

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA - UFJF
FACULDADE DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA – PPGE

JEFFERSON DOGLAS DA SILVA PEREIRA

IMPACTOS ECONÔMICOS E EFEITOS DE DESCARBONIZAÇÃO DA POLÍTICA
BLEND DE SAF NO SETOR AÉREO BRASILEIRO

JUIZ DE FORA

2025

JEFFERSON DOGLAS DA SILVA PEREIRA

IMPACTOS ECONÔMICOS E EFEITOS DE DESCARBONIZAÇÃO DA POLÍTICA
BLEND DE SAF NO SETOR AÉREO BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Economia da Faculdade de Economia da
Universidade Federal de Juiz de Fora como
requisito parcial para obtenção do título de Doutor
em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Admir Antonio Betarelli Jr

Coorientador: Prof. Dr. Weslem Rodrigues Faria

JUIZ DE FORA

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Jefferson Douglas da Silva.

Impactos econômicos e efeitos de descarbonização da política blend de SAF no setor aéreo brasileiro / Jefferson Douglas da Silva Pereira. -- 2025.

178 f. : il.

Orientador: Admir Antonio Betarelli Junior

Coorientador: Weslem Rodrigues Faria

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia. Programa de Pós-Graduação em Economia, 2025.

1. SAF. 2. Aviação. 3. Equilíbrio Geral Computável. 4. CORSIA. 5. Lei do Combustível do Futuro. I. Betarelli Junior, Admir Antonio , orient. II. Faria, Weslem Rodrigues, coorient. III. Título.

Jefferson Douglas da Silva Pereira

Impactos econômicos e efeitos de descarbonização da política blend de SAF no setor aéreo brasileiro

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Economia. Área de concentração: Economia.

Aprovada em 29 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Admir Antonio Betarelli Junior - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Weslem Rodrigues Faria - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Fabrício Pablo Virgínio de Campos

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr^a. Andressa Lemes Proque

Universidade Federal de São João Del Rei

Dr. Edson Paulo Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais

Dr. José Ricardo de Santana

Universidade Federal de Sergipe

Dr. Rafael Silva Capaz

Universidade Federal de Itajubá

Juiz de Fora, 17/09/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antonio Betarelli Junior, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Weslem Rodrigues Faria, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAFAEL SILVA CAPAZ, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 19:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andressa Lemes Proque, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 20:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDSON PAULO DOMINGUES, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 22:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE RICARDO DE SANTANA, Usuário Externo**, em 30/09/2025, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Pablo Virginio de Campos, Professor(a)**, em 30/09/2025, às 11:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2622893** e o código CRC **AFE0DF38**.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese representa o fechamento de um ciclo de intensa dedicação e de inúmeras abnegações em prol da minha capacitação intelectual e da minha formação profissional e pessoal. Não poderia fechar esse ciclo sem expressar os meus agradecimentos a todos que de alguma forma percorreram comigo esta caminhada.

Primeiramente, eu agradeço a Deus pela dádiva da vida e pela minha boa saúde física e mental, que me deram o vigor necessário para me manter firme mesmo diante de tantos desafios. O Senhor sempre foi e é o meu refúgio de todas as horas: nos momentos turbulentos, aquietou minha alma; nos momentos gélidos, acalenta meu coração. Toda honra e toda glória sejam dadas ao Senhor.

A minha família por todo o apoio e confiança depositados em mim: minha mãe, Josefa; meu pai, Arnou; minhas irmãs, Josélia e Liandra; e meus irmãos, Damião e Eduardo. De modo especial, expresso minha gratidão a minha mãe e as minhas irmãs, cujo amparo constante foi essencial ao longo de toda a minha trajetória. Estendo ainda meus agradecimentos ao meu cunhado, Júnior, e a uma grande amiga da vida, Auzenir (*in memoriam*), que sempre me incentivou a seguir com os estudos.

Ao meu orientador, Admir Betarelli, pela orientação atenta e dedicada e por todo o apoio ao longo do doutorado. Seu zelo pela qualidade e pelo rigor científico me serve de inspiração. Agradeço-lhe por ter sempre me incentivado a buscar novos horizontes, além de me abrir portas e me incluir em importantes projetos de pesquisa. Seu entusiasmo a cada etapa avançada na pesquisa, nossas longas discussões sobre quais caminhos seguir e suas palavras de incentivo quando eu estava aflito muito me impulsionaram. Guardo comigo uma frase que me disse em um momento em que eu estava desanimado: “*Ser otimista dá trabalho, mas cria oportunidades e vale a pena.*”

Ao meu coorientador, Weslem Faria, pelo apoio, pelas contribuições no desenvolvimento desta tese e pelas oportunidades de colaboração ao longo do doutorado. Sua confiança no meu trabalho em muito me enriqueceu como pesquisador e acadêmico.

Aos membros da banca, professores Edson Domingues, Fabrício Campos e Rafael Capaz, que também foram membros da banca de qualificação, cujas sugestões foram valiosas para o desenvolvimento desta tese; e aos professores Andressa Proque e Ricardo Santana, que vêm

somar a esta banca de tese. Meu muito obrigado por terem aceitado participar desta avaliação e pelas colaborações.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPGE/UFJF), pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado. De modo especial, ao professor Fernando Perobelli, pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa logo no início do meu doutorado. Estendo também meus agradecimentos aos técnicos, em especial Antônio e Nicole, ao pessoal administrativo e aos zeladores do PPGE/UFJF pelo trabalho essencial que desempenham.

À professora Madhu Khanna por ter aceitado ser minha supervisora e me receber para o meu período de doutorado-sanduíche na Universidade de Illinois Urbana-Champaign. E a todo o grupo de pesquisa sob sua coordenação pelas sugestões para esta tese.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação desde o ensino básico até aqui. A Adelson Santos, meu orientador de graduação, e a Keuler Teixeira, meu orientador de mestrado, são profissionais com quem aprendi lições valiosas.

Ao Estado brasileiro, cujas políticas públicas de educação — em especial a interiorização das universidades — foram decisivas para que um ex-aluno da escola pública como eu pudesse alcançar a graduação, o mestrado e, hoje, o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, sob o código de financiamento 001 e pela bolsa de doutorado-sanduíche.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pela concessão de bolsa nos meses finais do meu doutorado em um projeto coordenado pelo Prof. Victor Valerio.

Ao Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), pela concessão de uma bolsa como assistente de pesquisa. Agradeço a Fernando Ribeiro, coordenador do projeto em que atuei, pela oportunidade de trabalharmos juntos.

À equipe do Centro de Excelência de Tecnologias para a Transição Energética (CETTE) da UFJF por todo o aprendizado sobre SAF no âmbito do projeto Estudos acerca das alternativas do setor aéreo relacionados ao uso de SAF, financiado pela SAC.

Aos amigos e colegas de curso, agradeço tanto pelo apoio nas questões acadêmicas quanto pelos momentos de descontração, seja nas confraternizações da “salinha”, nos cafês após o almoço

ou nas tradicionais “saidinhas”. De modo particular, agradeço a Jamaika, Lindomayara, Lucas e Moíses, pela amizade que construímos ao longo desses anos e por sempre poder contar com vocês para o que der e vier. A Gabriel, Filipe, Juliano, Matheus, Pedro Leite e Pedro Soyer por toda a convivência. A Guilherme e a David por todos os momentos compartilhados juntos. Aos colegas de futebol pelos momentos de lazer que me ajudaram a equilibrar essa jornada.

Aos meus amigos de longa data, pelo apoio constante e pela torcida em cada conquista, em especial a Bárbara, Clédia, Livia, Luiza e Rosana.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização desta tese.

RESUMO

O setor de transporte aéreo é estratégico para a economia e facilita a integração entre as cadeias produtivas. Um efeito adverso de sua atuação na economia são as emissões de dióxido de carbono (CO₂) oriundas do uso de combustíveis fósseis. Embora tenha sido responsável por apenas 2,5% das emissões globais de CO₂ em 2024, o transporte aéreo é o modal de transporte que apresentou o maior crescimento relativo entre 2000 e 2019. Nesse sentido, para alinhar-se ao movimento de descarbonização global, o Brasil instituiu a Lei do Combustível do Futuro (LCF), que estabelece metas para redução das emissões dos voos domésticos, e aderiu ao Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA), que regula as emissões dos voos internacionais. A substituição do querosene de aviação (QAV) por combustível sustentável de aviação (SAF) é alternativa técnica mais viável para atender a esses regulamentos. Apesar da relevância do tema, ainda são escassos os estudos que avaliam de forma integrada os efeitos econômicos e ambientais do cumprimento da LCF e do CORSIA no Brasil. Assim, esta tese tem como objetivo mensurar os impactos econômicos e ambientais da substituição de QAV por SAF no setor de transporte aéreo brasileiro entre 2027 e 2037, considerando as metas de redução de CO₂ estabelecidas pela LCF e pelo CORSIA. Para acomodar esse objetivo, foram desenvolvidos cinco modelos dinâmicos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), genericamente denominados *Brazilian Sustainable Aviation Fuel* (SAFBR), calibrados com a Matriz de Contabilidade Social (MCS) brasileira, dados de emissões de CO₂ e a incorporação de um novo setor de produção, que produz exclusivamente SAF. Foram analisadas cinco rotas tecnológicas de produção de SAF – duas baseadas em biomassas de primeira geração (CAN/ATJ e OS/HEFA) e três de segunda geração (RCAN/ATJ, SB/HEFA e RF/FT) – simuladas sob dois cenários de descarbonização alinhados às metas da LCF e do CORSIA, totalizando dez simulações. Embora o setor aéreo atinja as metas de redução de emissões, sua produção cairia, sobretudo nas rotas com maiores custos de abatimento em ambos os cenários. Os setores ligados à cadeia produtiva do SAF apresentariam ganhos de produção, enquanto aqueles ligados à cadeia do setor aéreo sofreriam perdas. No agregado, no entanto, predominariam efeitos econômicos negativos e as emissões totais de CO₂ aumentariam, além de impactos adversos sobre o bem-estar das famílias, especialmente as de baixa renda. Conclui-se que, embora reduzam as emissões do transporte aéreo, a LCF e o CORSIA gerariam efeitos econômicos e ambientais negativos para a economia brasileira.

Palavras-chave: SAF. Aviação. Equilíbrio Geral Computável. CORSIA. Lei do Combustível do futuro.

ABSTRACT

The air transport industry is strategic for the economy and facilitates the integration of production chains. However, its economic activity also generates adverse effects in the form of carbon dioxide (CO₂) emissions derived from the use of fossil fuels. Although responsible for only 2.5% of global CO₂ emissions in 2024, emissions from air transport were the fastest growing among transport modes between 2000 and 2019. In this context, to align with the global decarbonization movement, Brazil established the Future Fuel Law (LCF), which sets progressive targets for reducing emissions from domestic flights, and joined the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), which regulates emissions from international flights. The replacement of jet fuel (JF) with sustainable aviation fuel (SAF) emerges as the most viable technical alternative to meet these regulations, although it is not yet produced on a commercial scale. Despite the relevance of the topic, there are no studies that assess in an integrated manner the economic and environmental effects of implementing these policies in Brazil. Thus, this thesis aims to measure the economic and environmental impacts of replacing JF with SAF in the Brazilian air transport industry between 2027 and 2037, considering the CO₂ reduction targets set by the LCF and CORSIA. To achieve this objective, five dynamic Computable General Equilibrium (CGE) models, generically named Brazilian Sustainable Aviation Fuel (SAFBR), were developed. They were calibrated using the Brazilian Social Accounting Matrix (SAM), CO₂ emissions data, and the incorporation of a new industry exclusively dedicated to SAF production. Five pathways for SAF production were analyzed – two based on first-generation biomass (CAN/ATJ and OS/HEFA) and three derived from second-generation feedstocks (RCAN/ATJ, SB/HEFA, and RF/FT) – simulated under two decarbonization scenarios aligned with the LCF and CORSIA targets, resulting in ten simulations. In both scenarios, although the air transport industry achieves its emission reduction targets, its output would decline, especially in the pathways with higher SAF abatement costs. The results for other industries indicate gains for those linked to the SAF production chain and losses for those connected to the air transport production chain. For the economy, the results indicate that there would be negative economic effects, higher CO₂ emissions, and adverse impacts on household welfare, particularly among low-income households. Therefore, despite the environmental benefits for the air transport industry, LCF and CORSIA would result in negative economic and environmental impacts for the economy.

Keywords: SAF. Aviation. Computable General Equilibrium. CORSIA. Future Fuel Law.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cronograma de redução de emissões de CO ₂ nas operações aéreas domésticas	61
Figura 2 – <i>Background</i> dos principais modelos de EGC e desenvolvimento do modelo SAFBR	87
Figura 3 – Estrutura de produção	97
Figura 4 – Estrutura da demanda por investimentos	98
Figura 5 – Estrutura de consumo das famílias.....	99
Figura 6 – Construção dos choques de política a serem simuladas no modelo SAFBR	116
Figura 7 – Redução (em %) das emissões de CO ₂ por cenário	117

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da quantidade de carga paga transportada – mercados doméstico e internacional (2010 a 2024).....	25
Gráfico 2 – Evolução do mercado de trabalho formal do setor aéreo de 2010 a 2022.....	26
Gráfico 3 – Composição da oferta e da demanda total do setor aéreo no Brasil.....	28
Gráfico 4 – Multiplicadores de produção, renda e emprego	32
Gráfico 5 – Emissões equivalentes de CO ₂ da aviação civil – voos domésticos e internacionais	36
Gráfico 6 – Desvio acumulado (%) do custo de produção a preços básicos do setor de transporte aéreo (anos selecionados)	122
Gráfico 7 – Desvio acumulado (%) na demanda por QAV do setor aéreo	125
Gráfico 8 – Desvio acumulado (%) das emissões do transporte aéreo em 2050.....	126
Gráfico 9 – Desvio acumulado (%) da produção dos setores produtores das matérias-primas do SAF	129
Gráfico 10 – Desvio acumulado (%) das emissões totais.....	133
Gráfico 11 – Desvio acumulado (%) da demanda das famílias por transporte aéreo (rotas selecionadas).....	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos principais acordos e ações climáticos globais.....	52
Quadro 2 – Histórico de programas e iniciativas nacionais de redução das emissões de GEE.....	57
Quadro 3 – Rotas tecnológicas aprovadas e incorporadas pela ANP para produção de SAF no Brasil.....	64
Quadro 4 – Emissões totais de GEE ($\text{gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$) geradas pelo SAF no Brasil	75
Quadro 5 - Rendimentos gerais para as rotas de produção de SAF	90
Quadro 6 – Parâmetros do modelo SAFBR	109
Quadro 7 – Parâmetros para o módulo de dinâmica recursiva do modelo SAFBR	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da quantidade de passageiros pagos transportados – mercados doméstico e internacional (2010 a 2024)	24
Tabela 2 – Participação do setor de transporte aéreo na economia brasileira	27
Tabela 3 – Principais setores demandantes dos serviços de transporte aéreo na economia brasileira (participação (%) no consumo intermediário)	29
Tabela 4 – Principais insumos que compõem o custo de produção do setor de transporte aéreo na economia brasileira (participação (%) no Valor Bruto da Produção).....	31
Tabela 5 – Índice de ligação Rasmussen-Hirshman e setores-chaves da economia brasileira (insumos selecionados).....	33
Tabela 6 – Extração hipotética total do setor de transporte aéreo (variação do VBP em milhões de reais).....	35
Tabela 7 – Custo total das matérias-primas para produção de 1 m ³ de SAF.....	92
Tabela 8 – Custos unitários de produção e preços para cinco rotas de produção de SAF, para o QAV e o EBIO (ano de 2015)	94
Tabela 9 – Emissões associadas ao uso de combustíveis e atividade econômica no Brasil (ano base 2015) em mil toneladas de CO ₂ e	111
Tabela 10 – Intensidade de carbono para o QAV e para o SAF.....	112
Tabela 11 – Variações reais (%) dos principais indicadores econômicos e do QAV	114
Tabela 12 – Choques (m ³) aplicados nas simulações dos modelos SAFBR	118
Tabela 13 – Custo de abatimento do SAF em anos selecionados do <i>baseline</i> (em R\$/t de CO ₂ evitada)	120
Tabela 14 – Participação (%) do SAF no consumo total de combustível do setor aéreo.....	121
Tabela 15 – Desvio acumulado (%) das vendas a preços básicos do setor aéreo por tipo de consumo.....	123
Tabela 16 – Desvio acumulado (%) da produção e do emprego do setor aéreo.....	124
Tabela 17 – Desvio acumulado (%) da produção setorial (setores selecionados).....	128
Tabela 18 – Desvio acumulado (%) nas emissões setoriais (setores selecionados)	131
Tabela 19 – Desvio acumulado (%) das principais variáveis macroeconômicas	134
Tabela 20 – Desvio acumulado (%) da renda real das famílias.....	136
Tabela 21 – Desvio acumulado (%) da renda real disponível e utilidade das famílias	138
Tabela 22 – Desvio acumulado da demanda das famílias por alimentos	140
Tabela 23 – Preço relativo dos SAF e custos de abatimento (2026)	141

Tabela 24 – Síntese dos principais resultados ao fim de cada política..... 143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais

ATJ – Álcool para Jato

BLUES – Sistema Brasileiro de Uso da Terra e Energia

CMC – Conferência Mundial do Clima

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

CONPET – Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural

CoPS – Centro de Estudos de Políticas

CORSIA – Esquema de Compensação e Redução de Carbono da Aviação Internacional

DLUC – Mudanças Diretas do Uso da Terra

FT – Síntese de *Fischer-Tropsch*

GREET – Gases de Efeito Estufa, Emissões Regulamentadas e Uso de Energia nos Transporte

GTAP-BIO – *Global Trade Analysis Project-Biofuel*

HEFA – Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Graxos

IATA – Associação Internacional de Transporte Aéreo

ILUC – Mudança Indireta no Uso da Terra

LCAF – Combustíveis de Aviação de Baixo Carbono

MLEC – Material Lignocelulósico de Eucalipto e de Cana-de-Açúcar

OACI – Organização Internacional da Aviação Civil

OMM – Organização Mundial de Meteorologia

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PNA – Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima

PNB – Programa Nacional de Bioquerosene

PNMC – Política Nacional de Mudanças Climáticas

PNPB – do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

ProBioQAV – Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação

RBQAV – Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para Aviação

RTK – Receita por Tonelada de Quilômetro

SAF – Combustível Sustentável de Aviação

SAFBR – Modelo Brasileiro de Combustível Sustentável de Aviação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Estrutura da Tese.....	21
2	TRANSPORTE AÉREO, ECONOMIA E EMISSÕES	23
3	REVISÃO TEÓRICA: ECONOMIA, ENERGIA E MEIO AMBIENTE	37
4	POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE E A AVIAÇÃO CIVIL	48
4.1	Políticas de descarbonização.....	48
4.2	Medidas de descarbonização para a aviação civil.....	58
4.2.1	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)</i> ...	58
4.2.2	Lei do Combustível do Futuro (LCF)	60
4.3	Rotas tecnológicas de produção de SAF	62
5	ESTUDOS DA LITERATURA APLICADA.....	68
5.1	Viabilidade ambiental do uso de SAF produzido por diferentes rotas tecnológicas	68
5.2	Viabilidade técnico-econômica da produção de SAF	76
5.3	Impactos econômicos	79
6	ESTRATÉGIA EMPÍRICA.....	81
6.1	Modelos de EGC e aspectos gerais dos modelos SAFBR	82
6.2	Estimativas de custos e rendimentos e base de dados do modelo SAFBR	88
6.3	Estrutura Teórica do modelo SAFBR	95
6.3.1	Núcleo do modelo	95
6.3.2	Dinâmica recursiva	101
6.3.3	Módulo fiscal	103
6.3.4	Módulo de emissões.....	105
6.3.5	Módulo de volume	107
6.4	Estrutura dos dados e parâmetros do modelo	108
6.5	Cenários de simulação	112
6.5.1	Fechamento	112
6.5.2	Cenário de referência (<i>Business as Usual</i> – BAU)	113
6.5.3	Análise de política.....	115
6.6	Custo de Abatimento do SAF	118
7	RESULTADOS.....	119
7.1	Custos de Abatimento e Participação do SAF	119
7.2	Resultados para o Setor Aéreo	121
7.3	Resultados para Demais Setores	127

7.4	Resultados Macroeconômicos	132
7.5	Resultados para as Famílias	135
7.6	Impactos de política	140
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	146
REFERÊNCIAS		150
APÊNDICE A – Emissões do setor aéreo por tipo de voo e emissões a serem reduzidas em cada cenários de política		170
APÊNDICE B – Substituição de qav por saf em cada cenário e em cada rota de produção..		171
APÊNDICE C – Desvio acumulado (%) do custo de produção do setor de transporte aéreo		172
APÊNDICE D – Desvio acumulado (%) das emissões setoriais		173
APÊNDICE E – Desvio acumulado (%) da demanda das famílias por transporte aéreo.....		175
ANEXO A - Critérios de sustentabilidade do corsia aplicáveis aos saf produzidos em ou após 1 de janeiro de 2024		176

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte aéreo é estratégico para a economia, pois ao facilitar o deslocamento rápido de cargas e passageiros, conecta mercados e ideias e promove maior integração das cadeias produtivas. Entre 2010 e 2021, em média, 65% de sua produção total foi absorvida pelos demais setores da economia para a produção de bens e serviços (IBGE, 2023). Os impactos desse setor na economia surgem tanto diretamente, por meio da atividade na indústria de aviação, quanto indiretamente, por meio do aumento dos gastos e dos benefícios econômicos associados à melhoria do acesso a recursos, mercados, tecnologia e massa econômica (Zhang; Graham, 2020). A atividade econômica, por sua vez, sustenta e gera demanda por transporte aéreo, evidenciando uma relação de interdependência (Ishutkina; Hansman, 2011). Além disso, o setor aéreo apresenta elevada elasticidade à renda da demanda (Oliveira *et al.*, 2006). Portanto, seu crescimento varia mais do que proporcionalmente ao da economia.

Esse dinamismo, no entanto, intensifica os impactos ambientais do setor, especialmente em períodos de crescimento econômico, quando a expansão da demanda por transporte aéreo se traduz em maiores emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), resultantes da queima de combustíveis fósseis nas operações aéreas. Em 2024, a aviação civil foi responsável por emitir 2,5% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), sendo o segmento de transporte com maior crescimento relativo entre 2000 e 2019 (IEA, 2025). Estima-se que, em 2050, o número de passageiros ultrapasse 10 bilhões, enquanto as emissões de CO₂ atinjam 21,2 bilhões de toneladas, o que representa praticamente o dobro das emissões realizadas em 2019 (IATA, 2021). Nesse cenário, a aviação civil seria responsável pelo aumento de aproximadamente 0,1 °C na temperatura média global até 2050 (Terrenoire *et al.*, 2019).

O aumento da temperatura média da superfície global representa um risco ao funcionamento dos sistemas naturais e à vida humana no planeta. De acordo com o IPCC (2018), um aumento médio de 1,5 °C até 2100, em relação ao período pré-industrial (1850-1900), eleva consideravelmente esse risco. No cenário mais otimista, estima-se que esse limite seja atingido entre 2030 e 2035 (IPCC, 2023a). Esse contexto levou a comunidade internacional a adotar uma resposta conjunta à ameaça das mudanças climáticas, aprovando, em 2015, o Acordo de Paris, cuja meta é manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para que não ultrapasse 1,5°C até 2100 (UNFCCC, 2023a).

O cumprimento dessa meta requer uma grande redução das emissões antropogênicas¹ de GEE, em especial, do CO₂, que responde sozinho por cerca de 66% do efeito de aquecimento do clima (OMM, 2021). No âmbito desse acordo, essas reduções são definidas individualmente por cada país signatário por meio das “Contribuições Determinadas Nacionalmente” (NDC) (UNFCCC, 2023a). Embora o Acordo de Paris não tenha estabelecido metas setoriais específicas para a redução de emissões de GEE, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, do inglês *International Air Transport Association*) e os Estados-membros da Organização Internacional da Aviação Civil (OACI) estabeleceram como objetivo de longo prazo zerar as emissões líquidas de carbono² dos voos internacionais até 2050 (IATA, 2021).

Alcançar esse objetivo requer a adoção combinada de diferentes estratégias. A IATA (2021) prevê que 65% da redução de emissões de CO₂ virá do uso de combustível sustentável de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuel*); 19% de compensações e captura de carbono; 13% de novas tecnologias; e 3% de melhorias na infraestrutura e eficiência operacional. A adoção dessas medidas demanda tempo, a produção de SAF, por exemplo, representou apenas 0,3% do volume global de combustível de aviação em 2024 (IATA, 2025). E a adoção de novas tecnologias, como a aviação elétrica e a propulsão a hidrogênio, não deve estar disponível em escala suficiente para a indústria aérea antes de 2050 (Costa *et al.*, 2024).

Diante desses desafios, em 2016, os Estados-membros da OACI adotaram o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, do inglês *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) (OACI, 2016). O CORSIA é um mecanismo de mercado de curto e médio prazo cujo objetivo é limitar as emissões de CO₂ da aviação civil internacional a 85% do nível observado em 2019. Por meio desse mecanismo, os operadores aéreos dos países signatários podem descontar suas emissões comprando créditos de carbono aprovados pela OACI ou utilizando SAF (IATA, 2024a).

O Brasil, enquanto um dos membros da OACI, aderiu ao CORSIA e, entre 2027 e 2035, os operadores aéreos nacionais deverão obrigatoriamente compensar parte das emissões de CO₂ dos voos internacionais (ANAC, 2022). O CORSIA, no entanto, não se aplica às emissões provenientes dos voos domésticos. Para esse tipo de operação, foi sancionada a Lei nº 14.993/2024, também conhecida como Lei do Combustível do Futuro (LCF). A LCF estabelece

¹ Emissões produzidas como resultado da ação humana.

² Isso significa que a indústria de aviação civil comercial deve adotar mecanismos para reduzir ou compensar as emissões de CO₂, de modo que o saldo final entre emissões e remoções seja zero.

que os operadores aéreos ficam obrigados a reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas por meio do uso de SAF, começando com 1% em 2027 e em 2028, e aumentando 1 ponto percentual ao ano até atingir 10% em 2037 (Brasil, 2024).

As compensações obrigatórias de CO₂ às quais a aviação civil brasileira está sujeita no âmbito do CORSIA e da LCF podem estimular o desenvolvimento da cadeia produtiva de SAF no país, ao condicionar o cumprimento dessas compensações à substituição de querosene de aviação (QAV) por SAF. Embora ainda não seja produzido em larga escala, o SAF representa uma das alternativas mais promissoras para descarbonização da indústria aérea (Becken; Mackey; Lee, 2023; Klimczyk *et al.*, 2025). Seu potencial de mitigação pode alcançar até 80% em comparação ao QAV (Wang; Ting; Zhao, 2024). Além disso, trata-se de um combustível *drop-in*, ou seja, que pode ser usado diretamente nas aeronaves sem a necessidade de alterações na tecnologia de combustão das aeronaves (Sain; Kazula; Enghardt, 2022).

Apesar dessa imposição regulatória, o custo de produção do SAF, que pode ser de 2 a 8 vezes superior ao do QAV, configura-se como entrave para o surgimento de um mercado consolidado desse combustível (Brodzik *et al.*, 2025; Dyk; Saddler, 2024). Esse custo está associado diretamente ao seu processo de produção, que envolve a escolha de matérias-primas e de uma tecnologia industrial de conversão. Outro desafio à consolidação do mercado de SAF diz respeito às muitas incertezas envolvidas no seu processo de produção (Efthymiou; Ryley, 2022).

No que se refere às matérias-primas, o Brasil se destaca por possuir condições favoráveis para o cultivo de diferentes biomassas e pela vasta experiência na produção de biocombustíveis (Cortez *et al.*, 2014). No curto prazo, a cana-de-açúcar e a soja são as biomassas com maior potencial para produção de SAF (Cantarella *et al.*, 2015; Embrapa, 2015; Carvalho, 2017; Walter *et al.*, 2021). No médio e longo prazo, os óleos de palma, algodão, girassol e canola podem ser melhores alternativas (Embrapa, 2015), assim como os resíduos de eucalipto e materiais lignocelulósicos (Cantarella *et al.*, 2015; Moraes *et al.*, 2014a).

Em se tratando das rotas de produção de SAF, as tecnologias *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA) e *Fischer-Tropsch* (FT) são as mais maduras, enquanto *Alcohol-to-Jet* (ATJ) surge como opção futura (Klimczyk *et al.*, 2025). Embora a rota HEFA apresente menor custo de investimento do que as rotas FT, que produz SAF por meio de biomassa e resíduos sólidos urbanos, e ATJ, que converte álcoois como etanol e butanol em SAF, o custo da matéria-prima

utilizada nesse processo é mais elevado. Em geral, conforme as matérias-primas são mais baratas, a tecnologia de conversão em SAF tende a ser mais cara (OACI, 2018).

A definição da melhor rota tecnológica para produção de SAF depende de uma série de fatores interligados. A escolha da matéria-prima, por exemplo, está condicionada a sua disponibilidade, ao seu preço e ao seu impacto ambiental. Enquanto a escolha da tecnologia de conversão se baseia em critérios técnicos que atestam o uso seguro do SAF nas aeronaves. Uma vez definida uma rota tecnológica de produção para o SAF (matéria-prima e tecnologia de conversão), determina-se seu potencial de redução de emissões de GEE e seus custos. Portanto, o processo de produção de SAF não é uma escolha trivial, depende da interação entre múltiplos fatores.

Nesse contexto, a literatura empírica tem direcionado esforços para compreender aspectos relacionados aos impactos ambientais (*e.g.*, Capaz (2021); Cox *et al.* (2014); De Jong *et al.* (2017)), à viabilidade técnica (*e.g.*, Alves *et al.* (2017); Holladay; Abdullah; Heyne (2020); Vyhmeister *et al.* (2018)), à disponibilidade de matérias-primas (*e.g.*, Carvalho (2017; Cortez *et al.* (2014); Escalante *et al.* (2022); Roitman (2018)) e à relação custo-benefício (*e.g.*, Bann *et al.* (2017); Capaz (2021); Montoya (2021); Shahriar; Khanal (2022)) relacionados à produção de SAF. Esses estudos, no entanto, não consideram as interdependências setoriais envolvidas no processo produtivo do SAF. A introdução desse combustível na economia deve ser avaliada a partir de uma abordagem intersetorial, que é a mais adequada para capturar os efeitos de políticas bioenergéticas (Kretschmer; Peterson, 2010).

Os estudos de Mueller, Winter e Grote (2024) para a Alemanha e de Wang *et al.* (2019) para o Brasil avançam nessa direção ao avaliarem os impactos da produção de SAF por meio de uma abordagem de equilíbrio geral. Apesar de ser direcionado para o Brasil, o estudo de Wang *et al.* (2019) não considera as metas de redução de CO₂ estabelecidas internacionalmente (CORSIA) e nacionalmente (LCF) para o setor aéreo brasileiro. Assim, esta tese busca preencher essa lacuna, integrando essas políticas de descarbonização via substituição de QAV por SAF em uma modelagem de equilíbrio geral.

A compreensão dos efeitos da LCF e do CORSIA aplicados ao setor aéreo é particularmente importante porque esses regulamentos estimularão o desenvolvimento de uma nova cadeia produtiva na economia brasileira, a de SAF. Os desdobramentos econômicos e ambientais amplos de sua produção ainda precisam ser explorados. Por ser mais caro que o QAV, o SAF pode elevar os custos do setor aéreo, uma vez que o combustível representa, em média, de 30% a 40% dos custos operacionais da aviação comercial (Efthymiou; Ryley, 2022). Esse aumento

pode elevar os custos de produção dos setores que demandam transporte aéreo, e impactar a economia como um todo. Além disso, o elevado preço do SAF pode redirecionar a produção de biomassa³, diminuindo a oferta de alimentos e elevando seus preços, prejudicando especialmente as famílias mais pobres (O'Malley; Pavlenko; Kim, 2023). De modo análogo, a menor demanda por QAV pode redirecionar a produção de petróleo para outros derivados, o que tende a diminuir o preço desses produtos, aumentar seu consumo e, consequentemente, elevar as emissões. Diante desse contexto, esta tese busca responder à seguinte pergunta: quais são os impactos econômicos e ambientais sistêmicos associados ao cumprimento das políticas de descarbonização do setor aéreo brasileiro por meio da substituição de QAV por SAF?

Em face dessa pergunta, o objetivo principal deste estudo é mensurar os impactos econômicos e ambientais da substituição de QAV por SAF no setor de transporte aéreo brasileiro entre 2027 e 2037, considerando as metas de redução de CO₂ estabelecidas pela LCF e pelo CORSIA. Para atingir esse objetivo, o primeiro passo consiste em identificar as rotas tecnológicas de produção de SAF com base em critérios ambientais e de viabilidade econômica. Em seguida, constrói-se a estrutura de custos associada a cada rota selecionada, fazendo sua incorporação à Matriz de Insumo Produto (MIP) brasileira. A partir disso, calcula-se, para cada rota, a quantidade de SAF necessária para cumprir as metas da LCF e do CORSIA. Por fim, definem-se dois cenários distintos para avaliação dos impactos desses regulamentos: (i) Cenário 1, considerando as metas estabelecidas pela LCF; e (ii) Cenário 2, considerando as metas do CORSIA.

Para atender ao objetivo central desta tese, serão desenvolvidos cinco modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) com dinâmica recursiva, genericamente denominados Modelo Brasileiro de Combustível Sustentável de Aviação (SAFBR, do inglês *Brazilian Sustainable Aviation Fuel*). Todos os modelos compartilham a mesma estrutura teórica e utilizam uma base de dados comum, que inclui os fluxos da Matriz de Contabilidade Social (MCS) brasileira e as emissões de CO₂. A distinção entre eles reside nas bases de dados específicas de cada uma das cinco rotas tecnológicas de produção de SAF analisadas. Sendo assim, cada um dos cinco modelos corresponde a uma rota distinta, sendo duas baseadas em biomassa de primeira geração: i) CAN/ATJ (etanol de cana-de-açúcar) e ii) OS/HEFA (óleo de soja); e três de segunda geração: iii) RCAN/ATJ (resíduos de cana-de-açúcar), iv) SB/HEFA (sebo bovino) e v) RF/FT (resíduos florestais).

³ Isso ocorreria para o SAF de primeira geração, ou seja, o SAF produzido a partir de matérias-primas alimentares, por exemplo, cana-de-açúcar e soja.

A escolha da modelagem EGC se justifica por sua capacidade de capturar as interdependências setoriais e os efeitos de encadeamento, sendo uma das abordagens mais utilizadas para a avaliação de políticas econômicas e climáticas (Hafner *et al.*, 2020). Assim, os modelos SAFBR possibilitam analisar os impactos da LCF e do CORSIA no longo prazo, considerando a trajetória econômica subjacente.

A principal inovação e contribuição desta tese é o desenvolvimento dos modelos SAFBR, cuja base de dados incorpora um novo setor à MIP, denominado SAF, que produz um único produto de mesmo nome. Para isso, elaborou-se uma estrutura de custos detalhada para cinco rotas tecnológicas de produção de SAF. Além disso, o modelo incorpora um módulo de volume que apresenta o consumo de QAV e de SAF em metros cúbicos e as emissões de CO₂ em toneladas. Isso permite que os choques de política sejam aplicados diretamente nessas grandezas físicas.

Além dessa inovação, esta tese apresenta contribuições adicionais que podem ser agrupadas em cinco dimensões principais. Primeiro, ainda do ponto de vista metodológico, o modelo desenvolvido é replicável e adaptável a outros contextos, seja para a avaliação de outras rotas de produção de SAF, seja para a incorporação de novos biocombustíveis à MIP. Segundo, no âmbito da literatura, este é o primeiro estudo, até o momento desta escrita, a analisar, por meio de uma modelagem EGC, os impactos da LCF e do CORSIA para o Brasil, considerando a substituição de QAV por SAF, possibilitando identificar as interdependências da cadeia produtiva do SAF e seus efeitos diretos e indiretos sobre a economia e o meio ambiente. Terceiro, para os formuladores de políticas públicas, esta pesquisa pode guiar a tomada de decisões de modo a priorizar as rotas de produção de SAF mais viáveis economicamente e ambientalmente. Quarto, para o setor privado, os resultados deste estudo podem orientar estratégias de investimento, de modo a minimizar os riscos e as incertezas envolvidos na produção de SAF. Por fim, para a sociedade em geral, os principais benefícios concentram-se na ampliação do acesso a informações sobre os efeitos das políticas de descarbonização nos preços do transporte aéreo e dos alimentos, bem como na redução das emissões de CO₂.

1.1 Estrutura da Tese

Além deste capítulo introdutório, esta tese se organiza em mais sete capítulos. O segundo capítulo apresenta uma caracterização econômica do setor de transporte aéreo brasileiro, destacando suas interações setoriais e suas emissões de CO₂. O terceiro capítulo discute os principais fundamentos teóricos que sustentam a relação entre economia, energia e meio

ambiente. O quarto capítulo realiza um levantamento histórico das principais políticas de mitigação de emissões de GEE, abordando os acordos internacionais e regulamentos nacionais, as metas de descarbonização do setor aéreo e as rotas tecnológicas de produção de SAF. O quinto capítulo oferece uma revisão empírica de estudos sobre a viabilidade ambiental e econômica do uso de SAF, bem como os impactos socioeconômicos decorrentes de sua produção e utilização. O sexto capítulo descreve em detalhe a estratégia empírica adotada neste estudo, abordando a metodologia de EGC, a estrutura teórica do modelo SAFBR, a base de dados, os parâmetros de calibração e os cenários de simulação, bem como o cálculo dos custos de abatimento do SAF. O sétimo capítulo apresenta os resultados das simulações, os custos de abatimento do SAF e os impactos das políticas analisadas. Em seguida, o oitavo capítulo traz as considerações finais deste estudo. Por fim, apresentam-se as referências utilizadas, seguidas pelos apêndices e anexos.

2 TRANSPORTE AÉREO, ECONOMIA E EMISSÕES

Este capítulo caracteriza o setor de transporte aéreo⁴, com ênfase no mercado brasileiro, sob uma perspectiva econômica e ambiental. Inicialmente, apresenta-se a evolução dos principais indicadores de desempenho e emprego desse setor. Em seguida, discute-se sua participação na economia e sua estrutura de custos e de demanda, evidenciando suas interdependências setoriais. Nesse contexto, realiza-se uma análise de indicadores sistêmicos com base na Matriz de Insumo-Produto (MIP) brasileira (IBGE, 2015). Por fim, apresentam-se as emissões de dióxido de carbono (CO₂) do setor.

A indústria de aviação desempenha um papel chave na economia, pois gera empregos, garante mobilidade de pessoas e amplia o acesso a serviços essenciais como saúde e educação (Banco Mundial, 2024). Entre os modais de transporte, distingue-se por oferecer conexões rápidas entre diferentes localidades, permitindo o fluxo de bens, investimentos, pessoas e ideias (IATA, 2019). Sua contribuição para o fortalecimento de cadeias produtivas, a inserção internacional e a integração territorial o torna um setor estratégico para a economia (CMAP, 2020).

Desde 1914, quando o primeiro voo comercial transportou apenas um passageiro entre duas cidades na Flórida, nos Estados Unidos (IATA, 2024b), a aviação civil se expandiu mundialmente. Em 2019, atingiu um recorde, com 4,5 bilhões de passageiros transportados entre 22.000 pares de cidades (IATA, 2020). Esse número, contudo, caiu drasticamente nos anos seguintes devido à pandemia de COVID-19, com quedas de 60% em 2020, 49% em 2021 e 29% em 2022 no volume total de passageiros transportados (OACI, 2023).

Em 2018, o impacto econômico global do setor aéreo – incluindo efeitos diretos, indiretos, induzidos e catalisadores do turismo – foi estimado em US\$ 3,5 trilhões, o que representava 4,1% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Desse total, o impacto direto correspondeu a US\$ 961,3 bilhões (1,1% do PIB global). No mesmo ano, o setor gerou 87,7 milhões de empregos em todo o mundo, sendo 11,4 milhões de geração direta. Ademais, em 2018, o modal aéreo foi responsável por transportar 35% do valor total do comércio global (ATAG, 2020).

No Brasil, um marco para a expansão do setor aéreo foi a liberalização do mercado, iniciada na década de 1990 e finalizada no início dos anos 2000, com o fim do controle de preços (Salgado; Oliveira, 2008; Zimmermann; Oliveira, 2012). Nesse período, segundo dados da Agência

⁴ Ao longo do texto, o setor de transporte aéreo pode ser substituído por setor de aviação civil, setor aéreo e setor de aviação, indústria de aviação, sem prejuízo de significado.

Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2000), o número de passageiros pagos transportados aumentou de 28,3 milhões, em 1990, para 40,4 milhões, em 2000, o que representa um crescimento de 42,8%. De 2000 a 2010, esse crescimento foi de 73,5%, com o número de passageiros pagos transportados chegando a 70,1 milhões (ANAC, 2015). Essa expansão é atribuída à popularização do serviço de transporte aéreo decorrente da redução do preço das passagens aéreas observadas após a liberalização econômica (Zimmermann; Oliveira, 2012).

A Tabela 1 reporta a evolução do transporte aéreo no Brasil entre 2010 e 2024. No período, o setor experimentou um crescimento consistente até 2015, quando atingiu o recorde de 117,7 milhões de passageiros pagos transportados – um aumento de 37,7% em relação a 2010. No entanto, esse crescimento foi interrompido pela recessão econômica de 2015-2016. Em 2016, houve uma redução de 7% em relação a 2015, com o mercado doméstico registrando uma retração ainda mais acentuada (7,9%). Esses dados corroboram o fato de o desempenho do setor aéreo estar ligado diretamente ao desempenho da atividade econômica (Coppio *et al.*, 2017; Profillidis; Botzoris, 2015).

Tabela 1 – Evolução da quantidade de passageiros pagos transportados – mercados doméstico e internacional (2010 a 2024)

Ano	Doméstico	Var. anual (%)	Internacional	Var. anual (%)	Total	Var. anual (%)
2010	70.148.029	-	15.370.766	-	85.518.795	-
2011	82.072.795	17,00	17.885.343	16,36	99.958.138	16,88
2012	88.688.896	8,06	18.948.992	5,95	107.637.888	7,68
2013	90.242.280	1,75	19.786.861	4,42	110.029.141	2,22
2014	95.912.236	6,28	21.293.671	7,62	117.205.907	6,52
2015	96.180.793	0,28	21.585.835	1,37	117.766.628	0,48
2016	88.594.995	-7,89	20.927.894	-3,05	109.522.889	-7,00
2017	90.576.711	2,24	21.889.286	4,59	112.465.997	2,69
2018	93.608.864	3,35	24.123.798	10,21	117.732.662	4,68
2019	95.049.348	1,54	24.150.150	0,11	119.199.498	1,25
2020	45.249.296	-52,39	6.763.409	-71,99	52.012.705	-56,36
2021	62.583.717	38,31	4.788.974	-29,19	67.372.691	29,53
2022	82.228.992	31,39	15.679.381	227,41	97.908.373	45,32
2023	91.440.361	11,20	21.257.654	35,58	112.698.015	15,11
2024	93.378.987	2,12	25.052.840	17,85	118.431.827	5,09

Fonte: ANAC (2015, 2024).

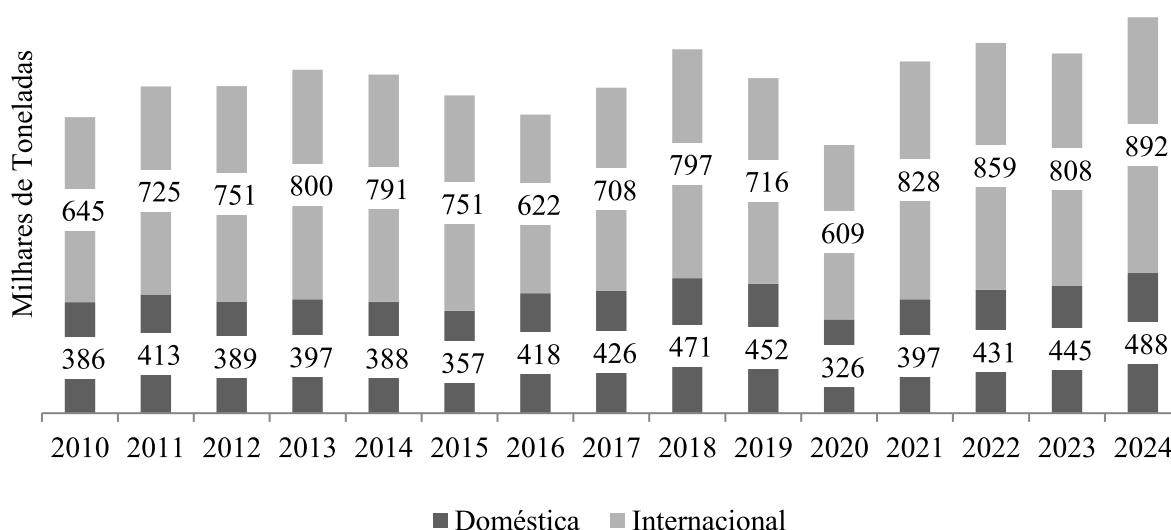
Conforme a Tabela 1, observa-se que em 2019, a aviação civil atingiu um novo recorde, transportando 119,2 milhões de passageiros, superando em 1,2% o total de 2015. Esse resultado deve-se principalmente ao crescimento de 11,9% no transporte internacional de passageiros em relação a 2015, já que o tráfego doméstico recuou 1,2%. Em 2020, o setor aéreo sofreu um novo

revés devido à pandemia de COVID-19, que impactou severamente a aviação (ANAC, 2021). Nesse ano, o tráfego total de passageiros reduziu-se 56,4% em relação a 2019, sendo o mercado internacional o mais impactado, com queda de 72%, enquanto o doméstico recuou 52,4%.

