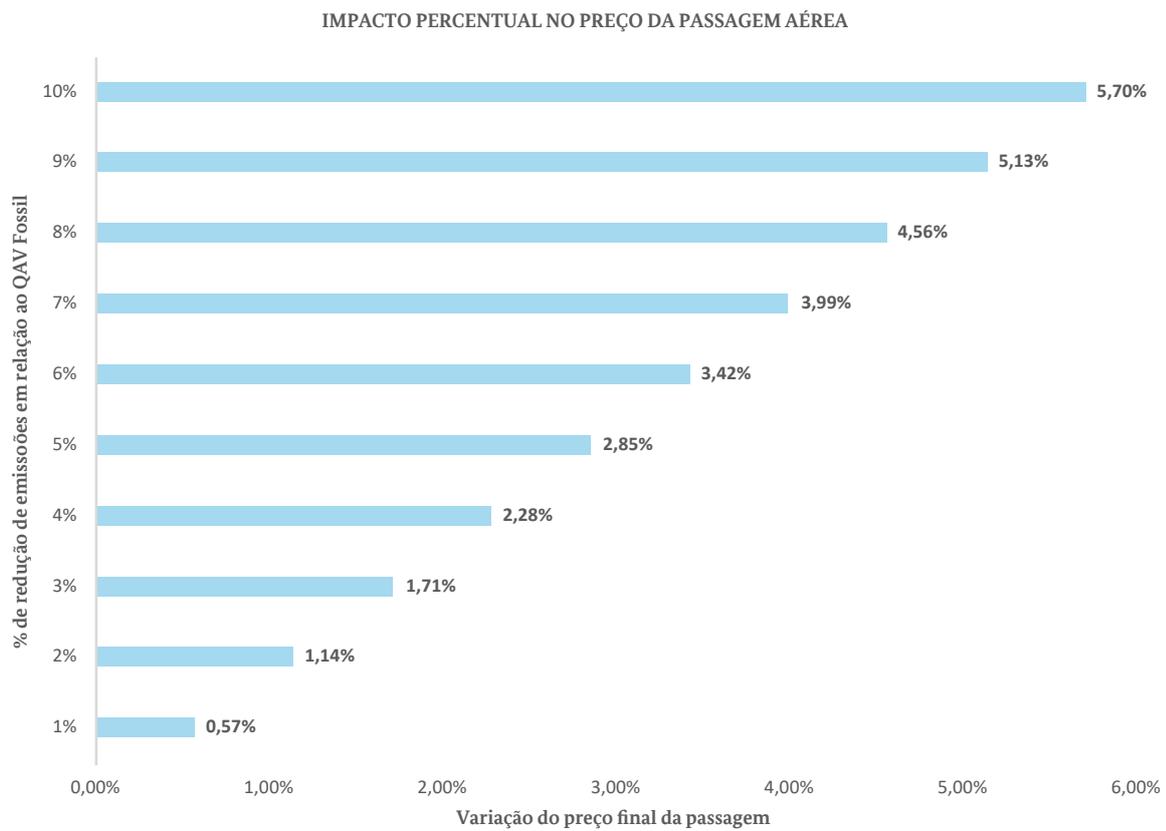
Fonte: Elaboração própria

**Figura 44.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com reforma de etanol nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