Por fim, a Tabela 1 mostra que os anos seguintes à pandemia registraram recuperação. Em 2023, o setor de aviação civil apresentou crescimento de 11,2% no tráfego doméstico e 35,6% no internacional em relação a 2022, totalizando 112,6 milhões de passageiros e 94,5% do nível pré-pandemia (2019). Em 2024, com uma expansão total de 5,1% em relação a 2023, o setor voltou aos patamares de 2019 (99,4%), conforme previsto pela IATA (2024b).

Em relação ao transporte de carga, o Gráfico 1 mostra que o período de 2010 a 2024 apresentou pouca volatilidade, com a pandemia de COVID-19 em 2020 representando um ponto de inflexão. De 2010 a 2019, o volume total de carga paga transportada oscilou entre 1,0 mil e 1,3 mil toneladas (t), com média de aproximadamente 1,1 mil t no período. Em 2020, o total de cargas transportadas caiu para 0,94 mil t, o que representa uma queda de 20% em relação a 2019, sendo o mercado nacional o mais impactado (-27,8%). O menor impacto no mercado internacional (-15%) pode ser justificado pela alta integração das cadeias globais de valor⁵.

Gráfico 1 – Evolução da quantidade de carga paga transportada – mercados doméstico e internacional (2010 a 2024)



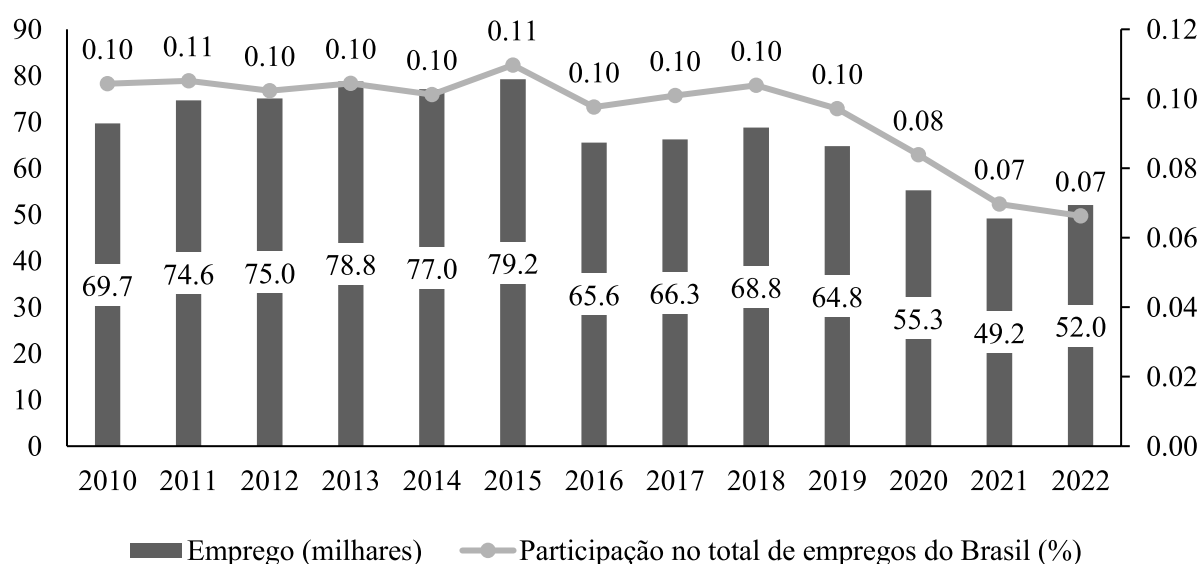
Fonte: ANAC (2015, 2024).

⁵ O conceito de cadeias globais de valor pode ser compreendido como uma evolução no contexto da gestão global da cadeia de suprimentos das empresas (*supply chain management*) (Schimanski; Zhang, 2014).

O Gráfico 1 mostra que, a partir de 2021, o setor aéreo iniciou uma recuperação, liderada principalmente pelo mercado internacional, que superou os níveis pré-pandemia já naquele ano (cresceu 15,6% em relação a 2019). Enquanto isso, o mercado doméstico só atingiu essa marca em 2024 quando cresceu 8% em relação a 2019. Também em 2024, o volume total de carga paga transportada atingiu o recorde de 1,4 mil t – valor 8,8% acima do recorde de 2018, que era de aproximadamente 1,3 mil t. Isso mostra uma resiliência superior no transporte de carga em comparação ao transporte de passageiros.

Além de contribuir para a mobilidade de pessoas e para o comércio internacional por meio do transporte de cargas, o setor de transporte aéreo também apresenta impactos diretos na economia. No Brasil, o setor de aviação gerou, em média, 67,4 mil empregos formais no período de 2010 a 2022 (MTE, 2024). Esse valor, no entanto, omite tendências distintas: a média foi de 75,7 mil no período 2010-2015; caiu para 66,5 mil entre 2016 e 2019, refletindo os efeitos da recessão econômica de 2015-2016; e recuou ainda mais para 52,2 mil após o choque da pandemia de COVID-19. Essa trajetória, apresentada no Gráfico 2, reforça a dependência do setor em relação ao nível de atividade econômica (Coppio *et al.*, 2017).

Gráfico 2 – Evolução do mercado de trabalho formal do setor aéreo de 2010 a 2022



Fonte: MTE (2024).

Conforme o Gráfico 2, a participação do setor aéreo no mercado de trabalho formal brasileiro manteve-se estável em 0,10%, em média, entre 2010 e 2019. No entanto, a partir de 2020, essa participação recuou para 0,07% (média de 2020-2022), refletindo a tendência geral de perda de postos de trabalho durante a pandemia. Em termos absolutos, o número de empregos formais

diminuiu 14,7% entre 2019 e 2020 e outros 11% entre 2020 e 2021. Em 2022, essa queda é cessada, e o setor aéreo registra um crescimento de 5,7% nos postos de trabalho em relação a 2021, sinalizando o início de uma recuperação do mercado de trabalho formal do setor.

Ao se observar as variações no número de passageiros (Tabela 1) e cargas (Gráfico 1) pagas transportadas, e no total de empregos (Gráfico 2), verifica-se que o setor de aviação civil apresenta forte vulnerabilidade a choques exógenos. Além de ser um setor altamente elástico à renda: em períodos de crescimento econômico, o tráfego aéreo cresce mais do que proporcionalmente à renda ou ao PIB; já, em períodos recessivos, ele diminui mais do que proporcionalmente à renda (Salgado, Vassallo; Oliveira, 2010; Zimmermann; Oliveira, 2012).

A Tabela 2 mostra o Valor Adicionado Bruto (VAB), a preços constantes de 2010⁶, para o setor de transporte aéreo e para o Brasil entre 2010 e 2021, bem como a contribuição do setor para a economia brasileira. De 2010 a 2014 e de 2016 a 2019, a participação do setor aéreo no VAB nacional foi constante, em média 0,18%. Essa participação diminuiu em 2015 (0,13%) e nos anos de 2020 e de 2021 (0,08% e 0,04%, respectivamente), períodos em que o Brasil enfrentou uma crise econômica e a pandemia da COVID-19, nesta ordem. O ano de 2019, marcado pelo recorde no tráfego de passageiros, também foi o ano em que o setor de aviação registrou seu maior VAB (R\$ 6,83 bilhões) e sua maior participação no VAB nacional (0,19%).

Tabela 2 – Participação do setor de transporte aéreo na economia brasileira

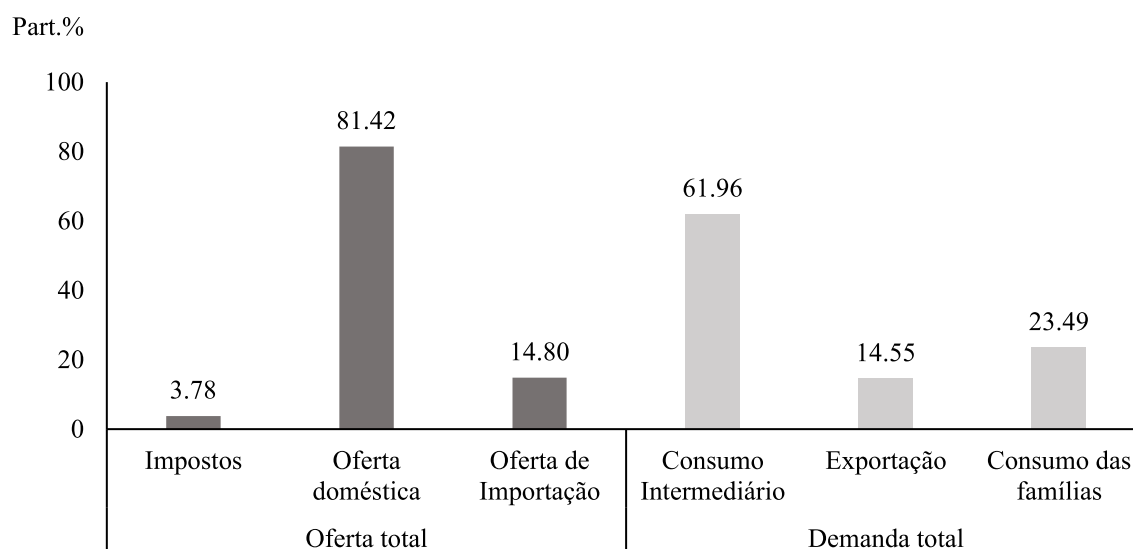
Ano	VAB do setor aéreo (R\$ bilhões a preço constante de 2010)	Var. (%)	VAB do Brasil (R\$ bilhões a preço constante de 2010)	Var. (%)	Part. (%) no VA Brasil
2010	6,26		3302,84		0,19
2011	6,01	-3,99	3434,69	3,99	0,17
2012	6,02	0,15	3501,74	1,95	0,17
2013	6,69	11,25	3623,02	3,46	0,18
2014	6,72	0,39	3668,39	1,25	0,18
2015	4,72	-29,76	3535,64	-3,62	0,13
2016	6,30	33,44	3438,34	-2,75	0,18
2017	6,16	-2,26	3470,89	0,95	0,18
2018	5,83	-5,30	3520,41	1,43	0,17
2019	6,83	17,20	3572,03	1,47	0,19
2020	2,86	-58,09	3480,71	-2,56	0,08
2021	1,43	-49,89	3601,36	3,47	0,04

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do SCN (IBGE, 2023).

⁶ O índice de preço utilizado para deflacionar o VAB foi o deflator do PIB, disponibilizado pelo IPEADATA (2024).

Conforme dados do Sistema de Contas Nacionais (SCN) do IBGE (2023), em 2019, a oferta total a preços do consumidor do setor de transporte aéreo (R\$ 59 bilhões) correspondia a 0,4% da observada para o Brasil (R\$ 15 trilhões). O Gráfico 3 mostra que desse total, 81,4% correspondem à oferta doméstica do serviço de transporte aéreo, enquanto 14,7% à oferta importada. Ao analisar a composição pelo lado da demanda, verifica-se que o setor destinou cerca de 62% para o consumo intermediário, isto é, para os demais setores produtivos da economia, 23,5% às famílias típicas e 14,5% ao mercado exterior (Gráfico 3). Esses resultados mostram que o mercado doméstico é o principal responsável pela absorção dos serviços prestados pelo setor de transporte aéreo (85,5% da demanda total em 2019).

Gráfico 3 – Composição da oferta e da demanda total do setor aéreo no Brasil



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do SCN (IBGE, 2023).

A indústria aérea é considerada um insumo produtivo para diversos setores da economia, dado que as maiores corporações o utilizam para transporte de bens, serviços e passageiros (CMAP, 2020; Oliveira, 2009). Nesse sentido, o transporte aéreo é capaz de produzir todo um movimento de indução ao longo das cadeias produtivas, contribuindo para o crescimento econômico e induzindo a competitividade do sistema produtivo como um todo (Oliveira, 2009). A Tabela 3 mostra os setores produtivos que mais compraram do setor de transporte aéreo entre 2010 e 2021.

Tabela 3 – Principais setores demandantes dos serviços de transporte aéreo na economia brasileira (participação (%) no consumo intermediário)

Setores\Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Média (2010-2021)
Organizações associativas e outros serviços pessoais	35,4	32,1	31,2	29,6	28,3	28,5	25,2	23,6	25,4	24,6	24,6	21,2	27,2
Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	7,9	8,4	9,3	10,0	10,2	10,4	11,0	11,9	11,7	11,8	11,1	13,3	10,7
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	8,4	9,2	8,5	8,9	8,6	9,4	8,9	8,1	7,4	7,0	5,6	6,4	8,1
Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	4,6	4,6	4,1	4,3	5,6	6,5	7,7	8,0	8,5	7,8	14,6	9,8	7,1
Educação privada	5,6	5,9	6,1	6,4	6,6	6,7	7,5	7,8	7,2	7,2	6,3	7,0	6,8
Construção	5,1	5,6	6,0	5,9	5,6	4,7	4,4	4,1	3,5	3,6	3,0	3,5	4,6
Administração pública, defesa e seguridade social	4,1	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0	3,7	3,5	3,9	3,9	4,8	4,1	4,0
Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	2,5	2,4	2,7	3,0	2,9	3,1	3,0	3,3	3,2	3,2	2,7	2,8	2,9
Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	2,5	2,3	2,1	2,1	2,4	2,1	2,5	2,8	2,7	3,0	2,4	2,6	2,5
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	1,6	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,8	2,5	3,4	2,3
Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	1,7	1,8	1,9	1,8	2,0	1,8	2,2	2,0	2,1	2,2	1,8	2,3	2,0
Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	1,3	1,4	1,5	1,5	1,7	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,4	1,6	1,7
Saúde pública	1,1	1,4	1,4	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	2,5	2,0	1,5
Outras atividades administrativas e serviços complementares	1,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2	0,9	1,2	1,2
Educação pública	0,9	1,1	1,2	1,4	1,4	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	0,8	1,1
Soma Parcial	83,9	83,3	83,2	83,3	83,8	84,9	84,1	83,1	83,4	82,6	85,4	82,0	83,5
Demais setores	16,1	16,7	16,8	16,7	16,2	15,1	15,9	16,9	16,6	17,4	14,6	18,0	16,5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do SCN (IBGE, 2023).

De acordo com a Tabela 3, em cada ano, cerca de 85% das vendas do setor de transporte aéreo foram feitas para 15 setores, sendo Organizações associativas e outros serviços pessoais o que mais demandou do setor em todo o período analisado. Em 2019, cinco atividades econômicas demandaram, juntas, cerca de 60% dos serviços de transporte aéreo: Organizações associativas e outros serviços pessoais (24,6%), Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores (11,8%), Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio (7,8%), Educação privada (7,2%), Intermediação financeira, seguros e previdência complementar (7,0%). Esses dados destacam o papel facilitador que o transporte aéreo desempenha para as atividades que requerem transporte rápido e eficiente de pessoas e mercadorias.

Em se tratando das compras realizadas pelo setor aéreo, observa-se na Tabela 4 que, de 2010 a 2021, o principal custo do setor foi com a aquisição de Combustíveis para Aviação (CAV), seguido dos custos com armazenamento e serviços auxiliares aos transportes, com médias de 34% e 13% do custo total ao longo do período, respectivamente. No ano de 2021, ainda sob restrições da COVID-19, os combustíveis compuseram 41,3% do custo total do setor de transporte aéreo, o maior percentual observado no período. Nesse mesmo ano, o preço do CAV⁷ aumentou 47,2% em relação a 2021 e 26,2% em comparação a 2019, último ano da série sem restrições da COVID-19 (ANP, 2021a). Em resumo, observa-se que os custos operacionais do setor de transporte aéreo são altamente influenciados pelos custos do CAV (Roitman, 2018).

Também de acordo com a Tabela 4, em 2019, um ano sem choques exógenos expressivos na economia, o CAV respondeu por 34,5% do custo total do setor de aviação brasileiro. Os custos com combustíveis podem ser ainda maiores com a introdução dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuels*), já que são de 2 a 5 vezes mais caros que o combustível de aviação fóssil (IATA, 2024d). Esse aumento de custo tem potencial para afetar toda a economia dadas as interações que o setor de transporte aéreo possui com os demais setores produtivos do sistema econômico (Lenaerts; Allroggen; Malina, 2021).

Essas interações podem ser mais bem compreendidas a partir da análise de insumo-produto (IP), pois evidencia como o setor aéreo se conecta com os demais setores da economia. O modelo seminal de IP, desenvolvido por Leontief (1936), parte da ideia de interdependência geral existente entre as várias partes do sistema econômico. Esse sistema inclui todos os ramos da produção de uma economia, bem como a distribuição de renda em nível agregado.

⁷ Preço médio do querosene de aviação ao consumidor, sem incidência de impostos conforme disponibilizado pela ANP (2021).

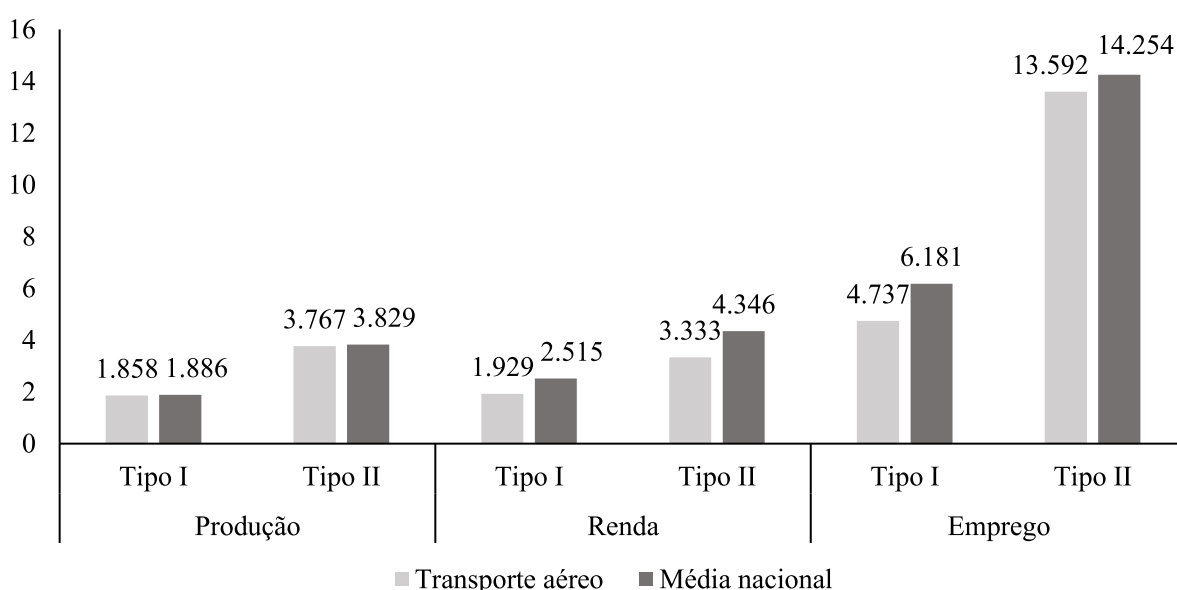
Tabela 4 – Principais insumos que compõem o custo de produção do setor de transporte aéreo na economia brasileira (participação (%) no Valor Bruto da Produção)

Insumos	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Média (2010-2021)
Combustíveis para aviação	29,0	35,8	38,1	36,8	35,7	33,7	27,5	28,6	35,6	34,5	30,6	41,3	34,0
Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes	10,5	11,1	11,4	11,2	11,4	12,5	12,3	12,9	13,5	12,7	16,4	19,3	13,0
Aluguéis não-imob. e gestão de ativos de propriedade intelectual	10,6	9,2	9,0	9,9	10,1	13,0	11,3	10,5	8,2	7,6	9,6	8,6	9,7
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	3,9	3,5	3,6	3,3	3,4	3,7	4,1	4,0	4,0	4,0	3,7	3,2	3,7
Artigos de borracha	3,7	3,5	3,1	3,0	2,7	3,5	3,4	3,1	2,7	2,5	3,3	3,8	3,2
Serviços de alimentação	2,9	2,5	2,3	2,3	2,4	2,8	2,5	2,6	2,0	1,9	1,5	2,2	2,3
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	2,5	2,1	1,8	1,7	1,7	2,0	2,0	2,1	1,9	2,2	2,7	2,8	2,1
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	1,9	1,4	0,9	1,0	1,2	2,1	2,4	2,5	2,4	2,4	2,5	0,8	1,8
Outros serviços administrativos	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,3	1,6	1,7	1,4	1,5	1,8	2,1	1,5
Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria	1,6	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3	1,6	1,7	1,3
Condomínios e serviços para edifícios	1,3	1,2	1,0	0,9	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,9	1,2	1,2	1,1
Artigos do vestuário e acessórios	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8
Publicidade e outros serviços técnicos	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
Serviços de vigilância, segurança e investigação	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5
Gasoolcool	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
Demais insumos	27,5	24,4	24,4	25,4	25,8	20,4	27,5	26,8	24,0	26,6	22,8	10,7	23,9
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do SCN (IBGE, 2023).

O modelo de IP⁸ permite fazer duas análises econômicas distintas: uma considerando a estrutura fechada do modelo (com demanda final e valor adicionado endógenos) e outra a estrutura aberta (com demanda final e valor adicionado exógenos). Entre os indicadores sistêmicos de IP, os multiplicadores se destacam por mensurarem os impactos causados por um choque de demanda sobre a produção, a renda e o emprego da economia (Guilhoto, 2011). O Gráfico 4 apresenta os multiplicadores de produção, renda e emprego dos tipos I (modelo aberto) e II (modelo fechado) para o setor de transporte aéreo e para a economia como um todo.

Gráfico 4 – Multiplicadores de produção, renda e emprego



Fonte: Elaboração própria a partir da MIP de 2015 (IBGE, 2015).

Segundo o Gráfico 5, uma variação de R\$ 1.000 na demanda final por transporte aéreo gera R\$ 1.858 de produto e R\$ 1.929 de renda na economia, incluindo o efeito direto e indireto (Tipo I). Ao somar o efeito induzido (Tipo II), esse impacto aumenta, respectivamente, para R\$ 3.767 e R\$ 3.333. Além disso, para cada posto de trabalho gerado diretamente no transporte aéreo, tem-se um efeito multiplicador de R\$ 4.737 na economia (Tipo I), considerando o efeito induzido (Tipo II), o valor aumenta para R\$ 13.592. Os valores dos multiplicadores do transporte aéreo, apesar de inferiores, são muito próximos à média nacional, à exceção dos multiplicadores de renda Tipo II e de emprego Tipo I, cuja diferença excede a unidade.

O modelo de IP também permite analisar os encadeamentos setoriais, isto é, a dependência intersetorial (Perobelli *et al.*, 2015). Segundo Guilhoto (2011), essa análise, feita por meio do

⁸ Para mais detalhes sobre a metodologia de IP, consultar (Guilhoto, 2011; Miller; Blair, 2009).

índice de ligação de Hirschman e Rasmussen, mostra a relação entre cada setor e os demais setores da economia, determinando os encadeamentos (ligações) para frente e para trás. A Tabela 5 apresenta os índices de ligação para a economia brasileira, especificamente para os 20 insumos com maior participação no custo total do setor de transporte aéreo, bem como para o próprio setor. Além disso, classificam-se esses insumos em setores-chave da economia no caso em que ambos os índices de ligação são superiores à unidade (McGilvray, 1977).

Tabela 5 – Índice de ligação Rasmussen-Hirshman e setores-chaves da economia brasileira
(insumos selecionados)

Insumos	Ligação para frente	Ligação para trás	Relação intersetorial
Transporte aéreo	0,80	0,99	Independente
Combustíveis para aviação	0,64	1,32	Ligação para trás
Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes	1,58	0,84	Ligação para frente
Aluguéis não-imob. e gestão de ativos de propriedade intelectual	1,03	0,76	Ligação para frente
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	3,40	0,79	Ligação para frente
Artigos de borracha	0,75	1,07	Ligação para trás
Serviços de alimentação	0,79	0,97	Independente
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	1,10	0,73	Ligação para frente
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	1,58	0,91	Ligação para frente
Outros serviços administrativos	1,39	0,74	Ligação para frente
Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria	2,94	0,76	Ligação para frente
Condomínios e serviços para edifícios	1,04	0,74	Ligação para frente
Artigos do vestuário e acessórios	0,62	0,98	Independente
Publicidade e outros serviços técnicos	1,80	1,03	Setor-chave
Serviços de vigilância, segurança e investigação	0,89	0,65	Independente
Gasoálcool	0,67	1,32	Ligação para trás
Serviços de alojamento em hotéis e similares	0,66	0,90	Independente
Telecomunicações, TV por assinatura e outros serv. relacionados	1,22	0,96	Ligação para frente
Diesel - biodiesel	2,26	1,32	Setor-chave
Transporte terrestre de carga	3,93	1,05	Setor-chave
Serviços de impressão e reprodução	0,78	0,97	Independente

Fonte: Elaboração própria a partir da MIP de 2015 (IBGE, 2015).

Os resultados da Tabela 5 mostram que o setor de transporte aéreo, isoladamente, não é classificado como setor-chave, já que seus índices de ligação se situam abaixo da unidade. O índice de ligação para trás do setor foi de 0,99, valor muito próximo à média da economia (1,0). Isso significa que seus encadeamentos para trás estão em nível médio, em comparação com os

demais setores da economia. Em outras palavras, um aumento unitário na demanda final por esse setor gera um aumento proporcional — equivalente à média da economia — na produção das indústrias a montante (fornecedoras de insumos de produção).

A Tabela 5 mostra que três dos insumos mais demandados pelo setor aéreo são considerados setores-chave para a economia brasileira: i) Transporte terrestre de carga; ii) Diesel – biodiesel; e iii) Publicidade e outros serviços técnicos. Além disso, o insumo Combustíveis para aviação, que constitui a maior parcela dos custos do setor, apresenta encadeamentos produtivos para trás, gerando uma demanda dos demais setores produtivos acima da média da economia. Por sua vez, o insumo Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes, segundo maior gasto do setor, apresenta encadeamentos produtivos para frente, sendo altamente dependente da demanda intersetorial (Betarelli Junior; Bastos; Perobelli, 2011).

Esses resultados revelam os mecanismos por meio dos quais o setor de transporte aéreo pode exercer impactos sobre a economia. Nesse contexto, a introdução do SAF pode reduzir a demanda por combustíveis para aviação, gerando impactos em toda a sua cadeia produtiva. Por exemplo, uma menor produção desses combustíveis pode afetar o refino de petróleo, o que impactaria a produção de diesel e, indiretamente, o transporte de cargas. Esse é um exemplo simplificado de como o setor aéreo pode afetar a dinâmica econômica, principalmente, em um contexto de substituição parcial de QAV por SAF.

Uma técnica de IP comumente utilizada para quantificar a contribuição de um setor para uma economia é o método de extração hipotética (Dietzenbacher, Linden; Steenge, 1993). Essa técnica é empregada para avaliar como o setor de transporte aéreo pode afetar a economia nacional. Para isso, realizou-se uma simulação de extração total do setor, que consiste na interrupção simultânea dos seus fluxos de vendas e compras.

A Tabela 6 mostra que, após a extração total do transporte aéreo, o VBP do Brasil sofre uma perda de R\$ 68,4 bilhões, o que representa uma queda de 0,67% em relação ao VBP total antes da extração. Com a inclusão do transporte aéreo, 16 insumos são responsáveis por 90% dessa perda, destacando-se o próprio setor (54%), seguido pelos insumos combustíveis para aviação (6,4%) e armazenamento e serviços auxiliares aos transportes (5,4%), que são os dois insumos com maior participação no custo total da aviação (conforme apresentado na Tabela 4).

No cenário em que o transporte aéreo é excluído da análise, 15 insumos representam cerca de 80% das perdas de VBP. Entre eles, destacam-se os combustíveis para aviação (13,8%),

armazenamento e serviços auxiliares aos transportes (11,7%), outros produtos do refino de petróleo (7,6%) e aluguéis não imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual (6,9%). Esses são os elos mais significativos da cadeia produtiva do transporte aéreo, que têm potencial de impactar a economia como um todo.

Tabela 6 – Extração hipotética total do setor de transporte aéreo (variação do VBP em milhões de reais)

Insumos	Var. absoluta VBP	Part. bruta (%)	Part. líquida (%)
Transporte aéreo	-36885,00	53,93	–
Combustíveis para aviação	-4347,54	6,36	13,80
Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes	-3696,79	5,40	11,73
Outros produtos do refino do petróleo	-2384,83	3,49	7,57
Aluguéis não imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	-2181,36	3,19	6,92
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	-1991,30	2,91	6,32
Petróleo, gás natural e serviços de apoio	-1938,73	2,83	6,15
Comércio por atacado e varejo	-1478,72	2,16	4,69
Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria	-1068,76	1,56	3,39
Serviços de alimentação	-932,07	1,36	2,96
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	-902,40	1,32	2,86
Transporte terrestre de carga	-889,36	1,30	2,82
Artigos de borracha	-878,52	1,28	2,79
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	-868,17	1,27	2,76
Outros serviços administrativos	-667,94	0,98	2,12
Publicidade e outros serviços técnicos	-582,03	0,85	1,85
Demais setores	-6703,87	9,80	21,27
Total	-68397,38	100	–
Total líquido	-35.512,38	–	100

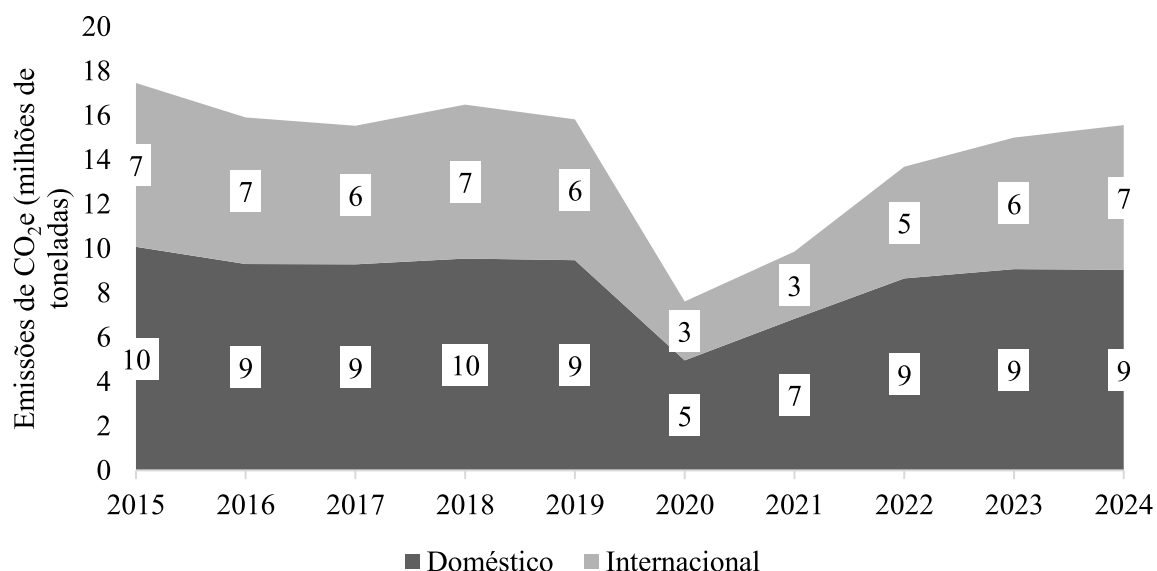
Fonte: Elaboração própria a partir da MIP de 2015 (IBGE, 2015).

Os indicadores sistêmicos apresentados neste capítulo mostram como o setor de transporte aéreo se insere no processo produtivo e como pode afetar a economia no geral. A produção do setor gera não apenas bens e serviços, mas também produtos indesejáveis, como as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Soares; Cunha, 2019). Sendo assim, é intrínseco que o setor de aviação, ao demandar e fornecer insumos para produção, gere emissões de GEE.

Os dados sobre as emissões desse setor são apresentados na Figura 5. Entre 2015 e 2019, as emissões de CO₂ quase não sofreram alterações; situaram-se entre 9 e 10 milhões de t nos voos domésticos e entre 6 e 7,5 milhões de t nos voos internacionais. No entanto, a partir de 2020,

há um declínio acentuado nas emissões, diretamente relacionado aos impactos da pandemia de COVID-19. Em 2021, as emissões, tanto domésticas quanto internacionais, começaram a aumentar novamente, superando em 2024 os níveis pré-pandemia.

Gráfico 5 – Emissões equivalentes de CO₂ da aviação civil – voos domésticos e internacionais



Fonte: (ANAC, 2024).

De modo geral, o setor de transporte aéreo possui considerável importância como um insumo para a economia global, permitindo uma conexão rápida e segura entre mercados (Button; Taylor, 2000; Kasarda; Green, 2005). No Brasil, o setor experimentou um crescimento substancial desde a liberalização do mercado, ocorrida entre os anos de 1990 e 2000 (Zimmermann; Oliveira, 2012; ANAC, 2015). No entanto, a pandemia da COVID-19 e a crise econômica de 2015-2016 provocaram quedas acentuadas no número de passageiros e cargas transportadas, evidenciando a vulnerabilidade do setor a choques exógenos (Profillidis; Botzoris, 2015; Coppio *et al.*, 2017; OACI, 2023).

Por fim, a análise sistêmica mostrou que o transporte aéreo desempenha papel relevante como fornecedor de um serviço essencial que promove o crescimento econômico, a geração de empregos e de renda. Sua demanda elevada por combustíveis para aviação e serviços de armazenagem tem potencial de impactar todo o sistema econômico, dado que esses insumos apresentam encadeamentos para trás e para frente, nesta ordem. E, em um contexto de introdução de SAF como alternativa ao uso de QAV, visando à redução das emissões de GEE do setor, o impacto do transporte aéreo na economia pode ser ainda mais acentuado.

3 REVISÃO TEÓRICA: ECONOMIA, ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Os combustíveis para aviação são o insumo mais demandado pelo setor de transporte aéreo. Esse insumo refere-se a dois tipos de combustíveis fósseis utilizados na aviação civil: o querosene de aviação e a gasolina de aviação, ambos derivados do petróleo (ANP, 2020). O uso desses combustíveis para gerar a energia que move as aeronaves resulta na emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (IPCC, 2005; Lee, 2018). A tendência global de crescimento da aviação civil requer um aumento na quantidade de energia usada para fornecer serviços de transporte aéreo, o que pode aumentar ainda mais as emissões de CO₂ (Kurniawan; Khardi, 2011). Nesse sentido, este capítulo busca embasar teoricamente a relação entre crescimento econômico, uso de energia e meio ambiente.

Na terminologia econômica, energia inclui todas as *commodities* e recursos energéticos que incorporam quantidades significativas de energia física e, portanto, oferecem a capacidade de realizar trabalho (Sweeney, 2001). Os recursos energéticos são derivados diretamente da natureza – por exemplo, petróleo bruto, gás natural, carvão, biomassa, hidrelétrica, urânio, vento, luz solar ou depósitos geotérmicos – e podem ser colhidos para produzir *commodities* energéticas. Por sua vez, as *commodities* energéticas – tais como, gasolina, óleo diesel, gás natural, propano, carvão ou eletricidade – podem ser usadas para fornecer serviços de energia para atividades humanas, como iluminação, aquecimento de ambientes, aquecimento de água, cozimento, força motriz ou atividade eletrônica (Sweeney, 2001; Timilsina, 2019).

A energia é considerada um insumo vital para o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano (Goldstein, Huang; Akan, 1997; Ouedraogo, 2013; Csereklyei, Rubio-Varas; Stern, 2016; Timilsina, 2019). O desenvolvimento dos sistemas energéticos tem acompanhado de perto a evolução das sociedades humanas ao longo da história. Desde o domínio do fogo, que permitiu o uso térmico de biomassa há aproximadamente 800 mil anos, até os sistemas energéticos modernos, cada estágio do progresso social foi marcado por avanços significativos na forma como a energia é produzida, distribuída e utilizada (Zweifel, Praktiknjo; Erdmann, 2017).

Goldstein *et al.* (1997) e Stern e Kander (2012) argumentam que o aproveitamento de fontes de energia não renováveis, principalmente carvão, petróleo e gás, tem sido fundamental para o processo de industrialização mundial nos últimos dois séculos. Nessa perspectiva, Timilsina (2019) afirma que sem os recursos energéticos modernos, como eletricidade e derivados de

petróleo, o desenvolvimento econômico alcançado atualmente não teria sido possível, dificultando até mesmo a sobrevivência humana. A autora ainda destaca que a demanda por energia tende a aumentar conjuntamente com o crescimento econômico e a melhoria da qualidade ou do padrão de vida da população.

Segundo Stern (2011), a energia é um fator de produção essencial nas atividades econômicas e sua substituição por outros fatores de produção é limitada. O autor destaca que, diferente dos fatores capital, trabalho e, a longo prazo, até mesmo recursos naturais, a energia e a matéria são fatores de produção não reproduzíveis. E, embora fisicamente abundantes, as fontes de energia são consideradas bens escassos (Zweifel, Praktiknjo; Erdmann, 2017).

Conforme Stern (2011), o processo de captura de energia e de matéria do meio ambiente inevitavelmente causa algum grau de perturbação ambiental. Para o autor, isso é relevante especialmente para energia, pois devido à Lei da Entropia, a energia útil (exergia) não pode ser reciclada. Stern (2011) destaca que, embora existam algumas fontes de energia abundantes, como a energia solar, elas são muito difusas quando comparadas aos estoques concentrados de combustíveis fósseis. Consequentemente, a conversão dessa energia em exergia requer grandes quantidades adicionais de energia investida, reduzindo sua eficiência. Nesse contexto, Stern (2011) pontua que a transição para o uso dos combustíveis fósseis durante a Revolução Industrial representou um marco importante, pois permitiu superar as restrições prevalentes no suprimento de energia, impulsionando assim a expansão da produção e do crescimento.

A relação entre energia e crescimento econômico depende de fatores como substitutibilidade entre energia e outros fatores de produção, mudanças na composição de insumos energéticos, bem como na composição da produção, mudança tecnológica e economias de escala (Soytaş; Sarı, 2019). A maneira como a energia é tratada na literatura econômica se dá em duas abordagens teóricas distintas: a ecológica e a neoclássica.

Na perspectiva neoclássica, a energia proveniente de fontes não humanas, embora considerada essencial no processo de produção, é apenas um insumo intermediário e não um fator primário de produção como o capital, o trabalho e a tecnologia (Alam, 2006; Stern, 2019). Nessa abordagem, a quantidade de energia disponível para a economia em qualquer período é endógena, embora limitada por restrições biofísicas (como a pressão em reservatórios de petróleo) e econômicas (como a quantidade de extração instalada, refino e capacidade de geração), e as possíveis velocidades e eficiências com as quais esses processos podem prosseguir (Stern, 2004). Nesse sentido, a energia e as questões ambientais em geral podem ser

analisadas a partir das ferramentas e princípios econômicos neoclássicos existentes sem alterar a estrutura fundamental delas (Venkatachalam, 2007).

Os modelos tradicionais da economia neoclássica, como o modelo de Solow, não tratam diretamente da energia nem incluem recursos naturais em sua formulação (Stern, 2004). A preocupação com as questões ambientais é incorporada nesses modelos, conforme a finitude e o grau de exaustão desses recursos são colocados como potenciais limitadores do crescimento econômico sustentável. Dentro da visão neoclássica, a questão ambiental é tratada por duas ramificações: a Teoria dos Recursos Naturais, preconizada por Hotelling (1931), e a Teoria da Poluição, um substrato da economia do bem-estar, desenvolvida por Pigou (1932).

A Teoria dos Recursos Naturais reconhece a finitude e a dinâmica intertemporal dos recursos naturais. Principal expoente dessa teoria, Hotelling (1931) afirma que a exploração desenfreada de um recurso exaurível pode levar ao seu esgotamento futuro, aumentando indefinidamente seu preço. Segundo o autor, o objetivo do proprietário de um recurso esgotável é a maximização do valor presente de todos seus lucros futuros. Essa maximização requer que o preço desse recurso cresça, pelo menos, à mesma taxa que os juros (Hotelling, 1931). Essa regra, portanto, assegura um equilíbrio na extração ao longo do tempo, promovendo uma utilização sustentável do recurso e evitando seu esgotamento prematuro.

Embora não utilize um modelo econômico formal para tratar a questão do esgotamento dos recursos, Hardin (1968) alerta para a “tragédia dos comuns”, situação em que a exploração desenfreada de um bem comum para maximização de ganhos individuais pode levar a sua destruição para todos. Essa concepção ganha relevância quando se considera que, em qualquer economia, há uma série de *commodities* que são insumos de produção cujo estoque disponível não pode ser aumentado, como os combustíveis fósseis (Dasgupta; Heal, 1974). Nesse contexto, Dasgupta e Heal (1980) argumentam que, no longo prazo, a disponibilidade limitada desses insumos pode se configurar como uma restrição ao potencial de crescimento da economia, desde que eles sejam considerados essenciais à produção de um bem final de consumo.

Mesmo na ausência de uma *commodity* indispensável à produção de um bem, Dasgupta e Heal (1974) argumentam que sua produção continua sendo possível se a elasticidade de substituição entre essa *commodity* e os insumos reproduzíveis for superior a um. Os autores propõem um modelo de produção no qual consideram a incerteza na determinação dos níveis ótimos de consumo, extração e estoque de recursos naturais esgotáveis que maximizam o bem-estar. A incerteza desse modelo se refere ao tempo de descoberta de uma nova fonte de recurso

esgotável, cuja probabilidade de existência é igual a um. Conforme Dasgupta e Heal (1974), essa descoberta pode levar muito tempo e comprometer o princípio de justiça intergeracional. Desse modo, é necessária uma mudança tecnológica no uso desses recursos de modo a garantir esse princípio.

Em meio a essas discussões sobre crescimento econômico sustentável e sobrevivência das gerações futuras, Solow (1974) introduziu os recursos naturais não renováveis como fator de produção no seu modelo básico de produção. Sob o pressuposto de que a elasticidade de substituição entre recursos naturais e os demais fatores de produção (trabalho e capital) não seja inferior à unidade, as gerações atuais podem esgotar os recursos naturais finitos de forma otimizada, desde que adicionem ao estoque de capital reproduzível (Solow, 1974). Em outras palavras, a substituição entre os estoques de recursos por estoques de capital reproduzível permite que a riqueza total da sociedade (capital natural + capital reproduzível) seja constante ou aumente ao longo do tempo, assegurando um futuro próspero para as próximas gerações.

Stiglitz (1974) também introduz os recursos naturais finitos no modelo de crescimento neoclássico, com o objetivo de determinar as taxas ótimas de extração desses recursos e de poupança que permitam à economia atingir um estado estacionário de crescimento mesmo com recursos naturais esgotáveis. O autor demonstra que, em uma economia de mercado livre com concorrência perfeita e a mesma tecnologia do modelo de Solow (1974), os recursos se esgotam e o consumo e o bem-estar social eventualmente caem para zero. Stiglitz (1974) considera que há pelo menos três forças econômicas capazes de lidar com a escassez desses recursos: mudança técnica, a substituição de recursos naturais por capital e retornos de escala. Assim, mesmo na presença de recursos naturais limitados, é possível haver crescimento econômico sustentável e a manutenção do bem-estar social (Stiglitz, 1974).

Hartwick (1977) propôs uma regra, conhecida como Regra de Hartwick, para lidar com o problema ético da geração presente (no tempo t) prejudicando as gerações futuras (no tempo $t + 1$) ao consumir em excesso recursos esgotáveis. Essa regra consiste em investir todos os lucros ou rendas de recursos exauríveis em capital reproduzível (Hartwick, 1977). Conforme Hartwick (1977), ao realizar tal investimento, e considerando os custos de extração dos recursos naturais iguais a zero, o consumo *per capita* mantém-se constante ao longo do tempo.

A abordagem neoclássica reconhece, além da finitude dos recursos naturais como um potencial problema para o crescimento sustentável, que a exploração desses recursos não é uma ação neutra. Essa abordagem é conhecida como Teoria da Poluição, que busca analisar as

consequências que as atividades econômicas geram para o meio ambiente. Pigou (1932) define essas consequências como externalidades (negativas, neste caso) – efeitos das atividades de um agente sobre terceiros que não estão diretamente envolvidos na produção. A externalidade é mais bem compreendida quando se conhece a diferença entre produto líquido marginal social e privado. O social abrange todos os impactos, positivos e negativos, da produção de uma unidade adicional do bem ou serviço; enquanto o privado considera apenas os benefícios diretos para o produtor dessa produção adicional (Pigou, 1932).

A poluição é um exemplo de externalidade negativa, em que os custos ambientais e de saúde não são arcados pelo poluidor, mas compartilhados com toda a sociedade. Nesse caso, o produto marginal privado é maior do que o social. Para lidar com os efeitos adversos dessa externalidade negativa, Pigou (1932) propõe a intervenção governamental, mediante a cobrança de taxas como um meio para equiparar os custos privados aos custos sociais.

Coase (1960) propôs uma estrutura para alocação ótima de recursos na presença de externalidades, sem intervenções de mercado ou regulamentação governamental. Segundo o autor, a chave para a alocação eficiente está na negociação direta entre as partes afetadas. Para isso é preciso que os direitos de propriedade sejam bem definidos, os custos de negociação ou transação sejam insignificantes, as partes envolvidas sejam poucas e haja concorrência perfeita (Coase, 1960).

Na análise da poluição, Coase (1960) defende que o problema deve ser analisado no total e na margem. Se a produção de um bem em uma determinada área resultar em poluição atmosférica, afetando negativamente terceiros, a mudança de local de produção pode parecer ser a melhor solução em um primeiro momento. No entanto, Coase (1960) ressalta que quando a mudança locacional ocasionar uma redução na produção, é preciso considerar os efeitos dessa mudança e os danos da permanência da atividade poluente no local. Para o autor, há uma quantidade ideal de poluição que maximiza o valor da produção, levando em conta os benefícios privados e os custos sociais envolvidos.

A ausência de direitos de propriedade bem definidos sobre recursos comuns, como argumenta Hardin (1968), facilita a externalização dos custos da poluição a terceiros. Isso porque os agentes racionais descartam seus resíduos, neste caso a poluição, nas áreas comuns (como o ar), pois o custo é menor do que tratá-los antes do descarte (Hardin, 1968). De acordo com Hardin (1968), a tragédia dos comuns pode ser evitada pela propriedade privada; no entanto, ar e águas, por exemplo, não podem ser facilmente cercados. Então, o autor sugere a aplicação de leis

coercitivas ou dispositivos de tributação que tornem mais caro para o poluidor descartar seus poluentes sem tratamento.

Essas duas teorias abordam questões distintas relacionadas aos recursos naturais. De um lado, a Teoria dos Recursos Naturais reconhece a finitude e a dinâmica intertemporal desses recursos, enfatizando a necessidade de uma gestão sustentável. A exploração dos recursos naturais esgotáveis deve ser equilibrada para evitar seu esgotamento prematuro (Hardin, 1968; Hotelling, 1931), que pode restringir o crescimento econômico, na ausência de substituição entre esses recursos e insumos reproduzíveis (Dasgupta; Heal, 1974; Solow, 1974; Stiglitz, 1974). Por outro lado, a Teoria da Poluição aborda as externalidades negativas da exploração das atividades econômicas, como a poluição, propondo intervenções governamentais (Pigou, 1932) e negociações diretas (Coase, 1960) para alinhar os custos privados aos sociais e alcançar uma alocação eficiente de recursos.

Outra abordagem para a energia é a economia ecológica que, diferentemente da visão neoclássica, considera a energia como um fator primário de produção, sem o qual a economia não funcionaria (Alam, 2006; Stern, 1997). Nesse contexto, fluxos materiais e energéticos desempenham papel relevante para a análise do sistema econômico (Stern, 2019). Na economia ecológica, as leis da termodinâmica e a conservação da matéria descrevem as restrições imutáveis dentro das quais esse sistema deve operar (Stern, 2011).

A Primeira Lei da Termodinâmica (a Lei da Conservação) implica o princípio do balanço de massa: para obter um determinado produto material, quantidades maiores ou iguais de matéria devem entrar no processo de produção como insumos, gerando resíduos em forma de poluentes ou produtos residuais (Stern, 1997). De acordo com essa lei, nenhuma energia é criada ou destruída; contudo, pode ser convertida entre suas várias formas para o uso humano (Sweeney, 2001). A implicação econômica dessa lei é que há uma exigência mínima de entrada de insumos materiais em qualquer processo de produção que gere produtos materiais (Stern, 2011).

Boulding (1966) descreve o processo de produção em uma economia de modo que se observam indiretamente os princípios da Lei da Conservação. O autor considera esse processo como um sistema fechado, sem reservatórios ilimitados de recursos para extração ou descarte de resíduos, isto é, um sistema ecológico cíclico capaz de reprodução contínua da forma material, embora necessite da entrada de insumos energéticos. Essa analogia, proposta por Boulding (1966), compara a Terra a uma nave espacial com recursos finitos e com necessidade de gerenciar seus resíduos e consumo de energia. Portanto, devem-se reconhecer os limites ecológicos do planeta

e a necessidade de uma transição para um sistema econômico mais sustentável (Boulding, 1966).

Daly (1968) utiliza o conceito de metabolismo para analisar a relação entre a economia e o meio ambiente. Na visão do autor, assim como no processo metabólico, a economia extrai materiais e energia do ambiente, os transforma em bens e serviços e gera resíduos que retornam ao ambiente. Como esses resíduos não são completamente reabsorvidos pelo sistema e a matéria e a energia úteis são finitas, o crescimento do sistema econômico pode ser limitado, o que enfatiza o caráter entrópico desse sistema (Boulding, 1966; Daly, 1968).

Com base na Segunda Lei da Termodinâmica (a Lei da Entropia), Georgescu-Roegen (1971) argumenta que o processo econômico consiste em uma transformação de baixa entropia em alta entropia, ou seja, em resíduo. Para o autor, uma vez que essa transformação é irrevogável, os recursos naturais devem necessariamente representar uma parte da noção de valor econômico. A consequência direta dessa lei é que a energia não pode ser reutilizada e há limites para o quanto a eficiência energética pode ser melhorada (Stern, 2019). Como resultado, todos os processos econômicos requerem energia, embora algumas atividades de serviço possam não exigir o processamento direto de materiais (Stern, 1997, 2019). Em resumo, a Lei da Entropia impõe limites à capacidade da economia de crescer indefinidamente.

As leis da termodinâmica e a conservação da matéria têm implicações para a escassez – considerada o principal problema da economia –, matéria e energia são bens escassos, portanto, devem ser alvos das análises econômicas (Stern, 2019; Sweeney, 2001). Dada a preocupação com a finitude dos recursos materiais e energéticos, a escala sustentável do sistema econômico (tamanho da produção) antecede os objetivos econômicos de distribuição equitativa e eficiência alocativa (Daly, 1992). Essa preocupação com a escala está associada ao fato de que, para os economistas ecológicos, a substituição entre capital e recursos naturais é limitada, portanto, não resolve o problema de escassez desses recursos (Stern, 1997, 2011).

A ideia básica é limitar o fluxo de transferência de recursos materiais e energéticos a um nível e composição ecologicamente sustentáveis, atendendo assim ao objetivo de uma escala sustentável da economia em relação ao ecossistema (Costanza *et al.*, 1997). Portanto, uma escala ótima pode ser descrita como o ponto em que os custos marginais (ecológicos e sociais) do subsistema econômico começam a se tornar maiores do que seus benefícios marginais (Daly; Farley, 2004).

Embora seja um passo dado em direção ao propósito de operar dentro de limites ecológicos seguros, definir uma escala ótima sustentável de produção é um desafio, sobretudo, porque os custos ecológicos nem sempre são óbvios, e alguns podem ser observados apenas a longo prazo (Aydemir; Soytaş, 2019). Daly (2007) afirma que mais importante do que conhecer essa escala é estabelecer um limite em que a economia seja estável. As implicações para a teoria macroeconômica incluem uma modificação do objetivo de aumentar o consumo e uma distinção entre o consumo de bens necessários e de bens de luxo; além disso, a questão de como alcançar uma economia estável e de pleno emprego na ausência de crescimento contínuo se faz necessária (Harris; Goodwin, 2003).

Nessa perspectiva, Aydemir e Soytaş (2019) enfatizam a necessidade de conhecer a quantidade e a qualidade de energia necessária para garantir a sobrevivência humana e um nível aceitável de bem-estar, em níveis que não pressionem o ecossistema. Os autores buscam um nível mínimo de uso de energia além do qual os ganhos para a qualidade de vida se estabilizam (nível de uso justo de energia). Esse bem-estar pode ser alcançado se for baseado em melhorias qualitativas em vez de aumento quantitativo na produção de matéria e de energia (Daly, 2007).

De acordo com Costanza *et al.* (1997), a ênfase deve mudar de tecnologias que aumentam a produtividade do trabalho e do capital humano para aquelas que aumentam a do capital natural. Os autores citam três formas para que isso ocorra: i) aumento do fluxo (crescimento líquido) de recursos naturais por unidade de estoque natural (limitado por taxas de crescimento biológico); ii) aumento da produção do produto por unidade de insumo de recurso (limitado pelo balanço de massa); e especialmente por iii) aumento da eficiência do uso final com a qual o produto resultante rende serviços ao usuário final (limitado pela tecnologia). Costanza *et al.* (1997) argumentam que dadas as limitações das demais formas, a eficiência deve ser o principal foco para o aumento do capital natural.

Ayres e Warr (2009) consideram que o aumento da eficiência energética foi o grande motor propulsor do crescimento econômico desde a Revolução Industrial. Para manter o crescimento econômico é preciso garantir a tendência de aumento dessa eficiência; embora, conforme Ayres e Warr (2009), esta possua limites de expansão. A melhoria na eficiência energética pode reduzir o consumo de energia ao mesmo tempo em que aborda os desafios de segurança energética, ambientais e econômicos, sendo considerada uma ferramenta essencial no enfrentamento das mudanças climáticas (Ryan, Turner; Campbell, 2019).

Em resumo, pode-se dizer que para a economia ecológica, a energia é um elemento indissociável da dinâmica socioambiental, indo além de sua função utilitária como propulsora do desenvolvimento econômico (Stern, 1997; Van Den Bergh, 2001). As leis da termodinâmica e a conservação da matéria descrevem as restrições imutáveis dentro das quais o sistema econômico deve operar, destacando que energia e matéria são bens escassos (Stern, 2011, 2019; Sweeney, 2001). Embora todos os processos de produção requerem uma quantidade mínima de energia para sua realização, seu caráter entrópico impõe limites à reutilização e à eficiência energética (Stern, 1997, 2019). Nessa perspectiva, a eficiência energética é considerada o principal foco para aumentar a produtividade do capital natural e manter o crescimento econômico, desde que respeitados os limites ecológicos (Costanza *et al.*, 1997; Ayres; Warr, 2009; Ryan; Turner; Campbell, 2019).

As abordagens neoclássica e da economia ecológica consideram a energia um fator essencial para o funcionamento da economia, porém divergem quanto ao seu papel e tratamento. Por um lado, a abordagem neoclássica trata a energia como um insumo intermediário, endógeno ao sistema econômico. Por outro, a economia ecológica a considera como um fator primário de produção, sujeito às leis físicas e com implicações diretas para a sustentabilidade do sistema. Apesar dessas diferenças, ambas as abordagens convergem ao destacar a finitude dos recursos naturais e a necessidade de uma gestão eficiente e sustentável. Enquanto a abordagem neoclássica propõe alcançar essa gestão por meio da internalização de externalidades, a economia ecológica defende a busca por uma escala econômica compatível com os limites ecológicos do planeta.

A economia circular sugere uma operacionalização do conceito de escala sustentável ao estabelecer limites para o uso dos recursos naturais renováveis. Pearce e Turner (1989) definem dois princípios para uso desses recursos: i) a taxa de exploração não deve exceder sua taxa de regeneração, garantindo a manutenção dos estoques naturais; e ii) a emissão de resíduos respeita a capacidade de absorção dos ecossistemas. Desse modo, na ausência de estoque de capital, assegura-se que os estoques de recursos renováveis se mantenham constantes ao longo do tempo.

No que se refere aos recursos não renováveis cujo esgotamento é inexorável frente ao uso contínuo, Pearce e Turner (1989) destacam duas estratégias principais: i) a substituição desses recursos por alternativas renováveis, como a bioenergia em substituição aos combustíveis fósseis; e ii) aumentar a eficiência no uso dos recursos não renováveis para maximizar a

utilidade por unidade extraída. Os autores, no entanto, afirmam que o crescimento populacional pode impor desafios a essas estratégias.

Essa também é a percepção de Timilsina (2019) que vê os limites ecossistêmicos sendo cada vez mais testados, tendo em vista a crescente demanda por energia, sobretudo, nos países com elevadas taxas de crescimento econômico e populacional. A autora enfatiza que, a longo prazo, são esses dois fatores os responsáveis por impulsionar a demanda por energia. A utilização de energia, especialmente a queima de combustíveis fósseis, é uma fonte importante de poluição ambiental (Jorgenson; Wilcoxon, 1993; Tol, 2019).

Segundo Wei e Liu (2019), 70% das emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) são oriundas da combustão de combustíveis fósseis. De acordo com os autores, a mitigação das emissões de GEE depende em grande parte do fornecimento de energia de baixo ou zero carbono, o que é muito incerto para atender às necessidades de crescimento econômico. Wei e Liu (2019) destacam que políticas mais rigorosas relativas ao modelo de crescimento econômico, à estrutura de energia de baixo carbono e às tecnologias de redução de emissões são necessárias para garantir o alcance da meta do Acordo de Paris.

Nesse contexto, a bioeconomia surge como uma estratégia global para promover o desenvolvimento sustentável, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as mudanças climáticas (FAO, 2022). Em se tratando da questão das emissões de GEE, a bioenergia, derivada de biomassa e de resíduos agrícolas, representa uma oportunidade única para aumentar a eficiência energética e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono. Os biocombustíveis têm se destacado como uma alternativa energética sustentável (Rial, 2024).

Um exemplo de biocombustível é os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuels*). A produção de SAF está alinhada aos princípios da Teoria dos Recursos Naturais, pois contribui para mitigar a exploração excessiva de recursos finitos, promovendo uma gestão mais equilibrada e sustentável desses recursos (Hotelling, 1931). Além disso, o uso de SAF pode reduzir as externalidades negativas do setor aéreo associadas às emissões de GEE, uma vez que sua intensidade de carbono é inferior à do combustível fóssil, estabelecendo uma conexão com a Teoria da Poluição ao diminuir os custos ambientais da poluição (Pigou, 1932).

A utilização de biomassa para a produção de SAF pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir a perturbação ambiental associada à extração e ao uso desses recursos. O SAF pode fechar ciclos materiais ao transformar resíduos em insumos energéticos, alinhando-se à visão de Boulding (1966) sobre sistemas fechados e à Lei da Entropia (Georgescu-Roegen, 1971), pois minimiza a degradação de energia útil. Além disso, o SAF atende ao critério de substituição de recursos não renováveis defendido na economia circular (Pearce; Turner, 1989). Esse duplo papel – circularidade e substituição – que o SAF pode desenvolver, o posiciona como um importante instrumento na busca por um sistema econômico mais alinhado aos limites biofísicos do planeta e à necessidade de preservar o meio ambiente para as gerações futuras (Hartwick, 1977).

O uso de SAF, no entanto, pode gerar contrapontos, os quais foram explicitados nos dilemas teóricos discutidos neste capítulo. O primeiro diz respeito à possível competição por recursos, ilustrando a "tragédia dos comuns" (Hardin, 1968). Caso a demanda por terra para o cultivo de biomassa resulte em aumento do desmatamento ou mudanças nos cultivos agrícolas que afetem a oferta de alimentos, por exemplo, é possível que o custo social do uso de SAF seja superior ao seu benefício social. Além disso, a produção de SAF pode contrariar os princípios do sistema econômico circular, caso se baseie exclusivamente em biomassa de primeira geração. Por fim, os elevados custos privados de produção do SAF podem torná-lo inviável como substituto dos combustíveis fósseis, sem não houver intervenção externa.

A discussão sobre a produção e o uso de SAF está ancorada em uma ampla e diversificada base teórica, que permite sua análise a partir de uma perspectiva tecnológica, social, econômica e ambiental. O capítulo a seguir apresenta algumas medidas institucionais e setoriais que vêm sendo adotadas ao longo do tempo para conter as emissões de GEE. Além de abordar as principais rotas tecnológicas de produção de SAF.

4 POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE E A AVIAÇÃO CIVIL

Este capítulo apresenta as principais políticas de mitigação das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e como a indústria da aviação civil se insere neste esforço global. A seção 4.1 apresenta um histórico dos principais acordos climáticos globais e suas principais metas estabelecidas para redução do aquecimento global. Além disso, mostra como o Brasil está inserido nesses acordos, descrevendo também suas principais políticas internas de redução das emissões de GEE. A seção 4.2 está dividida em duas subseções, que descrevem os regulamentos que versam sobre as metas climáticas da aviação civil comercial. Na primeira subseção é dado enfoque ao Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, do inglês *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), que trata das emissões de dióxido de carbono (CO₂) dos voos internacionais. Por sua vez, a segunda subseção descreve a Lei do Combustível do Futuro (LCF), que incide sobre as emissões dos voos domésticos. Por fim, a seção 4.3 apresenta as rotas de produção dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuels*), destacando aquelas que já estão certificadas e suas principais matérias-primas potenciais, dando enfoque para o contexto brasileiro.

4.1 Políticas de descarbonização

As preocupações com o aquecimento global fruto das emissões antropogênicas de Gases do Efeito Estufa (GEE) vêm tomando cada vez mais espaço na agenda global. Por ser um problema que afeta todo o planeta, sua solução requer ações conjuntas de todos os países. Nesse sentido, os acordos climáticos são importantes mecanismos no enfrentamento conjunto das mudanças climáticas. Um marco importante nesse enfrentamento se deu com a realização da primeira Conferência Mundial do Clima (CMC), ocorrida em 1979, em Genebra, na Suíça, organizada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Nessa conferência, foi apontada a necessidade de algum mecanismo para desenvolver avaliações globais de impacto ambiental que fossem aceitas por todas as nações (OMM, 1979).

Os apontamentos realizados na primeira CMC contribuíram para a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) em 1988 por dois organismos da Organização das Nações Unidas (ONU): a OMM e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (ONU, 1988). O IPCC funciona como um órgão científico que fornece aos formuladores de políticas avaliação coordenada de

magnitude, tempo e potenciais impactos ambientais e socioeconômicos das mudanças climáticas, bem como estratégias de resposta realistas a essas mudanças (ONU, 1988).

Desde sua criação, o IPCC tem elaborado relatórios de avaliação sobre as mudanças climáticas. O primeiro deles, publicado em 1990, destacou que a mudança climática é um desafio que requer cooperação internacional, e desempenhou um papel decisivo na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (*United Nations Framework Convention for Climate Change* - UNFCCC) (IPCC, 2023b). A UNFCCC é o mais importante tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das mudanças climáticas, reunindo 198 países, que são chamados de Partes da Convenção (UNFCCC, 2023b). Adotada em 1992, durante a Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro, no Brasil, a UNFCCC entrou em vigor no ano de 1994, e a primeira Conferência das Partes (COP 1), seu órgão de autoridade composto por todas as partes da UNFCCC e que toma as decisões e estabelece novos acordos, ocorreu em 1995 (UNFCCC, 2006).

O principal resultado da COP 1 foi o Mandato de Berlim, que exigiu dos países desenvolvidos um cronograma de metas de redução de GEE legalmente obrigatório (UNFCCC, 2006). De acordo com o mandato, a responsabilidade sobre o combate às mudanças climáticas e seus efeitos adversos caberia aos países desenvolvidos, já que eles eram os principais responsáveis históricos pelas emissões de GEE. O mandato ainda previa suporte financeiro aos países em desenvolvimento para desenvolvimento de respostas adequadas às mudanças climáticas (UNFCCC, 1995).

Em 1995, o IPCC divulgou seu segundo relatório de avaliação cujos resultados apontaram, com base em evidências empíricas, para uma influência humana perceptível no clima global que representava riscos para o desenvolvimento humano e econômico (IPCC, 1995). Os resultados desse relatório forneceram material importante para os governos utilizarem na preparação para a adoção do Protocolo de Quioto em 1997, durante a COP 3 da UNFCCC, realizada em Quioto, no Japão (UNFCCC, 2006).

O protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005, é um marco no combate às mudanças climáticas, pois estabelece para os países industrializados metas individuais e juridicamente vinculativas de redução de emissões de CO₂ e outros GEE. Os países industrializados deveriam reduzir suas emissões globais em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 até o período de compromisso de 2008-2012 (UNFCCC, 2006). Entre as medidas para atingir as metas de

redução estão a melhoria da eficiência energética em setores relevantes da economia e medidas para limitar ou reduzir as emissões de GEE no setor de transportes (UNFCCC, 1998).

Outro marco histórico nas negociações climáticas foi o Acordo de Copenhague, resultado da COP 15, realizada na Dinamarca em 2009. Nesse acordo, os países reconhecem a necessidade de estabilizar as emissões de GEE para limitar o aquecimento global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2009). Além disso, cria-se um Fundo Verde para o Clima (FVC) com o objetivo de mobilizar conjuntamente US\$ 100 bilhões por ano até 2020 para auxiliar os países em desenvolvimento em ações de mitigação das mudanças climáticas. Todavia, o acordo não estabelece um limite global ou nacional de emissões de GEE nem é vinculativo, isto é, não pode regular eficazmente as ações dos países (Lau; Lee; Mohamed, 2012).

Posteriormente, em 2010, na Cidade do México aconteceu a COP 16, quando foi firmado o Acordo de Cancún sobre Mudança Climática (UNFCCC, 2006). O acordo operacionalizou o FVC, criado no Acordo de Copenhague, e criou o Mecanismo de Tecnologia, responsável pelo desenvolvimento e implementação de novas tecnologias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas (UNFCCC, 2010). Em 2011, em Durban, na África do Sul, a COP 17 aprovou o Plano Durban para Ação Aprimorada que definiu um roteiro para a intensificação das ações de combate à mudança climática até 2015, quando seria realizado um novo acordo internacional (UNFCCC, 2011).

Esse novo acordo, denominado Acordo de Paris, entrou em vigor em 2016 e foi adotado por 196 Partes na COP 21, em Paris, na França, em 2015 (UNFCCC, 2015). Segundo a UNFCCC (2015), esse acordo é um tratado internacional juridicamente vinculativo, no qual todas as Partes concordaram em tomar medidas para enfrentar as mudanças climáticas. O objetivo principal do Acordo de Paris é limitar o aumento da temperatura global a bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar esse aumento a 1,5 °C (ONU, 2015).

O Acordo de Paris introduz um novo modelo de ação climática, no qual cada país apresenta suas metas para reduzir as emissões de GEE e suas ações para o combate às mudanças climáticas por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) (UNFCCC, 2015). Essas metas são estabelecidas de modo individual por cada país signatário do acordo. As Partes são encorajadas a estabelecerem metas ambiciosas com o passar do tempo. Nesse sentido, reconhecendo que é necessária uma ação acelerada para limitar o aquecimento global

a 1,5°C, a decisão da COP 27, realizada em Sharm El Sheikh, no Egito, em 2022, solicita que as Partes revisem e reforcem as metas de 2030 em suas NDCs para se alinharem com a meta de temperatura do Acordo de Paris até o final de 2023, levando em consideração diferentes circunstâncias (UNFCCC, 2022).

Desde a primeira CMC em 1979, a comunidade internacional tem se esforçado conjuntamente para combater o aquecimento global e suas consequências. A criação do IPCC em 1988 e a adoção da UNFCCC em 1992 são exemplos desse esforço e desempenharam importante papel na construção de um arcabouço legal e científico para lidar com as mudanças climáticas. Ao longo das COPs, os países membros da UNFCCC assumiram compromissos globais de redução de emissões de GEE. O Protocolo de Quioto (1997), que estabeleceu as primeiras metas internacionais de redução de emissões, e o Acordo de Paris (2015), que consolidou um regime jurídico vinculativo para limitar o aquecimento global, são os compromissos mais reconhecidos. O Quadro 1 fornece um resumo dos principais acordos e ações de combate às mudanças climáticas.

O Brasil é signatário da UNFCCC e ratificou o Acordo de Paris em 2016, assumindo compromisso de reduzir as emissões de GEE em 37% em 2025 e em 30% em 2030 em comparação com os níveis de 2005, conforme sua NDC atualizada (UNFCCC, 2023a). Os compromissos do país também incluem um objetivo de longo prazo para alcançar a neutralidade climática até 2050. A NDC brasileira é ampla em escopo e inclui ações de mitigação e adaptação em todos os setores econômicos. Entre essas ações se destacam o compromisso de zerar o desmatamento ilegal até 2028 e de continuar investindo no aumento da participação de energias renováveis em sua matriz energética, como a expansão de biocombustíveis (UNFCCC, 2023a).

Ao longo do tempo, o Brasil tem adotado iniciativas e programas voltados para a redução das emissões de GEE. Em 2009, o país instituiu a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), que estabelece diretrizes e metas para redução das emissões antrópicas de GEE em relação às suas diferentes fontes, além de tomar como diretrizes os compromissos assumidos pelo Brasil na UNFCCC e em outros acordos que o país venha a ser signatário (Brasil, 2009), como o Acordo de Paris. A PNMC é composta por planos setoriais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas que visam reduzir as emissões antrópicas de GEE nos diversos setores da economia, como geração e distribuição de energia elétrica, transporte público urbano, indústria, serviços de saúde e agropecuária (Brasil, 2009).

Quadro 1 – Resumo dos principais acordos e ações climáticos globais

Acordo/Ações	Local e ano	Descrição	Principais resultados	Referências
Primeira CMC	Genebra, Suíça - 1979	Discussão sobre a necessidade de desenvolver avaliações globais de impacto ambiental.	Criação do IPCC, reconhecendo a necessidade de cooperação internacional.	ONU (1988)
Criação do IPCC	Genebra, Suíça - 1988	Órgão que fornece avaliações científicas detalhadas sobre mudanças climáticas para apoiar políticas.	Seus relatórios fundamentaram a criação da UNFCCC e guiam políticas climáticas globais desde então.	IPCC (2023b)
Criação da UNFCCC	Rio de Janeiro, Brasil – 1992 (adotada) e 1994 (em vigor)	O principal tratado internacional para enfrentamento e adaptação ao aquecimento global.	Estabeleceu a Conferência das Partes (COP) como o fórum para negociação de ações climáticas.	UNFCCC (2006)
Mandato de Berlim (COP 1)	Berlim, Alemanha - 1995	Discussão sobre metas de redução de GEE para países desenvolvidos e sobre o apoio financeiro para ações climáticas aos países em desenvolvimento.	Preparou o caminho para o Protocolo de Quioto, estabelecendo compromissos de redução de emissões.	UNFCCC (1995, 2006)
Protocolo de Quioto	Quioto, Japão – 1997 (adotado) e 2005 (em vigor)	Elaboração de mecanismos de mercado, como o comércio de emissões, para atingir as metas de redução.	Impôs metas juridicamente vinculativas de redução de GEE para países industrializados, com o intuito de reduzir as emissões de GEE em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 de 2008 a 2012.	UNFCCC (1998, 2006)
Acordo de Copenhague (COP 15)	Copenhague, Dinamarca - 2009	Discussão sobre a necessidade de estabilizar as emissões de GEE e de apoiar os países em desenvolvimento no combate às mudanças climáticas	Limitou o aumento da temperatura global abaixo de 2°C em relação ao nível pré-industrial, prometendo mobilizar US\$ 100 bilhões por ano até 2020 para apoiar países em desenvolvimento por meio do FVC.	UNFCCC (2009)
Acordo de Cancún (COP 16)	Cancún, México - 2010	Acordo focado no apoio ao desenvolvimento e à implementação de tecnologias de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas.	Fortaleceu a estrutura de financiamento e apoio tecnológico para ações climáticas globais por meio da criação do Mecanismo de Tecnologia e operacionalizou o FCV.	UNFCCC (2006, 2010)
Plano Durban para Ação Aprimorada (COP 17)	Durban, África do Sul - 2011	Definição de um roteiro para um novo acordo climático pós-2020, com foco em intensificar as ações até 2015.	Estabeleceu a base para as negociações do Acordo de Paris em 2015.	UNFCCC (2011)
Acordo de Paris (COP 21)	Paris, França - 2015	Tratado internacional juridicamente vinculativo que visa limitar o aumento da temperatura global a bem abaixo de 2 °C, com esforços para 1,5 °C.	Envolveu todos os países membros da UNFCCC em compromissos climáticos voluntários e individuais por meio das NDCs para reduzir as emissões de GEE.	UNFCCC (2015)
COP 27	Sharm El Sheikh, Egito - 2022	Revisão das NDCs para alinhamento com as metas do Acordo de Paris até 2030.	Incentivou a atualização das NDCs para acelerar a ação global de combate às mudanças climáticas.	UNFCCC (2022)

Fonte: Elaboração própria.

Em 2016, por meio do Ministério do Meio Ambiente, o Brasil instituiu o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), cujo objetivo é promover a gestão e redução do risco climático no país frente aos efeitos adversos associados à mudança do clima (MMA, 2016a). O PNA é um instrumento da PNMC e está organizado em 11 estratégias de adaptação para setores e temas elencados como potencialmente vulneráveis à mudança climática, entre eles agricultura, energia, transportes e recursos hídricos (MMA, 2016b).

No âmbito do PNA (2016), as ações voltadas ao setor energético são consideradas fundamentais dada a importância deste para todos os setores econômicos do país. A relevante participação das fontes renováveis na matriz energética do Brasil confere ao setor uma característica única de baixa emissão de carbono quando comparado internacionalmente. Em 2019, essa participação correspondia a 46,1%, sendo 4,3 vezes maior do que a média dos países da OCDE e 3,3 vezes maior do que a média do resto do mundo (MMA, 2021).

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é um plano dinâmico, voltado para o setor de energia e indica as perspectivas de sua expansão no horizonte de dez anos, com uma visão integrada para os diversos setores energéticos considerando aspectos estratégicos, econômicos e socioambientais (EPE, 2022a). O setor energético foi responsável por apenas 18% das emissões do país em 2021, em especial, devido à participação das fontes renováveis (EPE, 2022b). Conforme o caderno de energia e meio ambiente do PDE (2032), a principal medida de mitigação de emissões de GEE na área de energia é a ampliação do uso dessas fontes. Para isso, o governo brasileiro possui algumas estratégias, a saber: o Programa de controle de emissões veiculares (Proconve); a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável do Biogás e Biometano; o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano (Metano Zero); a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio); e os programas Combustível do Futuro e Rota 2030 – Mobilidade e Logística (EPE, 2022b).

Com o objetivo de reduzir os níveis de emissões de poluentes lançados na atmosfera por veículos automotores, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) criou o Proconve, a partir da Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986 (Conama, 1986). Para atingir tal objetivo, o Proconve estabeleceu limites máximos de emissão de poluentes do ar para os motores e veículos automotores novos. Essas determinações foram reforçadas pela Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993, que redefiniu os limites dos níveis de emissão de gases e compostos poluentes dos veículos comercializados no país (Brasil, 1993). Em resoluções recentes, o Conama definiu

limites de emissões de poluentes para veículos rodoviários leves, de passageiros e comerciais (Resolução Conama nº 492, de 20 de dezembro de 2018) e para motocicletas, ciclomotores, triciclos e quadriciclos (Resolução Conama nº 493, de 24 de junho de 2019) (Ibama, 2022).

O programa Rota 30 – Mobilidade e Logística, criado em 2018, é parte da estratégia elaborada pelo Governo Federal para o desenvolvimento do setor automotivo no país. O programa possui como um de seus pressupostos o princípio da sustentabilidade ambiental (MDIC, 2023). O Rota 30 estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos novos produzidos no país ou importados. Esses requisitos buscam atingir metas de desempenho e de eficiência. Uma dessas metas previa que até 2022 o aumento da eficiência energética implicaria na redução do consumo de combustível médio dos veículos novos em pelo menos 11% (MDIC, 2023). Essa redução implica, em alguma medida, uma menor emissão de GEE oriunda do uso de combustível fóssil.

A Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável do Biogás e Biometano é um mecanismo legal que busca incentivar programas e ações para reduzir as emissões de metano e fomentar o uso de fontes renováveis de energia (Brasil, 2022). Esse mecanismo, apesar de não quantificar metas a serem atingidas, define instrumentos que contribuem para o cumprimento de metas climáticas assumidas pelo país, como aquelas ligadas à UNFCCC. Um desses instrumentos é o programa Metano Zero, criado em 2022, e que visa reduzir as emissões de metano e custos de combustíveis e usar o biogás e o biometano como fontes renováveis de energia e combustível (MMA, 2022).

Em se tratando de fontes renováveis de combustíveis, o Brasil possui um conjunto de políticas de estímulo à produção e ao uso de biocombustíveis. Nesse sentido, em 1975, foi instituído o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), com o objetivo de estimular a produção de álcool com vistas a atender às necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos (Brasil, 1975). O programa foi lançado para reduzir a dependência do petróleo e é um marco no incentivo à produção de biocombustíveis no país. Mais adiante, em 1991, foi lançado o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET), com a finalidade de desenvolver e integrar as ações que visem a racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural (Brasil, 1991).

Outra iniciativa de destaque no que diz respeito à produção de biocombustíveis no Brasil foi a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2004. O PNPB é gerido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e tem como objetivo

a implementação da cadeia de produção do biodiesel no Brasil. As principais diretrizes do PNPB são implementar um programa sustentável, promovendo inclusão social; garantir preços competitivos, qualidade e suprimento; e produzir o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas (MAPA, 2023).

Em termos regulatórios e legais, os biocombustíveis⁹ foram incrementados na matriz energética brasileira por meio da Lei nº 11.097 de 2005. Inicialmente, a lei estabelecia um percentual mínimo obrigatório de 2% de mistura de biodiesel ao diesel fóssil a ser atingido em 2008 e de 5% em 2013 (Brasil, 2005). No entanto, em decorrência do amadurecimento do mercado de biocombustíveis no Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), responsável por definir os limites dessa mistura, antecipou, em decisão do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), para 2010 a meta de 5%, definida pela Lei nº 11.097 de 2005. Para 2023, o CNPE definiu um percentual de 12% da mistura de biodiesel ao diesel fóssil e prevê aumento de 1 ponto percentual (p.p.) ao ano até 2026, quando a mistura deve atingir 15% (ANP, 2023).

Ainda no contexto de fomento à produção e ao uso de fontes renováveis de energia, um instrumento de destaque é a RenovaBio. A política, instituída em 2017, visa promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com vistas a reduzir as emissões de GEE e a contribuir com os compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris (Brasil, 2017). Os principais mecanismos da RenovaBio são o estabelecimento de metas anuais de descarbonização para o setor de biocombustíveis e a certificação de créditos de descarbonização e de biocombustíveis. As metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE para a comercialização de combustíveis são definidas pelo CNPE, do Ministério de Minas e Energia (MME). Para 2032, essa redução deve ser de 99,22 milhões de Créditos de Descarbonização (CBIOs)¹⁰ (MME, 2022).

Em 2018, foi lançado o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018-2022, que é um documento de orientação estratégica do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) para atuação nas áreas de energias renováveis e biocombustíveis. O objetivo do plano é promover o conhecimento científico e o

⁹ Biocombustíveis são combustíveis derivados de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Brasil, 2005).

¹⁰ O CBIO é um instrumento registrado sob a forma escritural, para fins de comprovação individual da meta de redução de GEE do distribuidor de combustíveis.

desenvolvimento tecnológico em fontes renováveis de geração de energia elétrica, na produção e uso de biocombustíveis, e no uso eficiente da energia (MCTIC, 2018).

Um dos desdobramentos do plano do MCTIC (2018), Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para Aviação (RBQAV), tem enfoque no setor aéreo. A RBQAV tem como objetivo a realização de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) nesse setor por meio de parcerias entre instituições de pesquisa, empresas privadas e instituições governamentais para apoiar o desenvolvimento do setor de bioquerosene de aviação no âmbito nacional (RBQAV, 2023).

Em 2021, muitas iniciativas de apoio ao desenvolvimento de bioquerosene de aviação foram anunciadas, sobretudo, amparadas no Programa Combustível do Futuro (PCF), que foi instituído pela Resolução CNPE nº 7, de 20 de abril de 2021. Entre os objetivos do programa, estão a redução da intensidade média de carbono na matriz de combustíveis e das emissões do transporte, com a ampliação do uso de biocombustíveis, por exemplo, na aviação civil, com a introdução na matriz energética do querosene de aviação sustentável (MME, 2021). Nesse sentido, o PCF criou o subcomitê temático ProBioQAV, que busca criar mecanismos de incentivos fiscais e estruturar programas de financiamentos de projetos para a produção de combustível sustentável de aviação (MME, 2023).

O subcomitê ProBioQav é apoiado pela Lei nº 14.248, que estabeleceu o Programa Nacional de Bioquerosene (PNB), inserido no contexto do Programa Combustível do Futuro. O PNB incentiva a pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassas que não concorram com a produção de alimentos, visando à sustentabilidade da aviação brasileira (Brasil, 2021). O programa tem por objetivo o desenvolvimento de tecnologia limpa na produção de biocombustível, que seja compatível com as tecnologias de propulsão atuais, de modo a não ser necessário alterar motores, aeronaves e infraestrutura de distribuição existentes e que não comprometa a segurança no sistema de aviação. O PNB prevê ainda o desenvolvimento de tecnologias para mistura, em proporções adequadas, do bioquerosene com o querosene de aviação (QAV) fóssil, e para sua substituição total pelo bioquerosene (Brasil, 2021). Em 2024, o PCF foi regulamentado pela Lei nº 14.993/2024, conhecida como a Lei do Combustível do Futuro (LCF) (Brasil, 2024). O Quadro 2 resume as principais iniciativas nacionais para redução dos GEE.

Quadro 2 – Histórico de programas e iniciativas nacionais de redução das emissões de GEE

Ano	Programa/Iniciativa	Descrição/Objetivo(s)	Referência
1975	Proálcool	Tem como objetivo estimular a produção de álcool com vistas a atender às necessidades do mercado interno e externo, reduzindo a dependência do petróleo.	Brasil (1975)
1986	Proconve	Criado pelo Conama para regular as emissões de poluentes de veículos automotores novos, estabelecendo limites de emissões para esses veículos.	CONAMA (1986)
1991	Conpet	Desenvolvido visando a eficiência no uso de combustíveis derivados do petróleo e do gás natural.	Brasil (1991)
2004	PNPB	Visa implementar uma cadeia de produção do biodiesel no Brasil, promovendo inclusão social, garantindo preços competitivos, qualidade e suprimento, e produzindo o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas.	MAPA (2023)
2005	Lei nº 11.097	Regulamenta a adição obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil, incrementando os biocombustíveis na matriz energética brasileira.	Brasil (2005)
2009	PNMC	Estabelece diretrizes e metas para a redução de emissões de GEE em vários setores econômicos, alinhadas aos compromissos da UNFCCC.	Brasil (2009)
2016	PNA	Promove a gestão e a redução de riscos climáticos por meio de 11 estratégias de adaptação para setores vulneráveis à mudança climática, entre eles agricultura, energia, transportes e recursos hídricos.	MMA (2016)
2017	RenovaBio	É uma política de incentivo à produção e ao uso de biocombustíveis para reduzir as emissões de GEE, com metas de descarbonização anuais, definidas pelo CNPE.	Brasil (2017)
2018	Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018-2022	Busca orientar a atuação em energias renováveis e biocombustíveis, promovendo o desenvolvimento tecnológico e a eficiência energética.	MCTIC (2018)
2018	Rota 2030 – Mobilidade e Logística	Programa de desenvolvimento do setor automotivo com foco em eficiência energética e redução de emissões.	MDIC (2023)
2021	PCF	Visa reduzir a intensidade de carbono nos combustíveis e ampliar o uso de biocombustíveis, especialmente no setor de transportes.	MME (2021)
2021	PNB	Busca incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de biocombustíveis sustentáveis para a aviação, compatíveis com tecnologias atuais de propulsão, e que não concorram com a produção de alimentos.	Brasil (2021b)
2022	Metano Zero	Objetiva reduzir as emissões de metano e promover o uso de biogás e biometano como fontes renováveis de energia.	MMA (2022)
2024	LCF	Regulamentou o PCF.	Brasil (2024)

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Medidas de descarbonização para a aviação civil

Esta seção apresenta as medidas adotadas para mitigar as emissões de GEE na atmosfera provenientes da indústria da aviação civil, tanto em âmbito internacional quanto nacional. A Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association – IATA*) (2021) prevê zerar as emissões líquidas de GEE da aviação civil internacional em 2050 em relação aos níveis de 2019. A IATA (2021), todavia, reconhece que essa meta é desafiadora, especialmente considerando a projeção de 10 bilhões de passageiros em 2050, o que implicaria uma redução acumulada de 21,2 gigatoneladas de carbono até esse ano. Para alcançar tal objetivo, a IATA propõe diversas medidas, incluindo o CORSIA, um mecanismo de compensação de mercado, descrito na primeira subseção. No contexto nacional, o governo brasileiro definiu percentuais mínimos de redução das emissões de GEE em operações domésticas no período de 2027 a 2037, conforme estipulado na LCF, abordada na segunda subseção. Tanto o CORSIA quanto a LCF ressaltam a importância da substituição de QAV por SAF, que são apresentados na última subseção.

4.2.1 *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*

A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu o primeiro acordo global sobre uma meta que aborda os impactos climáticos de um setor específico, neste caso, o setor aéreo (OACI, 2010). Alguns elementos desse acordo incluem o desenvolvimento de padrões globais de CO₂ para aeronaves, coleta de dados de emissões da aviação civil internacional pela OACI, continuação do trabalho sobre combustíveis alternativos para aviação e uma meta de melhoria anual global de 2% na eficiência do combustível até o ano de 2050. Embora não haja uma meta específica de redução de emissões de GEE a ser atingida pela aviação internacional no âmbito do Acordo de Paris, a IATA e os países membros da OACI se comprometeram a zerar as emissões líquidas de carbono de voos internacionais até 2050 em relação aos níveis de 2019 (IATA, 2021).

Em relação às emissões de CO₂, a IATA (2021) aponta que as emissões que não forem eliminadas na fonte devem ser eliminadas por meio de opções fora do setor, como captura e armazenamento de carbono e esquemas de compensação confiáveis. Nesse sentido, em 2016, os Estados-membros da OACI passaram a adotar um mecanismo de mercado para a compensação ambiental na indústria de aviação civil internacional – o CORSIA (OACI, 2016). Esse mecanismo requer uma série de ações para sua implementação, entre elas, duas se

destacam. A primeira delas, implementada em 1º de janeiro de 2019, diz respeito ao monitoramento e verificação das emissões de CO₂. A segunda refere-se a uma fase piloto do esquema, iniciada em 1º de janeiro de 2021 para o período 2021-2023 (OACI, 2022a).

Originalmente, o CORSIA previa que as emissões totais de CO₂ da aviação internacional que ultrapassassem as emissões de 2020 deveriam ser compensadas (OACI, 2016). No entanto, em decorrência da pandemia da COVID-19, a OACI decidiu tomar como linha de base as emissões de 2019 para o período 2021-2023 (IATA, 2023a). Mais recentemente, em 2022, a OACI estabeleceu 85% das emissões de 2019 como linha de base do CORSIA de 2024 até o final do esquema em 2035 (IATA, 2023a). Isto implica dizer que entre 2024 e 2035, as emissões de CO₂ pela aviação civil internacional não devem ultrapassar 85% daquelas observadas em 2019.

De acordo com a OACI (2019), a quantidade de emissões de CO₂ que deve ser compensada (CO_{2compensada}) por um operador de aeronave abrangido pelo CORSIA em um determinado ano a partir de 2021 é igual o produto das emissões anuais desse operador (EO) por um fator de crescimento (FC) de emissões setoriais e individuais do operador da linha de base para um determinado ano futuro:

$$CO_{2compensada} = EO \times FC \quad (1)$$

De 2021 a 2029, a quantidade de requisitos de compensação de CO₂ é calculada multiplicando as emissões anuais dos operadores pelo fator de crescimento do setor de aviação internacional a cada ano, seguindo a chamada abordagem 100% setorial. A partir de 2030, essa quantidade é multiplicada levando em conta tanto o fator de crescimento do setor como o fator de crescimento de um operador individual (no mínimo 20% de 2030 a 2032 e pelo menos 70% de 2033 a 2035) (OACI, 2019).