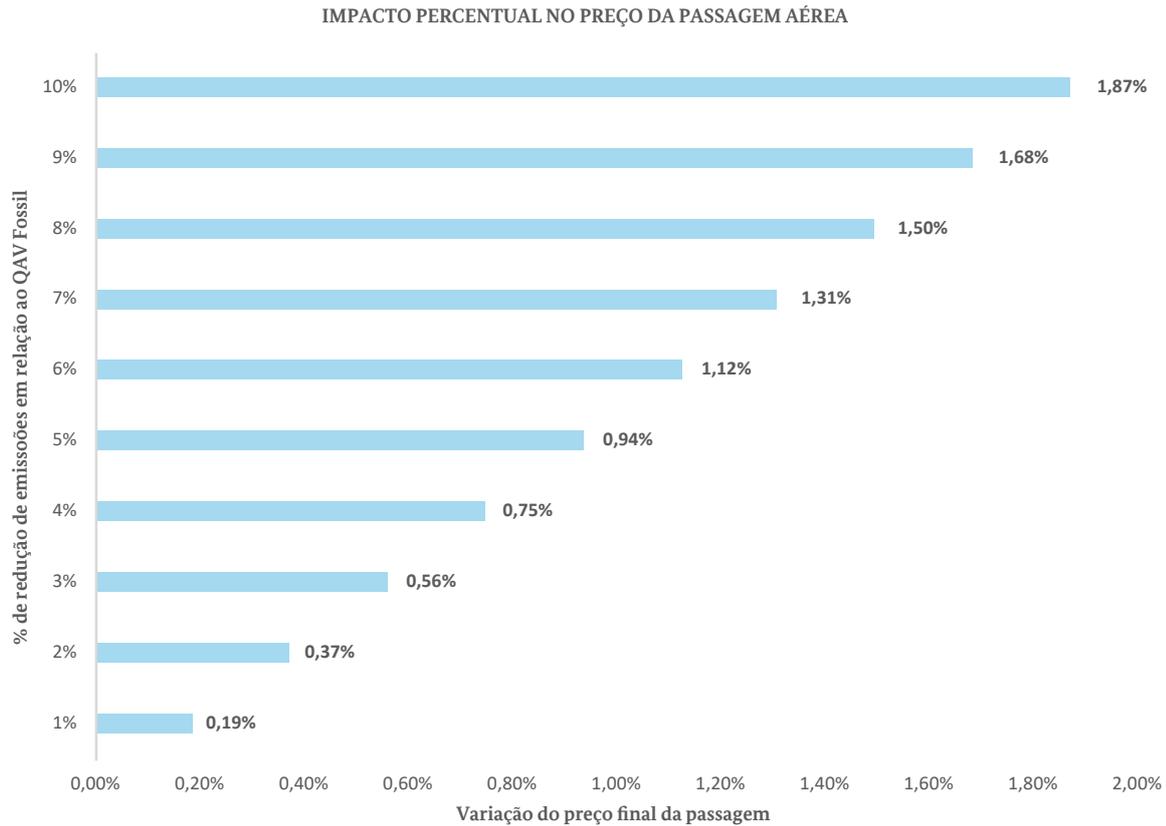
Fonte: Elaboração própria

**Figura 45.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota Fischer Tropsch com biogás nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



Fonte: Elaboração própria

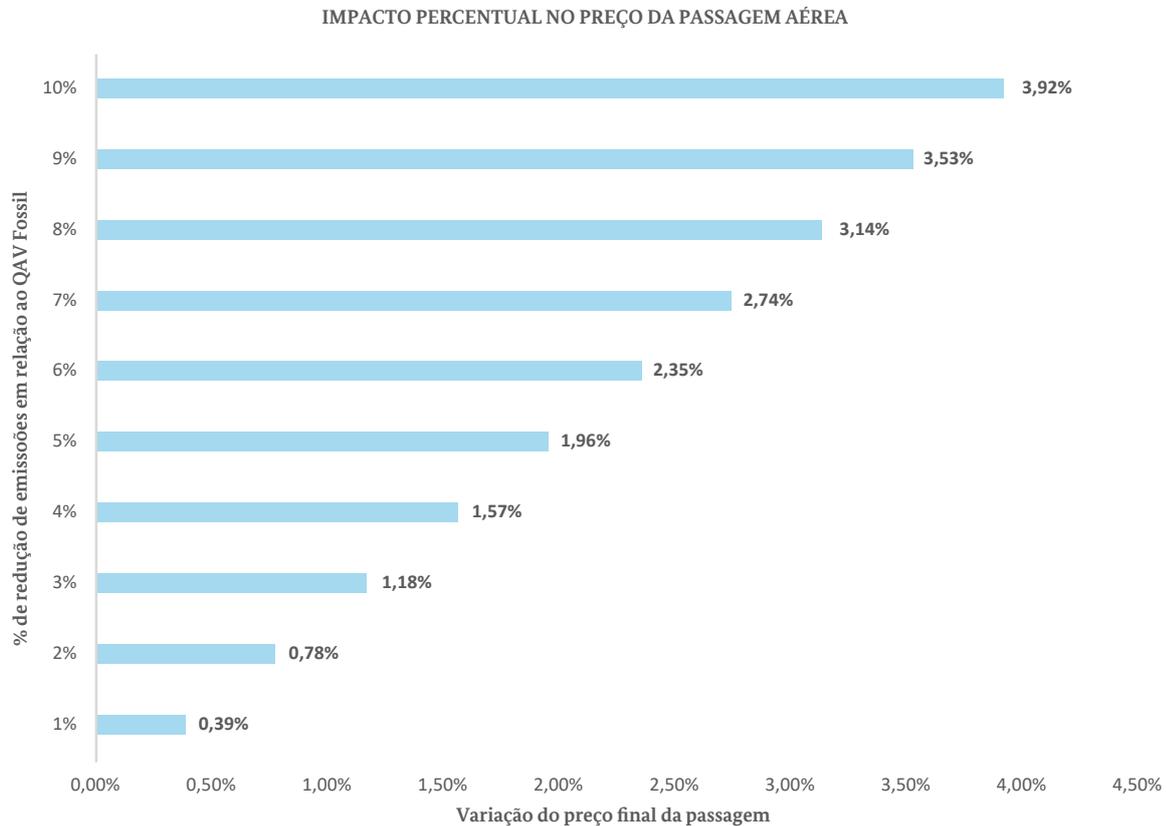
**Figura 46.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota HEFA com reciclagem de óleo de fritura reciclado nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



Fonte: Elaboração própria

A análise desses resultados mostra que a inserção de SAF para redução de até 10% das emissões geraria um impacto máximo nos preços das passagens de 21% no caso da rota de Fischer-Tropsch com captura direta do ar, mas que, em todas as demais rotas estudadas, esse impacto não chegaria a 6,5%.

**Figura 47.** Impacto da mistura no QAV fóssil do SAF na rota HEFA com sebo nos preços das passagens aéreas, mantendo 30% de participação do combustível na composição dos custos totais da companhia aérea



Fonte: Elaboração própria

Assim, a inserção de misturas até 10% traria impacto sobre as passagens que poderia ser facilmente absorvido com a comercialização dos créditos de carbono, ou mesmo que repassado aos consumidores finais ainda seria um impacto inferior do que existe atualmente pela mistura do biodiesel no *diesel* nacional.