A OACI (2016) adotou uma implementação em fases para o CORSIA de modo a acomodar as especificidades de cada um dos seus Estados-membros ou países-membros. São três fases: uma fase piloto (2021-2023), que engloba Estados voluntários; uma primeira fase (2024-2026), em que participam, além dos voluntários da fase piloto, outros que queiram participar voluntariamente desta fase; e uma segunda fase (2027-2035), destinada a todos os países que tenham uma quota individual de atividades de aviação internacional em Receita por Tonelada de Quilômetro (RTK, do inglês *Revenue Tonne-Kilometres*), no ano de 2018, superior a 0,5%

do total de RTK ou cuja participação acumulada na lista de países do maior para o menor número de RTK atinja 90% do total de RTKs¹¹ (OACI, 2016).

Para eliminar possíveis distorções de mercado, a OACI (2016) determina que os requisitos de compensação das emissões só são válidos quando os Estados de origem e destino dos voos internacionais são participantes do CORSIA. Se ao menos um desses Estados não está incluído no esquema, ambos são isentos dessa compensação. Além desse caso, o CORSIA não se aplica a baixos níveis de atividade da aviação internacional, a saber: operadores de aeronaves que emitam menos de 10.000 toneladas de emissões de CO₂ da aviação internacional por ano; aeronaves com menos de 5.700 kg de peso de decolagem ou operações humanitárias, médicas e de combate a incêndios (OACI, 2016).

O Brasil aderiu ao CORSIA, mas somente a partir de 2027 deverá atender aos critérios de redução das emissões de CO₂. Na fase voluntária do esquema, apenas o monitoramento, reporte e verificação das emissões de CO₂ são realizados pelos operadores nas rotas que envolvem o Brasil (ANAC, 2018). Na segunda fase (2027-2035), obrigatória, as emissões internacionais de operadores brasileiros, acima da linha de base do CORSIA (85% das emissões de 2019), deverão ser compensadas com a aquisição de créditos de carbono ou por meio do uso de combustíveis elegíveis ao CORSIA, em especial o SAF (ANAC, 2023b).

O CORSIA não se estende a todas as operações aéreas. As emissões oriundas dos voos domésticos, isto é, aqueles com origem e destino em um mesmo país, não são contabilizadas. Por conseguinte, sob esse mecanismo, operadores aéreos de voos domésticos não estão obrigados a reduzir suas emissões de CO₂. Não obstante, visando diminuir as emissões de CO₂ das operações domésticas e contribuir para o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris, o Governo Federal sancionou, em 2024, a LCF que, entre outras coisas, define percentuais de redução das emissões de GEE dos voos domésticos por meio de QAV por SAF.

4.2.2 Lei do Combustível do Futuro (LCF)

A LCF aborda diversos aspectos relacionados ao processo de descarbonização da matriz energética de transportes no Brasil. Essa lei propõe uma integração entre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover),

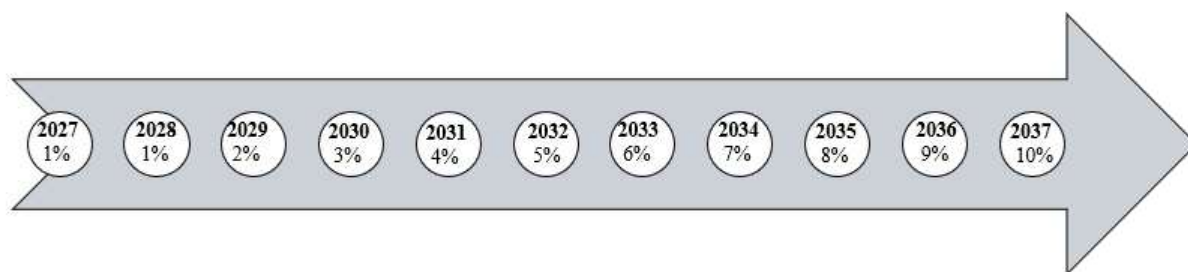
¹¹ Países Menos Desenvolvidos (PMD), Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) e Países em Desenvolvimento sem Litoral (PMD), a menos que se voluntariem para participar desta fase, não são obrigados a aderirem ao CORSIA.

o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e o Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve). Uma das principais iniciativas da LCF é a avaliação das emissões dos diferentes combustíveis utilizados no setor de transportes por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) completa, que abrange as etapas de geração de energia, extração, produção e uso do combustível (Brasil, 2024).

Especificamente, para o setor aéreo, a LCF institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), que deve contribuir para que o Brasil atinja suas metas de redução de CO₂ assumidas no âmbito do Acordo de Paris. O ProBioQAV tem como objetivo o incentivo à pesquisa, à produção, à comercialização e ao uso energético do SAF na matriz energética brasileira. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) será responsável por determinar as emissões totais equivalentes ao longo do ciclo de vida de cada rota tecnológica de produção de SAF, desde a extração até a queima. Além disso, a ANP deve buscar um alinhamento metodológico à Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) em relação aos requisitos de elegibilidade e de certificação para o SAF (Brasil, 2024).

Em relação às metas de redução de emissões de CO₂, a LCF estabelece que, a partir de 2027, os operadores aéreos serão obrigados a reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em suas operações domésticas por meio do uso de SAF. A LCF estabelece metas de redução de CO₂ nos voos domésticos, começando com 1% em 2027 e em 2028, e aumentando 1 ponto percentual ao ano até atingir 10% em 2037 (Brasil, 2024). A Figura 1 apresenta o cronograma de reduções a serem seguidas entre 2027 e 2037.

Figura 1 – Cronograma de redução de emissões de CO₂ nas operações aéreas domésticas



Fonte: Elaboração própria.

No âmbito do ProBioQAV, os operadores aéreos estão liberados de cumprir suas obrigações caso não haja disponibilidade de SAF em nenhum dos aeroportos onde operam, ou se suas emissões anuais forem inferiores ao limite estabelecido pela regulamentação da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). As metas de redução de emissões de GEE definidas na

LCF para os operadores aéreos não acarretam prejuízos ou duplicidade em relação a outros acordos que estabeleçam metas de redução de emissões de GEE diferentes (Brasil, 2024). Isso implica dizer que as obrigações assumidas pelo Brasil junto à OACI permanecem ativas.

4.3 Rotas tecnológicas de produção de SAF

O SAF é um combustível líquido utilizado na aviação comercial, que pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas, incluindo resíduos de óleos e gorduras, resíduos verdes e municipais e culturas não alimentares, além de poder ser produzido sinteticamente através de um processo que captura carbono diretamente do ar (IATA, 2023b). O uso de SAF pela aviação civil internacional é apontado como essencial para o cumprimento das metas climáticas assumidas pelo setor aéreo (OACI, 2017), já que o uso desse combustível pode reduzir as emissões de CO₂ em até 80%.

Os operadores aéreos que optarem por reduzir seus requisitos de compensação por meio do uso de SAF e/ou Combustíveis de Aviação de Baixo Carbono (LCAF, do inglês *Lower Carbon Aviation Fuels*) devem atender aos critérios de sustentabilidade e às metodologias de ciclo de vida definidas pelo CORSIA. Um combustível é elegível ao esquema se atender a dois princípios básicos. O primeiro é gerar uma menor emissão de carbono no seu ciclo de vida. O segundo é não ser produzido a partir de biomassa obtida de terrenos com elevado estoque de carbono (OACI, 2022b).

Para atender a esses princípios, a OACI (2022c) estabeleceu critérios para certificar os combustíveis produzidos antes de 1 de janeiro de 2024¹² como sustentáveis ou não. Em conformidade com o primeiro princípio, o combustível elegível ao CORSIA deve alcançar reduções líquidas de emissões de GEE de, pelo menos, 10% em comparação com os valores de emissões do ciclo de vida da linha de base do combustível de aviação. Já para atender ao segundo princípio, dois critérios precisam ser atendidos. O primeiro deles é que o combustível não seja produzido a partir de biomassa obtida de terras regeneradas após 1 de janeiro de 2008 que sejam florestas primárias, pântanos ou turfeiras, nem contribua para a degradação das reservas de carbono nesses tipos de vegetação, dadas suas elevadas reservas de carbono. O segundo critério define que, em caso de conversão do uso do solo após 1 de janeiro de 2008, tal como definido nas categorias de terras do IPCC, as emissões de Mudanças Diretas do Uso da

¹² O Anexo A fornece os requisitos para um combustível ser classificado como SAF a partir de 1 de janeiro de 2024.

Terra (DLUC, do inglês *Direct Land Use Change*) devem ser calculadas. Se as emissões de GEE das DLUC excederem o valor padrão das emissões da Mudança Indireta no Uso da Terra (ILUC, do inglês *Induced Land Use Change*), o valor das emissões DLUC deve substituir o valor padrão das ILUC (OACI, 2022b).

As emissões do ciclo de vida (LCA, do inglês *Life Cycle Assessment*) padrão do SAF são calculadas a partir de uma abordagem “baseada em processos”, que acompanha toda a cadeia de valor (OACI, 2022c). As emissões totais de GEE do ciclo de vida do SAF são a soma das emissões ao longo da cadeia de valor e das emissões oriundas da ILUC. A metodologia do CORSIA para o LCA contabiliza as emissões associadas ao cultivo de matéria-prima, à colheita, coleta e recuperação de matéria-prima, ao processamento e extração de matéria-prima, ao transporte de matéria-prima para instalações de processamento e produção de combustíveis, aos processos de conversão de matéria-prima em combustível, ao transporte e distribuição de combustíveis e à combustão do combustível em um motor de aeronave. Todavia, essa metodologia não contabiliza as emissões geradas durante atividades únicas de construção ou fabricação, tais como a construção de instalações de produção de combustível e a fabricação de equipamentos (OACI, 2022c).

Um combustível alternativo – elegível ou não ao CORSIA – tem de cumprir a norma D4054 da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, do inglês *American Society for Testing and Materials*) para ser utilizado em voos comerciais (OACI, 2022c). Entre as rotas certificadas pela ASTM, um combustível pode ser elegível ao CORSIA desde que atenda aos seus critérios de sustentabilidade. Conforme a OACI (2022b), em novembro de 2021, foram aprovadas nove rotas de conversão para a produção de combustíveis alternativos de aviação. Dessas, a ANP aprovou e incorporou sete por meio da Resolução nº 856/2021 (ANP, 2021b). Cada rota produz um tipo de SAF ou querosene de aviação alternativo (*JEt alternativo*), que ao ser misturado ao querosene de aviação fóssil (*JET A* ou *JET A-1*) dá origem ao querosene de aviação C (*JET C*). Importante destacar que, conforme a ANP (2021), o *JET C* é composto de um único tipo de *JEt alternativo* ou SAF misturado ao *JET A* ou ao *JET A-1* nas proporções definidas pela agência. O Quadro 3 apresenta as rotas tecnológicas de produção de SAF autorizadas no Brasil e seus respectivos percentuais de mistura ao QAV.

Quadro 3 – Rotas tecnológicas aprovadas e incorporadas pela ANP para produção de SAF no Brasil

Rota tecnológica de conversão	Abreviação	Proporção de mistura ao QAV fóssil
Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch	SPK-FT	Até 50%
Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados	SPK-HEFA	Até 50%
Querosene parafínico sintetizado com aromáticos	SPK-A	Até 50%
Querosene parafínico sintetizado por álcool	SPK-ATJ	Até 50%
Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados	SIP	Até 10%
Querosene de hidrotermólise catalítica	CHJ	Até 50%
Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados	SPK-HC-HEFA	Até 10%

Fonte: Elaboração própria a partir da Resolução nº 856/2021 (ANP, 2021b).

As rotas tecnológicas apresentadas no Quadro 3 utilizam diferentes matérias-primas nos seus processos de produção de SAF, que são categorizadas como de: primeira geração (1G), segunda geração (2G), terceira geração (3G) e quarta geração (4G). Os SAF de primeira geração são oriundos diretamente de biomassas comestíveis, tais como: culturas de oleaginosas (camelina, palma/dendê, colza/canola, soja, girassol e salicórnia) e culturas açucareiras e amiláceas (milho, trigo, cana-de-açúcar, beterraba sacarina). Os de segunda geração são produzidos a partir de uma ampla gama de matérias-primas diferentes, desde matérias-primas lignocelulósicas não comestíveis até resíduos sólidos urbanos, por exemplo: culturas energéticas de sementes oleaginosas (pinhão-manso e mamona), culturas energéticas de gramíneas (*switchgrass*, *miscanthus* e capim elefante), culturas energéticas de madeira (choupo, salgueiro e eucalipto), resíduos agrícolas e florestais (palha de milho, bagaço de cana e resíduos de colheita/processamento de madeira) e alimentos e resíduos urbanos (óleo de cozinha usado, gorduras animais e fração biogênica de resíduos sólidos urbanos). Os SAF de terceira geração são fabricados a partir da biomassa de algas. Por fim, os SAF de quarta geração são originados a partir da modificação genética de microrganismos (como microalgas, cianobactérias, fungos e leveduras) que consomem mais CO₂ do meio ambiente do que emitem quando são consumidas (queima) (Alalwan *et al.*, 2019; Doliente *et al.*, 2020; Lee; Lavoie, 2013).

Atualmente, a produção de SAF por meio das matérias-primas de 1G é considerada a mais rentável. Não obstante, seu potencial de produção é limitado a certos países devido à alta procura por terra e por água para sua geração, além do potencial conflito com a necessidade

alimentar global (Alalwan *et al.*, 2019). A geração de SAF de 2G, embora não gere competição com o setor alimentício, apresenta algumas limitações relacionadas ao custo-benefício envolvido na escala da produção para um nível comercial, conforme apontam Alalwan *et al.* (2019). Em termos de redução de emissões de GEE, os autores destacam que os SAF de 2G e de 3G têm apresentado um desempenho melhor do que os de 1G. No entanto, a produção de biocombustível de 3G, além de custo-benefício elevado, dá origem a um produto menos estável do que aqueles produzidos por outras fontes. Espera-se que a produção de SAF de 4G, que se encontra ainda em estágios iniciais de desenvolvimento, seja responsável por uma maior redução nas emissões de GEE quando comparada aos SAF das demais gerações (Alalwan *et al.*, 2019).

Nesse sentido, em um primeiro momento, devido à viabilidade e ao estágio de amadurecimento, a produção de SAF deve ocorrer, principalmente, por meio do uso de matérias-primas de 1G e de 2G. A seleção dessas matérias-primas, todavia, deve ser justificada com base no custo de produção e na pegada ambiental, evitando ao mesmo tempo concorrência com os mercados já existentes (Ng *et al.*, 2021), seja de biocombustíveis para transporte rodoviário ou de alimentos. Além disso, a implementação do SAF deve levar em conta as especificidades e os objetivos de cada país, desde que feita de forma sustentada, cumprindo sempre critérios de sustentabilidade socioeconômica e ambiental (Doliente *et al.*, 2020).

O Brasil é reconhecido por sua longa experiência no uso de biomassa para geração de energia, conciliando a produção de biocombustíveis com a segurança alimentar e o desenvolvimento rural (Cortez *et al.*, 2014). Isso faz com que o debate sobre o possível conflito entre a produção de alimentos e a de SAF não seja tão intenso no contexto brasileiro (Moraes *et al.*, 2014b). O país possui uma grande variedade de matérias-primas devido a sua grande área de produção com boa disponibilidade de água, diferentes tipos de microclimas e múltiplas capacidades regionais para promover a adaptação das culturas (Cortez *et al.*, 2014).

Conforme já mencionado, o Brasil possui um grande potencial para produção de biocombustível de aviação dadas as suas características morfoclimáticas e sua *expertise* na produção de bioenergia. Estima-se que há no Brasil cerca de 90 milhões de hectares disponíveis para agricultura, além de 200 milhões de hectares de pastagens com algum grau de degradação, que, se recuperadas, podem ser utilizadas para geração de alimentos e de bioenergia (Embrapa, 2015b). Como também já citado, a biomassa para produção de SAF pode ser oriunda de diversas matérias-primas (*e.g.*, biomassas lignocelulósicas, fontes sacarinas, amiláceas e óleos vegetais).

Cortez *et al.* (2014) consideram que do ponto de vista de produtividade das culturas e do balanço energético, as matérias-primas mais produtivas são a cana-de-açúcar e a silvicultura. Os autores destacam que outras biomassas também podem ser cultivadas para produção de SAF devido à vasta disponibilidade de terra que o Brasil possui. Moraes *et al.* (2014) discutem quais são as principais lacunas para uma produção sustentável de bioquerosene a partir de quatro grupos de matérias-primas: açúcares e amidos, culturas oleaginosas, materiais lignocelulósicos e resíduos. Em se tratando do quesito sustentabilidade, os autores encontram impactos positivos na produção de bioquerosene a partir de açúcares e de materiais lignocelulósicos.

Em um artigo sobre matérias-primas oleaginosas, a Embrapa (2015) aponta a soja como principal candidata de curto prazo para produção de bioquerosene, já que é a única entre todas que atende na totalidade a três parâmetros básicos e essenciais para a sustentabilidade de um possível programa de bioquerosene no Brasil: tecnologia de produção, escala de produção e logística de distribuição espacial ao longo do território nacional. Embora Cantarella *et al.* (2015) corroborem esse apontamento, os autores alertam para possíveis limitações no uso da soja em decorrência de exigências do mercado internacional no que tange à potencial competição com a cadeia de suprimentos existente. Nesse sentido, no médio prazo, pode-se recorrer a outras oleaginosas tais como o óleo de palma, o algodão, o girassol e a canola; e no longo prazo, às culturas ainda não domesticadas, como o pinhão-manso, a macaúba e a camelina (Embrapa, 2015b).

Além da soja, Cantarella *et al.* (2015) destacam a cana-de-açúcar e o eucalipto como matérias-primas promissoras para geração de biocombustíveis de aviação. Os autores afirmam que o avanço tecnológico pode tornar viável o uso de outras matérias-primas na produção de bioquerosene. Nessa perspectiva, Carvalho (2017) avaliou a disponibilidade de bioenergia a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais com potencial técnico, que considera a fração do potencial ambientalmente sustentável disponível sob possibilidades tecnológicas, restrições logísticas e competição por usos não energéticos. A partir desse potencial, a autora quantificou o potencial técnico de resíduos de biomassa de cana-de-açúcar, soja, arroz, trigo, milho, eucalipto e pinheiro, por meio da seguinte equação:

$$RP_j = \sum A_i P_i RPR_{j,i} ESR_j AR_j LHV_j \quad (2)$$

em que RP_j é o resíduo potencial, A_i é a área plantada da cultura i (hectares por ano), P_i é a produtividade da cultura i (toneladas por hectare), $RPR_{j,i}$ representa a proporção do resíduo de

j para o produto i , ESR_j representa a taxa de remoção ambientalmente sustentável do resíduo j (%), AR_j é a taxa de disponibilidade do resíduo j (%) e, por fim, LHV_j representa o baixo poder de aquecimento do resíduo j (megajoule por quilograma). A cana-de-açúcar e a soja foram escolhidas por sua atual utilização para fins energéticos no país. Os demais em decorrência da sua relevante área plantada, potencial de expansão e alta relação resíduo/produto.

Carvalho (2017) estimou em 3.931.807 terajoule (TJ) por ano o potencial total de biomassa para o Brasil, sendo as regiões Sul e Sudeste as de maior potencial com 1.288.131 e 1.095.003 TJ/ano, respectivamente. Em se tratando das culturas, a autora mostrou que os maiores potenciais de produção de bioenergia são a soja (1.050.091 TJ/ano) e a cana-de-açúcar (1.033.683 TJ/ano). Dessas duas culturas, Long *et al.* (2015) argumentam que apenas a cana-de-açúcar aparenta ter um futuro promissor enquanto matéria-prima destinada à produção de SAF, já que a soja produz muito pouco combustível por unidade de área.

Embora as fontes de açúcares tenham sido apontadas como matérias-primas mais viáveis para a produção de SAF no Brasil, em especial, a cana-de-açúcar, a rota tecnológica com melhor tecnologia disponível em escala comercial é a SPK-HEFA, que utiliza materiais oleaginosos em seu processo de conversão (OACI, 2018). A OACI (2018a) destaca que a rota SPK-HEFA, embora apresente menor custo de investimento que as rotas SPK-FT e SPK-ATJ, o custo da matéria-prima utilizada é superior. Em geral, conforme as matérias-primas são mais baratas, o processo de conversão em bioquerosene se torna mais caro (OACI, 2018).

No Brasil, Carvalho (2017) analisou a produção de bioquerosene a partir de duas rotas tecnológicas: a rota SPK-FT, utilizando resíduos florestais, e a rota SPK-HEFA, utilizando óleo de soja. A autora encontrou que, embora o custo de investimento inicial da rota SPK-FT seja superior ao da rota SPK-HEFA, seu preço final é mais competitivo, já que o custo da matéria-prima é baixo. Além disso, o potencial de redução de emissões de GEE é de 92%, percentual superior à redução via rota SPK-HEFA, que é de 52%. Essas questões de viabilidade ambiental e econômica das rotas de conversão de SAF são analisadas no capítulo seguinte.

5 ESTUDOS DA LITERATURA APLICADA

A literatura aplicada sobre combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuel*) ainda é muito incipiente, sobretudo, no que diz respeito aos seus impactos socioeconômicos. Este capítulo está dividido em três seções. A primeira delas faz uma revisão de estudos que avaliam a viabilidade ambiental da produção de SAF, considerando as análises feitas para o Brasil. A segunda seção apresenta os estudos sobre a viabilidade técnico-econômica da produção de SAF no país. A última seção apresenta estudos que avaliam os impactos socioeconômicos da implementação de SAF.

5.1 Viabilidade ambiental do uso de SAF produzido por diferentes rotas tecnológicas

Os estudos sobre os impactos ambientais do uso de SAF ganharam destaque na literatura principalmente a partir de 2016, quando entrou em vigor o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para Aviação Internacional (CORSIA, do inglês *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Nesse esquema, a pegada de carbono de cada rota tecnológica de produção de SAF é calculada por meio de uma abordagem atributiva do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* – LCA), que contabiliza os fluxos de massa e energia ao longo de toda cadeia de valor, e uma abordagem consequential do LCA para as emissões resultantes de Mudanças Indiretas no Uso da Terra (ILUC, do inglês *Indirect Land Use Change*). Os valores totais das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)¹³ do ciclo de vida para um determinado SAF são dados pela soma das emissões “principais” do LCA e das emissões ILUC (OACI, 2022b).

A produção de SAF se dá por meio da combinação de, no mínimo, nove tecnologias de conversão e diversas matérias-primas. O CORSIA apresenta valores de emissões de GEE para uma ampla combinação de rotas tecnológicas para produção de SAF em diferentes regiões do mundo. No entanto, há algumas rotas que não foram exploradas. Nesse sentido, alguns estudos têm utilizado a metodologia do CORSIA para estimar as emissões de GEE dessas rotas de produção e de rotas já estabelecidas para fins de comparação com os valores-padrão. Algumas dessas pesquisas foram realizadas considerando a geração de SAF para países como os Estados

¹³ As emissões de GEE são calculadas em termos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Unidos (De Jong *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2021; Taheripour, Sajedinia; Karami, 2022), a China (Zhang *et al.*, 2023), a Holanda (Moretti *et al.*, 2022) e a União Europeia (Zhao *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, a literatura também tem direcionado esforços para estimar as emissões de GEE oriundas da produção de SAF. De Jong *et al.* (2017) realizaram um estudo que avaliou o ciclo de vida das emissões de algumas rotas de produção de SAF com base no modelo de Gases de Efeito Estufa, Emissões Regulamentadas e Uso de Energia nos Transportes (GREET, do inglês *Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*), desconsiderando as emissões ILUC. Para o Brasil, os autores consideraram a rota de produção de SAF fruto da combinação da tecnologia Álcool para Jato (ATJ, do inglês *Alcohol to Jet*) e da cana-de-açúcar como matéria-prima, que apresentou emissões no valor de 31 gCO₂eMJ⁻¹.

Carvalho (2017) estimou as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida do SAF por meio do modelo GREET, com adaptações para o Brasil. Além das emissões LCA, os autores estimaram as emissões de Mudanças Diretas do Uso da Terra (DLUC, do inglês *Direct Land Use Change*) no Cerrado brasileiro. O SAF produzido pelo processo de conversão FT usando os resíduos de madeira apresentou menores emissões de GEE (4,72 gCO₂eMJ⁻¹) do que o SAF produzido pela via HEFA usando óleo de soja (40,9 gCO₂eMJ⁻¹).

Klein *et al.* (2018) conduziram um estudo que realizou uma análise técnico-econômica e ambiental abordando diversas rotas de produção de SAF a partir de distintas matérias-primas em biorrefinarias integradas com destilarias de etanol. Os autores consideram essas biorrefinarias como sendo autossuficientes, caracterizadas pela independência de fornecimento externo de energia, dependendo exclusivamente de matérias-primas como bagaço e palha de cana-de-açúcar, eucalipto e óleos vegetais.

O estudo de Klein *et al.* (2018) investigou três rotas de produção, selecionadas com base em sua relevância global e potencial de implementação em grande escala no cenário brasileiro: Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Graxos (HEFA, do inglês *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) para óleo de palma, macaúba e soja, Síntese de Fischer-Tropsch (FT) para resíduos de cana-de-açúcar e eucalipto, e ATJ para a conversão de etanol e isobutanol em SAF. Os autores utilizaram a metodologia de LCA para calcular o impacto ambiental da produção de SAF por cada rota tecnológica, sem levar em conta as emissões ILUC.

Os resultados encontrados por Klein *et al.* (2018) apresentaram desempenho ambiental superior em comparação ao combustível fóssil de aviação, o qual possui emissões de 89 gCO₂eMJ⁻¹. As

emissões do SAF produzido por meio da tecnologia FT foram de 9,3 gCO₂eMJ⁻¹ quando se emprega cana-de-açúcar e de 9,4 gCO₂eMJ⁻¹ ao utilizar material lignocelulósico de eucalipto e de cana-de-açúcar (MLEC). As emissões das rotas HEFA foram de 22,3 gCO₂eMJ⁻¹ para óleo de palma, 17,3 gCO₂eMJ⁻¹ para óleo de macaúba e 16,9 gCO₂eMJ⁻¹ para óleo de soja. As rotas ATJ de etanol apresentaram emissões de 20,7 gCO₂eMJ⁻¹ para cana-de-açúcar e de 24,8 gCO₂eMJ⁻¹ para combinação de cana-de-açúcar e resíduos de cana-de-açúcar. Já a rota ATJ isobutanol para cana-de-açúcar apresentou emissões de 17,7 gCO₂eMJ⁻¹. Os autores sugerem que a produção de SAF baseada na macaúba poderia ser realizada em Minas Gerais, enquanto o estado de São Paulo poderia contar com rotas FT e o Sul do Brasil com soja e outras matérias-primas.

Sem considerar também as emissões ILUC, Vásquez *et al.* (2019) realizaram uma análise comparativa LCA para avaliar o impacto das emissões de dois casos propostos para produção de SAF por meio da tecnologia HEFA, utilizando o óleo de palma e o óleo de soja. Os autores consideraram a produção dessas matérias-primas em regiões estratégicas do Brasil, com a produção de óleo de palma planejada para as regiões Norte e Nordeste do país, enquanto a produção de óleo de soja seria realizada na região Sul. Os resultados mostram que, no cenário convencional, com o uso de hidrogênio fóssil, as emissões oriundas de SAF produzido com o óleo de palma (14,2 gCO₂eMJ⁻¹) são inferiores às emissões do SAF produzido com o óleo de soja (40,1 gCO₂eMJ⁻¹). No cenário que incorpora o hidrogênio renovável no processo de produção, essas emissões são reduzidas, passando a ser de 4,8 gCO₂eMJ⁻¹ e 33,9 gCO₂eMJ⁻¹, respectivamente.

Capaz *et al.* (2021) conduziram uma avaliação LCA para doze possíveis rotas de produção de SAF no Brasil, compreendendo matérias-primas promissoras – como soja, palma, cana-de-açúcar, resíduos de cana-de-açúcar, resíduos florestais, óleo de cozinha usado, sebo bovino e gases residuais de aço – e tecnologias aprovadas pela ASTM: HEFA, ATJ e FT. Nesse estudo, todas as vias analisadas apresentaram desempenho dentro dos critérios do CORSIA, com destaque para as seguintes rotas: FT-resíduos florestais (2,4 gCO₂eMJ⁻¹), FT-cana-de-açúcar (3,9 gCO₂eMJ⁻¹), HEFA-óleo de cozinha usado (17,2 gCO₂eMJ⁻¹) e HEFA-sebo (18,5 gCO₂eMJ⁻¹). Os autores, contudo, sugerem como alternativa preferida no curto prazo o SAF gerado a partir da via ATJ-cana-de-açúcar (44,7 gCO₂eMJ⁻¹) devido ao potencial de fornecimento e à mitigação de emissões. Capaz *et al.* (2021) colocam o SAF gerado de resíduos florestais e sebo como alternativas estratégicas de longo prazo.

Em linha com as diretrizes do CORSIA, (Capaz *et al.* (2021b) estimaram a pegada de carbono de dez rotas de produção de SAF, considerando as mesmas matérias-primas e tecnologias de conversão adotadas em Capaz *et al.* (2021a). Sob o esquema regulatório do CORSIA, os autores encontraram que as rotas viáveis de produção de SAF no Brasil são: cana-de-açúcar-FT (2,5 gCO₂eMJ⁻¹); resíduos de cana-de-açúcar-FT (3,5 gCO₂eMJ⁻¹); sebo bovino-HEFA (13,5 gCO₂eMJ⁻¹); óleo de cozinha usado-HEFA (20,1 gCO₂eMJ⁻¹); resíduos de cana-de-açúcar-ATJ (22,5 gCO₂eMJ⁻¹); resíduos florestais-ATJ (24,3); cana-de-açúcar-ATJ (43,8 gCO₂eMJ⁻¹); óleo de soja-HEFA (71,1 gCO₂eMJ⁻¹) e óleo de palma-HEFA (71,8 gCO₂eMJ⁻¹).

Diferente dos estudos de De Jong *et al.* (2017), Carvalho (2017), Klein *et al.* (2018) e Vásquez *et al.* (2019), os estudos de Capaz *et al.* (2021a) e Capaz *et al.* (2021b) mostram poucos ganhos em termos de pegada de carbono para a tecnologia HEFA envolvendo o óleo de soja e o óleo de palma. O valor elevado da pegada de carbono para essas rotas tecnológicas se deve principalmente à contabilidade das emissões ILUC, que responde em ambos os estudos a 38% e 55,5% das emissões de GEE, respectivamente. De modo geral, os autores apontam que as potenciais reduções de GEE para vias que usam matérias-primas de segunda geração tendem a ser superiores às vias que usam insumos de primeira, uma vez que a carga da fase a montante é normalmente ignorada para vias baseadas em resíduos e os resíduos são normalmente considerados livres.

Zhao *et al.* (2021) conduziram um amplo estudo sobre emissões ILUC em dezessete rotas distintas de produção de SAF, considerando cinco tecnologias de conversão, nove matérias-primas derivadas de biomassa e quatro regiões geográficas. Para isso, os autores incorporaram as rotas de produção de SAF em um modelo de equilíbrio geral computável (EGC), o *Global Trade Analysis Project-Biofuel* (GTAP-BIO), empregando uma versão que contabiliza as emissões, denominada AEZ-EF. A seleção das matérias-primas de uma determinada região baseia-se na vantagem comparativa local ou no potencial futuro de produção. Zhao *et al.* (2021) ajustaram a magnitude dos choques no modelo com base nas metas de produção de SAF projetadas pelo CORSIA para o ano de 2035.

Os resultados obtidos por Zhao *et al.* (2021) revelam que a intensidade média de emissões ILUC é de -22,6 gCO₂eMJ⁻¹ para as sete rotas que empregam material celulósico, 16,4 gCO₂eMJ⁻¹ para as seis que usam amido e açúcares e de 24,4 gCO₂eMJ⁻¹ para as quatro que utilizam óleos vegetais. Das rotas de produção de SAF investigadas, as intensidades de emissões ILUC para o Brasil são: cana-de-açúcar-ATJ (isobutanol) (7,4 gCO₂eMJ⁻¹), cana-de-açúcar-ATJ (etanol) (9

gCO₂eMJ⁻¹), cana-de-açúcar-SIP (14,2 gCO₂eMJ⁻¹) e óleo de soja-HEFA (22,5 gCO₂eMJ⁻¹). Quando Zhao *et al.* (2021) consideram as emissões do ciclo de vida completo, que é a soma das emissões ILUC e das emissões básicas do LCA, definidas no CORSIA, as emissões das rotas de produção de SAF para o Brasil são: cana-de-açúcar-ATJ (isobutanol) (31,4 gCO₂eMJ⁻¹), cana-de-açúcar-ATJ (etanol) (33,1 gCO₂eMJ⁻¹), cana-de-açúcar-SIP (47 gCO₂eMJ⁻¹) e óleo de soja-HEFA (62,9 gCO₂eMJ⁻¹). De maneira geral, constata-se que a matéria-prima utilizada exerce a influência mais significativa na variação da intensidade de emissões ILUC em relação à tecnologia (Zhao *et al.*, 2021).

Vicente (2022) analisou as emissões de GEE e as emissões ILUC da produção de SAF no Brasil. Para isso, a autora calculou o potencial técnico de culturas energéticas específicas (cana-de-açúcar, milho, palma, soja e macaúba), em seguida realizou uma LCA atributiva de cada uma das culturas selecionadas e, por fim, quantificou os efeitos da mudança direta do uso da terra. Esse cálculo preenche uma lacuna do CORSIA que apresenta valores das emissões ILUC para o Brasil apenas para as rotas cana-de-açúcar-ATJ (isobutanol e etanol), cana-de-açúcar-SIP, óleo de carinata-HEFA e óleo de soja-HEFA. Sem considerar os efeitos das emissões DLUC, Vicente (2022) encontrou que todas as rotas avaliadas apresentam valores de emissão de CO₂ inferiores aos do combustível fóssil (89 gCO₂eMJ⁻¹).

Quando Vicente (2022) considera as emissões totais do ciclo de vida, as rotas com potencial de certificação para produção de SAF no Brasil e suas emissões médias (entre parênteses) são: cana-de-açúcar-ATJ no cerrado (52,2 gCO₂eMJ⁻¹) e nas pastagens (23,8 gCO₂eMJ⁻¹); milho-ATJ nas pastagens (42,8 gCO₂eMJ⁻¹); óleo de soja-HEFA nas pastagens (23,2 gCO₂eMJ⁻¹); óleo de palma-HEFA em determinadas áreas da Floresta Amazônica (28,2 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e 8,5 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano) e nas pastagens (45,6 gCO₂eMJ⁻¹); macaúba-HEFA em determinadas áreas da Floresta Amazônica (54,6 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e baixa produtividade, 36,5 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e baixa produtividade, 26,4 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e alta produtividade e 8,2 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e alta produtividade), na Caatinga (52,5 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e baixa produtividade, 34,4 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e baixa produtividade, 30,4 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e alta produtividade e 12,2 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e alta produtividade), no Cerrado (56,3 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e baixa produtividade, 38,2 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e baixa produtividade, 29,1 gCO₂eMJ⁻¹ sem captura de metano e alta produtividade e 10,9 gCO₂eMJ⁻¹ com 85% de captura de metano e alta produtividade) e nas pastagens (60,2

$\text{gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ sem captura de metano e baixa produtividade, $42,1 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ com 85% de captura de metano e baixa produtividade, $23,8 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ sem captura de metano e alta produtividade e $5,6 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ com 85% de captura de metano e alta produtividade).

Os resultados encontrados por Vicente (2022) sugerem que a produção de SAF só é, ambientalmente, viável em áreas específicas do país, em que pese a grande disponibilidade de terra. Todas as rotas analisadas mostraram potencial para produção e certificação de SAF quando o cultivo de matéria-prima se dá em terras convertidas de áreas de pastagens. Por fim, as regiões Sudeste e Centro-Oeste são as que apresentam maior potencial de produção de SAF (Vicente, 2022).

Fiorini *et al.* (2023) avaliaram as implicações das emissões ILUC de quatro rotas distintas de produção de SAF no Brasil: cana-de-açúcar-ATJ, milho-ATJ, palma-HEFA e macaúba-HEFA por meio do modelo integrado de avaliação do Sistema Brasileiro de Uso da Terra e Energia (BLUES, do inglês *Brazilian Land Use and Energy Systems*). Os resultados encontrados mostram uma grande variação nas emissões ILUC, variando de $-298 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ a $15 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$. Fiorini *et al.* (2023) destacam que as emissões ILUC são muito sensíveis às taxas de desmatamento, à quantidade de SAF produzida e à matéria-prima utilizada. Em um cenário de desmatamento ilegal zero após 2028, com mistura de 50% de SAF ao combustível de aviação, as emissões acumuladas ILUC em 2050 são $-37,4$, $-23,5$, $-13,7$, $-4,3$ e $-13,6 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ para milho-ATJ (etanol) (milho como uma cultura de segunda colheita), cana-de-açúcar-ATJ (etanol), óleo de palma-HEFA, óleo de macaúba-HEFA (baixa produtividade) e macaúba-HEFA (alta produtividade), respectivamente.

Embora Fiorini *et al.* (2023) não tenham calculado as emissões totais do ciclo de vida dos SAF produzidos pelas rotas consideradas no estudo, é possível efetuar tal cálculo com base nos resultados-padrão do CORSIA (OACI, 2022b). Assim, as emissões das rotas milho-ATJ e cana-de-açúcar-ATJ são, respectivamente, $28,3$ e $0,9 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$. No caso da rota de óleo de palma-HEFA com 85% de captura de metano e sem captura de metano, as emissões são de $23,7$ e $46,3 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$. Em relação à rota óleo de macaúba-HEFA, o CORSIA não fornece valores específicos de emissões dos GEE. Portanto, para calcular as emissões totais do LCA com base nas emissões ILUC encontradas por Fiorini *et al.* (2023), é possível utilizar o valor das emissões básicas do LCA calculado por Vicente (2022). Isso resulta em emissões de $49,4 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ e $67,5 \text{ gCO}_2\text{eMJ}^{-1}$ para a rota óleo de macaúba-HEFA (baixa produtividade) com 85% de captura de metano e sem captura de metano, respectivamente. Já a via óleo de macaúba-HEFA (ala

produtividade), com 85% de captura de metano e sem captura de metano, resulta em emissões de 21,9 gCO₂eMJ⁻¹ e 39,8 gCO₂eMJ⁻¹, nesta ordem.

Fiorini *et al.* (2023) apontam que, em um primeiro momento, a produção de SAF ficaria restrita às regiões Sudeste (cana-de-açúcar, macaúba e milho), Centro-Oeste (milho segunda safra) e Nordeste (palma), com posterior expansão para áreas menos produtivas nas regiões Centro-Oeste e Norte do país. A produção de SAF em larga escala no Brasil só desempenha um papel importante na descarbonização do setor de aviação nacional e apoia o CORSIA da OACI se for combinada com estratégias de combate ao desmatamento no país (Fiorini *et al.*, 2023).

O Quadro 4 resume os dados apresentados até aqui para o Brasil. O CORSIA determina, entre outros critérios, que as emissões líquidas de GEE de um combustível SAF devem ser, no mínimo, 10% menores do que o valor das emissões do combustível fóssil de aviação. Desse modo, o SAF deve apresentar emissões totais do ciclo de vida de, no máximo, 80,1 gCO₂eMJ⁻¹. No caso das matérias-primas que são resíduos vegetais ou animais (resíduos florestais, resíduos de cana-de-açúcar, óleo de cozinha usado, sebo, MLEC) não há valores para emissões ILUC e/ou DLUC, já que esses materiais não requerem mudança de uso da terra. O CORSIA calcula e disponibiliza os valores de emissões de GEE para o ciclo de vida básico do combustível e para as emissões ocasionadas por mudanças do uso da terra. Neste último caso, há valores discriminados por rota tecnológica e região produtora de SAF, tendo em vista que as emissões ILUC podem variar conforme varia a localidade.

No Quadro 4, todos os valores de emissões ILUC cuja referência é o CORSIA são específicos para o Brasil, exceto para o óleo de palma¹⁴. O CORSIA não apresenta valores de emissões do ciclo de vida básico nem das emissões ILUC para as rotas que envolvem o óleo de macaúba e os resíduos de cana-de-açúcar. Alguns estudos apresentados - De Jong (2017), Carvalho (2017), Klein *et al.* (2018), Vásquez *et al.* (2019) - não realizaram cálculo para as emissões ILUC. Enquanto outros não o fizeram para as emissões do ciclo de vida básico, como Fiorini *et al.* (2023). Nesses casos, na coluna total de emissões, foram somados às emissões de cada estudo o valor faltante conforme dados disponibilizados pelo CORSIA. No caso das rotas envolvendo o óleo de palma e o óleo de macaúba, os valores somados vieram dos estudos de Vicente (2022) e de Fiorini *et al.* (2023), como mostrado na coluna de referências.

¹⁴ Para a rota HEFA-óleo de palma, o valor de emissões ILUC é o calculado para Malásia e Indonésia.

Quadro 4 – Emissões totais de GEE (gCO₂eMJ⁻¹) geradas pelo SAF no Brasil

Matéria-prima	Conversão	Emissões LCA	Emissões ILUC	Total de emissões	Referências
Cana-de-açúcar	SIP	32,8 32,8	11,3 14,2	44,1 47	CORSIA Zhao <i>et al.</i> (2021)
Cana-de-açúcar e melaço	ATJ (isobutanol)	24 17,7 24	7,3 7,3 7,4	31,3 25 31,4	CORSIA Klein <i>et al.</i> (2018) + CORSIA Zhao <i>et al.</i> (2021)
Cana-de-açúcar	ATJ (etanol)	24,1 31 20,7 36 35,1 24,1 22,4 24,1	8,7 8,7 8,7 8,7 8,7 9 0,4 a 29,8 -23,5	32,8 39,7 29,4 44,7 43,8 33,1 23,8 a 42,2 0,9	CORSIA De Jong (2017) + CORSIA Klein <i>et al.</i> (2018) + CORSIA Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b) Zhao <i>et al.</i> (2021) Vicente (2022) Fiorini <i>et al.</i> (2023) + CORSIA
Cana-de-açúcar e seus resíduos	ATJ (etanol)	24,8 27,6 22,5	- - -	24,8 27,6 22,5	Klein <i>et al.</i> (2018) Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b)
Grão de milho	ATJ (etanol)	65,7 39,5 65,7	34,9 3,5 -37,4	100,6 43 28,3	CORSIA Vicente (2022) Fiorini <i>et al.</i> (2023) + CORSIA
Resíduos Florestais	FT	8,3 4,7 2,4 3,5	- - - -	8,3 4,7 2,4 3,5	CORSIA Carvalho (2017) Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b)
Resíduos de cana-de-açúcar	FT	9,3 3,9 2,5	- - -	9,3 3,9 2,5	Klein <i>et al.</i> (2018) Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b)
MLEC	FT	10,4 9,4	- -	10,4 9,4	CORSIA Klein <i>et al.</i> (2018)
Óleo de soja	HEFA	40,4 40,9 16,9 40,1 42,9 44,1 40,4 20,1	27 27 27 27 27 27 22,5 3,1	67,4 67,9 43,9 67,1 69,9 71,1 62,9 23,2	Carvalho (2017) + CORSIA Klein <i>et al.</i> (2018) + CORSIA Vásquez <i>et al.</i> (2019) + CORSIA Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b) Zhao <i>et al.</i> (2021) Vicente (2022)
Óleo de palma	HEFA	37,4 e 60 22,3 14,2 34,4 32,7 28,6 a 48,3 37,4 e 60	39,1 39,1 39,1 39,1 39,1 -39,9 a -3,4 -13,7	76,5 e 99,1 61,4 53,3 73,5 71,8 8,5 a 45,6 23,7 e 46,3	Klein <i>et al.</i> (2018) + CORSIA Vásquez <i>et al.</i> (2019) + CORSIA Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b) Vicente (2022) Fiorini <i>et al.</i> (2023) + CORSIA
Óleo de macaúba	HEFA	17,3 35,5 a 71,8 35,5 a 71,8	-13,6 e -4,3 -24,6 a -8,8 -13,6 a -4,3	3,7 e 13 5,6 a 60,2 21,9 a 67,5	Klein <i>et al.</i> (2018) + Fiorini <i>et al.</i> (2023) Vicente (2022) Fiorini <i>et al.</i> (2023) + Vicente (2022)
Sebo	HEFA	22,5 18,5 13,5	- - -	22,5 18,5 13,5	CORSIA Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b)
Óleo de cozinha usado	HEFA	13,9 17,2 20,1	- - -	13,9 17,2 20,1	CORSIA Capaz <i>et al.</i> (2021a) Capaz <i>et al.</i> (2021b)

Fonte: Elaboração própria.

Em termos de desempenho ambiental, isto é, potencial de redução de emissões de GEE, as rotas de produção de SAF cujo processo de conversão empregado é a tecnologia FT apresentaram os menores resultados de emissões totais independentemente da matéria-prima utilizada, com valores de 2,4 a 10,4 gCO₂eMJ⁻¹. Em seguida, destacam-se as rotas HEFA que utilizam sebo e óleo usado de cozinha com emissões totais variando de 13,5 a 22,5 gCO₂eMJ⁻¹. O SAF produzido via ATJ (etanol) a partir da cana-de-açúcar e seus resíduos também apresentou baixo impacto ambiental com emissões entre 22,5 e 27,6 gCO₂eMJ⁻¹. Essas rotas de produção de SAF apresentam esses valores baixos porque suas emissões ILUC são zero.

Ao analisar as rotas tecnológicas de produção de SAF que apresentam emissões ILUC, verifica-se no Quadro 4 que as rotas ATJ-etanol e ATJ-isobutanol são as que emitem menos GEE, variando de 0,9 a 44,7 gCO₂eMJ⁻¹. As rotas que utilizam óleo de soja e óleo de palma são as que, de modo geral, mais emitem GEE, situando-se normalmente acima de 60 gCO₂eMJ⁻¹. O SAF produzido a partir do milho também não apresenta bom desempenho ambiental nas estimativas do CORSIA.

Os estudos de Vicente (2022) e Fiorini *et al.* (2023) que calcularam as emissões de óleo de palma e de óleo de macaúba para o Brasil apresentam resultados promissores para a produção de SAF utilizando essas matérias-primas, a depender da localidade em que elas são produzidas. Com base nos estudos apresentados neste capítulo e em consonância com os critérios do CORSIA, é possível identificar cinco potenciais rotas de produção de SAF para o Brasil. Duas delas utilizam biomassa de primeira geração: (i) ATJ a partir de etanol de cana-de-açúcar (CAN/ATJ) e (ii) HEFA a partir de óleo de soja (OS/HEFA). As outras três rotas se baseiam em biomassa de segunda geração: (iii) ATJ a partir de resíduos de cana-de-açúcar (RCAN/ATJ), (iv) HEFA a partir de sebo bovino (SB/HEFA) e (v) FT a partir de resíduos florestais (RF/FT). Ressalta-se que os combustíveis gerados pelas cinco rotas analisadas são considerados SAF, uma vez que atendem aos critérios ambientais estabelecidos pelo CORSIA, que estão detalhados no Anexo A.

5.2 Viabilidade técnico-econômica da produção de SAF

Quando se trata da comercialização de SAF, seu desempenho econômico é uma métrica tão importante quanto sua viabilidade ambiental (Watson *et al.*, 2024). Klein *et al.* (2018) realizaram uma análise da viabilidade econômica por meio da estimativa do Preço Mínimo de Venda (PMV) do SAF produzido a partir de oito rotas tecnológicas distintas. Para calcular o

preço do litro do combustível de aviação convencional, os autores consideraram o preço do barril de petróleo fornecido pela Agência de Informação de Energia dos Estados Unidos (EUA). Os cenários de preços para o barril de petróleo foram: US\$ 40, US\$ 70 e US\$ 100, a serem transportados da Costa do Golfo dos EUA até o Porto de Santos, no estado de São Paulo, Brasil. Assim, os preços do combustível de aviação associados foram de 0,33 USD/l, 0,55 USD/l e 0,76 USD/l, respectivamente.

Ao analisarem as diversas rotas de produção de SAF, Klein *et al.* (2018) observaram que os cenários de produção via FT apresentaram os PMVs mais favoráveis: -0,22 USD/l ao utilizar material lignocelulósico de cana-de-açúcar e 0,36 USD/l ao empregar material lignocelulósico de eucalipto e cana-de-açúcar. As rotas HEFA, utilizando óleo de macaúba, óleo de palma e óleo de soja, apresentaram os seguintes PMVs: 0,59 USD/l, 0,74 USD/l e 0,77 USD/l, respectivamente. Por sua vez, as rotas ATJ de etanol obtiveram PMVs de 0,87 USD/l para cana-de-açúcar e 1,17 USD/l para a combinação de cana-de-açúcar e resíduos de cana-de-açúcar. Já a rota ATJ isobutanol para cana-de-açúcar apresentou PMV de 0,68 USD/l. Com base no nível de 2016 de US\$ 40 por barril de petróleo, apenas o cenário FT, utilizando material lignocelulósico de cana-de-açúcar, apresentou PMV inferior ao preço de venda do combustível de aviação convencional. Por fim, Klein *et al.* (2018) mostram que mesmo o barril de petróleo custando US\$ 70, apenas os SAF produzidos pelas rotas FT apresentariam PMV inferior ao combustível fóssil.

Em seu estudo sobre viabilidade do SAF, Capaz *et al.* (2021a) também estimaram o preço mínimo de venda (PMV) desses biocombustíveis. Em linhas gerais, os autores constataram que nenhuma das 12 rotas tecnológicas analisadas apresentou um preço competitivo em relação ao querosene fóssil. O PMV dos SAF variou entre 26,7 e 44,6 USD/GJ, enquanto o querosene fóssil manteve uma média de preço de 15,8 USD/GJ durante o período de 2017 a 2019 no Brasil.

Os preços mínimos de venda registrados para os SAF produzidos pelas rotas cana-de-açúcar-ATJ, óleo de palma-HEFA e óleo de soja-HEFA foram de 33,7 USD/GJ, 34,5 USD/GJ e 36,4 USD/GJ, respectivamente. Nesses cenários, Capaz *et al.* (2021a) destacam que os custos associados à matéria-prima desempenham um papel preponderante na composição do preço final do SAF, com percentuais de 43% para o biocombustível proveniente do óleo de soja e 32% para o biocombustível derivado do óleo de palma e da cana-de-açúcar. Os valores mais baixos foram observados para as rotas tecnológicas que empregam óleo de cozinha usado-

HEFA (26,7 USD/GJ) e resíduos florestais-FT (32,4 USD/GJ). Enquanto isso, a rota de resíduos lignocelulósicos de cana-de-açúcar-ATJ apresentou o maior valor, atingindo 44,6 USD/GJ.

Walter *et al.* (2021) realizaram uma avaliação da viabilidade econômica da produção de SAF no Brasil, considerando três rotas certificadas que se baseiam na produção de eucalipto, soja, cana-de-açúcar e milho, em locais selecionados. O PMV do SAF, no cenário de referência, foi estimado em 13,4 EUR/GJ para a rota óleo de soja-HEFA, 21 EUR/GJ para a rota ATJ baseada em etanol da cana-de-açúcar e do milho, e 32 EUR/GJ para a rota eucalipto-FT. O PMV do SAF produzido utilizando a tecnologia FT é mais que o dobro do que aquele que utiliza a ATJ e cerca de 50% do originado pela HEFA, principalmente devido aos baixos custos das matérias-primas (óleo de soja e etanol do milho e da cana-de-açúcar) em comparação com seus custos de oportunidade. Os autores ressaltam que, embora os resultados para o PMV sejam relativamente baixos em comparação com as estimativas disponíveis na literatura, eles não demonstram a viabilidade econômica dos SAF no curto e médio prazo, principalmente devido aos baixos preços dos combustíveis fósseis.

Por sua vez, Montoya (2021) avaliou os impactos econômicos e sociais da introdução de um mandato de 5% de biocombustíveis na aviação doméstica em 2030. O autor utilizou dados do setor aéreo de 2002 a 2018 e aplicou modelos econométricos para prever o consumo de combustível e o tráfego de passageiros entre 2019 e 2030. Montoya (2021) calculou os preços do biocombustível de aviação derivado da soja (4,79 R\$/l), do eucalipto (7,22 R\$/l) e da cana-de-açúcar (8,37 R\$/l), e concluiu que apenas a produção a partir da soja tem potencial de gerar benefícios sociais.

Guarenghi *et al.* (2022) também calcularam o PMV do SAF, com base nos preços de 2018, produzido pela rota tecnológica óleo de soja-HEFA. Para isso, os autores estimaram as áreas ainda disponíveis para expansão da cultura da soja no Brasil, levando em consideração as restrições impostas, necessárias para garantir a sustentabilidade dos biocombustíveis de aviação. No caso em que apenas a soja é cultivada, os PMVs do SAF foram de 12,87 EUR/GJ na cidade de Parnaíba (MS) e de 12,93 EUR/GJ em Presidente Venceslau (SP). Quando o cultivo de soja é combinado com o de milho, esses PMVs caem para 9,66 EUR/GJ e 9,90 EUR/GJ, respectivamente. Por fim, quando há uma combinação da produção de SAF entre essas duas localidades, o PMV é de 12,13 EUR/GJ.

5.3 Impactos econômicos

As duas seções anteriores apresentaram uma série de estudos que trata da viabilidade ambiental e técnico-econômica da produção de SAF no Brasil a partir de diferentes matérias-primas e tecnologias de conversão. Em se tratando dos estudos sobre os impactos econômicos da adoção de SAF no país, a literatura ainda é escassa. Por esse motivo, esta seção abordará também estudos para outras localidades, buscando dar enfoque aqueles que utilizam modelo de equilíbrio geral.

Winchester *et al.* (2015) analisaram os impactos econômicos e de emissões decorrentes da meta de uso de combustíveis alternativos de aviação estabelecida pela Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos. À época, como o CORSIA ainda não estava em vigor, o biocombustível produzido a partir de gramíneas não era classificado como SAF. Os autores utilizaram um modelo de EGC e estimaram que a introdução de 350 milhões de galões anuais de biocombustível na aviação comercial, a partir de 2020, resultaria em perdas de PIB entre 0,33% e 0,46% em 2030 a depender do cenário considerado. A receita da aviação civil, por sua vez, diminuiria entre 2,3% e 3,6% e a demanda por QAV entre 2,5% e 3,8%. As emissões apresentariam uma redução entre 1,3% e 3,8% conforme cenário analisado.

Wang *et al.* (2019) avaliaram os principais efeitos socioeconômicos relacionados à produção de SAF sobre o emprego, o Produto Interno Bruto (PIB) e a balança comercial do Brasil para 2050. Os autores consideram quatro cenários para a produção de biocombustíveis de aviação, a partir de diferentes rotas tecnológicas de produção e matérias-primas, a saber: cana-de-açúcar-ATJ, eucalipto-ATJ e macaúba-HEFA. Para cada cenário, Wang *et al.* (2019) estimaram uma demanda de biocombustível de aviação, que posteriormente foi utilizada como choque em uma análise de Insumo-Produto (I-P) tanto determinística quanto estocástica.

Wang *et al.* (2019) utilizaram a matriz de I-P brasileira de 2010 que não possui o setor de biocombustível de aviação desagregado. Em decorrência disso, os autores criaram, então, um setor denominado “biocombustível de aviação” para aplicar o choque de demanda em cada cenário proposto. Os resultados do estudo apontam para efeitos socioeconômicos significativos sobre o emprego e o PIB. De modo geral, a rota macaúba-HEFA se mostrou a opção mais favorável entre os cenários analisados, apesar da incerteza associada a sua produção, podendo gerar até 19 mil novos postos de trabalho e um acréscimo de até US\$ 156 milhões no PIB nacional.

Assim como Winchester *et al.* (2015), Mueller, Winter e Grote (2024) também utilizaram um modelo EGC para avaliar os impactos do uso de SAF na Alemanha. Os autores analisaram os impactos econômicos da introdução de cotas de mistura de combustível sintético (*Power to Liquid* – PtL), que é um tipo de SAF, na aviação alemã em 2030 e em 2040, considerando tanto a produção quanto a utilização desses combustíveis em um modelo de equilíbrio geral computável estático. Além disso, os autores avaliaram os efeitos de uma política de preços que consiste em um imposto sobre o querosene de aviação (90% em 2030 e 120% em 2040) e subsídios (50% em ambos os anos) ao combustível PtL.

Mueller, Winter e Grote (2024) encontraram resultados que mostram, na ausência de política de preços e considerando uma cota de mistura de 10%, em 2030, um aumento nos preços ao consumidor do setor de aviação de 7,9% e uma queda de 3,1% na produção do setor em comparação ao cenário-base. Ao considerar a presença da política de preços, os preços ao consumidor aumentam 19,7% e o produto cai 7,1%. Mueller, Winter e Grote (2024) destacam que à medida que as cotas aumentam, os custos no setor de transporte aéreo se elevam e sua produção cai. Além disso, os autores apresentam resultados para o PIB, que registra perdas entre 0,23% e 0,35% a depender da cota e da política adotadas. De modo geral, dos cenários testados por Mueller, Winter e Grote (2024), o de menor impacto socioeconômico é aquele em que há a presença apenas dos subsídios à produção de SAF.

Jiang e Yang (2021), diferentemente dos estudos anteriores, construíram um modelo teórico para comparar duas políticas relacionadas às emissões da indústria da aviação: imposto de carbono e mandato de SAF. Os autores definiram dois objetivos políticos, que são orientados para as emissões: controlar a emissão total esperada sob um determinado nível e maximizar o nível de bem-estar social esperado. Quanto maior for a meta de emissões, maior a probabilidade de que o mandato de SAF supere a política de imposto de carbono no controle de emissões e no nível de bem-estar (Jiang e Yang, 2021). O resultado desse modelo indica que o projeto de lei do Governo Federal, que visa reduzir emissões via uso de SAF, pode ser eficaz tanto para reduzir as emissões de CO₂ do setor aéreo quanto para promover bem-estar social.

De modo geral, verifica-se que a literatura sobre SAF está ainda muito focada em análises de viabilidade ambiental e técnica. Isso pode se justificar pelo fato de o incremento de SAF como combustível de aviação ser ainda recente. Os estudos sobre os impactos que a adoção de SAF pode provocar na economia estão ganhando espaço apenas agora nessa literatura.

6 ESTRATÉGIA EMPÍRICA

Este capítulo descreve o desenvolvimento de cinco modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), desenvolvidos nesta Tese, para avaliar os impactos econômicos e ambientais da substituição de QAV por SAF no setor aéreo brasileiro, no âmbito da Lei do Combustível do Futuro (LCF) e do Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, do inglês *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Esses modelos são genericamente denominados de Modelo Brasileiro de Combustível Sustentável de Aviação (SAFBR, do inglês *Brazilian Sustainable Aviation Fuel*). Cada modelo SAFBR apresenta uma estrutura baseada no modelo ORANIG-RD (Horridge, Parmenter e Pearson, 1998), que inclui os mecanismos intertemporais, e tem acoplado um módulo ambiental que contabiliza as emissões de dióxido de carbono (CO₂) por agente emissor e atividade econômica, conforme o modelo MMRF-Green (Adams, Horridge; Parmenter, 2000). E, assim como nos estudos de Cardoso (2016), Proque (2019) e Betarelli Junior *et al.* (2021), os modelos SAFBR possuem a Matriz de Contabilidade Social (MCS), calibrada para o ano de 2015, o que permite ao modelo capturar os fluxos de renda e de pagamentos entre os agentes econômicos, similar ao modelo PHILGEM-RD (Corong, 2014).

O desenvolvimento dos modelos SAFBR é requerido, pois a substituição de QAV por SAF implica o surgimento de uma nova cadeia produtiva. Seu uso pelo setor aéreo tem potencial de repercutir por toda a economia, dadas as interações (oferta e demanda) entre os setores produtivos, afetando decisões de produção, investimento e consumo. Nesse sentido, apenas uma estrutura de equilíbrio geral de toda a economia, em que a demanda e a oferta de cada *commodity* dependem de todos os preços relativos, é capaz de capturar totalmente o efeito dessas interações (Bandara, 1991). Assim sendo, a modelagem EGC se mostra como caminho metodológico adequado para acomodar o problema de pesquisa deste estudo (Bandara, 1991; Dixon; Parmenter, 1996; Devarajan; Robinson, 2005).

Dessa maneira, este capítulo se divide em cinco seções. A primeira seção aborda os aspectos gerais dos modelos EGC e como os modelos SAFBR se inserem neste grupo. A seção seguinte detalha a construção da estrutura de custo de cada uma das cinco rotas de produção de SAF analisadas neste estudo. A terceira seção, por sua vez, discorre sobre a estrutura teórica do SAFBR. Em seguida, a quarta seção apresenta os parâmetros e os dados utilizados na calibragem do modelo. A quinta seção descreve os cenários de simulação. Por fim, a sexta seção apresenta a metodologia de cálculo para os custos de abatimento do SAF.

6.1 Modelos de EGC e aspectos gerais dos modelos SAFBR

Os modelos de EGC são baseados na tradição *Walrasiana*¹⁵ e descrevem a alocação de recursos em uma economia de mercado como resultado da interação entre oferta e demanda, levando a preços de equilíbrio (Borges, 1986). Nesses modelos, a economia funciona como um sistema de mercados interdependentes, em que o equilíbrio de todas as variáveis deve ser determinado simultaneamente (Domingues, 2002; Haddad, 2004; Perobelli, 2004). Diante dessa estrutura teórica, qualquer mudança exógena que perturbe o equilíbrio dos mercados leva a uma alteração endógena dos preços relativos e das quantidades (Almeida, 2003; Perobelli, 2004).

A formalização do sistema de equações dos modelos de equilíbrio geral foi realizada por Arrow e Debreu (1954). Os autores provaram que há um equilíbrio na economia por meio de um modelo integrado de produção e consumo que leva em conta o fluxo circular da renda. As simulações a partir dos modelos de EGC combinam o modelo teórico de Arrow-Debreu (1954) com dados econômicos reais (Wing, 2004), normalmente, dados da Matriz de Contabilidade Social dos países. Desse modo, converte-se a estrutura abstrata dos modelos de equilíbrio geral em um modelo empírico de uma economia real.

De acordo com Robinson (1989), os componentes essenciais da abordagem neoclássica para modelagem EGC são: i) especificação dos agentes representativos cujo comportamento deve ser analisado (*e.g.*, produtores e consumidores); ii) identificação das regras comportamentais e das condições sob as quais os agentes operam (*e.g.*, comportamento de maximização de lucro pelos produtores e comportamento de maximização de utilidade pelos consumidores); iii) agentes tomam suas decisões com base nos sinais que eles observam (*e.g.*, em um modelo *Walrasiano*, preços são os únicos que os agentes observam); e iv) identificação das "regras do jogo" (*e.g.*, assumir competição perfeita nos modelos de EGC implica que cada agente atua como um tomador de preços, que são flexíveis). Bandara (1991) afirma que com essas especificações, é possível derivar um sistema de equações e resolvê-lo simultaneamente para encontrar um equilíbrio geral, que é simplesmente uma solução das equações comportamentais.

Conforme Shoven e Whalley (1992), esse equilíbrio é caracterizado por um conjunto de preços e níveis de produção em cada setor, de modo que a demanda e a oferta de mercado são iguais. Nesses modelos, cada consumidor possui uma dotação inicial de *commodities* e preferências,

¹⁵ O comportamento dos agentes econômicos é maximizador, isto é, as famílias maximizam utilidade e as firmas minimizam custos ou maximizam lucros.

resultando em funções de demanda para cada *commodity*. Segundo Shoven e Whalley (1992), a soma dessas demandas compõe a demanda de mercado, que depende de todos os preços, é contínua, não negativa, homogênea de grau zero (sem ilusão monetária) e satisfaz a Lei de Walras¹⁶. Do lado da produção, a tecnologia é descrita por atividades de retornos constantes ou não crescentes de escala, com os produtores maximizando os lucros. A homogeneidade zero das funções de demanda e a homogeneidade linear dos lucros nos preços implicam que apenas os preços relativos são significativos, de modo que o nível absoluto de preços não impacta o resultado do equilíbrio (Shoven; Whalley, 1992).

A forma de aplicação dos modelos de EGC segue duas vertentes principais. A primeira se baseia no trabalho de Johansen (1960), que utilizou métodos de programação linear para a solução do modelo (Fochezatto, 2005). Seu modelo continha vinte setores minimizadores de custos e um setor doméstico maximizador de utilidade. A aplicação do modelo se deu com base em estimativas das elasticidades de preço e rendimento das famílias e nos dados de insumo-produto da Noruega (Dixon; Parmenter, 1996). A outra vertente é baseada no estudo de Scarf (1969), que desenvolveu um algoritmo com propriedade de convergência finita para solucionar modelos de equilíbrio geral (Borges, 1986a; Dixon; Parmenter, 1996). Na visão de Fochezatto (2005), os modelos baseados em Johansen (1960) são mais preocupados com o realismo das suas formulações e se aproximam mais da economia real.

Dixon e Parmenter (1996) destacam dois fatores que contribuíram para a expansão da modelagem EGC a partir da década de 1970. O primeiro deles foi a ocorrência de grandes choques na economia mundial – aumento dos preços de *commodities* energéticas decorrente do choque de petróleo em 1973, mudança brusca no sistema monetário internacional e rápido crescimento nas taxas de salários reais –, que não eram bem explicados pelas análises econométricas vigentes. O segundo fator foi o aumento da capacidade dessa modelagem em lidar com detalhes, principalmente em decorrência de uma maior e melhor disponibilidade de dados e dos avanços computacionais (*e.g.*, a disponibilidade de programas como o GEMPACK). Portanto, a modelagem EGC se expandiu devido a sua capacidade de prever efeitos de choques específicos para os quais não se tinha histórico e de incorporar um maior detalhamento em suas análises.

A partir de então, os modelos de EGC têm sido utilizados para avaliar os mais diversos temas (setores produtivos; regiões; emprego; educação e treinamento; distribuição de renda; bem-

¹⁶ Para qualquer conjunto de preços, o valor total das despesas do consumidor é igual a sua renda.

estar social e meio ambiente) em diferentes espaços econômicos (global, nacional e inter-regional) (Dixon; Parmenter, 1996; Domingues, 2002). No final da década de 1970, o governo da Austrália, no âmbito do projeto IMPACT, financiou o desenvolvimento do modelo ORANI, que é um modelo multisetorial de EGC da economia australiana, que segue a abordagem de Johansen (Dixon *et al.*, 1982). Esse modelo é considerado um marco na modelagem de EGC (Domingues, 2002).

O ORANI é um modelo nacional cujo objetivo foi avaliar os efeitos de mudanças em diversas políticas econômicas sobre um amplo conjunto de variáveis para a economia australiana (Dixon *et al.*, 1982). Segundo Dixon *et al.* (1982), o modelo reconhece 115 *commodities*, 113 setores e nove ocupações distintas, sendo o fator trabalho flexível entre os setores enquanto o capital é fixo. O ORANI é um modelo estático, isto é, as análises econômicas dividem-se em dois momentos particulares do tempo, que são determinados pelo fechamento do modelo (Ferreira Filho, 2018). A análise de curto prazo considera a taxa de retorno do capital endógena e o estoque de capital exógeno ao modelo; no longo prazo, ocorre o contrário (Dixon *et al.*, 1982).

Uma limitação do modelo ORANI é que suas análises só possibilitam verificar efeitos de curto e de longo prazo. Essa limitação passa a ser superada por versões do modelo que incorporam elementos dinâmicos (intertemporais) de acúmulo de estoque de capital e de dívida externa, como os modelos ORANI-F e MONASH (Adams; Parmenter, 1994; Adams *et al.*, 1994). Embora a dinâmica de acumulação dessas variáveis, no modelo ORANI-F, seja suficiente para fornecer efeitos de médio prazo (*e.g.*, seis anos), ela não é convincente em apresentar trajetória ano a ano para as variáveis (Adams *et al.*, 1994). Por sua vez, o modelo MONASH possui dinâmica suficiente para permitir previsões anuais setorialmente desagregadas que rastreiam fenômenos de ciclo de negócios projetados externamente (Adams; Parmenter, 1994).

Os principais avanços técnicos do MONASH em relação ao ORANI são os mecanismos dinâmicos e as opções de fechamento (Dixon; Rimmer, 2002). Segundo Dixon e Rimmer (2002), o MONASH incorpora três tipos de ligações intertemporais: acumulação de capital físico; acumulação de ativos/passivos financeiros; e processos de ajuste defasados; e quatro classes de fechamentos: histórico; decomposição; previsão; e fechamentos de política. Os modelos dinâmicos, como é o MONASH, permitem acompanhar o efeito de um choque exógeno ao longo do tempo, até que a economia atinja novamente o equilíbrio entre oferta e demanda dos mercados. Nesses modelos há a suposição de cenários para variáveis como taxas de crescimento econômico, populacional e tecnológico, em cada período (Domingues, 2002).

Os modelos ORANI-F e MONASH, versões dinâmicas do modelo ORANI, são voltados para a economia australiana. A fim de popularizar a metodologia ORANI e disponibilizar uma base para criação de novos modelos, Horridge *et al.* (1998) desenvolveram uma versão genérica do modelo ORANI – o ORANI-G – adaptável para diversos países. Esse modelo também possui sua versão intertemporal, o ORANIG-RD, que é um modelo dinâmico recursivo, semelhante a uma versão simplificada do MONASH. O ORANIG-RD incorpora funções de acumulação de capital que explicitam a duração do tempo T (Horridge, Parmenter; Pearson, 1998).

Os modelos de EGC avançaram não só em relação à questão temporal, mas também no que se refere ao espaço econômico analisado. Modelos inter-regionais de equilíbrio geral computável (IEGC) foram desenvolvidos a partir do ORANI. O modelo multirregional multissetorial da economia australiana, denominado MONASH-MRF, é um IEGC dinâmico que divide a economia da Austrália em oito regiões, isto é, cada região apresenta seu próprio modelo ORANI, que interage entre si (Peter *et al.*, 1996). Adams *et al.* (2000) apresentaram uma versão desse modelo, o MMRF-Green, incluindo um módulo ambiental. Esse módulo permite monitorar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por agente, região e atividade econômica, além de incluir equações de substituição entre combustíveis na geração de eletricidade por região e permitir calcular endogenamente o preço do carbono ou custo relativo às políticas de redução de GEE (Adams, Horridge; Parmenter, 2000).

Ainda no que tange aos avanços da modelagem de EGC, Corong e Horridge (2012) estenderam o modelo ORANI-G ao introduzir múltiplas famílias e equações adicionais para uso de dados provenientes de uma Matriz de Contabilidade Social (MCS). Essa extensão foi feita para a economia das Filipinas e é conhecida como PHILGEM, cuja primeira versão é um modelo estático. O PHILGEM, além de conseguir captar as relações entre demanda e oferta no sistema econômico, como em uma análise tradicional de Insumo-Produto (I-P), permite averiguar como a renda é gerada, distribuída e transferida entre os setores produtivos e o resto da economia (famílias, governo e resto do mundo) (Corong; Horridge, 2012; Betarelli Junior *et al.*, 2021). Uma segunda versão do modelo, o PHILGEM-RD, incorpora a dinâmica recursiva do ORANIG-RD, preservando os avanços do PHILGEM (Corong, 2014).

Desde sua formalização e operacionalização, o modelo ORANI e suas adaptações tem sido base para o desenvolvimento de modelos de EGC para diversas economias (Horridge, Parmenter; Pearson, 1998). Para a economia brasileira, destacam-se alguns modelos: i) o modelo PAPA, que foi desenvolvido para o planejamento e a análise de políticas agrícolas (Guilhoto, 1995);

ii) o modelo B-MARIA¹⁷, utilizado para analisar os impactos regionais de diferentes políticas econômicas no Brasil (Haddad, 1999); o modelo SPARTA, usado para avaliar os impactos setoriais e regionais sobre a economia brasileira da liberalização tarifária no âmbito da Área de Livre Comércio das Américas (ALCA) (Domingues, 2002); iii) o modelo MIBRA, desenvolvido para obter previsões para a economia brasileira e para analisar políticas econômicas ao longo do tempo (Guilhoto, Hasegawa; Lopes, 2002); iv) o modelo BRIDGE, criado para avaliar o impacto da crise de 2009 sobre a economia brasileira (Domingues *et al.*, 2010); e v) o modelo BIM-T, desenvolvido para analisar impactos de políticas que afetam o setor de transportes, na presença de retornos crescentes de escala de produção e mercados imperfeitos (Betarelli Junior, 2013). Estes dois últimos modelos, diferentes dos demais, incorporam a dinâmica intertemporal em suas análises.

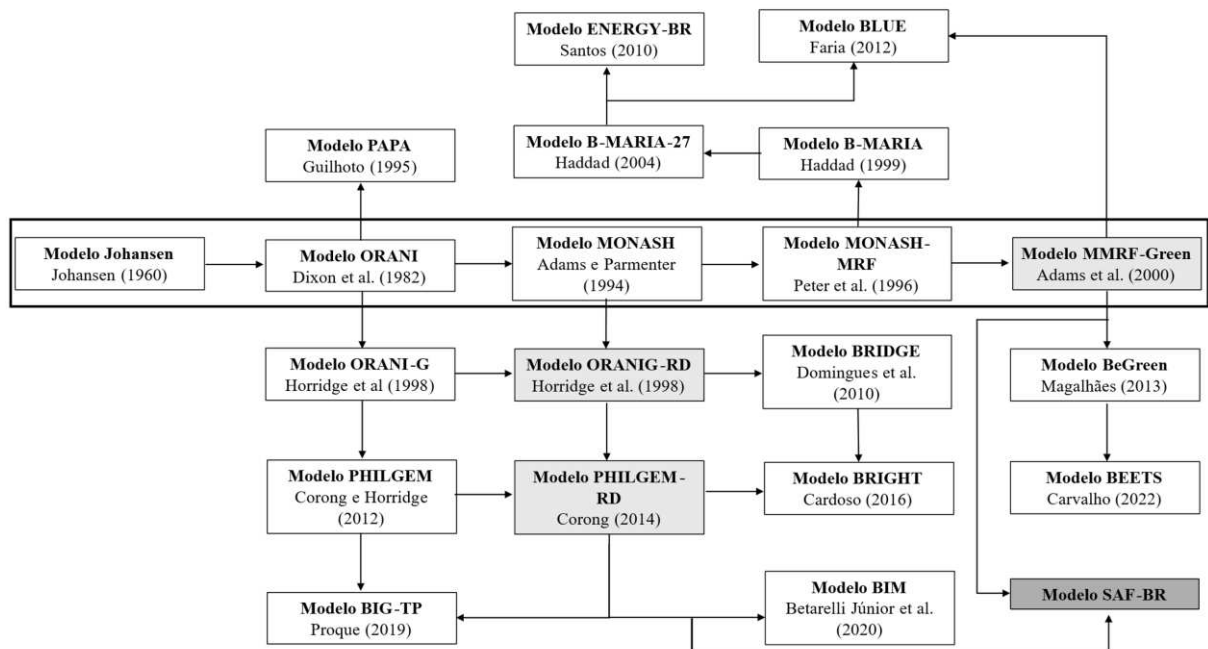
Além dos modelos desenvolvidos para análises dos impactos de políticas econômicas setoriais e regionais, a literatura de EGC brasileira possui alguns modelos com enfoque ambiental. Pode-se citar como exemplos: i) o modelo ENERGY-BR utilizado para avaliar os impactos regionais de longo prazo da política tarifária do setor elétrico brasileiro (Santos, 2010); ii) o modelo BLUE, que possui uma especificação detalhada do uso da terra para o Brasil, permitindo acessar os efeitos de políticas que afetam direta ou indiretamente o uso da terra (Faria, 2012); iii) o modelo BeGreen, construído para analisar questões relacionadas às políticas climáticas de redução das emissões de GEE e de melhoria da eficiência energética, bem como seus custos inerentes e que possui um módulo ambiental (Magalhaes, 2013); iv) o modelo REGIA, desenvolvido para a Amazônia Legal, tem um módulo de mudança indireta do uso da terra e é utilizado para avaliar os efeitos de políticas que afetam a disponibilidade de terra aptas à agropecuária na região (Carvalho, 2014) e v) o modelo BEETS, que inclui módulos ambiental e de mudança de uso da terra, utilizado para avaliar os impactos econômicos da implementação de mercados de carbono (Carvalho, 2022).

Mais recentemente, os modelos de EGC desenvolvidos para o Brasil passaram a incorporar os dados da MCS em vez da matriz de I-P. Essa incorporação advém dos modelos PHILGEM (Corong; Horridge, 2012; Corong, 2014). Alguns exemplos são: i) o modelo BRIGHT, primeiro modelo brasileiro a incorporar em sua especificação teórica elementos da Matriz de Contabilidade Social (MCS), foi utilizado para analisar os impactos econômicos de

¹⁷ O modelo B-MARIA (Haddad, 1999) possui diversas extensões, tais como: B-MARIA-SP (Domingues; Haddad, 2003), B-MARIA-27 (Haddad, 2004), B-MARIA-27-IT (Perobelli, 2004), B-MARIA-RS (Porsse, 2005) e B-MARIA-MG (Haddad *et al.*, 2011).

modificações da distribuição dos rendimentos na economia brasileira (Cardoso, 2016); ii) o modelo BIG-TP, desenvolvido para analisar os impactos de políticas de transporte de passageiros sobre a economia brasileira (Proque, 2019); e iii) o modelo BIM, utilizado para avaliar os impactos econômicos na ausência de incentivos públicos para investimento privado em pesquisa e desenvolvimento (P&D), levando em conta a relação estoque-fluxo entre investimento em P&D e capital de conhecimento (Betarelli Junior *et al.*, 2020). A Figura 2 apresenta os principais modelos de EGC que seguem a abordagem de Johansen (1960), com enfoque naqueles que inspiraram o desenvolvimento do SAFBR.

Figura 2 – *Background* dos principais modelos de EGC e desenvolvimento do modelo SAFBR



Fonte: Elaboração própria.

Esta tese desenvolve cinco modelos nacionais de EGC intertemporal para avaliar os impactos econômicos e ambientais da substituição de QAV por SAF no setor de transporte aéreo brasileiro entre 2027 e 2037, considerando as metas de redução de CO₂ estabelecidas pela LCF e pelo CORSIA. Os modelos SAFBR baseiam-se nas estruturas teóricas de três modelos apresentados na Figura: o ORANIG-RD, o MMRF-Green e o PHILGEM-RD. A estrutura do ORANIG-RD foi utilizada para a calibração dos modelos SAFBR a partir da Matriz de Insumo-Produto (MIP) (Horridge, 2000, 2002), introduzindo um módulo de equilíbrio fiscal e fluxo de pagamentos em seu arcabouço teórico e de dados, inspirado no modelo PHILGEM-RD (Corong; Horridge, 2012; Corong, 2014), como fizeram Cardoso (2016), Proque (2019) e

Betarelli *et al.* (2020). Os modelos SAFBR também possuem um módulo ambiental que contabiliza as emissões de CO₂ por agente emissor (setores e famílias) e atividade econômica. Esse módulo é inspirado no modelo MMRF-Green (Adams, Horridge; Parmenter, 2000; Adams, Horridge; Wittwer, 2002) e segue a estratégia de operacionalização do BeGreen desenvolvido por Magalhães (2013).

6.2 Estimativas de custos e rendimentos e base de dados do modelo SAFBR

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos e as premissas adotadas para estimar os custos unitários de produção de SAF por rota de conversão. Também apresenta os rendimentos do refino de SAF e a base de dados dos modelos SAFBR. A partir dos critérios do CORSIA (OACI, 2022b) e baseado na literatura consultada (descrita no Capítulo 5.2), este estudo aponta cinco potenciais rotas tecnológicas de produção de SAF no Brasil. Duas delas utilizam biomassa de primeira geração: (i) ATJ a partir de etanol de cana-de-açúcar (CAN/ATJ) e (ii) HEFA a partir de óleo de soja (OS/HEFA). As outras três rotas se baseiam em biomassa de segunda geração: (iii) ATJ a partir de resíduos de cana-de-açúcar (RCAN/ATJ), (iv) HEFA a partir de sebo bovino (SB/HEFA) e (v) FT a partir de resíduos florestais (RF/FT). Essas rotas se destacam não apenas pela disponibilidade de suas matérias-primas, mas também pela capacidade de integração com a infraestrutura de biorrefinarias já existente no Brasil.

As biorrefinarias são instalações que promovem o processamento sinérgico e sustentável da biomassa, transformando-a em uma variedade de produtos comercializáveis, incluindo alimentos, rações, produtos químicos, materiais e energia, como combustíveis, eletricidade e calor (IEA, 2014). As usinas de cana-de-açúcar são um bom exemplo do conceito de biorrefinaria e podem atuar como plantas hospedeiras para uma série de processos integrados para produtos de base biológica, como o SAF (Klein *et al.*, 2018). Os coprodutos gerados nas biorrefinarias apresentam custos de produção mais competitivos e proporcionam benefícios socioeconômicos e ambientais, o que faz dessas instalações uma excelente estratégia para o uso sustentável em larga escala da biomassa (IEA, 2022). Klein *et al.* (2018) corroboram essa visão. Segundo os autores, ao se utilizar os produtos de uma usina de cana-de-açúcar para abastecer uma planta de produção de SAF, esta última pode alcançar melhor estabilidade operacional e desempenho econômico, além de menores impactos ambientais.

No contexto brasileiro, alguns estudos avaliaram diferentes estratégias para produção de SAF integrada às biorrefinarias de cana-de-açúcar (*e.g.*, Alves *et al.* (2017), Santos *et al.* (2018),

Klein *et al.* (2018) e Capaz *et al.* (2021)). Essa integração é uma configuração que busca mitigar os riscos inerentes às tecnologias de produção de SAF (Klein *et al.*, 2018), além de tornar sua produção economicamente viável (Alves *et al.*, 2017). Sendo assim, a produção de SAF se dá em paralelo à produção de outros produtos nas biorrefinarias, como o diesel verde e o nafta verde (Capaz, 2021; Klein *et al.*, 2018).

Dado que produzir SAF de forma integrada às biorrefinarias existentes mitiga os riscos inerentes a sua produção, tornando-a economicamente viável, esta tese adota o pressuposto de que a produção de SAF ocorrerá em biorrefinarias integradas. Uma consequência direta desse princípio é que os processos de refino das matérias-primas para SAF também geram outros produtos além do próprio combustível sustentável de aviação (Capaz *et al.*, 2021; Klein *et al.*, 2018). Em outras palavras, um insumo que poderia ser totalmente convertido em SAF é, na prática, dividido entre a produção de SAF e a de outros produtos.

Os rendimentos do refino do SAF são diferentes para cada rota tecnológica. Para as rotas CAN/ATJ e RCAN/ATJ, adota-se a média aritmética dos parâmetros por Klein *et al.* (2018) e Capaz *et al.* (2021). De acordo com ambos os estudos, 1 m³ de etanol gera 0,2179 t de SAF ou 1 t de etanol resulta em 0,269 t de SAF¹⁸. Conforme Capaz *et al.* (2021), 1 t de cana-de-açúcar gera 93,2 litros (l) ou 0,0755 t de etanol e 0,1156 t de material lignocelulósico (palha e bagaço). Por sua vez, 1 t de material lignocelulósico (palha e bagaço) gera 357,4 l (0,2895 t) de etanol. Portanto, a depender da rota adotada, o requerimento de matéria-prima é distinto.

Para a rota OS/HEFA, a conversão para SAF adotada neste estudo é a média dos parâmetros estabelecidos por Capaz *et al.* (2021), Klein *et al.* (2018) e Alves *et al.* (2017). Assim, 1 t de óleo de soja gera 0,4933 t de SAF. O rendimento da rota SB/HEFA é calculado com base na quantidade de bovinos abatidos. Segundo Sousa *et al.* (2017), cada bovino abatido pesa 450 kg, dos quais 5,1% são convertidos em sebo. Assim, 1 t de gado abatida gera 0,051 t de sebo. Por fim, Capaz *et al.* (2021) estimam a quantidade de SAF produzida por 1 t de resíduos florestais. Os autores consideram que durante as operações de colheita, em média, 1 m³ de madeira gera 0,167 t de resíduos ou 1 t de madeira origina 0,334 t de resíduos¹⁹. Ainda de acordo com Capaz *et al.* (2021), 1 t desses resíduos gera 0,0589 t de SAF. O Quadro 5 resume essas informações.

¹⁸ Para realizar tal conversão, considerou-se a densidade do SAF de 0,8075 kg/l (MME, 2022) e do etanol de 0,81 kg/l (CAPAZ *et al.*, 2021a).

¹⁹ A conversão de m³ para t foi feita considerando a densidade do eucalipto de 0,5 t/m³ (Vital, 2009)

Quadro 5 - Rendimentos gerais para as rotas de produção de SAF

Rota de conversão	Rendimento intermediário	Rendimento do refino de SAF em t	Rendimento do refino de SAF em m ³	Matéria-prima requerida para gerar 1 m ³ de SAF	Matéria-prima bruta requerida para gerar 1 m ³ de SAF
CAN-1G/ATJ	0,08 t _{tetanol} /t _{CAN}	0,27 t _{SAF} /t _{tetanol}	0,33 m ³ _{SAF} /t _{tetanol}	39,76 t de cana-de-açúcar	39,76 t de cana-de-açúcar
RCAN-2G/ATJ	0,29 t _{tetanol} /t _{RCAN}	0,27 t _{SAF} /t _{tetanol}	0,33 m ³ _{SAF} /t _{tetanol}	10,37 t de resíduos de cana-de-açúcar	89,53 t de cana-de-açúcar
RF/FT	0,33 t _{RF} /t _{eucaípto}	0,06 t _{SAF} /t _{RF}	0,07 m ³ _{SAF} /t _{RF}	14,42 t de resíduos florestais	43,17 t de madeira
OS/HEFA	0,19 t _{óleo de soja} /t _{soja}	0,49 t _{SAF} /t _{óleo de soja}	0,61 m ³ _{SAF} /t _{óleo de soja}	1,64 t de óleo de soja	8,62 t de soja
SB/HEFA	0,05 t _{sebo} /t _{peso vivo}	0,49 t _{SAF} /t _{sebo}	0,61 m ³ _{SAF} /t _{sebo}	1,64 t de sebo	32,08 t de bovinos abatidos

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os parâmetros de rendimento foram arredondados para duas casas decimais.

Na penúltima coluna do Quadro 5, tem-se a quantidade de toneladas de matéria-prima requerida para gerar 1 m³ de SAF conforme o insumo usado em cada rota. À exceção da cana-de-açúcar, cada um desses insumos advém de uma matéria-prima bruta. Sendo assim, indiretamente, a produção de 1 m³ de SAF requer 89,5 t de cana-de-açúcar (RCAN/ATJ), 43,2 t de madeira (RF/FT), 8,6 t de soja (OS/HEFA) e 32,1 t de bovinos abatidos (SB/HEFA). Embora o SAF não seja produzido diretamente dessas matérias-primas brutas, a contabilidade das emissões do ciclo de vida do CO₂ para as rotas OS/HEFA e CAN/ATJ é feita desde o cultivo até a distribuição do SAF gerado, conforme os critérios do CORSIA. No caso das rotas RCAN/ATJ e RF/FT, a contabilidade ocorre apenas a partir da coleta dos resíduos até a distribuição final de combustível originado (OACI, 2022c).

A rota SB/HEFA apresenta uma peculiaridade em relação às demais, o cálculo das emissões de CO₂ varia de acordo com a origem do sebo. De um lado, quando é proveniente da indústria de renderização, as emissões do ciclo de vida do sebo se iniciam na fase de processamento. Por outro lado, se a origem do sebo é da indústria de carnes, a contabilidade estende-se e inclui o crescimento e o abate do gado (Seber *et al.*, 2014). As emissões de CO₂, neste último caso, são

superiores aos critérios do CORSIA para definição de SAF. Portanto, o sebo é uma matéria-prima elegível apenas se for um subproduto da indústria de renderização (OACI, 2022c).

Uma vez estabelecida a quantidade de matéria-prima (em t) necessária para a produção de 1 m³ SAF em cada rota de conversão, calcula-se o custo total da matéria-prima. Conhecer esse custo permitirá analisar as simulações da introdução de SAF na economia brasileira. Essa análise se dará por meio de uma modelagem EGC, cujo modelo será calibrado com os dados da matriz de Insumo-Produto (MIP) de 2015 do IBGE, que apresenta apenas valores monetários da produção (IBGE, 2018). Como na MIP original não há o produto nem o setor SAF, sua incorporação a essa base de dados baseia-se nos estudos de Wang *et al.* (2019) para o Brasil e de Mueller, Winter e Grote (2024) para a Alemanha.