Dessa forma, o desafio maior na elaboração de uma política pública para inserção do SAF no Brasil é muito mais de viabilizar a produção para prover a oferta desse combustível do que o seu impacto na tarifa do setor aéreo.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEAR. **Panorama 2020**. O setor aéreo em dados e análises. 2020. Disponível em: <https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Panorama2020-vf.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- AIL, S. S.; DASAPPA, S. Biomass to liquid transportation fuel via FT-Technology review and current scenario. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 58, p. 267-286, 2016.
- ANDRIANI, D. *et al.* A review on optimization production and upgrading biogas through CO<sub>2</sub> removal using various techniques. **Appl Biochem Biotechnol.**, v. 172, p. 1909-1928, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/5123-publicadas-novasresolucoes-da-anp-sobre-combustiveis-de-aviacao>. Acesso em: 4 mar. 2020.
- BALONEK, C. M. *et al.* 2010. Effect of alkali metal impurities on co-re catalysts for fischer-tropsch synthesis from biomass-derived syngas. **Catalysis Letters**, v. 138, n. 1, p. 8-13, Aug./2010.
- BAUMI, J.; BERTOSSE, C.; e GUEDES, C. L. B. Obtenção de aditivo para querosene de aviação através de coproduto da indústria sucroalcooleira. **Rev. Virtual Quim.**, v. 11, n. 4, p. 1135-1149, 2019. Data de publicação na Web: 28 de agosto de 2019. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v11n4a06.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- BARTHOLOMEV, C. H. Recent technological developments in Fischer-Tropsch. **Catalysis Letters**, v. 7, n. 1, p. 303-315, 1990.
- BAUEN, A.; BITOSSO, N.; GERMAN, L.; HARRIS, A.; LEOW, K. Sustainable aviation fuels: status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. **Johnson Matthey Technol. Rev.**, v. 64, n. 3, p. 263-278, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>.
- BELLAVER, C.; ZANOTTO, D. L. Parâmetros da qualidade em gorduras e subprodutos proteicos de origem animal. Conferência APICO 2004. Santos/SP.
- BIO4A. **Advanced Sustainable BIOfuels for Aviation Deliverable D5.1: Business Case**. 2019. Disponível em [https://www.bio4a.eu/wp-content/uploads/2020/02/BIO4A\\_D5.1\\_BUSINESS-CASE\\_SKYNRG-2.pdf](https://www.bio4a.eu/wp-content/uploads/2020/02/BIO4A_D5.1_BUSINESS-CASE_SKYNRG-2.pdf). Acesso em: 27 dez. 2021.
- BLAUFELDER, C.; LEVY, C.; MANNION, P.; PINNER, D. A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. McKinsey. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>. Acesso em: 2 fev. 2022.
- BLOOMBERG. Airlines win approval to use biofuels for commercial flights. **[Journal] [prod.] L. Dowling**. New York City, New York: Bloomberg LP, 1 July 2011.

- BLOOMBERG. **Europe CO<sub>2</sub> prices may rise more than 50% by 2030, EU draft shows. 2021.** Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-06-29/europe-co-2-prices-may-rise-more-than-50-by-2030-eu-draft-shows>. Acesso em: 5 fev. 2022.
- BOEING, EMBRAER e FAPESP. **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano De Ação.** 2013.
- BOTES, F. G.; NIEMANSTSVERDIET, J. W.; LOOSDRECHT, J. V. A comparison of cobalt and iron based slurry phase Fischer–Tropsch synthesis. **Catalysis Today**, v. 215, p. 112-120, 2013.
- BRESSANIN, J. *et al.* (2020). Techno-economic and environmental assessment of biomass gasification and Fischer–Tropsch synthesis integrated to sugarcane biorefineries. **Energies**, v. 13, n. 17, p. 4.576. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4576/htm>. Acesso em: 5 jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/en13174576>.
- BUKUR, D. B. *et al.* Binder/Support Effects on the Activity and Selectivity of Iron Catalysts in the Fischer–Tropsch Synthesis. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 29, n. 8, p. 1588-1599, 1990.
- CAGNOLI, M. V. *et al.* Catalytic CO hydrogenation on potassic Fe/zeolite LTL. **Applied Catalysis A: General**, v. 230, n. 1-2, p. 169-176, 2002.
- CANTARELLA, H. *et al.* Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 52-63, 2015.
- CARVALHO, F. *et al.* Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, 6, p. 1.454-1.475, 2019.
- CAPAZ, R.S.; GUIDA, E.; SEABRA, J.E.A.; OSSEWEIJER, P.; POSADA, J.A. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential, **Biofuels, Bioprod. Bioref.**, v. 15, p. 502–524, 2021.
- CREMONEZ, P. A. *et al.* 2015. Biofuels in Brazilian aviation: current scenario and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1063-1072, 2015.
- COSTA, H.; HENKES, J. **R. bras. Av. civil. ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 1, n. 4, p. 134-159, jul.-ago. 2021.
- DAI, X. P. *et al.* Fischer–Tropsch synthesis in a bench-scale two-stage multitubular fixed-bed reactor: Simulation and enhancement in conversion and diesel selectivity. **Chemical Engineering Science**, v. 105, p. 1-11, 2014.
- DE CASTRO, G. P.; SOARES, R. R. **Avaliação do catalisador 10%Co/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na Síntese de Fischer-Tropsch em reator de leito de lama agitado.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: Divisão Gráfica, Setor de Impressão, 2004.
- DE JONG, S.; HOEFNAGELS, R.; FAAIJ, A.; SLADE, R.; MAWHOOD, R.; JUNGINGER, M. The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison. **Biofuel Bioprod Biorefin**, v. 9, n. 6, p. 778-800, 2015.

- DONJING, L.; BIN, L.; YANGXIAN, L. 2020. Sorbents for hydrogen sulfide capture from biogas at low temperature: a review. **Environmental Chemistry Letters**. v. 18, 1, p. 113-128, 2020.
- DOS SANTOS, W. S.; SOARES, R. R. 2012. **Avaliação de catalisadores a base de ferro suportados em nióbia na Síntese de Fischer-Tropsch**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: Divisão Gráfica, Setor de Impressão, 2012.
- DRY, M. E. 1982. Catalytic aspects of industrial Fischer-Tropsch synthesis. **Journal of Molecular Catalysis**, v. 17, 2-3, p. 133-144, 1982.
- DRY, M. E. 1996. Practical and theoretical aspects of the catalytic Fischer-Tropsch process. **Journal of Molecular Catalysis**, v. 138, 2, p. 133-144, 1996.
- EUROPENA SECURITIES AND MARKETS AUTHORITY (ESMA). **Preliminary report: emission allowances and derivatives thereof**. 2021. Disponível em: [https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma70-445-7\\_preliminary\\_report\\_on\\_emission\\_allowances.pdf](https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma70-445-7_preliminary_report_on_emission_allowances.pdf). Acesso em: 1 fev. 2022.
- EPE. **PNE – Plano Nacional de Energia 2050**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2021.
- EPE. SÉRIE: FORMAÇÃO DE PREÇOS DE COMBUSTÍVEIS. **Carga tributária incidente sobre a comercialização de combustíveis no Brasil: 2020**. 2020b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-413/topico-567/SP-EPE-DPG-SDB-Abast-02-2020\\_Carga%20tribut%C3%A1ria\\_2020\\_r1.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-413/topico-567/SP-EPE-DPG-SDB-Abast-02-2020_Carga%20tribut%C3%A1ria_2020_r1.pdf). Acesso em: 26 dez. 2021.
- EPE. **Comitê Técnico – Combustível para o Futuro – Subcomitê ProBioQAV: metodologias e estimativas para o QAV**. 2021a. Disponível em: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/probioqav/participacao-social/ap-epe-dpg-sdb-2021-43-probioqav\\_26-08-2021.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/probioqav/participacao-social/ap-epe-dpg-sdb-2021-43-probioqav_26-08-2021.pdf). Acesso em: 25 dez. 2021.
- EPE. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020. **Nota técnica**. 2021b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03\\_Analise\\_de\\_Conjuntura\\_dos\\_Biocombustiveis\\_ano\\_2020.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf). Acesso em: 1 fev. 2022.
- EPE. PDE 2031. **Plano decenal de expansão de energia: versão para consulta pública**. 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-609/Relatorio\\_PDE2031\\_ConsultaPublica.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-609/Relatorio_PDE2031_ConsultaPublica.pdf). Acesso em: 15 fev. 2022.
- EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão 2031**. Demanda energética do setor de transportes. 2022b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes\\_PDE%202031\\_2022.02.09.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE%202031_2022.02.09.pdf). Acesso em: 10 fev. 2022.

- EPE. **Perspectivas do mercado brasileiro de combustíveis no curto prazo**. 2022c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/perspectivas-para-o-mercado-brasileiro-de-combustiveis-no-curto-prazo>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- EURACTIV. **Analyst**: EU carbon price on track to reach €90 by 2030. 2021. Disponível em: <https://www.euractiv.com/section/emissions-trading-scheme/interview/analyst-eu-carbon-price-on-track-to-reach-e90-by-2030/>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- FABIANO, D. P.; SOARES, R. R. **Avaliação de catalisadores de Co/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na Síntese de Fischer-Tropsch em reator de leito de lama agitado**. 2006. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: Gráfica UFU – Divisão de Impressão, 2006.
- FENGQUI, Y.; BELINDA, W. 2011. Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed and centralized processing networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, 17, p. 10102-10127, 2011.
- FREITEZ, A. *et al.* 2011. Single-stage Fischer-Tropsch synteis and hydroprocessing: the hydroprocessing performance of Ni/ZSM-5/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under Fischer-Tropsch conditions. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, p. 13732-13741, 2011.
- FREY, S. J. *et al.* **Reforming process for a renewable aviation fuel**. 2014. US 2014/0005448 A1 Estados Unidos da América, 2 de Janeiro de 2014. Processo Químico.
- FRILUND, C. *et al.* Desulfurization of biomass syngas using ZnO-Based adsorbents: long-term hydrogen sulfide breakthrough experiments. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 3, p. 3316-3325, 2020.
- FRILUND, C. *et al.* 2020. Experimental Bench-Scale Study of Residual Biomass Syngas Desulfurization Using ZnO-Based Adsorbents. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 3, p. 3326-3335, 2020.
- GODDARD, J.; MEIER, P. **EU's Green Deal sets out a bold ambition and proposes supportive revisions to three key policy directives**. 2021. Disponível em: <https://www.lek.com/insights/ar/eu-wants-aviation-transition-saf-who-will-produce-it-and-what-price>. Acesso em: 31 dez. 2021.
- GUTIÉRRES-ATONIO, C. *et al.* 2018. Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation. **Chemical Engineering and Processing – Process Intensification**, v. 124, 2018.
- GUTIÉRREZ, N. Á.; GIL, M. V.; PEVIDA, R. C. 2017. Kinetics of CO<sub>2</sub> adsorption cherry stone-based carbons in CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>. **Chemical Engineering Journal**, v. 307, p. 249-257, 2017.
- HAHN, M. *et al.* Mechanism and Kinetics of CO<sub>2</sub> Adsorption on Surface Bonded Amines. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 119, 8, p. 4126-4135, 2015.
- HAMELINCK, C. N. *et al.* 2004. Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential. **Energy**, v. 29, n. 11, p. 1743-1771, 2004.