Com base na estrutura original da MIP de 2010, Wang *et al.* (2019) classificam os custos de produção de cada setor em seis tipos, a saber: (i) custos de matéria-prima; (ii) custos de processamento de matéria-prima; (iii) custos de conversão de combustíveis; (iv) custos de comércio; (v) custos de transporte; e (vi) custos de serviços administrativos. A partir dessa classificação, os autores detalham os custos para cada uma das três rotas de SAF consideradas na análise com base em dados da literatura. Wang *et al.* (2019), então, calculam os coeficientes técnicos de produção de cada SAF e os incluem, em uma nova coluna, na matriz de coeficientes técnicos da MIP brasileira. Desse modo, os autores avaliam os impactos socioeconômicos da produção de SAF por meio de indicadores de insumo-produto.

Mueller, Winter e Grote (2024) seguem uma estratégia similar para inclusão de um setor SAF na MCS alemã. Primeiro, os autores escolhem uma cadeia de suprimentos para o SAF. Em seguida, essa cadeia é subdividida em suas etapas de produção constituintes, incluindo os custos de produção associados a cada etapa do processo. Por fim, Mueller, Winter e Grote (2024) adaptam essa estrutura de produção à MCS e atribuem um valor de EUR 1 milhão à produção de SAF, que equivale à produção de 205 toneladas de SAF. Assim, o novo setor passa a ser considerado como regular na MCS e políticas de descarbonização do transporte aéreo são realizadas pelos autores utilizando modelagem EGC.

Esta tese desenvolve estratégia semelhante a esses dois estudos. Primeiro, detalha-se a estrutura de custos de produção do setor SAF, que será acomodada em uma nova coluna na MIP. Dado que um dos pressupostos adotados neste estudo é de que a produção de SAF ocorrerá em uma biorrefinaria integrada, seus custos de produção são muito similares aos do setor de etanol e outros biocombustíveis (EBIO), presente na MIP. Desse modo, com base na classificação

proposta por Wang *et al.* (2019), a estrutura de custos dos produtos EBIO e SAF é idêntica para custos de comércio e de serviços administrativos. Os custos de processamento de matéria-prima e conversão de combustíveis seguem a estrutura adotada por Wang *et al.* (2019). Enquanto, os custos de transporte e de matéria-prima são calculados de outra maneira.

No que se refere ao transporte, considerando que o SAF é um combustível do tipo “*drop-in*” – ou seja, que pode substituir diretamente o QAV – assume-se que o custo desse serviço corresponde à média entre os custos de transporte dos produtos EBIO e Combustíveis para aviação (CAV), dispostos na MIP. Em relação aos custos das matérias-primas, estes variam conforme seu uso em cada rota tecnológica de produção de SAF. Esses custos referem-se à matéria-prima em que se inicia a contabilidade das emissões de CO₂ e estão a preços de 2015²⁰, ano da MIP que calibra o modelo SAFBR.

Os custos da cana-de-açúcar e da soja são dados pela razão entre o valor bruto da produção (VBP) (IBGE, 2015) e a quantidade produzida de cada um desses insumos disposta na Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) (IBGE, 2024a). O preço do sebo²¹ é oriundo da consultoria Scot (SCOT, 2023), que também foi utilizado por Capaz *et al.* (2021) e pelo estudo do ProQr (MME, 2022). O preço dos resíduos de cana-de-açúcar foi o mesmo utilizado por Santos *et al.* (2018). Já para os resíduos de eucalipto, o preço utilizado é o mesmo de Alves *et al.* (2017). A partir desses dados e dos rendimentos de SAF dispostos no Quadro 5, foi possível calcular o custo de produção de 1 m³ de SAF. Esses custos estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Custo total das matérias-primas para produção de 1 m³ de SAF

Rota	Matéria-prima	Valor da produção da matéria-prima (R\$/t)	Quantidade de matéria-prima (t) para produção de 1 m ³ de SAF	Custo total (R\$/m ³)
CAN/ATJ	Cana-de-açúcar	61,42	39,76	2442,09
RCAN/ATJ	Resíduos de cana-de-açúcar	65,98	89,53	5907,38
RF/FT	Resíduos de eucalipto	192,22	43,17	8298,57
OS/HEFA	Soja	1120,1	8,61	9649,47
SB/HEFA	Sebo	2000	1,64	3272,54

Fonte: Elaboração própria.

A partir das informações apresentadas na Tabela 7, é possível estruturar o vetor completo de custos de produção de 1 m³ de SAF para cada rota tecnológica analisada. Nos casos em que a matéria-prima não se encontra desagregada na MIP, considera-se como insumo o produto no

²⁰ Nos casos em que os preços não correspondiam a 2015 – resíduos de eucalipto –, eles foram deflacionados para 2015 por meio do IGP-DI (BCB, 2024).

²¹ O preço da tonelada do sebo é o preço FOB sem bonificação e sem ICMS e referente ao ano de 2015.

qual ela está agregada, em conformidade com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) (IBGE, 2024b). Assim, os resíduos florestais são representados pelo produto Produtos da exploração florestal e da silvicultura; o sebo bovino, por Carne de bovinos e outros produtos de carne; o óleo de soja, por Soja; e os resíduos de cana-de-açúcar, por Cana-de-açúcar. Nesse último caso, adota-se a quantidade de cana-de-açúcar equivalente necessária para a produção de 1 m³ de SAF, conforme disposto no Quadro 5, preservando, no entanto, o custo dos resíduos de cana-de-açúcar. Esse origina o vetor de custos de produção de 1 m³ de SAF para cada rota tecnológica, que será incorporado à MIP.

Ressalta-se que, diferentemente de Mueller, Winter e Grote (2024), não há imputação *ad hoc* de valor de produção para o SAF. Em consulta ao técnico em informações geográficas e estatísticas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Paulo Montoya, verificou-se que a demanda do setor aéreo por EBIO na MIP 2015 corresponde, na realidade, ao que atualmente poderia ser denominado combustível alternativo de aviação, categoria que contempla o SAF. Sendo assim, o valor de R\$ 8 milhões gastos pelo setor de transporte aéreo com o produto EBIO é redirecionado para o setor SAF e distribuído entre os insumos de produção conforme a participação de cada um no custo total de produção de 1 m³ de SAF.

A Tabela 8 mostra os custos de produção e os preços ao consumidor do EBIO, do QAV e dos SAF originados por cada processo de conversão. Os custos com aquisição de matéria-prima representam em torno de 50% dos custos totais do insumo EBIO e apenas 25% do QAV. Em relação ao SAF, em todas as rotas tecnológicas, os custos com matéria-prima são os que mais contribuem para o custo total de produção desse biocombustível. De modo particular, essa contribuição é maior nas rotas HEFA: OM/HEFA (74%) e OS/HEFA (72,6%) e SB/HEFA (67,7%), o que corrobora Carvaho (2017) e a OACI (2018). Já a rota CAN/ATJ apresentou a menor participação da matéria-prima no custo total (46%).

Ainda na Tabela 8, verifica-se que os preços do SAF em todas as rotas são superiores ao preço do QAV. O SAF produzido pelas rotas SB/HEFA e CAN/ATJ apresenta preço básico de R\$ 4,84/l e de R\$ 5,31/l e preço ao consumidor de R\$ 6,78/l e R\$ 7,44/l, respectivamente, sendo os que mais se aproximam dos preços do QAV (R\$ 1,81/l e R\$ 2,48/l). Com exceção da rota SB/HEFA, o SAF produzido pelos processos de conversão HEFA e FT apresentou os maiores preços em comparação aos preços do QAV. O maior custo do SAF via FT pode estar relacionado ao seu elevado custo de investimento (Carvalho, 2017).

Tabela 8 – Custos unitários de produção e preços para cinco rotas de produção de SAF, para o QAV e o EBIO (ano de 2015)

Processo de produção	EBIO (R\$/m³)	QAV (R\$/m³)	CAN/ATJ (R\$/m³)	RCN/ATJ (R\$/m³)	RF/FT (R\$/m³)	OS/HEFA (R\$/m³)	SB/HEFA (R\$/m³)
Custos da matéria-prima	870,22	450,94	2442,09	5907,38	8298,57	9649,47	3272,54
Part. (%)	50,25	24,97	46	49,85	63,07	72,61	67,67
Processamento de matéria-prima e conversão de biocombustíveis	135,47	724,55	1274,51	2775,6	1377,35	126,53	84,95
Part. (%)	7,82	40,13	24,01	23,42	10,47	0,95	1,76
Varejo	49,17	13,98	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17
Part. (%)	2,84	0,77	0,93	0,41	0,37	0,37	1,02
Transporte	141,65	29,62	141,65	141,65	141,65	141,65	141,65
Part. (%)	8,18	1,64	2,67	1,2	1,08	1,07	2,93
Administração	123,68	48	123,68	123,68	123,68	123,68	123,68
Part. (%)	7,14	2,66	2,33	1,04	0,94	0,93	2,56
Outros custos	411,7	538,52	1278,08	2852,69	3167,51	3199,24	1164,22
Part. (%)	23,77	29,82	24,07	24,07	24,07	24,07	24,07
VBP (a preços básicos)	1731,89	1805,62	5309,19	11850,18	13157,93	13289,74	4836,22
Part. (%)	100	100	100	100	100	100	100
Custos de venda	694,58	674,42	2129,28	4752,57	5277,05	5329,92	1939,59
Part. (%) no VBP	40,11	37,35	40,11	40,11	40,11	40,11	40,11
Preço básico	1,73	1,81	5,31	11,85	13,16	13,29	4,84
Preço ao consumidor	2,43	2,48	7,44	16,6	18,43	18,62	6,78
Variação (%) em relação ao QAV							
Preço básico	-4,08	0	194,04	556,30	628,72	636,02	167,84
Preço ao consumidor	-2,16	0	199,93	569,46	643,33	650,78	173,21

Fonte: Elaboração própria a partir da MIP (IBGE, 2015).

Por fim, ainda em relação à introdução do setor SAF na MIP, esta tese leva em conta dois pressupostos adotados por Wang *et al.* (2019). O primeiro é que, uma vez criado, esse novo setor produzirá apenas um produto, o SAF. O segundo pressuposto é que não demandará nenhum insumo de si próprio para produzir SAF. E, assim como na MIP não há importação de EBIO pelo setor aéreo, adota-se o pressuposto de que a importação de SAF é nula. Além disso, o único setor que demanda SAF é o setor de transporte aéreo, de modo a equilibrar a oferta e a demanda de SAF na MCS dos modelos SAFBR conforme Mueller, Winter e Grote (2024).

6.3 Estrutura Teórica do modelo SAFBR

Esta seção descreve a estrutura teórica do modelo nacional de EGC, desenvolvido para esta tese. Ela se divide em cinco subseções. A primeira apresenta a especificação teórica central comum aos modelos SAFBR, que está baseada no modelo ORANI-G. A segunda descreve as extensões adicionadas ao ORANI-G para incrementar os mecanismos de dinâmica recursiva no modelo, seguindo a documentação do ORANIG-RD. A terceira descreve o módulo fiscal. E a quarta parte é o módulo ambiental. Toda a documentação desses modelos está amplamente documentada pelo Centro de Estudos de Políticas (*Centre of Policy Studies – CoPS*)²². Por fim, a última subseção descreve a principal inovação do SAFBR, o módulo de volume de SAF.

6.3.1 Núcleo do modelo

Esta subseção descreve a especificação teórica central do modelo SAFBR, que é a baseada na estrutura básica do ORANI-G, com a adição de mecanismos para dinâmica recursiva, descrita em Horridge (2000)²³. As equações de demanda e oferta para os agentes do setor privado são derivadas das soluções para os problemas de otimização (minimização de custos, maximização de utilidade etc.) que são assumidos como subjacentes ao comportamento dos agentes na microeconomia neoclássica convencional. Os agentes são assumidos como tomadores de preços, com produtores operando em mercados competitivos que impedem a obtenção de lucros puros (Horridge, 2000).

O modelo SAFBR, diferente do modelo ORANI-G, pressupõe que cada setor i produz apenas um único produto z , usando como insumos *commodities* domésticas e importadas, trabalho,

²² Para acesso à documentação mencionada, ver (COPS, 2024), disponível em: <https://www.copsmodels.com/oranig.htm>.

²³ Para um maior nível de detalhamento, recomenda-se a leitura do original.

terra e capital. A tecnologia de produção de cada setor i apresenta retornos constantes de escala. A especificação de produção do modelo está ancorada em uma série de suposições de separabilidade, que permite separar em aninhamentos as decisões de produção como ilustra a Figura 8. Por exemplo, a suposição de separabilidade entre insumo e produto implica que a função de produção genérica para alguns setores:

$$F(\text{insumos}, \text{produtos}) = 0 \quad (3)$$

pode ser escrita como:

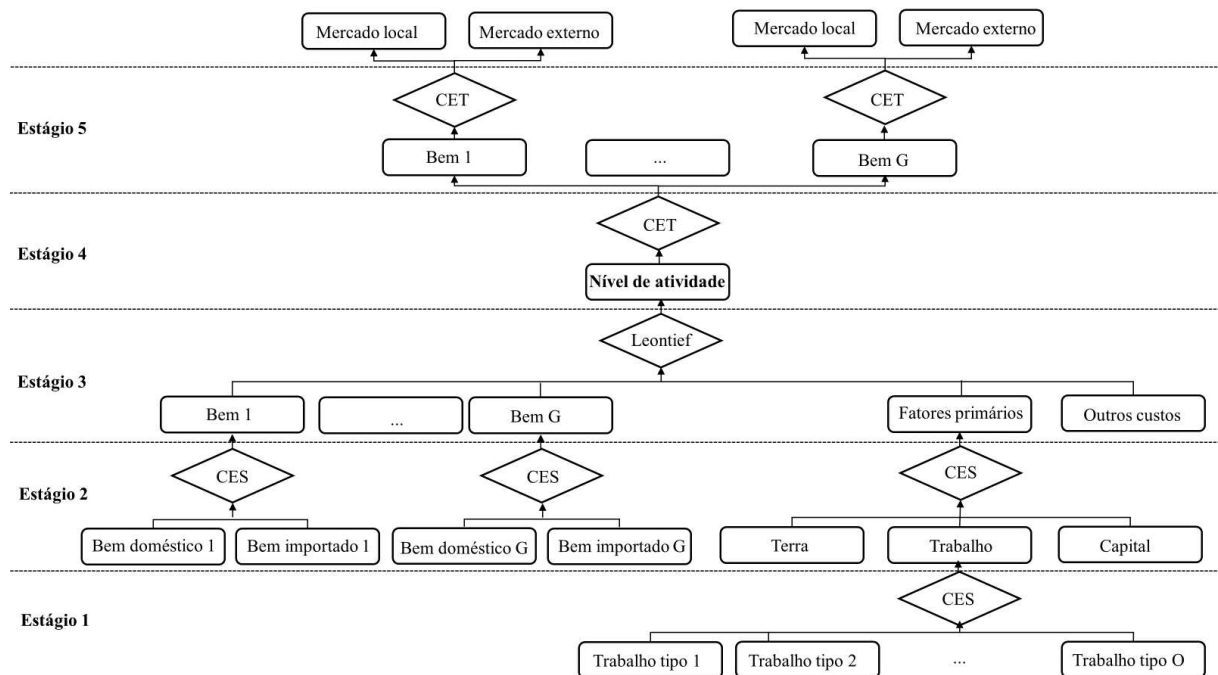
$$G(\text{insumos}) = Z = H(\text{produtos}) \quad (4)$$

em que Z é o índice de atividade setorial (Horridge, 2000).

A decisão dos produtores (setores) em relação à combinação dos insumos que minimizam os custos totais de produção se dá por meio de funções de elasticidade constante de substituição (CES, do inglês *Constant Elasticity of Substitution*) em três estágios distintos. No Estágio 1, combinam-se os tipos de ocupação para formar um composto de trabalho, que é exclusivo para cada setor. Por sua vez, esse composto de trabalho, mais o capital e a terra, é combinado no Estágio 2 para gerar um agregado de fatores primários de produção. Enquanto isso, ainda no Estágio 2, origina-se um composto de *commodities* intermediárias, que é determinado usando uma função CES sob o pressuposto de Armington (1969) de substituição imperfeita entre *commodities* domésticas e importadas (Corong, 2014). Por fim, no Estágio 3, o bem é produzido por uma função de produção Leontief que combina em proporções fixas o composto de fatores primários de produção, o composto de *commodities* intermediárias e outros custos de produção, como impostos sobre a produção (Horridge, 2000).

A Figura 3 também mostra que a oferta de produção de cada setor é baseada em um processo de maximização de lucro de dois estágios (estágios 4 e 5 da Figura 3). No Estágio 4, os setores multiprodução decidem sobre o composto ótimo de *commodities* a serem produzidos por meio de uma função de elasticidade constante de transformação (CET, do inglês *Constant Elasticity of Transformation*). Finalmente, no Estágio 6, outra função CET é empregada para dividir a oferta do bem gerado entre os mercados local e externo (Corong, 2014; Horridge, 2000).

Figura 3 – Estrutura de produção



Fonte: Adaptado de Horridge (2000).

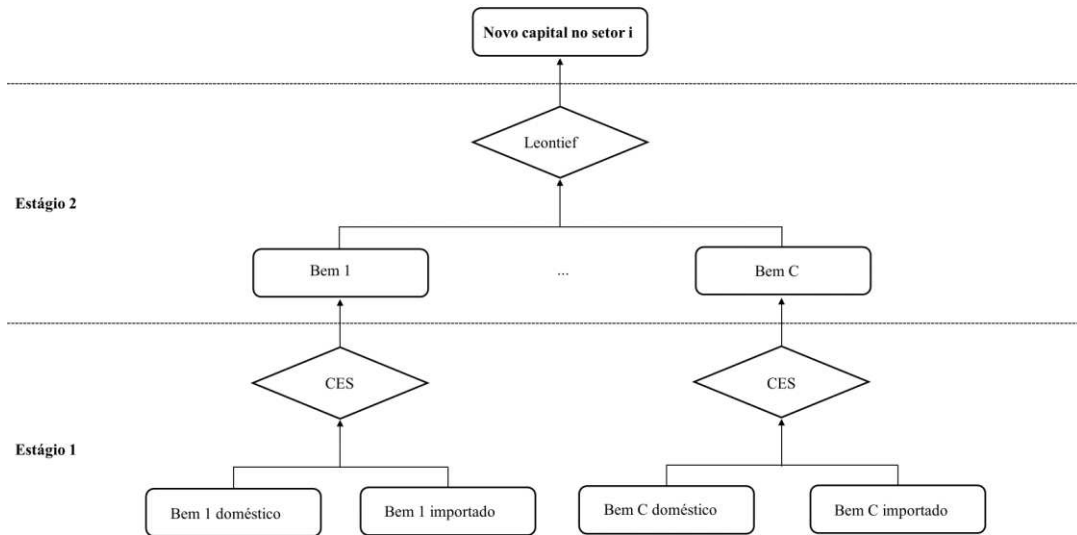
Em resumo, a Figura 3 mostra os vários estágios de tomada de decisão que o produtor toma ao longo do processo de produção. Pelo lado da demanda (estágios 1 a 3), assume-se a minimização de custos, enquanto o lado da oferta (estágios 4 e 5) considera-se a maximização do lucro. Desse modo, as condições de primeira ordem associadas a cada decisão geram: i) funções de demanda por fatores de produção, por insumos importados e por insumos domésticos e demanda doméstica; e ii) funções de produção, de oferta doméstica e de exportação. Embora as indústrias compartilhem uma estrutura de produção comum, suas elasticidades comportamentais e proporções de insumos podem variar (Corong, 2014).

A estrutura de produção dos modelos SAFBR é muito similar à descrita na Figura 3, com duas exceções. A primeira delas se refere à característica dos setores, no modelo em questão, o setor SAF é monoprodução, isto é, produz um único produto, o SAF. A segunda exceção diz respeito à impossibilidade de troca entre o SAF produzido no mercado doméstico e no mercado externo, já que se adota o pressuposto de que não há importação de SAF.

No modelo SAFBR, a demanda por investimentos se dá em dois estágios conforme representado pela Figura 4. Os investidores combinam insumos (bens) de capital de diferentes fontes (domésticos e importados) para produzir novas unidades de capital fixo (Horridge, 2000). No primeiro estágio, a demanda ótima por bens de capital c da fonte s é determinada pela imposição do pressuposto de Armington (1969) de substituição imperfeita entre esses bens

domésticos e importados. No segundo estágio da Figura 4, observa-se que os novos bens de capital do setor i são criados a partir de uma função de produção do tipo Leontief dos compostos de insumos de capital c .

Figura 4 – Estrutura da demanda por investimentos



Fonte: Adaptado de Horridge (2000).

A estrutura de aninhamento da demanda das famílias está dividida em dois estágios, como ilustrada na Figura 5, e é muito similar à da demanda por investimentos. A única diferença é que os compostos de *commodities* são agregados por uma função de Klein-Rubin, em vez de Leontief, levando a um sistema linear de gastos (LES, do inglês *Linear Expenditure System*) (Horridge, 2000). O problema de otimização da família representativa da economia consiste na escolha entre bens domésticos e importados, que são substitutos imperfeitos, para compor um composto de *commodities* de modo a minimizar os custos de consumo:

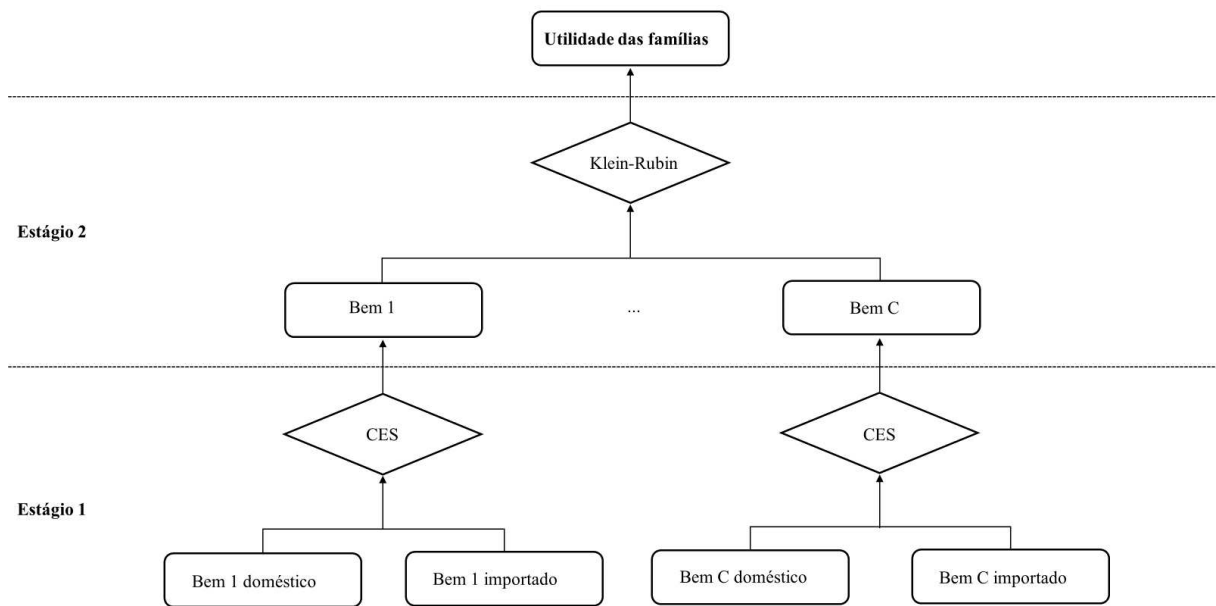
$$\sum_s X3_{c,s} * P3_{c,s} \quad (5)$$

Sujeita a restrição de uma função agregada de Armington (1969):

$$X3_{S_c} = \left[\sum_s \theta_{c,s}^H \frac{X3_{c,s}^{-\rho_c^H}}{A3_{c,s}} \right]^{\frac{-1}{\rho_c^H}} \quad (6)$$

Em que $A3_{c,s}$ é o coeficiente de eficiência de consumo da mercadoria c de cada fonte s ; $\theta_{c,s}^H$ representa os parâmetros de distribuição dessas mercadorias; e ρ_i^H é a elasticidade de substituição entre as mercadorias importadas e domésticas: $\rho_c^H = \frac{1}{(1+\rho_i^H)}$ (Corong, 2014).

Figura 5 – Estrutura de consumo das famílias



Fonte: Adaptado de Horridge (2000).

No SAFBR, assim como no ORANI-G, a demanda por exportação de *commodities* está dividida em dois grupos: i) o grupo de *commodities* individuais, em que a demanda externa é inversamente relacionada ao preço dessas *commodities*; e ii) o grupo de *commodities* coletivas, cuja demanda externa é inversamente relacionada ao preço médio de todas as *commodities* de exportação. A demanda do grupo de exportações individual inclui as principais *commodities* de exportação. Conforme Horridge (2000), os volumes de exportação da *commodity*, são funções decrescentes de seus preços em moeda estrangeira.

O grupo de *commodities* de exportações coletivas, que inclui serviços, por exemplo, é exogenizado ao tratar as exportações coletivas como um agregado Leontief. A demanda pelas exportações desse grupo está relacionada ao seu preço médio por meio de uma curva de demanda de elasticidade constante, semelhante àquela para exportações individuais. Como é permitido ao conjunto individual conter todas as *commodities*, o conjunto coletivo fica vazio, portanto, o mecanismo de exportação coletiva é desativado (Horridge, 2000).

Por sua vez, a demanda do governo é determinada exogenamente (Corong, 2014; Horridge, 2000), com o consumo agregado variando conforme o consumo agregado real das famílias (Horridge, 2000). A demanda por estoques segue a produção doméstica (Betarelli Junior, 2013; Horridge, 2000). E a demanda por margens é definida de forma proporcional aos fluxos das *commodities* às quais as margens estão associadas. As margens (comércio e transporte) representam o gasto necessário para que determinada *commodity* específica de fonte doméstica ou externa chegue até o usuário final (produtores, investidores, famílias, governo e exportações) (Cardoso, 2016; Corong, 2014; Proque, 2019). Por fim, a demanda total por *commodities* produzidas domesticamente e importadas é o resultado do somatório das demandas de todos os usuários (produtores, investidores, famílias, exportações, governo e estoques) e das margens.

Em se tratando dos preços de compra para cada um dos cinco primeiros grupos de usuários: produtores, investidores, famílias, exportadores e governo, são as somas dos preços básicos, impostos sobre vendas e margens. Os preços básicos das *commodities* domésticas são o preço recebido pelos produtores, enquanto os preços básicos das importações são o preço pago pelos importadores, que incluem taxas de importação (Corong, 2014). Os impostos sobre vendas são tratados como *ad valorem* sobre os preços básicos, com as variáveis de imposto sobre vendas t no modelo linearizado sendo mudanças percentuais no “poder da tarifa”, que é a soma de um mais a taxa *ad valorem* (Horridge, 2000).

Assim como os modelos ORANI-G e PHILGEM, os modelos SAFBR permitem grande flexibilidade no tratamento de impostos indiretos. Os impostos sobre vendas são tratados como *ad valorem* nos valores básicos. As mudanças nos impostos indiretos podem ser incorporadas como alterações no poder da tarifa para cada usuário (Corong, 2014; Horridge, 2000).

Os modelos SAFBR apresentam as equações que definem o PIB tanto pelo lado da renda quanto pelo lado da despesa como no modelo ORANI-G. Pela ótica da renda, o PIB nominal é a soma de todos os pagamentos aos fatores primários de produção (terra, capital e trabalho), mais o valor de outros custos e o rendimento total de impostos sobre as *commodities*. Pela ótica da despesa, é a soma do consumo de cada usuário ponderada pela soma das variações percentuais dos índices de preço e quantidade na variação percentual da despesa total. Por fim, o PIB pode ser expresso a custo de fatores, ou seja, como a soma dos fatores de produção, sem considerar impostos e subsídios (Corong, 2014; Horridge, 2000).

O saldo da balança comercial, isto é, exportações menos importações agregadas. Enquanto o índice de termos de troca é definido como sendo a razão entre a variação percentual do índice

de preços de exportação e do índice de preços de importação (Corong, 2014). Por fim, a taxa de câmbio real é a subtração entre o índice de preços de importação e o deflator do PIB, medindo assim as variações nos preços domésticos em relação aos preços mundiais. Uma variação percentual positiva na taxa de câmbio indica que os bens produzidos localmente estão se tornando relativamente mais baratos no mercado mundial (Corong, 2014).

6.3.2 Dinâmica recursiva

Esta subseção descreve a incorporação dos mecanismos intertemporais (dinâmica recursiva) ao modelo SAFBR, que é baseado no modelo ORANIG-RD (Horridge, 2002). O mecanismo de dinâmica recursiva anual implica que cada solução do modelo representa as mudanças entre um ano e o outro. Na prática, o modelo dinâmico recursivo anual é uma série de modelos estáticos ligados entre si por meio de equações de acumulação de capital e mudanças projetadas em variáveis macroeconômicas (Corong, 2014). O modelo ORANIG-RD incorpora três mecanismos dinâmicos, a saber: i) uma relação entre fluxo de investimento e estoque de capital, com uma defasagem de gestação de um ano; ii) uma relação positiva entre investimento e taxa de retorno; e iii) uma relação entre crescimento salarial e emprego (Horridge, 2002).

Horridge (2002) destaca que o modelo ORANIG-RD permite a construção de dois cenários para a economia em análise: i) um cenário base (*baseline*) plausível para longos períodos; e ii) um cenário de política, que permite choques diferentes do *baseline* em alguns instrumentos de política. Segundo o autor, projetar esses cenários requer adições ao banco de dados do modelo, descrevendo estoques de capital, bem como previsões exógenas para trajetórias futuras, por exemplo, de mudança tecnológica, emprego e preços de importação. Por fim, Horridge (2002) afirma que a diferença entre as projeções do *baseline* e do cenário de política representa o efeito da mudança de uma política sobre a economia.

A taxa de crescimento dos estoques de capital está vinculada ao investimento que, por sua vez, é guiado por taxas de retorno. Horridge (2002) define a quantidade de capital em cada período $t + 1$ no setor i , $K_{i,t+1}$, como sendo igual à soma do investimento feito nesse setor no ano t , $I_{i,t}$, menos a depreciação do capital nesse setor no ano t , $D_i K_{i,t}$:

$$K_{i,t+1} = I_{i,t} - D_i K_{i,t} \quad (7)$$

O autor considera que o período de gestação do capital é defasado em um ano, de modo que mudanças no investimento em t só surtem efeitos em $t + 1$. Além disso, a depreciação é tida

como um parâmetro exógeno no modelo e constante ao longo do tempo (Betarelli Junior, 2013; Proque, 2019).

No modelo SAFBR, assim como no ORANIG-RD, o mecanismo de alocação de investimento tem dois componentes: i) as taxas de investimento/capital, que são positivamente relacionadas às taxas de retorno esperadas; e ii) as taxas de retorno esperadas, que convergem para as taxas de retorno reais por meio de um mecanismo de ajuste parcial. Horridge (2000) postula que a taxa de crescimento do estoque de capital do setor i no tempo $t + 1$, $G_{i,t+1}$, depende da taxa de retorno esperada do setor i em $t + 1$, e pode ser expressa como:

$$G_{i,t+1} = \frac{I_{i,t}}{K_{i,t}} = F(E_{i,t+1}) \quad (8)$$

Em que $F(E_{i,t+1})$ é uma função positiva do retorno esperado do setor i em $t + 1$. Horridge (2000) considera a hipótese de que cada setor i possui uma taxa de retorno de longo prazo ou normal, R_{normal} , que quando igual a taxa de retorno esperada E iguala a taxa de crescimento bruta G à taxa de crescimento bruto normal do estoque de capital, G_{normal} , isto é:

$$G_{normal_i} = F(R_{normal_i}) \quad (93)$$

Em se tratando do mecanismo de ajuste parcial, no modelo ORANIG-RD, $E_{i,t+1}$ é a média da taxa de retorno esperada do setor i em t , $E_{i,t}$, e da taxa de retorno real desse setor em $t + 1$, $R_{i,t+1}$, ponderada pela elasticidade do investimento, a , como descrito a seguir:

$$E_{i,t+1} = (1 - a)E_{i,t} + aR_{i,t+1}, \quad 0 < a < 1 \quad (104)$$

A equação 29 implica que os investidores são conservadores e míopes, isto é, apenas as taxas de retorno passadas e correntes afetam a taxa esperada para o próximo período (Horridge, 2002).

Os modelos SAFBR permitem que o salário real, W , se ajuste aos níveis de emprego corrente, L , e tendencial, L , da seguinte forma:

$$\Delta \frac{W}{W_t} = \gamma \left[\left(\frac{L_t}{T_t} \right) - 1 \right] + \gamma \Delta \left(\frac{L}{T} \right) \quad (115)$$

Desse modo, se o emprego em t exceder em $x\%$, então o salário real aumentará, durante o período, em $\gamma\%$. Como o emprego é negativamente relacionado ao salário real, esse mecanismo

faz com que o emprego se ajuste em direção ao nível de tendência, que pode ser pensado como o nível de emprego que não acelera a inflação (Horridge, 2002).

6.3.3 Módulo fiscal

Esta subseção apresenta as equações comportamentais e variáveis adicionais necessárias para estender a base comum aos modelos SAFBR (baseada no ORANIG-RD, que é calibrado com dados de uma matriz de insumo-produto) para incorporar dados suplementares de uma Matriz de Contabilidade Social (MCS). Essa extensão é denominada nesta Tese de módulo fiscal, está baseada teoricamente no modelo PHILGEM (Corong e Horridge, 2012) e segue a operacionalização realizada no modelo BIG-TP (Proque, 2019). As equações comportamentais adicionais são: i) Excedente Operacional Bruto (EOB); ii) conta das empresas; iii) rendimento do trabalho das famílias; iv) renda das famílias; v) função de consumo das famílias, poupança e outras transferências; vi) gastos do governo; vii) resto do mundo; e viii) gastos de investimento privado.

O EOB ou renda derivada do capital é a soma das remunerações do capital e da terra do agregado de stores da economia. A conta das empresas representa todas as instituições públicas e privadas da economia. Ela é derivada dos rendimentos do EOB e das transferências das famílias, do governo e do resto do mundo (Corong e Horridge, 2012; Corong, 2014). No que diz respeito aos desembolsos das empresas, a renda disponível das empresas é a diferença entre a renda das empresas e os impostos de renda pagos diretamente ao governo. A poupança ou os lucros retidos das empresas são computados como um resíduo entre sua renda e seus desembolsos.

O modelo SAFBR, assim como o PHILGEM permite distinguir os rendimentos do trabalho de cada família por setor e por ocupação. A massa salarial de um setor é igual ao valor da renda do trabalho recebido pelas famílias neste mesmo setor. As mudanças na massa salarial das famílias acompanham as variações populacionais e dos salários nominais (Corong, 2014). A renda bruta das famílias é a renda sem incidência de impostos que consiste na soma das remunerações do capital, do trabalho e das transferências de empresas às famílias. As transferências recebidas pelo governo seguem os movimentos do PIB real e são indexadas ao índice de preços ao consumidor, enquanto as recebidas do resto do mundo acompanham o PIB real e são indexadas à taxa de câmbio nominal. Por fim, as transferências entre famílias são definidas como uma parcela fixa do total de transferências interfamiliares (Corong, 2014).

A partir da renda bruta de cada família, é possível calcular a renda disponível das famílias deduzindo o imposto de renda direto e outras transferências não relacionadas a impostos para o governo. De posse da renda disponível, cada família decide o quanto consumir e o quanto poupar. A despesa de cada família é dada pela média ponderada entre cada componente da despesa, a saber: consumo de *commodities*, pagamentos de impostos e transferências

O governo auferir renda de impostos indiretos sobre *commodities*, impostos diretos sobre a renda das famílias e das empresas, renda sobre o EOB e transferências das famílias, das empresas e do resto do mundo. Além disso, conforme Proque (2019), adicionam-se à renda do governo as transferências de renda entre governos, já que esse fluxo está presente na MCS. Assume-se que as receitas do governo e do resto do mundo seguem os movimentos nominais do PIB (Corong; Horridge, 2012; Corong, 2014).

O gasto corrente nominal do governo refere-se à soma de todas as despesas com consumo e transferências. Além do gasto corrente, o governo também realiza dispêndios com bens de investimento, que são calculados a partir da dotação inicial do investimento público em cada setor no investimento total da economia. Por fim, a poupança do governo é tida como um resíduo entre a renda total e a despesa total do governo.

Os modelos SAFBR contabilizam os fluxos entre a economia brasileira e o restante do mundo. Assim como Cardoso (2016) e Proque (2019), incorpora-se aos modelos o fluxo de remunerações do trabalho entre a economia doméstica e o setor externo dada a disponibilidade desses dados na MCS. A receita total recebida do resto do mundo, que é oriunda das exportações (a preços FOB²⁴), das transferências do resto do mundo para o governo, para as empresas e para famílias, além do recebimento de remuneração do trabalho. O pagamento total feito ao resto do mundo, em moeda estrangeira, inclui: as importações a preços CIF, os lucros repatriados pelas empresas, as transferências correntes e pagamentos dos serviços da dívida externa, as transferências das famílias para o resto do mundo e o envio de remuneração por trabalho prestado por não residente.

Finalmente, calcula-se o saldo em conta corrente ou a poupança externa, que é a diferença entre os pagamentos ao setor externo e os recebimentos ao resto do mundo. Os modelos SAFBR, assim como o PHILGEM, também incluem equações que definem poupança e investimento em toda a economia. A despesa agregada de investimento privado é definida como sendo a

²⁴ Nos preços “livre a bordo” (*Free on Board* – FOB) todo os custos, incluindo frete e transporte, são arcados pelo comprador da mercadoria.

diferença entre o investimento total (incluindo estoques) e a despesa de investimento do governo. Segundo Corong e Horridge (2012), se todas essas contas estão em equilíbrio, a poupança total da economia deve ser igual ao investimento total.

6.3.4 Módulo de emissões

Os modelos SAFBR são desenvolvidos para, entre outros objetivos, avaliar o impacto da adoção de SAF sobre as emissões de CO₂ do setor aéreo e da economia brasileira. Para atingir tal objetivo, um módulo de contabilidade de emissões é acoplado à base de dados central desses modelos. Esse módulo é baseado teoricamente no modelo MMRF-Green (Adams; Horridge; Parmenter, 2000; Adams; Horridge; Wittwer, 2002) e implementado conforme o modelo BeGreen (Magalhaes, 2013).

O módulo de emissões permite que os modelos SAFBR rastreiem as emissões de GEE em um nível detalhado, identificando-as conforme agente emissor (setores e famílias), e atividade emissora. A maioria das atividades emissoras consiste na queima de combustíveis (carvão mineral, gás natural, ou produtos de petróleo). Ademais, há uma categoria residual chamada “Atividade” que abrange as emissões fugitivas e agropecuárias, que não são decorrentes da queima de combustível. Dentro dessa categoria, que é responsável por mais emissões do que qualquer uma das atividades de combustão, o maior emissor isolado é o setor agropecuário (Adams; Horridge; Parmenter, 2000).

Adams *et al.* (2002) destacam que as emissões da queima de combustíveis são diretamente proporcionais ao seu uso e que apenas o progresso técnico (exógeno) e a redução na quantidade total de combustíveis utilizada podem reduzir as emissões de um setor. Todavia, quando se simulam os efeitos de um imposto sobre o carbono ou emissões GEE, considera-se também a redução das emissões não relacionadas à combustão. A quantidade de redução está diretamente relacionada ao preço do carbono, que é determinado endogenamente pelo modelo em forma de alíquotas *ad valorem* (Adams; Horridge; Wittwer, 2002; Magalhaes, 2013).

O imposto específico sobre o carbono por fonte f e por usuário u é cobrado em unidades equivalentes de CO₂ ($S_{u,f}$) e é vinculado a um único índice de preço (I), de modo a preservar assim a homogeneidade do modelo. Assim, um item de receita de impostos sobre carbono (REV) é escrito como:

$$REV_{u,f} = E_{u,f} * S_{u,f} * I \quad (126)$$

Em que $E_{u,f}$ é a quantidade equivalente de CO₂, em toneladas, por fonte f e por usuário u . Dado que o imposto $S_{u,f}$ será cobrado em forma de uma taxa *ad valorem* (V_f) imposta aos preços básicos dos combustíveis (P_f) usados na produção corrente, $REV_{u,f}$ pode ser reescrita como:

$$REV_{u,f} = \frac{1}{100} * [V_f * P_f * Q_{f,u}] \quad (13)$$

Em que $Q_{f,u}$ é a quantidade de combustível consumida pelo usuário f .

A partir das equações 53 e 54, Adams *et al.* (2002) determinam a taxa *ad valorem* cobrada pela emissão como sendo a razão entre o valor indexado das emissões ($E_{u,f} * I$) e o valor da base tributária *ad valorem* ($P_f * Q_{f,u}$):

$$V_f = S_{u,f} \frac{100 * E_{u,f} * I}{P_f * Q_{f,u}} \quad (14)$$

Em que $\frac{E_{u,f}}{P_f * Q_{f,u}}$ é a intensidade de emissão por uso de combustível (Magalhaes, 2013).

As emissões de GEE não provenientes da combustão são diretamente proporcionais à produção dos setores relacionados, com uma permissão para abatimento em resposta a um imposto sobre o carbono. A quantidade abatida está diretamente relacionada ao nível da penalidade de carbono, gera uma economia de custos equivalente à quantidade de emissões poupada vezes o imposto sobre o carbono (Adams; Horridge; Wittwer, 2002; Magalhaes, 2013).

A mitigação, no entanto, é custosa. Ela envolve investimento adicional em nova tecnologia e/ou mudanças em tecnologias e práticas de trabalho existentes. No contexto desta Tese, o aumento dos custos em face à redução de emissões de GEE se daria em decorrência da adoção do SAF, que requer investimentos adicionais para sua produção. É possível que dentro do esquema CORSIA, esses investimentos possam ser compensados a depender da quantidade de emissões abatidas e do preço do imposto de carbono.

6.3.5 Módulo de volume

Os modelos SAFBR também possuem um módulo de volume que permite tratar a quantidade de combustível utilizada pelo setor aéreo (QAV e SAF) em metros cúbicos e as emissões de CO₂ equivalentes em toneladas. Esse módulo é inspirado no estudo realizado por Betarelli Júnior *et al.* (2022) em um projeto sobre viabilidade de SAF encomendado pela Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC). As emissões de QAV e SAF são diretamente derivadas do consumo desses combustíveis pelos diferentes componentes da demanda intermediária (setores) e da demanda final (governo, investimento, famílias, estoques e exportações). Para consolidar essas informações, foi criada a variável $xavfuel(u, c, s)$ que representa as variações percentuais de consumo de combustível por usuário u , por tipo de combustível c (QAV ou SAF), e por origem s (doméstica ou importada).

Como a base de dados do modelo contém valores monetários para a produção do QAV e do SAF, foi possível definir o volume físico desses combustíveis. Para isso, dividiram-se esses valores pelo preço de 1 m³ de QAV com base nos dados da ANP para o ano de 2015. No caso do SAF, utilizaram-se os custos unitários estimados neste estudo e dispostos na Tabela 8 da seção 6.2. O volume total desses combustíveis (em m³) é representado nos modelos SAFBR pelo coeficiente $FULAVM(u, c, s)$.

A partir disso, foi introduzida no modelo a variável $delfulavm(u, c, s)$, que transforma as variações percentuais de consumo de QAV e SAF ($xavfuel(u, c, s)$) em variações absolutas em m³, por meio da seguinte relação:

$$delfulavm(u, c, s) = \frac{1}{100} [FULAVM(u, c, s) * xavfuel(u, c, s)] \quad (15)$$

Desse modo, os choques aplicados no modelo incidem sobre essa variável física de consumo ($delfulavm(u, c, s)$), o que permite simular a substituição de QAV por SAF em termos de volumes efetivos em m³.

De modo similar, calculou-se a quantidade de emissões em toneladas equivalentes de CO₂ a partir da intensidade de carbono (IC) do QAV e de cada SAF. Para isso, multiplicou-se cada IC pela quantidade de QAV e SAF consumidos, originando o coeficiente $QGAS(c, s, u)$, que representa o volume de emissões por combustível (c), origem (s) e usuário (u). Como o modelo possui a variação de emissões ($xgas(c, s, u)$), calcula-se a variação absoluta das emissões em t ($delGAS(c, s, u)$) da seguinte forma:

$$delGAS(c, s, u) = \frac{1}{100} [QGAS(c, s, u) * (xgas(c, s, u))] \quad (16)$$

Assim, o módulo de volume permite que os modelos SAFBR operem com grandezas físicas reais de volume e de emissões de QAV e SAF.