- HE, Q. *et al.* 2018. Renewable aqueous ammonia from biogas slurry for carbon capture: Chemical composition and CO<sub>2</sub> absorption rate. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 77, p. 46-54, 2018.
- HERALD, J. F.; BOUCHY, C.; CEDEX, R. M. **Use of a bifunctional catalyst based on eolite IZM-2 for the hydroisomerization of light paraffinic feedstocks resulting from Fischer-Tropsch Synthesis**. US 2020/0024530 A1 Estados Unidos da América, 23 Jan 2020. Processo Químico.
- HU, J.; LU, Y.; YU, F. Application of Fischer-Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion. **Catalysts**, v. 2, p. 303-326, 2012.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Environmental report: aviation and environment**. 2016. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2020.
- ICAO. **Environmental report: aviation and environment**. 2019. Disponível em: [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf). Acesso em: 21 abr. 2020.
- ICAO. **Environmental report: aviation and environmental**. 2013. Disponível em: [https://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013/files/assets/common/downloads/ICAO\\_2013\\_Environmental\\_Report.pdf](https://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013/files/assets/common/downloads/ICAO_2013_Environmental_Report.pdf). Acesso em: 21 abr. 2020.
- ICAO. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. 2021. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20March%202021.pdf>. Acesso em 16 jun. 2022.
- ICAO. 2021 global air passenger totals show improvement from 2020, but still only half pre-pandemic levels. 2022 Disponível em: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/2021-global-air-passenger-totals-show-improvement.aspx>. Acesso em 17 jun, 2022.
- IEA Bionergy. **Progress in commercialization of biojet/sustainable aviation fuels (SAF): technologies, potential and challenges**. Task 39. 2021.
- IHS MARKIT. **Voluntary carbon markets poised for growth in 2022**. 2022. Disponível em: <https://cleanenergynews.ihsmarkit.com/research-analysis/voluntary-carbon-markets-poised-for-growth-in-2022.html>. Acesso em: 8 fev. 2022.
- IRENA. Innovation outlook: advanced liquid biofuels. 2016. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_Advanced11\\_Liquid\\_Biofuels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced11_Liquid_Biofuels_2016.pdf).
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). 2017. **Biofuels for aviation: Technology brief**. 2017. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA\\_Biofuels\\_for\\_Aviation\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf). Acesso em: 20 abr. 2020.

- IRENA. **Where will we get our biojet?**. 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2019/May/biojet-EUBCE/0-DolfGielen.pdf?la=en&hash=-1FA1D387B23EA8DF00635733670D8CC1B0519DD2>. Acesso em: 30 dez. 2021.
- IRENA. **Reaching zero with renewables: biojet fuels**. 2021.
- JAGER, B.; ESPINOZA, R. Advances in low temperature Fischer-Tropsch synthesis. **Catalysis Today**, v. 23, 1, p. 17-28.
- JIN, Y.; DATYE, A. K. Phase transformations in iron Fischer-Tropsch catalysts during temperature-programmed reduction. **Journal of Catalysis**, v. 196, 1, p. 8-17.
- JONG, S. de *et al.* The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison. **Biofuel, Bioprod. Bioref.**, v. 9, p. 778–800, 2015. DOI: 10.1002/bbb.1613.
- JÜRGENS, S. *et al.* 2019. Assessment of combustion properties of non-hydroprocessed Fischer-Tropsch fuels for aviation. **Fuel Processing Technology**, v. 193, p. 232-243, 2019.
- KASIKAMPHAIBOON, P.; KHUNJAN, U. CO<sub>2</sub> Adsorption from biogas using amine-functionalized MgO. **Hindawi**, v. 2018, p. 8.
- KHODAKOV, A. Y.; CHU, W.; FONGARLAND, P. Advances in the development of novel cobalt Fischer-Tropsch catalysts for synthesis of long-chain hydrocarbons and clean fuels. **Chemical Reviews**, v. 107, n. 5, p. 1.692-1.744, 2007.
- KLEINA, B.; CHAGAS, M.; JUNQUEIRA, T.; REZENDE, M.; CARDOSO, T.; CAVALETTA, O.; BONOMIA, A. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. **Applied Energy**, v. 209, p. 290-305, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>.
- KUNIMORI, K. *et al.* 1984. Strong metal support interactions in niobium oxide-supported and titanium dioxide-supported metal catalysts: their effects on carbon monoxide hydrogenation. **VIII Int. Cong. Catal.**, Berlin, Weinheim, Alemanha: Verlag Chemie, 1984. v. 5.
- LEE, W. Y. *et al.* Simultaneous removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S from biogas by blending amine absorbents: a performance comparison study. **Energy Fuels**, v. 34, 2, p. 1992–2000, 2020.
- LI, S. *et al.* Promoted iron-based catalysts for the Fischer-Tropsch synthesis: design, synthesis, site densities, and catalytic properties. **Journal of Catalysis**, v. 206, 2002.
- LIU, Y.; MURATA, K.; INABA, M. 2019. Hydrocracking of algae oil to aviation fuel-ranged hydrocarbons over NiMo-supported catalysts. **Catalysis Today**, v. 332, p. 115-121, 2019.
- MADSEN, R.; HENKES, J. Aviação civil e a inserção do bioquerosene no Brasil. **R. Bras. Av. civil. Ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 6-34, mar/2021.
- MARCOBERARDINO, G. *et al.* Green hydrogen production from raw biogas: a techno-economic investigation of conventional processes using pressure swing adsorption unit. **Processes**, v. 6, 19, p. 23, 2018.

- S&P GLOBAL PLATTS. **COP26**: Voluntary carbon market value tops \$1 bil in 2021: Ecosystem Marketplace. 2021. Disponível em: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111121-cop26-voluntary-carbon-market-value-tops-1-bil-in-2021-ecosystem-marketplace>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- S&P GLOBAL PLATTS. **Commodities 2022**: EU on collision course with shipping over carbon market reforms. 2022. Disponível em: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/energy-transition/122321-commodities-2022-eu-on-collision-course-with-shipping-over-carbon-market-reforms>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- SOUZA, L. **O mercado brasileiro de bioquerosene de aviação**: mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA. 2019. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.
- MENG, W. *et al.* Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 79, p. 31-49, Sept./2019.
- MICOLI, L.; BAGNASCO, G.; TURCO, M. HCl removal from biogas for feeding MFCs: Adsorption on microporous materials. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 447-452, 2013.
- MILLER, S. J.; O'REAR, D. **Highly paraffinic, moderately aromatic distillate fuel blend stocks prepared by low pressure hydroprocessing of Fischer-Tropsch products**. US 2001/0187291 A1 Estados Unidos da América, 16 de Agosto de 2007. Processo Químico.
- MISSAGIA, A. B. 2020. Análise da competitividade do biocombustível di-amil éter (DAE) para ser utilizado como combustível de aviação. 2020. Dissertação de Mestrado. Programa de engenharia de produção, UFSM, 2020.
- MOTTA, R.S.; COUTO, L.C.; CAIADO, L.; CASTRO, L. Ipea, textos para discussão: 1781. Curvas de custos marginais de abatimento de gases de efeito estufa no Brasil: resenha e oportunidades de mitigação, 2012.
- NASLAUSK, M.; HENKES, J. R. **Bras. Av. civil. Ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 103-126, 2021.
- NG, K.S.; FAROOQ, D.; YANG, A. 2021. **Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production**: renewable and Sustainable Energy Reviews 150 111502. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/353403500\\_Global\\_biorenewable\\_development\\_strategies\\_for\\_sustainable\\_aviation\\_fuel\\_production](https://www.researchgate.net/publication/353403500_Global_biorenewable_development_strategies_for_sustainable_aviation_fuel_production). Acesso em: 30 dez. 2021.
- NIYA, A.; RUFFORD, T.; ZHU, Z. 2016. Activated carbon monoliths with hierarchical pore structure from tar pitch and coal powder for the adsorption of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>. **Carbon**, v. 103, p. 115-124.
- NOH, J. H. *et al.* Numerical modeling and performance prediction of COS hydrolysis reactor in an integrated gasification fuel cell in terms of thermo-chemical transport phenomena. **Applied Sciences**, v. 8, 7, p. 1196, 2018.