6.4 Estrutura dos dados e parâmetros do modelo

Esta seção descreve a calibragem do modelo SAFBR, que consiste na determinação de valores para coeficientes e parâmetros que originam o cenário de referência ou solução inicial do modelo, que teve como principal base de dados uma MCS para o Brasil. Essa matriz combina a MIP nacional de 2015 (IBGE, 2015) com o Sistema de Contas Nacionais (SCN) (IBGE, 2023). De um lado, a MIP fornece o fluxo básico nacional para consumo intermediário, demanda por investimento, consumo das famílias, consumo do governo, exportações agregadas e variações de estoques, fluxos de margens e impostos indiretos (Betarelli Junior, 2013). Por outro lado, a MCS brasileira detalha os fluxos de renda entre os agentes econômicos ao longo do tempo, o que não é possível a partir da MIP (Proque, 2019). A construção da MCS comum aos modelos SAFBR permite, portanto, a interação entre as atividades econômicas em termos de consumo intermediário e final de bens e serviços, incorporando conceitos derivados do fluxo circular da renda e gastos na economia.

A base de dados original da MIP conta com 127 produtos e 67 setores. Após os procedimentos para inclusão do setor SAF, já descritos na seção 6.3 deste capítulo, a base de dados de cada um dos modelos SAFBR passa a contar com uma MIP de 130 produtos por 68 setores. Após todas as mudanças realizadas, os modelos SAFBR reconhecem cinco componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo do governo, investimento, exportações e estoques); três fatores primários de produção (terra, capital e trabalho); duas fontes de produção (doméstica e externa); quatro setores de margens (comércio, transporte ferroviário, aquaviário e rodoviário); importações por produto; um agregado de impostos sobre a produção; e uma desagregação por tipos de tributos (ICMS, IPI e Outros)²⁵, o. Além disso, o modelo possui um agregado familiar

²⁵ A desagregação dos impostos, das margens de transporte e das famílias foi feita conforme Betarelli Júnior (2013).

para 10 tipos de famílias organizadas conforme sua renda. Por fim, o modelo possui um conjunto que permite desagregar as emissões de CO₂ oriundas do uso de QAV e de SAF.

Além das informações da MCS, a calibragem de modelos EGC envolve a adoção de estimativas de parâmetros e elasticidades, denominados parâmetros comportamentais (Cardoso, 2016). Estas estimativas são, geralmente, extraídas da literatura. A elasticidade da demanda por exportações de bens tradicionais é oriunda das estimativas de Domingues (2002). Já as elasticidades de substituição por ocupações e por fatores de produção foram calibradas seguindo Betarelli Júnior (2013). O valor utilizado para o parâmetro de Frisch, que estabelece a sensibilidade da utilidade marginal dos gastos das famílias, é o mesmo estimado por Almeida (2011). Essa estimativa também foi utilizada nos estudos de Magalhães (2013) e Proque (2019). No caso das elasticidades de Armington, este estudo utiliza os parâmetros estimados por Tourinho, Kume e Pedroso (2007), que são amplamente utilizados na literatura brasileira de EGC (*e.g.*, Magalhaes (2013), Cardoso (2016), Proque (2019), Betarelli, Domingues e Hewings (2020)). O Quadro 6 sintetiza os parâmetros utilizados no modelo SAFBR.

Quadro 6 – Parâmetros do modelo SAFBR

Parâmetro	Dimensão	Valor
Elasticidade de Armington de substituição: uso intermediário	Produto	0,15 a 3,59
Elasticidade de Armington para investimentos	Produto	0,15 a 3,59
Elasticidade de Armington das famílias	Produto	0,15 a 3,59
Elasticidade da demanda por exportações de bens tradicionais	Produto	0,38 a 2,07
Elasticidade da demanda por exportações de bens não tradicionais	Nacional	1,28
Elasticidade de substituição CES para fatores primários	Setorial	0,27 a 1,54
Elasticidade de substituição por ocupações	Setorial	0,2
Elasticidade de transformação CET	Setorial	0,5
Parâmetro de FRISCH	Famílias	-1,94

Fonte: Elaboração própria.

Os modelos SAFBR são modelos EGC de dinâmica recursiva, como visto na subseção 6.3.2, cuja calibragem depende da disponibilidade de dados para o estoque de capital e para o emprego da economia brasileira, já que são parâmetros exógenos (Betarelli Junior, 2013; Proque, 2019). Nesta tese, assim como em Cardoso (2016), o ajuste intertemporal do mercado de trabalho foi calibrado de maneira que, no estado estacionário, o nível de emprego atual e o tendencial não diferem; portanto, a variação do salário real é igual à taxa de crescimento econômico. Assim, a razão entre o nível de emprego atual e tendencial é igual a 1 no período inicial. A elasticidade do salário em relação ao emprego foi calibrada com um valor de 0,66, conforme estimativa de

Gonzaga e Corseuil (2001), e é amplamente utilizada na literatura de EGC (Cardoso, 2016; Proque, 2019; Betarelli, Domingues e Hewings, 2020).

Em relação ao mecanismo intertemporal do estoque de capital e fluxos de investimento, a elasticidade de investimento para todos os setores assume valor de 4,8, conforme Haddad (2004) e Perobelli (2004). A razão tendencial entre investimento e capital varia de 6% a 11% entre os setores, considerando uma taxa de crescimento de 3% no estado estacionário, a depreciação do capital varia de 4% a 8%. Essa variação está dentro do intervalo calculado por Ferreira, Issler e Pessoa (2000) de 3% a 12% , e compreende as taxas encontradas por Betarelli Júnior (2013), 5%, Cardoso (2016), 4%, e Proque (2019), 6%. A taxa de retorno bruta do capital nominal e esperado, que são iguais no estado estacionário, é de 14%. Esses parâmetros estão dispostos no Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros para o módulo de dinâmica recursiva do modelo SAFBR

Parâmetro	Dimensão	Valor
Taxa de depreciação do capital	Setorial	0,04 a 0,08
Taxa de retorno bruta nominal	Setorial	0,14
Taxa de retorno bruta esperada	Setorial	0,14
Razão investimento/capital	Setorial	3
Razão investimento/capital (tendência)	Setorial	0,06 a 0,11
Elasticidade do investimento	Setorial	4,8
Elasticidade do salário em relação ao emprego	Nacional	0,66
Razão entre nível de emprego atual e tendencial	Nacional	1

Fonte: Elaboração própria.

Outro aspecto importante do modelo diz respeito aos dados das emissões de CO₂. Eles são extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), que estima as emissões nos cinco setores que são fontes de gases de efeito estufa no Brasil – Agropecuária, Energia, Processos Industriais, Resíduos e Mudanças de Uso da Terra (SEEG, 2024). Nesta tese, as emissões deste último setor não foram incluídas, já que não podem ser diretamente associadas às atividades econômicas contidas na MIP. No modelo SAFBR, as emissões estão em toneladas equivalentes de CO₂ e são distribuídas entre os setores do modelo, conforme procedimento adotado por Magalhães (2013).

O módulo de emissões acoplado aos modelos SAFBR permitem classificar as emissões em dois tipos: emissões por queima de combustíveis e emissões fugitivas, que não são decorrentes da queima de combustíveis (Adams; Horridge; Parmenter, 2000). Assim como Magalhães (2013), as emissões de CO₂ equivalente (CO₂e) por queima de combustíveis são associadas ao uso de

combustíveis e alocadas para cada setor de uso da MIP de acordo com a utilização do combustível. Em outras palavras, a quantidade de emissões de cada setor depende da quantidade de combustível utilizada. No caso das emissões fugitivas, elas são associadas a cada setor produtivo conforme os dados da SEEG. Por exemplo, as emissões de metano dos rebanhos são associadas ao setor pecuário (Magalhães, 2013).

A Tabela 9 mostra os dados de emissões das 10 atividades emissoras de CO₂ dos modelos SAFBR por origem (doméstica e importada). As atividades fugitivas respondem, sozinhas, por 43,7% das emissões CO₂e do país, sendo a maior parte oriunda da produção doméstica (38,4%). Os outros produtos do refino do petróleo respondem por 31,6% desse total, seguido do diesel-biodiesel (10,5%). Os combustíveis de aviação, por sua vez, contribuem com 0,96% das emissões totais de CO₂e, com 0,27% delas sendo de origem internacional.

Tabela 9 – Emissões associadas ao uso de combustíveis e atividade econômica no Brasil (ano base 2015) em mil toneladas de CO₂e

Emissor	Doméstico	Importado	Total	Part. (%) doméstico no total	Part. (%) importado no total	Part. (%) do produto no total
Exploração florestal	10162,18	343,99	10506,17	0,63	0,02	0,65
Carvão mineral	3613,58	18791,23	22404,81	0,22	1,17	1,39
Combustíveis de aviação	11152,23	4272,21	15424,44	0,69	0,27	0,96
Gasolina e álcool	140361,73	0	140361,73	8,71	0	8,71
Nafta e Petróleo	0	0	0	0	0	0
Óleo combustível	24760,91	894,84	25655,75	1,54	0,06	1,59
Diesel-biodiesel	169109,5	0,00	169109,5	10,49	0	10,49
Outros produtos do refino do petróleo	407655,33	102267,37	509922,7	25,29	6,34	31,63
Etanol e biocombustíveis	13330,1	305,93	13636,03	0,83	0,02	0,85
Atividade econômica	618309,31	86609,6	704918,92	38,36	5,37	43,73
Total	1398454,88	213485,18	1611940,06	86,76	13,24	100

Fonte: Dados dos modelos SAFBR calibrados a partir dos dados da SEEG (2024).

A Tabela 9 não apresenta as emissões do SAF, que também é um emissor de CO₂, pois a intensidade de carbono (IC) de cada rota tecnológica de produção de SAF possui um parâmetro de emissão específico. Os parâmetros utilizados neste estudo são oriundos do CORSIA. A Tabela 10 mostra a IC de cada rota, considerando as emissões do ciclo de vida (LCA) e das mudanças no uso da terra (ILUC). A base de dados de cada modelo SAFBR é calibrado com a IC total, isto é, a soma da IC oriunda do LCA e da ILUC. Observa-se que os SAF produzidos pelas rotas OS/HEFA e CAB/ATJ são os que mais emitem CO₂, já os que são produzidos pelas

rotas RF/FT e SB/HEFA são os que possuem as menores intensidades de carbono, respectivamente.

Tabela 10 – Intensidade de carbono para o QAV e para o SAF

Rota tecnológica	Emissões LCA	Emissões ILUC	Emissão total de GEE (gCO ₂ e/MJ)
QAV	89		89
CAN/ATJ	24,10	8,70	32,80
RCAN/ATJ	24,10	0,00	24,10
RF/FT	8,30	0,00	8,30
OS/HEFA	40,40	27,0	67,40
SB/HEFA	22,50	0,00	22,50

Fonte: Elaboração própria com base no CORSIA (OACI, 2022b), na IATA (2022).

6.5 Cenários de simulação

Esta seção está dividida em três partes. A primeira delas descreve o fechamento do modelo. A segunda parte discorre sobre o cenário de referência. E, por fim, a terceira parte aborda a análise de política, isto é, apresenta as simulações que serão analisadas neste estudo.

6.5.1 Fechamento

O fechamento de um modelo de EGC consiste na definição do conjunto de variáveis exógenas e endógenas para que o modelo em questão possa operar durante as simulações. Essa definição representa as hipóteses sobre funcionamento da economia e não deve ser feita de modo *ad hoc* (Magalhaes, 2013). É preciso garantir que o cenário econômico definido a partir do fechamento do modelo seja coerente com os objetivos do estudo (Betarelli Junior, 2013). Assim, os choques implementados poderão representar de modo adequado a política econômica em questão.

Nos modelos de EGC, calcula-se como variações nas variáveis exógenas, cuja quantidade é a diferença entre o número de equações e de variáveis endógenas, que afeta as variáveis endógenas (Dixon; Rimmer, 2002). A classificação de quais variáveis serão endógenas ou exógenas é flexível. Essa escolha, todavia, deve ser feita de modo a evitar problemas de singularidade, que ocorre quando as variáveis classificadas como endógenas não são funções das variáveis definidas como exógenas no fechamento (Betarelli Junior, 2013). Os modelos de EGC de dinâmica recursiva, como é o caos do SAFBR, apresentam quatro tipos possíveis de fechamento: histórico, de decomposição, prospectivo e de política (Dixon; Rimmer, 2002).

No fechamento histórico são incluídos dois tipos de variáveis: observáveis e atribuíveis. O primeiro tipo refere-se às estatísticas disponíveis para o período que se quer estudar; o segundo é atribuído exogenamente. Em um fechamento de decomposição, incluem-se todas as variáveis exógenas que não são explicadas em um modelo EGC, podendo estas ser variáveis observáveis, como taxas de impostos, ou não observáveis, como tecnologia e variáveis de preferência. No fechamento prospectivo, as variáveis exógenas do fechamento histórico se tornam endógenas. Por fim, no fechamento de política atribuem-se choques às variáveis naturalmente exógenas. (Dixon; Rimmer, 2002). Neste último caso, se a variável de choque for endógena, deve-se realizar uma troca com outra variável do modelo, tipicamente de deslocamento de curvas de demanda, de preferências ou de produtividade, a fim de torná-la exógena (Cardoso, 2016).

As variáveis observadas que recebem choques na simulação histórica são: o PIB pela ótica do dispêndio, o consumo das famílias, o investimento real agregado, o consumo do governo, o índice do volume de exportações, o emprego agregado, a taxa de câmbio e a tributação direta sobre a renda das famílias e das empresas. Cada uma dessas variáveis tem sua contrapartida endógena, que são respectivamente: a produtividade total dos fatores primários (agregada para todos os setores); o deslocamento do consumo das famílias; o deslocamento do investimento; o deslocamento do consumo do governo; o deslocamento na demanda por exportações; o deslocamento que aciona o mecanismo de ajuste salarial; índice de preço ao consumidor; o deslocamento na tributação sobre a renda das empresas.

No fechamento de política, para viabilizar as simulações dos choques de substituição de QAV por SAF conforme as metas de redução de emissões de CO₂ definidas pela LCF e pelo CORSIA, a variável $delfulavm(u, c, s)$, que representa a variação ordinária em m³ da demanda por combustível de aviação (QAV ou SAF) e é originalmente endógena, foi exogeneizada. Para garantir que a consistência do modelo e assegurar o equilíbrio entre o número de equações e variáveis endógenas, a variável $a1com(c, s, i)$, que representa a mudança tecnológica no uso de insumos intermediários, tornou-se endógena. Destaca-se que essa troca ocorreu apenas para o consumo de QAV e SAF do setor aéreo.

6.5.2 Cenário de referência (*Business as Usual* – BAU)

Na simulação do cenário de referência (doravante *baseline*), o fechamento é formado a partir das variações reais dos principais componentes da demanda final observáveis até 2024 e previstos até 2050. A utilização dos dados observados visa atualizar a estrutura numérica dos

modelos SAFBR para a implementação dos choques prospectivos entre 2025 e 2050. A partir de 2025, serão utilizadas as estimativas de evolução das variáveis macroeconômicas para gerar as soluções prospectivas. A Tabela 11 apresenta os valores para cada uma dessas variáveis que compõem a simulação histórica.

Tabela 11 – Variações reais (%) dos principais indicadores econômicos e do QAV

Indicadores Macroeconômicos	Observado									Prospectivo
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 – 2050 (ao ano)
PIB	-3,3	1,3	1,8	1,2	-3,3	4,8	3,0	3,2	3,3	2,2
Consumo das famílias	-3,8	2,0	2,4	2,6	-4,6	3,0	4,2	3,2	5,1	-
Gastos do governo	0,2	-0,7	0,8	-0,4	-3,7	3,5	2,1	3,8	2,1	-
Exportações	0,9	4,9	4,1	-2,6	-2,3	4,4	5,7	8,9	4,1	-
Investimentos	-12,1	-2,6	5,2	4,0	-1,8	12,9	1,1	-3,0	6,6	-
Emprego Nacional	-1,6	1,3	2,7	1,6	-6,4	5,9	3,8	1,6	2,8	-
População	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,2
Indicadores QAV										
Demanda de QAV do transporte aéreo	-9,4	-0,8	3,1	-2,3	-47,2	36,1	28,1	4,6	2,9	-
Exportação de QAV	-8,3	3,4	-2,3	-26,9	-50,8	8,2	61,3	40,4	19,4	-
Importação de QAV	-7,3	-54,8	49,8	27,2	-67,0	3,4	246,2	-23,3	13,0	-

Fonte: (ANAC, 2025a); (ANP, 2025); e (IBGE, 2025a, 2025b, 2025c).

Nota: Valores faltantes (“-”) indicam que as variáveis são endógenas no período.

Os indicadores macroeconômicos observados na Tabela 11 revelam um período marcado por instabilidades. Em 2016, a economia enfrentou uma recessão (o PIB caiu 3,3%), que desencadeou elevada retração dos investimentos (-12,1%) e do consumo das famílias (-3,8%). No período de 2017 a 2019, a economia nacional recuperou-se em relação a 2016: o PIB cresceu, em média, 1,4% ao ano. O ano de 2020 destacou-se pelo impacto negativo da pandemia de COVID-19, com reduções expressivas no emprego (-6,4%), no consumo das famílias (-4,6%), nos gastos do governo (-3,7%) e no PIB (-3,3%). Em 2021, a economia brasileira recuperou-se: o PIB avançou 4,8%, impulsionado pela expansão dos investimentos (12,9%), das exportações (4,4%), dos gastos do governo (3,5%) e do consumo das famílias (3%), o que se refletiu em aumento do emprego nacional (5,9%). No triênio 2022–2024, observa-se uma estabilidade – o PIB cresceu, em média, 3,2%, embora os investimentos tenham apresentado oscilações, com queda de 3% em 2023.

A Tabela 11 também mostra os indicadores relativos ao QAV. As variações observadas nesses indicadores mostram que o QAV acompanha as tendências macroeconômicas, sobretudo em períodos de crise e de recuperação acentuadas. Em 2016, o consumo (-9,4%), as exportações (-

8,3%) e as importações (-7,3%) de QAV caíram, refletindo os impactos da recessão econômica daquele ano. Entre 2017 e 2019, período em que a recuperação econômica foi mais lenta, esses indicadores oscilaram. Já em 2020, ano da pandemia da COVID-19, os indicadores de QAV apresentaram quedas acentuadas: -47,2% no consumo, -50,8% nas exportações e -67,0% nas importações. A partir de 2021, observou-se uma recuperação: o consumo cresceu, em média, 17,9% ao ano (2021-2022) e as exportações acumularam alta de 129,3% (2021-2024), enquanto as importações alternaram picos (246,2% em 2022) e quedas (-23,3% em 2023), o que pode ser explicado pela sensibilidade do setor a choques externos.

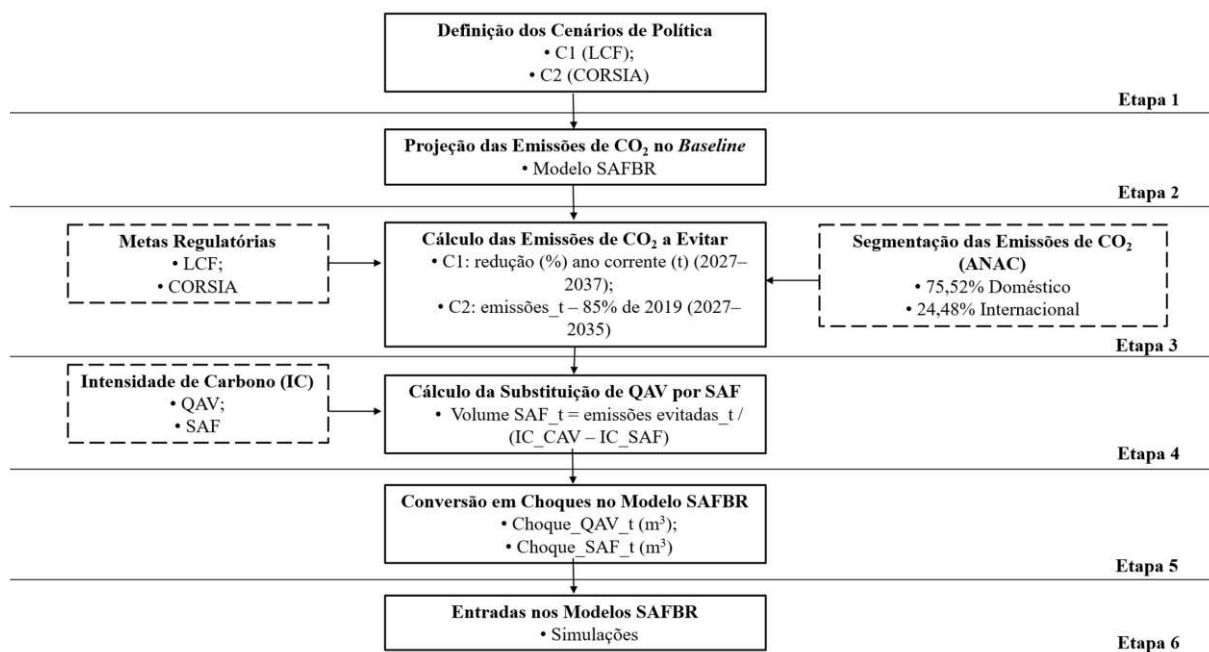
6.5.3 Análise de política

Esta subseção apresenta o fechamento de política e detalha a construção dos dois cenários analisados nesta tese. No fechamento de política, as variáveis apresentadas na Tabela 11 são endogenizadas nos modelos SAFBR, uma vez que se pretende capturar os desvios em relação ao cenário BAU. Cada simulação de política é realizada em um ambiente econômico com o gasto do governo vinculado à flutuação do PIB real, e o consumo das famílias à mudança endógena da renda. Assume-se a hipótese de um saldo comercial em equilíbrio em relação ao PIB (em % do PIB) e a taxa de câmbio é o numerário. Como a taxa de câmbio é o numerário escolhido para o sistema *walrasiano* do modelo, a variação dos preços da economia representa a oscilação em relação à taxa de câmbio.

A partir dessas hipóteses, procede-se à simulação da política de substituição de QAV por SAF conforme as metas de redução de CO₂ estabelecidas pela LCF e pelo CORSIA. Essas metas serão convertidas em redução e em aumento de consumo de QAV e SAF, respectivamente, pelo setor aéreo. Os choques incidirão sobre a variável de consumo intermediário do setor de transporte aéreo, definida em cada modelo SAFBR como *delfulavm* (u, c, s) de modo que o volume de saída de QAV é igual ao de entrada de SAF e ocorre simultaneamente.

A Figura 6 mostra as seis etapas envolvidas na construção dos choques de política aplicados aos modelos SAFBR. A Etapa 1 consiste na definição dos cenários a serem analisados neste estudo. O Cenário 1 (C1) simula a LCF, que estabelece uma trajetória progressiva de redução das emissões de CO₂ dos voos domésticos, iniciando em 1% nos dois primeiros anos (2027 e 2028) e crescendo 1 ponto percentual por ano até atingir 10% em 2037. O Cenário 2 (C2), por sua vez, avalia o CORSIA, que incide sobre os voos internacionais operados por companhias aéreas brasileiras, limitando as emissões entre 2027 e 2035 a 85% daquelas registradas em 2019.

Figura 6 – Construção dos choques de política a serem simuladas no modelo SAFBR



Fonte: Elaboração própria.

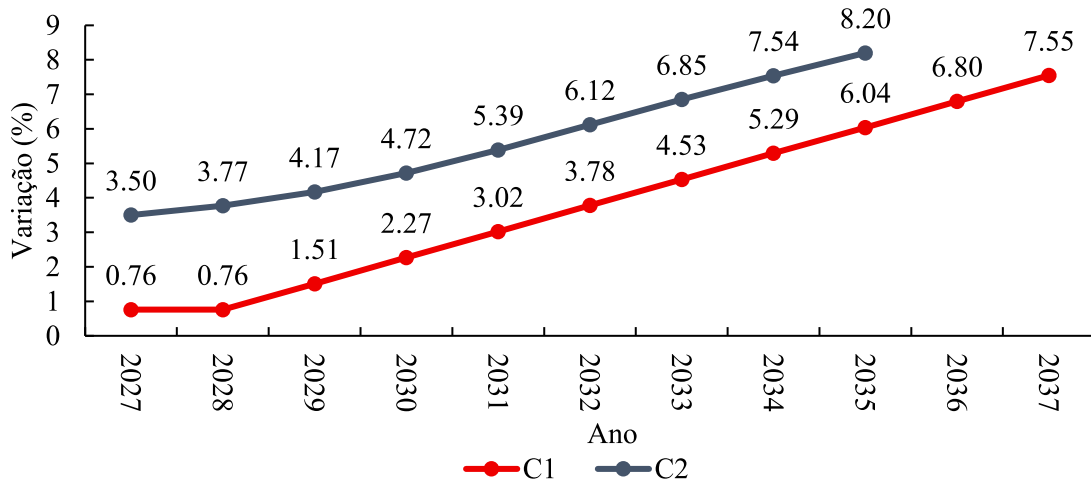
Na Etapa 2, projeta-se o volume de emissões de CO₂ sobre o qual cada cenário incidirá. Para isso, foram construídos cinco *baselines* um para cada modelo SAFBR (2015–2050), um para cada rota tecnológica de produção de SAF. Como o consumo inicial de SAF é irrelevante em relação ao QAV²⁶, as trajetórias de emissões nos diferentes *baselines* praticamente não se diferenciam. Assim, as emissões projetadas são equivalentes entre as rotas, e para fins de exposição adota-se o *baseline* da CAN/ATJ.

A Etapa 3 consiste no cálculo das emissões a serem evitadas em cada cenário. Para isso, dividem-se as emissões do setor aéreo conforme a natureza do voo – doméstico e internacional – já que a LCF e o CORSIA possuem escopos distintos. Essa divisão foi feita com base nos dados de consumo de QAV disponibilizados pela ANAC (2025b). No período de 2015 a 2024, em média, 75,52% do QAV total consumido pelas companhias aéreas brasileiras destinou-se aos voos domésticos, enquanto 24,48% aos voos internacionais. A partir desses percentuais e das metas da LCF e do CORSIA, as emissões a serem evitadas em cada cenário foram estimadas

²⁶ No *baseline* dos seis modelos, o percentual de consumo de SAF pelo setor aéreo não chega a 1% em nenhum deles.

e estão dispostas no Apêndice A. A Figura 7 mostra o quanto essas emissões representam do total do setor aéreo²⁷.

Figura 7 – Redução (em %) das emissões de CO₂ por cenário



Fonte: Elaboração própria a partir das projeções de *baseline* dos modelos SAFBR e das metas de redução de CO₂ estabelecidas por cada regulamento.

Na Etapa 4, calcula-se o quanto de QAV deve ser substituído por SAF. Cada rota de produção de SAF em cada cenário apresenta um volume distinto para saída de QAV e entrada de SAF, que vai depender da intensidade de carbono (IC) de cada rota tecnológica de produção de SAF. A Equação 17 mostra como esse cálculo é feito:

$$VOL_{(-QAV,+SAF),t,c} = \frac{MRE_{t,c}}{IC_{QAV} - IC_{SAF}} \quad (17)$$

Em que $VOL_{(-QAV,+SAF),t,c}$ é o volume de QAV a ser substituído por SAF para cumprir as metas de redução de emissões de CO₂ em cada ano t de cada cenário c ($MRE_{t,c}$); e IC_{QAV} e IC_{SAF} representam as intensidades de carbono do QAV e de cada SAF, respectivamente, dispostos na Tabela 10 da seção 6.4. O Apêndice B mostra o volume de SAF requerido em cada rota para cumprimento das metas de cada cenário.

Esses volumes, no entanto, ainda não são diretamente os choques a serem simulados. Como os modelos SAFBR são de dinâmica recursiva, a base de dados em $t + 1$ depende dos valores em

²⁷ Essas emissões são do *baseline* do modelo SAFBR para a rota CAN/ATJ, no entanto, poderia ser de qualquer uma das quatro rotas restantes, pois os resultados quando arredondados até a segunda casa decimal são iguais em todas elas.

t. Sendo assim, na Etapa 5, os choques são efetivamente construídos levando em conta essa dinâmica temporal. A Tabela 12 apresenta os choques anuais aplicados a cada rota nos dois cenários analisados. Os choques correspondem à entrada de SAF, a qual equivale, em magnitude, à saída de QAV (com sinal oposto), razão pela qual este último não é explicitado na tabela. Finalmente, na Etapa 6, são conduzidas as 10 simulações descritas na Tabela 12.

Tabela 12 – Choques (m³) aplicados nas simulações dos modelos SAFBR

Ano	C1					C2				
	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA
2027	34445	92014	30624	29887	24628	114140	159644	426474	141935	138513
2028	443	1184	394	384	317	10266	14359	38366	12766	12462
2029	36266	96879	32243	31467	25930	15972	22336	59675	19858	19386
2030	38554	102989	34276	33453	27566	22998	32160	85911	28591	27912
2031	41743	111509	37112	36220	29847	29981	41925	111994	37273	36385
2032	45400	121276	40363	39393	32461	34939	48861	130517	43440	42402
2033	49073	131087	43628	42580	35087	37482	52419	140017	46603	45487
2034	52721	140833	46872	45746	37696	38852	54338	145143	48310	47148
2035	56574	151125	50298	49089	40451	40302	56365	150559	50114	48908
2036	60743	162260	54004	52706	43431	-	-	-	-	-
2037	65126	173966	57901	56509	46565	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir do *baseline* dos modelos SAFBR e das metas de redução de CO₂ estabelecidas por cada regulamento.

Nota: Valores “-” indicam que não foi aplicado nenhum choque naquele ano.

6.6 Custo de Abatimento do SAF

Neste estudo, os custos de abatimento do SAF são os custos associados à redução de uma tonelada de CO₂ por meio da substituição de QAV por SAF. Tais custos resultam da combinação entre o preço e a IC de cada rota tecnológica de produção de SAF (Fan *et al.*, 2024) e são definidos como a razão entre a diferença nos preços do SAF (P_{SAF}) e do QAV (P_{QAV}) e a diferença na IC entre os dois combustíveis (Fan *et al.*, 2024; Sterner; Fritsche, 2011):

$$CA_{SAF} = \frac{P_{SAF} - P_{QAV}}{IC_{QAV} - IC_{SAF}} \quad (17)$$

Espera-se que o custo de abatimento seja alto quando o preço do SAF for maior que o do QAV e/ou quando a diferença na IC entre os dois combustíveis for pequena. De forma análoga, um SAF com preço próximo ao do QAV e com grande redução na intensidade de carbono tende a apresentar um custo de abatimento baixo.

7 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados econômicos e ambientais das simulações realizadas com o modelo SAFBR. A substituição de QAV por SAF foi simulada considerando as cinco rotas tecnológicas de produção – CAN/ATJ, RCAN/ATJ, RF/FT, OS/HEFA e SB/HEFA – e dois cenários de política (C1 e C2), o que totalizou 10 simulações. Cabe destacar que as simulações realizadas neste estudo não incorporam políticas adicionais de apoio à produção de SAF ou estímulos econômicos ao setor aéreo. Essa opção metodológica tem por objetivo identificar o impacto efetivo da substituição do QAV por SAF, refletindo as condições de mercado. A primeira seção deste capítulo apresenta os custos de abatimento e a proporção de SAF requerida em cada rota durante a vigência da LCF e do CORSIA. A segunda analisa os efeitos para o setor aéreo. A terceira aborda os impactos para os demais setores da economia. A quarta apresenta os resultados macroeconômicos. A quinta analisa os resultados para as famílias. Por fim, a sexta seção discute as implicações de política.

7.1 Custos de Abatimento e Participação do SAF

Esta seção apresenta o panorama inicial do setor aéreo a partir dos resultados da simulação de *baseline* do SAFBR, destacando dois elementos centrais para a compreensão dos resultados das simulações de política apresentadas ao longo deste capítulo. Esses elementos são: o custo de abatimento de SAF e a participação de SAF no total do combustível consumido pelo setor aéreo, considerando seu uso em substituição ao QAV para cumprimento das metas de redução de CO₂ de cada cenário.

A Tabela 13 apresenta o custo de abatimento do SAF, isto é, o quanto custa evitar a emissão de uma tonelada de CO₂ por meio da substituição de QAV por SAF para os anos de vigência da LCF e do CORSIA. Os dados mostram que há uma tendência de queda nesses custos ao longo do tempo, sugerindo que o SAF vai tornando-se economicamente menos inviável. A rota SB/HEFA apresentaria o menor custo de abatimento em todos os anos: começando com R\$ 3.546,09/tCO₂ em 2027 e caindo para R\$ 1.296,61/tCO₂ em 2037. As rotas CAN/ATJ e RF/FT vêm em seguida, saindo de R\$ 4.401,93/tCO₂ e R\$ 4.925,34/tCO₂, em 2027, para R\$ 2.368,29/tCO₂ e R\$ 2.402,53/tCO₂ em 2037, respectivamente. A rota RCAN/ATJ, embora apresente menor intensidade do que a rota CAN/ATJ, possui custo de produção mais elevado; seu custo de abatimento seria de R\$ 6.281,74/tCO₂ em 2037. A rota com custo mais elevado seria a OS/HEFA, saindo de R\$ 32.752,07/tCO₂ em 2027 para R\$ 21.151,54/tCO₂ em 2037.

Tabela 13 – Custo de abatimento do SAF em anos selecionados do *baseline* (em R\$/t de CO₂evitada)

Ano/Rota	CAN/ATJ	RCAN/ATJ	RF/FT	OS/HEFA	SB/HEFA
2027	4401,93	10231,79	4925,34	32752,07	3546,09
2028	4695,40	10842,58	5273,20	34051,44	3794,10
2029	4906,48	11248,28	5406,50	34600,66	3841,96
2030	4978,56	11399,87	5321,97	34520,28	3728,83
2031	4855,00	11203,70	5016,37	33529,02	3406,86
2032	4540,94	10664,25	4525,46	31908,16	2967,40
2033	4129,07	9817,17	4005,29	29764,87	2506,19
2034	3665,70	8880,93	3517,64	27353,68	2105,90
2035	3171,45	7895,64	3059,24	25063,04	1779,57
2036	2738,98	7044,11	2698,37	23040,31	1514,16
2037	2368,29	6281,74	2402,53	21151,54	1296,61

Fonte: Elaboração própria a partir da simulação de *baseline* do modelo SAFBR.

Nota: Os anos selecionados referem-se ao custo de abatimento dos anos que sofrerão os choques de política (2027-2037).

Os custos de abatimento do SAF dispostos na Tabela 13 revelam quais os SAF mais e menos vantajosos para serem adotados pelo setor de transporte aéreo no cenário de *baseline*. Ressalta-se que a dinâmica de produção de cada SAF está relacionada principalmente à disponibilidade de matéria-prima. Sendo assim, os custos de abatimento do SAF se modificarão nos cenários de simulação conforme os preços dessas matérias-primas se alterem.

A Tabela 14 apresenta a participação de cada rota de SAF no consumo total de combustível do setor aéreo durante o período de vigência da LCF (C1) e do CORSIA (C2). Em ambos os cenários, a trajetória de participação do SAF aumenta progressivamente para todas as rotas, especialmente, para a rota OS/HEFA que, no C1, chega a superar apresentar o consumo de QAV entre 2024 e 2037, atingindo 72,45% de participação no consumo total do setor²⁸ em 2037. Por outro lado, as rotas RF/FT e SB/HEFA apresentam as menores participações de SAF nos dois cenários. Isso está diretamente relacionado às intensidades de carbono dessas rotas (ver Tabela 10 da seção 6.4). Quando se compara os cenários, a participação de SAF em todas as rotas é sempre maior no C2, indicando uma maior demanda por SAF neste cenário. Esses resultados evidenciam não apenas a participação do SAF no consumo de combustível do setor aéreo, mas também como o desenho da LCF e do CORSIA condiciona o ritmo e a magnitude da substituição de QAV por SAF no setor aéreo.

²⁸ Conforme a ANP (2021b), os SAF produzidos pela tecnologia de conversão HEFA estão limitados a 50% de mistura no tanque das aeronaves, o que limita sua substitutibilidade em relação ao QAV a esse percentual no total de consumo de combustível pelo setor aéreo.

Tabela 14 – Participação (%) do SAF no consumo total de combustível do setor aéreo

Ano	C1					C2				
	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA
2027	1,16	1,04	0,83	7,24	1,01	5,40	4,80	3,86	14,42	4,68
2028	1,16	1,04	0,83	7,24	1,01	5,81	5,16	4,15	15,51	5,04
2029	2,33	2,07	1,66	14,49	2,02	6,43	5,71	4,59	17,16	5,58
2030	3,49	3,11	2,50	21,73	3,03	7,27	6,47	5,20	19,43	6,31
2031	4,66	4,14	3,33	28,98	4,04	8,32	7,39	5,95	22,21	7,22
2032	5,82	5,18	4,16	36,22	5,05	9,44	8,39	6,75	25,22	8,19
2033	6,99	6,21	4,99	43,47	6,06	10,56	9,39	7,55	28,21	9,16
2034	8,15	7,25	5,83	50,71	7,07	11,63	10,34	8,31	31,06	10,09
2035	9,31	8,28	6,66	57,96	8,08	12,65	11,25	9,04	33,79	10,98
2036	10,48	9,32	7,49	65,20	9,09	-	-	-	-	-
2037	11,64	10,35	8,32	72,45	10,10	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir da simulação de *baseline* do modelo SAFBR.

Nota: Os anos selecionados referem-se ao custo de abatimento dos anos que sofrerão os choques de política (2027-2037).

Os valores “-” significam que naquele período não vigora o C2.

Em resumo, esta seção buscou fornecer subsídios para uma melhor compreensão dos resultados das simulações de cada cenário. Por um lado, espera-se que as rotas com custo de abatimento mais elevado impactem mais negativamente o setor aéreo e a economia como um todo. Por outro lado, a duração de cada política simulada, bem como o volume de SAF requerido em cada uma delas, pode ditar a magnitude e a velocidade desses impactos.

7.2 Resultados para o Setor Aéreo

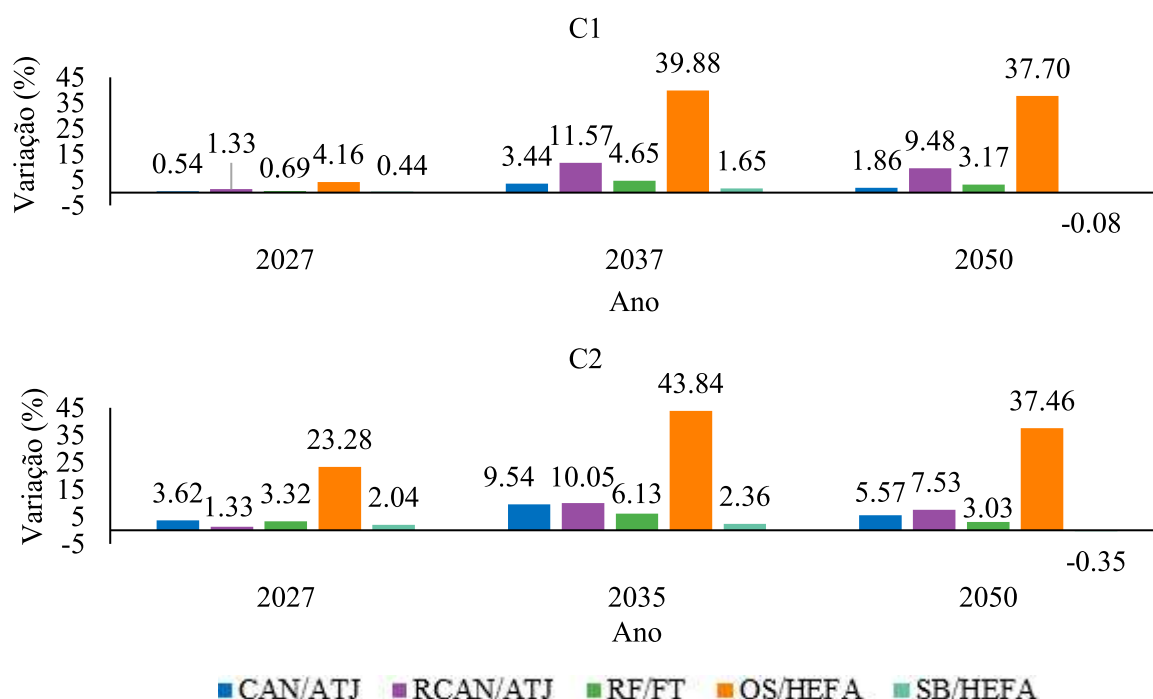
Esta seção apresenta os impactos das políticas de redução de emissões de CO₂ no setor de transporte aéreo brasileiro para cada um dos cenários analisados. Inicialmente, apresenta-se os principais resultados econômicos para o setor, seguido dos resultados ambientais.

A substituição de QAV por SAF é a principal estratégia de descarbonização da matriz energética do setor aéreo (IATA, 2021). Seu efeito imediato seria o aumento dos custos operacionais da indústria da aviação, já que o SAF apresenta custos superior ao do QAV em todas as rotas tecnológicas de produção (ver Tabela 8 da Seção 6.2). Conforme mostra o Gráfico 6²⁹, esses custos mais elevados se traduziriam em desvios acumuladas crescentes nos custos do transporte aéreo. Em 2027, primeiro ano de vigência da LCF e do CORSIA, o aumento desses

²⁹ O desvio acumulado dos custos de produção do setor de transporte aéreo para cada rota e cenário encontra-se detalhada no Apêndice C.

custos seria relativamente modesto, exceto para a rota OS/HEFA no C2 (23,28%). Em contrapartida, em 2037 e 2035, anos finais das duas políticas, respectivamente, os custos do transporte aéreo teriam um aumento expressivo. Sua elevação seria de 39,88% no C1 e de 43,84% no C2 na rota OS/HEFA. Já na rota SB/HEFA seria de apenas 1,65% no C1 e de 2,36% no C2, seguida da rota RF/FT cujos custos se elevariam em 4,65% e 6,13%, respectivamente. Esses resultados estão em consonância com os custos de abatimento dessas rotas, quanto maior esse custo, maior seria o impacto sobre os preços do transporte aéreo.

Gráfico 6 – Desvio acumulado (%) do custo de produção a preços básicos do setor de transporte aéreo (anos seleccionados)



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

O Gráfico 6 mostra ainda que em 2050, último ano de projeção do modelo, o desvio acumulado dos custos de produção do setor de transporte aéreo permaneceria elevada, mas em níveis inferiores aos observados no fim da vigência das políticas. Em ambos os cenários, entre 2035 e 2050, a rota SB/HEFA apresentaria as maiores reduções no desvio acumulado desses custos, saindo de 1,65% para -0,08% no C1 (-104%) e de 2,36% para -0,35% no C2 (-114%); seguida da rota CAN/ATJ, que sairia de 3,44% para 1,86% no C1 (-45%) e de 9,54% para 5,57% no C2 (-40%) e da rota RF/FT, que partiria de 4,65% para 3,17% no C1 (-30%) e de 6,13% para 3,03% no C2 (-50%). Por sua vez, a rota OS/HEFA manteria os custos elevados com pouca variação entre 2035 e 2050, sairia de 39,88% para 37,7% no C1 (-5%) e de 43,84% para 37,46% no C2

(-15%). Esse comportamento sugere que, embora a quantidade de QAV a ser substituída por SAF seja maior no C2, a menor duração da política diluiria seus efeitos sobre os custos do setor ao longo do tempo para todas as rotas, exceto CAN/ATJ.

O aumento dos custos de produção encareceria os serviços ofertados pelo setor aéreo, traduzindo-se diretamente em reduções na sua demanda. A Tabela 15 mostra como as vendas do setor³⁰ seriam afetadas em cada rota e cenário em três horizontes temporais distintos: curto prazo (variação acumulada até 2032), médio prazo (variação acumulada até 2037 no C1 e até 2035 no C2) e longo prazo (variação acumulada até 2050). As vendas para o consumo intermediário, privado e exportações, no curto prazo, seriam negativamente mais impactadas no C2 do que no C1. No médio prazo, esse padrão se repete, com exceção da rota RCAN/FT, cujas vendas diminuiriam mais no C1 do que no C2. No longo prazo, as vendas para o consumo intermediário em todas as rotas seriam menos impactadas no C2, o mesmo ocorreria para as exportações das rotas RF/FT e SB/HEFA.