- O'BRIEN, R. *et al.* Activity and selectivity of precipitated iron Fischer-Tropsch catalysts. **Catalysis Today**, v. 36, 3, p. 325-334, 1997.
- OLIVEIRA, J.; ANTUNES, P.; PINOTTI, L e CASSINI, T. Caracterização físico-química de resíduos oleosos do saneamento e dos óleos e graxas extraídos visando a conversão em biocombustíveis. **Quim. Nova**, v. 37, n. 4, p. 597-602, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140094>.
- OLUMIDE, W. A. *et al.* A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. waste and biomass valorization, v. 8, 7, p. 267-283, 2017.
- PABST, K.; CZERNETZKI, B. K.; SCHAUB, G. Combination of Fischer-Tropsch synthesis and hydroprocessing in a single-stage reactor. Part II. Effect of Catalyst Combinations. **Industrial & Chemistry Research**, v. 52, p. 8.988-8.995, 2013.
- PABST, K. *et al.* Combination of Fischer-Tropsch synthesis and hydroprocessing in a single-stage reactor. Part I. Mathematical Modeling of the Reaction Kinetics. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, p. 8978-8987, 2013.
- PAVLENKO, N.; SEARLE, S.; CHRISTENSEN, A. The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. **International Council on Clean Transportation Working Paper 2019-05**.
- PEARLSON, M.N. A techno-economic and environmental assessment of hydroprocessed renewable distillate fuels. 2007. MSc 20 Dissertation. Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- PEARLSON M.; WOLLERSHEIM, C.; HILEMAN, J. A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. **Biofuel Bioprod Biorefin**, v. 7, n. 1, p. 89-96, 2013.
- PERES, S. *et al.* Uso dos coprodutos da indústria do biodiesel para produção de bioquerosene de aviação. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n.4, p. 36.898-36.907, abr./2021
- PRUSSI, M.; O'CONNELL, A.; LONZA, L. 2019. Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28. **Biomass and Bioenergy**, v. 130, 2019.
- RAÍZEN. 2021. **Apresentação para o combustível do futuro em 21/10/21**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/probioqav/participacao-social/probioqav-raizen-v4.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2021.
- RAUCH, R.; KIENNEMANN, A.; SAUCIUC, A. 2013. Chapter 12 – Fischer-Tropsch synthesis to biofuels (BtL Process). *In*: TRIANTAFYLIDIS, K. S.; LAPPAS, A. A.; STÄCKER. M. **The role of catalysis for the sustainable production of bio-fuels and bio-chemicals**. Amsterdam: Elsevier, v. 1, n. 12, p. 397-443, 2013.

- REUTERS 2022. Analysts raise EU carbon price forecasts as gas rally persists. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/analysts-raise-eu-carbon-price-forecasts-gas-rally-persists-2022-01-25/>. Acesso em: 12 fev. 2022.
- ROCCO, G.; HENKES, J. Biocombustíveis sustentáveis para a aviação no Brasil **R. Gest. Sust. ambient.**, Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 191-226, out./dez. 2020.
- RODRIGUES, P. F.M. (2018).
- RODRIGUES, S.L.; HENKES, J. **R. Bras. Av. Civil. Ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 1, n. 3, p. 145-164, jun./2021.
- SCHMIDT, P.; BATTEIGER, V.; ROTH, A.; WEINDORF, W.; RAKSHA, T. Power-to-liquids as renewable fuel option. **Chem. Ing. Tech.**, v. 90, n. 1-2, p. 127-140, 2018. DOI: 10.1002/cite.201700129.
- SCHULZ, H. Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis. **Applied Catalysis A: General**, v. 186, 1-2, p. 3-12, 1999.
- SHAH, M.; TSAPATSI, M.; SIEPMANN, J. I. Hydrogen sulfide capture: from absorption in polar liquids to oxide, zeolite, and metal-organic framework adsorbents and membranes. **Chemical Reviews**, v. 117, 14, p. 9755-9803, 2017.
- SIE, S. T.; KRISHNA, R. 1999. Fundamentals and selection of advanced Fischer-Tropsch reactors. **Applied Catalysis A: General**, v. 186, 1-2, p. 55-70, 1999.
- SOARES, R. R.; FRYDMAN, A.; SCHMAL, M. 1993. Effect of preparation method on 5% Co/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in Fischer-Tropsch Synthesis (FTS). **Catalysis Today**, v. 16, 3, p. 361-370, 1993.
- SUBIRANAS, A. M. **Combining Fischer-Tropsch Synthesis (FTS) and hydrocarbon reactions in one reactor**. 2008. Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW), Karlsruhe Institute. Karlsruhe (TH): KIT, 2008. DSc Thesis. KITopen-ID: 1000010077.
- TAN E.C.D. *et al.* Comparative techno-economic analysis and process design for indirect liquefaction pathways to distillate range fuels via biomass-derived oxygenated intermediates upgrading. **Biofuel Bioprod Biorefin**, v. 11, n. 1p. 41-66, 2017.
- TAO, L.; MILBRANDT, A.; ZHANG, Y.; WANG, W.-C. Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel. **Biotechnol. Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 261, 2017.
- THE NEW YORK TIMES. 2011. Airlines Weigh the Advantages of Using More Biofuel. **The New York Times**. [Online] 9 Out. 2011. Disponível em: [https://www.nytimes.com/2011/10/10/business/global/10iht-green10.html?\\_r=1](https://www.nytimes.com/2011/10/10/business/global/10iht-green10.html?_r=1).
- TANZIL, A.H.; ZHANG, X.; WOLCOTT, M.; BRANDT, K.; STOCKLE, C.; MURTHY, G.; GARCIA-PEREZ, M. Evaluation of dry corn ethanol bio-refinery concepts for the production of sustainable aviation fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 146, p. 105.937, 2021.

- TIJMENSEN, M. J. A. *et al.* Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 2, p. 129-152, 2002.
- VAZIRI, R. S.; BABLER, M. U. Removal of hydrogen sulfide with metal oxides in packed bed reactors: a review from a modeling perspective with practical implications. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24, p. 5316, 2019.
- VILAVA, J. **Produção de ésteres leves derivados de óleo de amêndoa de macaúba para potencial aplicação como biocombustível de aviação**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Energia. Universidade Estadual Paulista. Rosana.
- VOSLOO, A. C. Fischer-Tropsch: a futuristic view. **Fuel Processing Technology**, v. 71, 1, p. 149-155, 2001.
- WALTER, A.; SEABRA, J.; ROCHA, J.; GUARENCHI, M.; VIEIRA, N.; DAMAME, D.; SANTOS, J.L. Spatially Explicit Assessment of the Feasibility of Sustainable Aviation Fuels Production in Brazil: Results of Three Case Studies. **Energies**, v. 14, p. 4972, 2021.
- WANG, W. C.; e TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 801-822, 2016.
- WORLDBANK. **Carbon price dashboard**. 2022. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>. Acesso em: 7 fev. 2022.
- YANG, H.; GONG, M.; CHEN, Y. Preparation of activated carbons and their adsorption properties for greenhouse gases: CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. **Journal of Natural Gas Chemistry**, v. 20, n. 5, p. 460-464, 2011.
- YATES, I. C.; STARRERFIELD, C. N. Intrinsic Kinetics of the Fischer-Tropsch Synthesis on a Cobalt Catalyst. **Energy & Fuels**, v. 5, p. 168-173, 1991.
- YOSHINAGA, F. *et al.* Bioquerosene para aviação: cenário atual e perspectivas futuras. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 10, n. 1, p. 73-91, 2020.
- ZHAO, S. *et al.* 2013. The Hydrolysis of Carbonyl Sulfide at Low Temperature: A Review. **Hindawi**, v. 2013, p. 8, 2013.
- ZHAO, T. S. *et al.* Selective Synthesis of Middle Isoparaffins via a Two-Stage Fischer-Tropsch Reaction: Activity Investigation for a Hybrid. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 4, p. 769-775, 2005.
- ZHAO, T. *et al.* 2017. **Apparatus and method for producing diesel fuel and jet fuel using fischer-tropsch synthetic oil**. US 2017/0362518 A1 Estados Unidos da América, 21 Dec. 17. Processos Químicos.
- ZIMMERMAN, W. H.; BUKUR, D. B. 1990. Reaction kinetics over iron catalysts used for the Fischer-Tropsch synthesis. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 68, p. 292, 1990.

# ANEXOS

**Tabela 9.** Referência para o custo da biomassa de cana-de-açúcar. Custos por etapa de produção na safra 2020/2021 e projeção para a safra 2021/2022.

Descrição	2020/2021		2021/2022	
	R\$/ha	R\$/t	R\$/ha	R\$/t
Tratos Culturais de Cana Soca	2.061,10	25,34	2.281,73	29,26
Colheita, Transbordo e Transporte (CTT)	2.682,87	33,00	2.654,07	34,06
Arrendamentos	1.698,40	20,90	1.925,82	24,71
Administrativo	408,05	4,93	421,68	5,41
<b>Custo Operacional Efetivo (COE)</b>	<b>6.850,42</b>	<b>84,18</b>	<b>7.283,29</b>	<b>93,44</b>
Formação do Canavial	1.289,08	16,27	1.407,18	18,52
<b>Custo-Caixa Agrícola</b>	<b>8.022,8</b>	<b>100,86</b>	<b>8.690,47</b>	<b>111,96</b>

Fonte: CNA. [https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/ativos\\_cana\\_campo\\_futuro\\_Marco2021.pdf](https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/ativos_cana_campo_futuro_Marco2021.pdf)

**Tabela 10.** Base para premissa do custo do óleo de fritura reciclado

 **Brasil - Complexo Soja - Setor Processador**  
Evolução das Cotações FOB-Brasil  
Média Mensal (1ª entrega)

Discriminação	fev/20	jani/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21
<b>Óleo Bruto</b>													
Chicago - CBOT (US\$/t)	669,37	944,40	1.019,24	1.182,94	1.291,68	1.457,46	1.460,90	1.429,08	1.368,84	1.270,03	1.356,10	1.324,63	1.215,75
Prêmio	52,36	44,64	28,66	9,70	(22,05)	(117,58)	(242,95)	(176,37)	(45,75)	38,80	28,11	73,30	111,99
FOB Porto - Paranaguá	721,73	989,04	1.047,90	1.192,64	1.269,63	1.339,88	1.217,95	1.252,71	1.323,09	1.308,83	1.384,21	1.397,94	1.327,74
<b>Mercado Interno</b>													
São Paulo - R\$/t - com ICMS de 12%	3.148,42	5.348,59	5.754,61	6.714,82	6.786,57	7.082,24	6.192,52	6.440,75	6.918,54	6.888,10	7.645,70	7.764,61	7.640,81

Elaboração: ABIOVE - Gerência de Economia.

Fonte: Bolsa de Chicago, Corretoras.

Fonte: Abiove. <https://abiove.org.br/estatisticas/>

**Tabela 11.** Referência para estimativa do custo do sebo

Fechamento: 14/01/2022		
Região	Preço (R\$/Kg)	Variação (%)
Brasil Central	6,95	0,00
Rio Grande do Sul	6,90	0,00

Fonte: <https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/boi/sebo>