Tabela 15 – Desvio acumulado (%) das vendas a preços básicos do setor aéreo por tipo de consumo

Rota	Curto prazo			Médio prazo			Longo prazo		
	Interme diário	Privado	Exporta ção	Interme diário	Privado	Exporta ção	Interme diário	Privado	Exporta ção
C1									
CAN/ATJ	-0,41	-0,55	-0,54	-0,45	-0,65	-0,85	-0,08	-0,39	-0,59
RCAN/ATJ	-1,08	-1,34	-1,55	-1,36	-1,98	-2,88	-0,30	-1,73	-3,06
RF/FT	-0,43	-0,61	-0,60	-0,58	-0,80	-1,16	-0,01	-0,55	-1,06
OS/HEFA	-3,16	-4,13	-4,53	-5,06	-6,82	-9,94	-1,71	-6,53	-11,93
SB/HEFA	-0,24	-0,31	-0,35	-0,17	-0,29	-0,41	0,06	-0,02	-0,00
C2									
CAN/ATJ	-1,13	-1,53	-1,69	-1,19	-1,76	-2,23	0,07	-1,24	-1,76
RCAN/ATJ	-1,08	-1,34	-1,55	-1,31	-1,80	-2,35	0,00	-1,45	-2,38
RF/FT	-0,68	-0,89	-1,16	-0,69	-0,99	-1,45	0,18	-0,72	-1,02
OS/HEFA	-4,67	-6,68	-7,24	-5,41	-8,08	-10,33	-0,77	-7,07	-11,86
SB/HEFA	-0,32	-0,49	-0,54	-0,21	-0,45	-0,56	0,20	-0,11	0,12

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

No médio prazo, que corresponde ao fim das políticas LCF e CORSIA, os maiores impactos negativos nas vendas do setor aéreo se concentrariam na rota OS/HEFA, com quedas de 5,06%,

³⁰ Nas simulações do modelo, a variação acumulada das vendas para os demais componentes da demanda final (investimento, governo e estoques) foram zero, por isso não estão dispostas na Tabela 15.

6,82% e 9,94% no C1 e de 5,41%, 8,08% e 10,33% no C2 para o consumo intermediário, privado e exportações, nesta ordem. Enquanto, a rota SB/HEFA apresentaria os menores efeitos negativos, com reduções de 0,17%, 0,29% e 0,41% no C1 e 0,21%, 0,45% e 0,56% no C2, respectivamente. No longo prazo, haveria uma atenuação dos impactos sobre as vendas acumuladas do setor aéreo em todas as rotas e cenários, com os maiores impactos negativos ainda se concentrando na rota OS/HEFA, com quedas de 1,71%, 6,53% e 11,93% no C1 e de 0,77%, 7,07% e 11,86% no C2 para o consumo intermediário, privado e exportações, nesta sequência. Essas vendas seriam positivas para o consumo intermediário na rota SB/HEFA no C1 (0,06%) e no C2 (0,20%), bem como para as exportações no C2 (0,12%).

Conforme a Tabela 15, as vendas para as exportações e para o consumo privado apresentariam as maiores perdas nas simulações realizadas. Isso mostra que esses dois tipos de consumo são mais sensíveis a variações relativas de preços e ajustam seus padrões de consumo. Em contraposição, as vendas para o consumo intermediário, cuja demanda é modelada por uma função de produção de Leontief, seriam menos impactadas, refletindo a rigidez enfrentada pelos setores para ajustar a tecnologia de produção no curto e no médio prazo. Como resultado dessa redução nas vendas, a produção e a demanda por trabalho do setor de transporte aéreo diminuiriam (Tabela 16).

Tabela 16 – Desvio acumulado (%) da produção e do emprego do setor aéreo

Rota	Curto prazo		Médio prazo		Longo prazo	
	Produção	Emprego	Produção	Emprego	Produção	Emprego
C1						
CAN/ATJ	-1,51	-1,84	-1,92	-1,83	-1,02	-0,92
RCAN/ATJ	-3,95	-4,91	-6,12	-6,26	-4,97	-4,90
RF/FT	-1,63	-1,99	-2,50	-2,54	-1,59	-1,33
OS/HEFA	-11,76	-14,87	-21,50	-23,26	-19,97	-19,74
SB/HEFA	-0,90	-1,09	-0,85	-0,74	0,07	0,09
C2						
CAN/ATJ	-4,36	-5,11	-5,17	-5,33	-2,98	-2,96
RCAN/ATJ	-3,95	-4,91	-5,40	-5,83	-3,89	-3,52
RF/FT	-2,76	-3,03	-3,15	-3,07	-1,58	-1,42
OS/HEFA	-18,71	-21,12	-23,77	-24,81	-19,77	-19,34
SB/HEFA	-1,36	-1,43	-1,23	-1,06	0,18	0,14

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

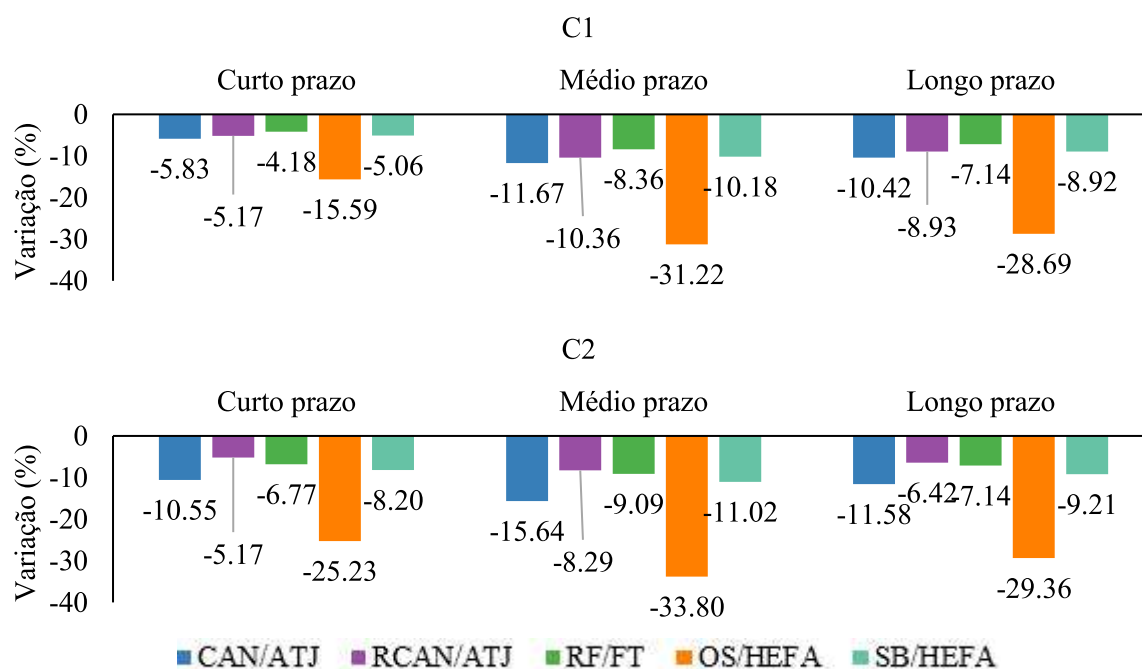
Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Segundo a Tabela 16, em todos os horizontes temporais e cenários, a rota OS/HEFA é a que apresentaria os maiores impactos negativos para o setor, com quedas de 21,5% (C1) e 23,77%

(C2) na produção e 23,26% (C1) e 24,81% (C2) no emprego. Em seguida, apareceria a rota RCAN/ATJ, com reduções de 6,12% e 5,4% na produção e 6,26% e 5,83% no C1 e no C2, respectivamente. Enquanto a rota SB/HEFA apresentaria os menores impactos negativos, com perda na produção de 0,85% (C1) e 1,23% (C2) e no emprego de 0,74% (C1) e 1,06% (C2). No longo prazo, todas as rotas reduziriam os impactos negativos, com destaque para a rota SB/HEFA que apresentaria efeitos positivos de 0,07% (C1) e 0,18% (C2) sobre a produção e de 0,09% (C1) e 0,14% (C2) sobre o emprego do setor aéreo.

Um impacto esperado da redução na produção do setor aéreo é a queda na demanda por combustível. Naturalmente, nos períodos de vigência da LCF (2027-2037) e do CORSIA (2035-2037), a redução dessa produção se dá pela substituição de combustível mais barato (QAV) por outro mais caro (SAF), de modo que essa substituição deve ser o suficiente para atingir as metas de redução de CO₂ definidas em cada cenário. No entanto, a partir do fim da vigência desses regulamentos, o setor aéreo pode escolher entre utilizar QAV ou SAF. Como o primeiro é relativamente mais barato, espera-se que sua demanda aumente. Como o ajuste na tecnologia de produção do setor não é imediato, o uso de QAV se recuperaria gradativamente. O Gráfico 7 apresenta o desvio acumulado do consumo de QAV pelo setor aéreo.

Gráfico 7 – Desvio acumulado (%) na demanda por QAV do setor aéreo



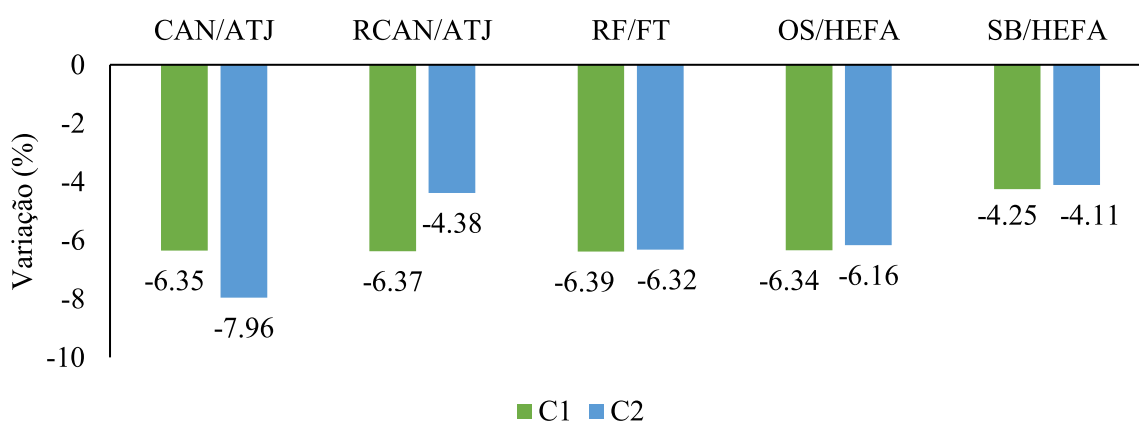
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Do curto para o médio prazo, a demanda por QAV reduziria em todas as rotas nos dois cenários analisados, o que está em linha com a política vigente de substituição desse combustível por SAF. Do médio para o longo prazo, embora a variação nessa demanda continuasse negativa, ela seria menos negativa, mostrando um maior uso de QAV no transporte aéreo. A variação na demanda é mais negativa conforme sua intensidade de carbono for maior. Por esse motivo, em todas as simulações, a rota OS/HEFA apresentaria as maiores reduções e a rota RF/FT as menores, contudo, negativas.

Como no modelo SAFBR, as emissões do setor aéreo estão relacionadas à queima de combustível, espera-se que o setor emita menos CO₂ conforme consume menos QAV. O Gráfico 8 mostra que mesmo após finalizado o período de vigência da LCF e do CORSIA, os efeitos sobre as emissões persistiriam. Isso se deve ao ajuste temporal na tecnologia de produção do setor aéreo e do refino de petróleo que produz o QAV.

Gráfico 8 – Desvio acumulado (%) das emissões do transporte aéreo em 2050



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Em 2050, último ano projetado no modelo SAFBR, as variações nas emissões seriam similares para cada rota no C1 e no C2. No C1, as maiores reduções acumuladas seriam observadas nas rotas RF/FT (6,39%), RCAN/ATJ (6,37%), CAN/ATJ (6,35%) e OS/HEFA (6,34%). Por sua vez, no C2, seriam CAN/ATJ (7,96%), RF/FT (6,32%) e OS/HEFA (6,16%). A rota SB/HEFA, de menor custo de abatimento de SAF, apresentaria a menor variação na redução das emissões – 4,25% no C1 e 4,11% no C2. Isso ocorre porque essa rota demanda menor volume de SAF para atingir as metas de emissão; assim, ao final das políticas, a substituição de SAF por QAV também é reduzida, e poderia ser atendida pelo setor de refino de petróleo.

Esta seção mostrou que a rota SB/HEFA é a que causaria os menores impactos nos custos de produção do transporte aéreo ao longo do tempo, seguida das rotas RF/FT e CAN/ATJ. Enquanto a rota OS/HEFA, os maiores. A rota RCAN, por sua vez, em ambos os cenários, ocuparia uma posição intermediária, com efeitos muito próximos aos da CAN/ATJ no C2. Esses resultados, além de refletirem os custos de abatimento, evidenciam que a vigência de cada política pode influenciar os impactos sobre o setor aéreo. Choques maiores em um curto período exigiriam um aumento rápido na produção de SAF, o que poderia reduzir seus custos de produção, e contribuindo para a redução dos custos do setor aéreo no longo prazo.

Esses custos impactariam negativamente as vendas do setor aéreo, sendo aquelas destinadas ao consumo privado e às exportações as mais afetadas quando se compara com as vendas para o consumo intermediário. A menor demanda por serviços aéreos, por sua vez, reduziria a produção e o emprego do setor. Como resultado, a demanda por combustíveis se reduziria, resultando em menores emissões de CO₂. Toda essa dinâmica impactaria aqueles setores mais integrados à cadeia produtiva do setor aéreo.

7.3 Resultados para Demais Setores

Esta seção apresenta os efeitos da política de substituição do QAV por SAF sobre outros setores da economia. Por um lado, o setor aéreo requer insumos de várias indústrias (a montante); por outro, oferece serviços a outros setores (a jusante). Os impactos dessa política variam entre os setores, dependendo das ligações com o setor aéreo e com a cadeia de fornecimento QAV e SAF. Esses impactos serão apresentados para setores selecionados.

A montante, os combustíveis de aviação e os serviços de armazenagem (ver Tabela 4 da Seção 2) são os insumos mais demandados, representando em média 34% e 13% dos custos de produção do setor aéreo. Na MCS do SFBR, o primeiro é produzido no setor de refino de petróleo e o segundo, principalmente, no de armazenamento e serviços auxiliares aos transportes (armazenamento), responsável por 92% de sua produção. A jusante, organizações associativas e serviços pessoais (OASP) e comércio são os maiores compradores do setor aéreo, com participações de 27,2% e 10,7%, respectivamente (ver Tabela 3 da Seção 2).

A Tabela 17 apresenta os impactos da substituição de QAV por SAF sobre a produção desses setores. A produção do refino de petróleo apresentaria queda em quase todas as rotas, sendo a mais intensa na rota CAN/ATJ no longo prazo, com perdas de 0,41% no C1 e 0,27% no C2,

seguida da rota OS/HEFA com quedas de 0,24% no C1 e 0,18% no C2. Por sua vez, a produção cresceria 0,15% na rota RCAN/ATJ e 0,10% na RF/FT no longo prazo do C2. A produção no setor de armazenamento sofreria impactos maiores, especialmente, na rota OS/HEFA, com quedas de 0,93% no C1 e 0,77% no C2 no longo prazo. A produção do setor de comércio apresentaria resultados heterogêneos: impactos negativos de 0,13% e 0,05% na rota CAN/ATJ no longo prazo do C1 e C2, respectivamente; e ganhos de 0,14% e 0,15% na rota RF/FT, nesta ordem. Por fim, a produção do setor de OASP diminuiria praticamente em todos os cenários e rotas, com destaque para a rota OS/HEFA, com perdas de 2,17% no C1 e 2,19% no C2 no longo prazo. Esse padrão reflete como o aumento do custo do transporte aéreo afetaria mais fortemente os setores intensivos em deslocamentos, como o OASP.

Tabela 17 – Desvio acumulado (%) da produção setorial (setores selecionados)

Rota	C1				C2			
	A montante		A jusante		A montante		A jusante	
	Ref. Petr.	Armaz.	Comer.	OASP	Ref. Petr.	Armaz.	Comer.	OASP
Curto prazo								
CAN/ATJ	-0,09	-0,07	-0,10	-0,17	-0,16	-0,17	-0,01	-0,21
RCAN/ATJ	-0,09	-0,21	0,01	-0,12	-0,09	-0,21	0,01	-0,12
RF/FT	-0,03	-0,02	-0,06	-0,09	0,02	-0,10	0,19	0,06
OS/HEFA	-0,14	-0,43	-0,11	-0,59	-0,12	-0,58	-0,08	-1,00
SB/HEFA	-0,03	-0,04	0,01	-0,05	-0,04	0,01	0,07	-0,08
Médio prazo								
CAN/ATJ	-0,18	-0,09	-0,10	-0,25	-0,24	-0,20	-0,03	-0,32
RCAN/ATJ	-0,07	-0,24	0,04	-0,27	-0,09	-0,23	-0,01	-0,26
RF/FT	-0,08	-0,14	-0,01	-0,09	-0,04	-0,18	0,17	0,05
OS/HEFA	-0,22	-0,89	-0,09	-1,48	-0,13	-0,83	-0,03	-1,59
SB/HEFA	-0,02	0,03	0,07	-0,07	-0,02	0,06	0,13	-0,09
Longo prazo								
CAN/ATJ	-0,41	-0,30	-0,13	-0,31	-0,27	-0,07	-0,05	-0,34
RCAN/ATJ	-0,19	-0,30	-0,07	-0,51	0,15	-0,01	0,21	-0,26
RF/FT	-0,08	-0,21	0,14	0,12	0,10	0,09	0,15	-0,14
OS/HEFA	-0,24	-0,93	0,00	-2,17	-0,18	-0,77	0,16	-2,19
SB/HEFA	-0,20	-0,19	0,04	-0,02	-0,17	0,03	0,04	-0,06

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

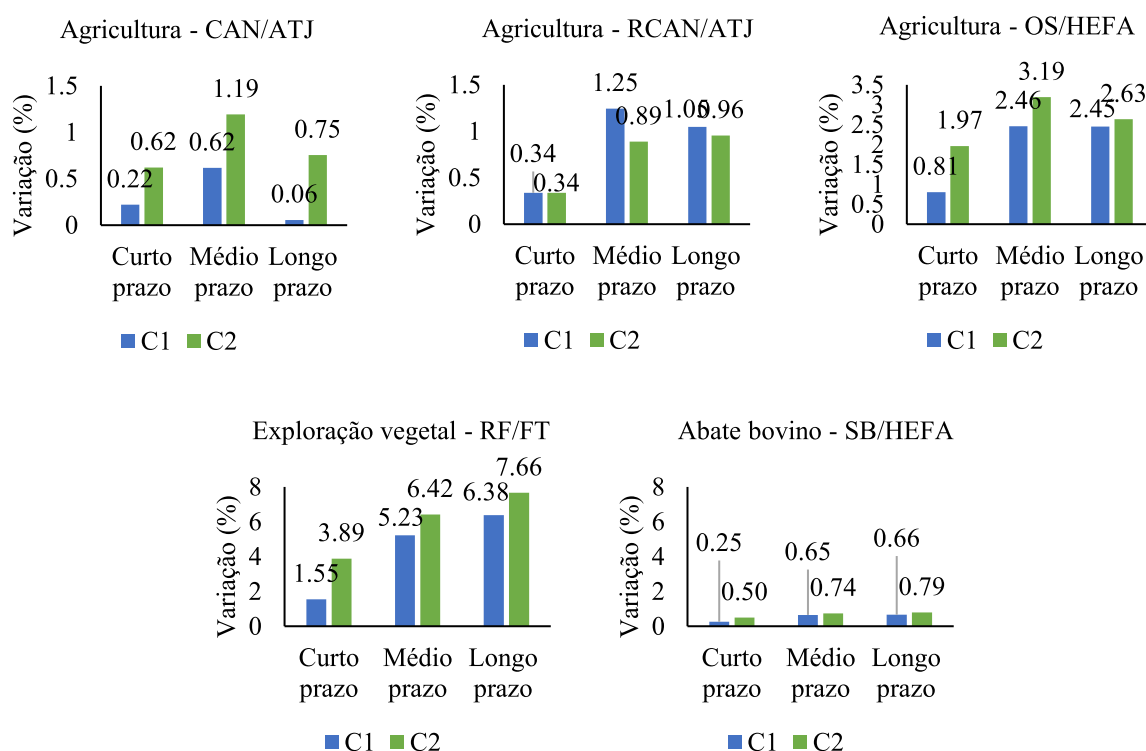
Esses resultados mostram que a queda na produção do setor aéreo afetaria negativamente o setor de refino de petróleo devido a menor demanda por QAV. Em princípio, parte do petróleo poderia ser redirecionada para outros derivados, mas a estrutura tecnológica de uso dos insumos intermediários em proporções fixas limitaria ajustes imediatos. Ademais, a demanda inelástica dos combustíveis, em especial, dos derivados de petróleo também limitaria a absorção de

potenciais excedentes (Steinbuks; Narayanan, 2015). No geral, o setor de armazenamento também seria impactado negativamente devido à queda nas operações do setor aéreo.

Ainda de acordo com a Tabela 17, a produção do setor OASP seria a mais afetada negativamente. Esse resultado decorreria de uma redução na demanda do setor devido aos maiores custos em adquirir o transporte aéreo para deslocamentos. Já o setor de comércio apresentaria resultados diferentes a depender da rota e do horizonte considerados em cada cenário. Se o custo do transporte aéreo aumentasse muito, o setor poderia redirecionar sua demanda para outros modais de transporte; além disso, poderia se beneficiar do surgimento das novas cadeias produtivas ligadas ao SAF.

O surgimento dessas novas cadeias produtivas influenciaria principalmente a atividade econômica dos setores que produzem as matérias-primas do SAF. As matérias-primas das rotas CAN/ATJ, RCAN/ATJ e OS/HEFA são produzidas pelo setor da agricultura, da rota RF/FT pelo setor de exploração vegetal e da rota SB/HEFA pelo abate bovino (ver Seção 6.2). O Gráfico 9 mostra a variação da produção desses setores por cada rota associada.

Gráfico 9 – Desvio acumulado (%) da produção dos setores produtores das matérias-primas do SAF



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Segundo o Gráfico 9, o setor de exploração vegetal cresceria 7,66% no C2 e 6,38% no C1 no longo prazo, com trajetória ascendente desde o curto prazo. O setor da agricultura, quando simulada a rota OS/HEFA, apresentaria o maior crescimento entre as três rotas cuja matéria-prima é produzida por esse setor, com variações de 2,45% no C1 e 2,63% no C2 no longo prazo. A produção da agricultura da rota RCAN/ATJ também se expandiria no longo prazo (1,05% no C1 e 0,96% no C2), embora com desaceleração em relação ao médio prazo. O setor de abate bovino SB/HEFA cresceria apenas 0,66% no C1 e 0,79% no C2 no longo prazo. Já a produção da agricultura da rota CAN/ATJ seria o que, em 2050, teria apresentado o menor crescimento (0,06% no C1 e 0,75% no C2). Esses resultados mostram que o estímulo à produção de SAF via LCF e CORSIA geraria encadeamentos produtivos positivos nos setores associados diretamente a sua cadeia de suprimentos.

Os modelos SAFBR foram calibrados para garantir o cumprimento das metas de redução de emissões, de modo que rotas com maiores custos de abatimento, como a OS/HEFA, demandariam maiores volumes de SAF. Isso explicaria, por exemplo, o elevado crescimento da produção agrícola associada a essa rota. Assim, quanto maior o requerimento de matérias-primas, que representam os maiores custos de produção de SAF, maior seria o esforço produtivo exigido dos setores a montante, contrastando com a variação negativa dos setores apresentados na Tabela 17. Espera-se observar essas diferenças também nas emissões setoriais de CO₂, já que nos modelos SAFBR estão associadas à atividade econômica e ao uso de combustíveis. A Tabela 18 mostra o desvio acumulado dessas emissões para setores selecionados. As emissões setoriais detalhadas estão no Apêndice D.

Conforme a Tabela 18, tanto no curto quanto no médio prazo, períodos de vigência da LCF e do CORISA, o setor da Agropecuária, maior emissor de CO₂ nos modelos SAFBR (35,6%), apresentaria desvios acumulados positivos em todas as rotas simuladas. Esse resultado reflete o aumento da produção do setor devido às maiores requisições de matérias-primas para produção de SAF. No médio prazo, as maiores variações ocorrem quando o SAF é produzido pela rota RF/FT, com crescimento acumulado de 1,75% no C1 e de 2,10% no C2, seguida da OS/HEFA, com 0,61% no C1 e 0,76% no C2. No longo prazo, o setor apresentaria variações negativas, contudo, para duas rotas apenas CAN/ATJ e SB/HEFA no C1, com reduções de 0,08% e 0,01%, respectivamente. A indústria extrativa, que produz a matéria-prima da rota RF/FT, também apresentaria emissões positivas para todas as simulações dessa rota.

Tabela 18 – Desvio acumulado (%) nas emissões setoriais (setores selecionados)

Setor	Curto prazo					Médio prazo					Longo prazo				
	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA
C1															
Agropecuária	0,07	0,04	0,58	0,24	0,05	0,09	0,24	1,75	0,61	0,17	-0,08	0,15	2,11	0,67	-0,01
Comércio	-0,11	0,01	-0,04	-0,12	0,01	-0,12	0,03	0,00	-0,11	0,08	-0,21	-0,09	0,08	-0,01	0,02
Indústria extrativa	0,03	-0,13	0,11	0,01	-0,01	0,10	0,05	0,01	0,04	0,01	-0,31	0,03	-0,25	0,23	-0,40
Produtos químicos	0,17	0,23	0,11	0,19	-0,02	0,44	0,91	0,03	0,84	-0,01	0,03	0,81	-0,01	1,13	-0,29
Refino de Petróleo	-0,10	-0,08	-0,03	-0,14	-0,02	-0,17	-0,05	-0,09	-0,21	-0,05	-0,41	-0,15	-0,12	-0,20	-0,20
Serviços Diversos	-0,05	-0,05	-0,02	-0,19	-0,01	-0,06	-0,07	-0,06	-0,42	0,02	-0,16	-0,16	-0,02	-0,53	-0,06
Transporte geral	0,03	-0,10	0,08	0,09	0,00	0,06	0,03	-0,02	0,27	0,07	-0,27	0,01	-0,22	0,40	-0,26
C2															
Agropecuária	0,23	0,04	1,33	0,54	0,13	0,40	0,15	2,10	0,76	0,25	0,31	0,29	2,72	0,75	0,19
Comércio	-0,28	-0,21	0,06	-0,14	0,01	-0,36	-0,29	0,01	-0,13	0,03	-0,43	-0,10	0,15	-0,13	-0,07
Indústria extrativa	0,02	-0,07	1,40	-0,11	0,13	0,01	-0,13	2,20	-0,28	0,26	0,13	0,10	2,60	-0,03	0,19
Produtos químicos	-0,89	-0,85	-0,16	0,02	0,02	-1,10	-1,13	-0,21	0,14	0,06	-1,24	-1,03	0,22	-0,09	-0,03
Refino de Petróleo	-0,10	-0,17	-0,26	0,05	0,17	-0,02	-0,10	-0,38	0,02	0,23	0,08	0,28	0,16	0,16	0,17
Serviços Diversos	0,24	0,12	0,01	0,29	0,02	0,46	0,36	-0,03	0,57	0,05	0,40	0,51	0,26	0,73	-0,13
Transporte geral	-0,04	-0,10	-0,15	0,30	0,05	0,01	-0,01	-0,24	0,44	0,12	0,06	0,30	0,18	0,53	0,06

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Ainda de acordo com a Tabela 18, no C1 o setor de refino de petróleo emitiria menos CO₂ em relação ao *baseline* em todas as rotas. No longo prazo, na rota CAN/ATJ reduziria suas emissões em 0,41% e nas rotas OS/HEFA e SB/HEFA em 0,20%. No C2, no curto e no médio prazo, as emissões seriam positivas para as rotas OS/HEFA e SB/HEFA, 0,02% e 0,23% no médio prazo do C2, respectivamente. A Tabela 18 também mostra que, no geral, o setor de transporte em geral³¹, responsável por 12,7% das emissões no SAFBR, aumentaria suas emissões. No médio prazo, as emissões seriam maiores, com destaque para rota OS/HEFA no C2 (0,44%), rota de maior custo de abatimento. Esse maior custo poderia levar à substituição parcial dos serviços de transporte aéreo de cargas e passageiros, o que demandaria mais uso de combustível pelo transporte em geral, aumentando suas emissões.

7.4 Resultados Macroeconômicos

A LCF e o CORSIA, embora incidam apenas sobre o setor de transporte aéreo, geram efeitos que se propagam por toda a economia. A seção 7.3 mostrou que a substituição de QAV por SAF para cumprimento dessas políticas não impacta apenas o setor aéreo, mas também outros setores. Esses impactos podem ser negativos para alguns setores, mas positivos para outros tanto em termos de produção quanto de emissões de CO₂. Sendo assim, esta seção apresenta os resultados ambientais e econômicos agregados para a economia brasileira.

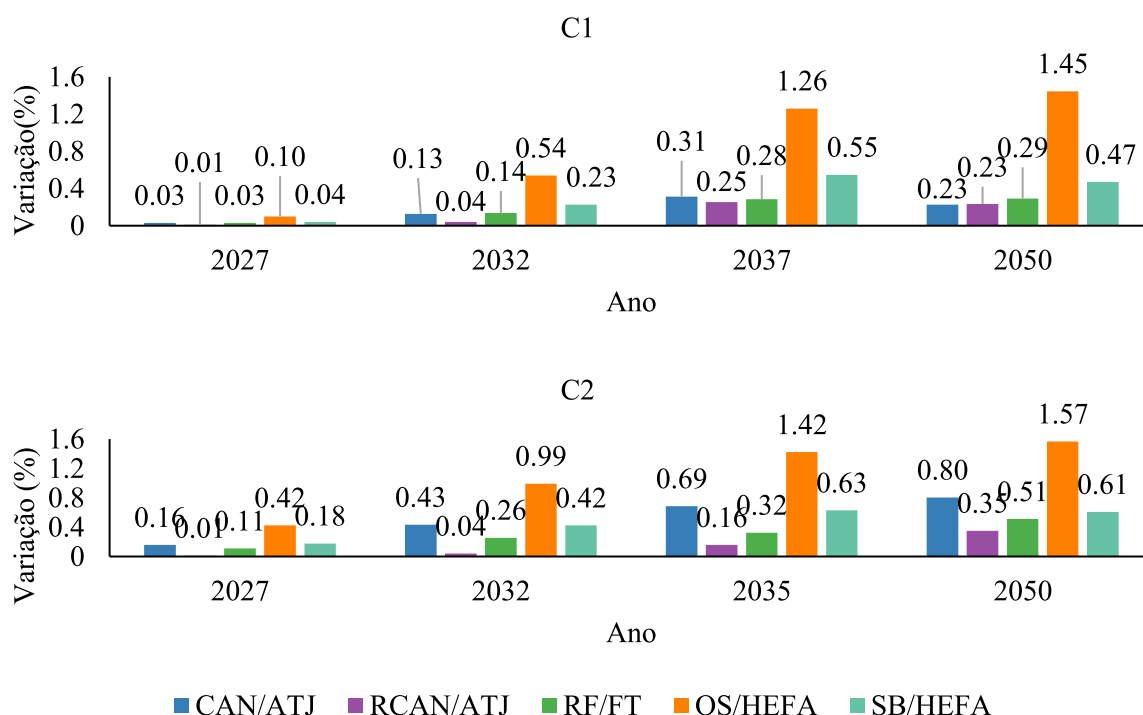
Em termos gerais, o desvio acumulado das emissões totais para o Brasil (Gráfico 10) apresentaria crescimento em todas as simulações. Em ambos os cenários, o destaque é para as emissões da rota OS/HEFA, cujo valor acumulado cresceria de 1,26% em 2037 para 1,45% em 2050 no C1 e de 1,42% em 2035 para 1,57% em 2050 no C2. Essa é a rota com maior custo de abatimento e a que requer maior volume de SAF para cumprimento das metas de redução de CO₂. A variação das emissões para as demais também seria positiva, mas em menor magnitude. No médio prazo (2037) do C1, essa variação vai de 0,25% (RCAN/ATJ) a 0,55% (SB/HEFA). No médio prazo (2035) do C2, variariam de 0,16% (RF/FT) a 0,69% (CAN/ATJ). No longo prazo (2050) de ambos os cenários, as emissões permaneceriam positivas.

Em um primeiro momento, esses resultados podem parecer contraintuitivos, já que a LCF e o CORSIA reduziriam as emissões de CO₂ do setor aéreo, mas não são. No modelo SAFBR, as emissões são provenientes do uso de combustíveis e da atividade econômica. A seção 7.3

³¹ Exceto o setor de transporte aéreo.

mostrou que devido à maior demanda por SAF, a produção do setor agropecuário, responsável por 35,6% das emissões totais, se elevaria e, por consequência, suas emissões. Além disso, o setor de transporte em geral, responsável por 13,7% das emissões totais, também aumentaria sua produção e suas emissões em algumas rotas. Já o setor aéreo, embora seja o foco das políticas, responde por apenas 0,5% das emissões totais, de modo que a diminuição de suas emissões teria impacto relativamente limitado sobre o resultado agregado.

Gráfico 10 – Desvio acumulado (%) das emissões totais



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

As diferenças nas emissões setoriais também são reflexo do nível de atividade de cada setor que, sob a política de substituição de QAV por SAF, apresentaria resultados distintos entre si. Além do setor de transporte aéreo, os setores de serviço, com elevada participação no valor bruto da produção (VBP) da economia brasileira, como o OASP (ver seção 7.3), diminuiriam sua produção em ambos os cenários. Enquanto os setores a montante da produção do SAF, como a agricultura e exploração vegetal, com baixa participação no VBP, teriam sua atividade econômica aumentada. Assim, os impactos sobre o PIB se mostrariam negativos, refletindo a maior relevância relativa dos setores de serviços em sua composição. A Tabela 19 mostra os efeitos das políticas de mitigação de CO₂ do setor aéreo sobre indicadores macroeconômicos selecionados.

Tabela 19 – Desvio acumulado (%) das principais variáveis macroeconômicas

Indicador	Curto prazo					Médio prazo					Longo prazo				
	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA
C1															
PIB	-0,10	-0,06	-0,07	-0,25	-0,03	-0,14	-0,06	-0,12	-0,51	-0,03	-0,29	-0,13	-0,03	-0,58	-0,16
Deflator do PIB	-0,32	0,47	-0,38	-0,09	0,00	-0,13	0,08	-0,04	-0,09	0,02	0,64	-0,01	0,38	-0,32	0,83
Consumo das famílias	-0,12	-0,03	-0,09	-0,29	0,00	-0,19	-0,14	-0,09	-0,62	0,00	-0,20	-0,24	0,14	-0,92	0,06
Utilidade	-0,20	-0,02	-0,18	-0,48	-0,01	-0,31	-0,18	-0,16	-0,99	-0,01	-0,31	-0,33	0,19	-1,35	0,11
Emprego nacional	-0,07	-0,04	-0,02	-0,13	0,01	0,00	0,05	-0,04	-0,11	0,07	-0,14	-0,05	0,02	0,15	-0,13
Salário real	-0,05	0,03	-0,13	-0,05	-0,02	-0,29	-0,23	-0,07	-0,33	-0,09	-0,02	-0,29	0,17	-1,23	0,44
Renda total do governo	-0,36	0,34	-0,36	-0,51	0,01	-0,27	-0,04	0,00	-0,96	-0,03	0,24	-0,25	0,46	-1,30	0,60
Receita tributária	-0,39	0,26	-0,39	-0,68	-0,01	-0,33	-0,15	-0,06	-1,35	-0,09	0,12	-0,36	0,38	-1,79	0,39
C2															
PIB	-0,08	-0,06	0,07	-0,34	-0,02	-0,13	-0,09	0,04	-0,48	-0,01	-0,16	0,10	0,07	-0,44	-0,11
Deflator do PIB	0,22	0,47	0,76	-0,34	0,00	0,13	-0,01	0,66	-0,34	0,02	-0,05	-0,33	-0,48	-0,65	0,30
Consumo das famílias	-0,08	-0,03	0,15	-0,44	0,02	-0,16	-0,14	0,15	-0,64	0,03	-0,27	-0,06	-0,11	-0,82	-0,03
Utilidade	-0,12	-0,02	0,23	-0,72	0,01	-0,26	-0,19	0,22	-1,02	0,02	-0,44	-0,03	-0,16	-1,23	-0,11
Emprego nacional	-0,04	-0,04	0,08	-0,07	0,07	-0,02	-0,03	-0,02	-0,06	0,13	0,17	0,25	0,02	0,24	0,04
Salário real	-0,06	0,03	0,08	-0,26	-0,09	-0,19	-0,14	0,27	-0,39	-0,15	-0,68	-0,46	-0,13	-1,26	-0,07
Renda total do governo	-0,01	0,34	0,86	-0,87	-0,02	-0,20	-0,12	0,68	-1,10	-0,02	-0,37	-0,25	-0,36	-1,38	0,03

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Conforme a Tabela 19, em todas as simulações, em ambos os cenários, a rota OS/HEFA é a que apresentaria os impactos mais severos sobre o PIB, emprego, consumo das famílias, utilidade (*proxy* para o bem-estar), receita tributária. No C1, o PIB dessa rota apresentaria o maior recuo, com queda de 0,51% e 0,58% no médio e longo prazo. Esse resultado se refletiria diretamente no consumo das famílias que cairia 0,62% e 0,92%, respectivamente, o que impactaria negativamente a utilidade das famílias em 1,35% no longo prazo. A contração do PIB e do consumo teria efeitos fiscais, com a receita tributária caindo 1,79% no longo prazo. No C2, os efeitos também são negativos, no entanto, com menor magnitude do que no C1.

Em contraste, a rota RF/FT no C2 apresentaria crescimento de algumas variáveis no médio e longo prazo, como crescimento de 0,04% e 0,07% do PIB e 0,15% no consumo das famílias no médio prazo, ficando negativa em 0,11% no longo prazo. A rota RCAN/ATJ também apresentaria crescimento do PIB e do emprego nacional no longo prazo do C2, em 0,10% e 0,25%, nesta ordem. A rota SB/HEFA, por sua vez, no curto e médio prazo de ambos os cenários é a que apresenta os menores impactos para os indicadores macroeconômicos, embora negativos. O PIB cairia 0,03% no C1 e 0,01% no C2, o emprego cresceria 0,07% e 0,13%, respectivamente. Esses resultados evidenciam que os impactos macroeconômicos da substituição de QAV por SAF variam conforme a rota tecnológica e o cenário considerado.

Por fim, a Tabela 19 mostra ainda que para algumas rotas simuladas o PIB e o deflator do PIB tiveram direções opostas. Esse fato pode estar associado aos altos custos de produção do SAF, pressionando o deflator para cima, e às quedas de produção que teriam o setor aéreo e de serviços como um todo, reduzindo o crescimento do PIB. De forma integrada, os resultados mostram que a substituição de QAV por SAF no contexto das metas da LCF e do CORSIA impactaria negativamente a economia, com destaque para a magnitude dos impactos da rota OS/HEFA. Esses efeitos se refletiriam diretamente sobre as famílias, cuja queda no consumo e na utilidade evidenciaria a perda de bem-estar associada às políticas analisadas.

7.5 Resultados para as Famílias

Os impactos negativos sobre o consumo e a utilidade nacional certamente diferem, ao menos em magnitude, para grupos familiares distintos. No modelo SAFBR, as famílias estão organizadas em dez grupos conforme a faixa de renda, sendo H01 as de menor renda e H10 as de maior. Estudos de orçamento familiar mostram que as famílias de maior renda gastam relativamente mais com serviços, como transporte e educação, do que as famílias de menor

renda, cuja maior parte da renda é destinada à habitação e ao consumo de alimentos básicos (Belik, 2020). Como os resultados da aplicação da LCF e do CORSIA elevariam os custos dos serviços de transporte aéreo, afetando os setores de serviço como um todo, e pressionariam a demanda por biomassa, que é insumo comum à produção de alimentos e de SAF, espera-se que os resultados econômicos e de bem-estar se diferenciem entre os distintos grupos familiares. Esta seção apresenta tais resultados para famílias de renda baixa (H01-H03), média (H04-H07) e alta (H08-H10).

A Tabela 20 mostra que, de modo geral, a renda real das famílias diminuiria, principalmente no C1. Ao fim da vigência da LCF e do CORSIA, no médio prazo, a substituição de QAV por SAF resultaria em perdas na renda real para todos os grupos familiares, exceto para o de renda mais alta na rota SB/HEFA (0,01%) do C1. No longo prazo, todos os grupos familiares apresentariam crescimento na renda real para as rotas RF/FT e SB/HEFA, com destaque para o crescimento de 0,16% das famílias de baixa renda. Como nessas rotas, a realocação da demanda do setor aéreo por QAV tenderia a ser mais rápida, já que o volume de SAF a ser substituído é menor, a capacidade instalada para a produção das matérias-primas dessas rotas poderia ampliar a oferta de produtos do consumo dessa faixa de renda.

Tabela 20 – Desvio acumulado (%) da renda real das famílias

Rota	C1			C2		
	H01-H03	H04-H07	H09-H10	H01-H03	H04-H07	H09-H10
Curto prazo						
CAN/ATJ	-0,12	-0,13	-0,12	-0,06	-0,08	-0,08
RCAN/ATJ	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,03
RF/FT	-0,12	-0,10	-0,09	0,15	0,15	0,13
OS/HEFA	-0,24	-0,21	-0,23	-0,32	-0,29	-0,34
SB/HEFA	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,01
Médio prazo						
CAN/ATJ	-0,20	-0,21	-0,20	-0,14	-0,17	-0,18
RCAN/ATJ	-0,11	-0,12	-0,13	-0,11	-0,12	-0,14
RF/FT	-0,09	-0,08	-0,11	0,17	0,15	0,11
OS/HEFA	-0,46	-0,42	-0,47	-0,43	-0,40	-0,50
SB/HEFA	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,04	0,04
Longo prazo						
CAN/ATJ	-0,19	-0,20	-0,24	-0,31	-0,30	-0,28
RCAN/ATJ	-0,23	-0,22	-0,25	-0,07	-0,04	-0,04
RF/FT	0,16	0,14	0,11	-0,07	-0,11	-0,17
OS/HEFA	-0,77	-0,72	-0,78	-0,68	-0,64	-0,68
SB/HEFA	0,10	0,09	0,02	-0,05	-0,03	-0,05

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Segundo a Tabela 20, no C2, apenas no curto e médio prazo as rotas RF/FT e SB/HEFA apresentariam resultados positivos, com destaque para as famílias de baixa e média renda na rota RF/FT, com aumentos na renda real de 0,17% e 0,15% no médio prazo. Enquanto nas demais rotas a variação para todos os grupos familiares seria negativa, especialmente na rota OS/HEFA. No médio prazo, as perdas para as famílias de alta e baixa renda seriam de 0,50% e 0,43% no C2, respectivamente. No longo prazo, essas perdas se ampliariam para 0,68% para ambos os grupos familiares.

Os resultados negativos para a renda real das famílias podem ser explicados por alguns fatores. Um deles é a retração geral da economia, com desemprego elevado e PIB caindo, em especial, nas rotas de maior custo de abatimento, como a OS/HEFA (ver seção 7.4). Isso aliado aos elevados custos dos serviços, como do transporte aéreo e dos alimentos, em virtude de uma realocação parcial no uso da matéria-prima para produção de SAF, seria a principal explicação para essa redução na renda real das famílias, que difere em magnitude a depender da renda. Os impactos sobre o bem-estar das famílias podem ser avaliados a partir das variações na renda disponível, isto é, na renda líquida de impostos, e na utilidade, que se baseia na variação de consumo considerando a parcela acima dos bens de subsistência.

De modo geral, a Tabela 21 mostra que no médio prazo, fim da LCF e do CORSIA, haveria uma queda da renda real disponível e da utilidade das famílias em praticamente todas as rotas de produção de SAF. Na rota OS/HEFA, os impactos seriam os mais severos para todos os grupos familiares. A perda seria maior para as famílias de renda alta na ordem de 0,49% em ambos os cenários na renda real disponível e 1,05% no C1 e 1,12% no C2 na utilidade. Em seguida, as famílias de renda baixa, com perdas de 0,45% no C1 e 0,43% no C2 na renda real disponível e 1% na utilidade nos dois cenários. Por sua vez, nas rotas SB/HEFA e RF/FT, as perdas na renda real disponível seriam as menores, com ganhos acumulados de 0,18% e 0,15% para as famílias de baixa e alta renda, respectivamente, na rota RF/FT do C2. Também no C2 a utilidade nessas rotas apresentaria as menores perdas, na rota RF/FT, inclusive, haveria ganhos de 0,27% e 0,23% para as famílias de renda baixa e média, nesta ordem.

De modo geral, a Tabela 21 evidencia que nas rotas com menor custo de abatimento e que requerem menos SAF para cumprimento das metas da LCF e do CORSIA, as perdas na renda real disponível e na utilidade seriam menores e, em alguns casos, até haveria ganhos. Por outro lado, nas rotas com custos mais elevados e maior necessidade de SAF, essas perdas seriam maiores. Os resultados para as famílias de renda baixa, especialmente, nas rotas RF/FT e

SB/HEFA mostram que quando o SAF é produzido utilizando resíduos, os impactos sobre o bem-estar são menores do que quando usando matérias-primas de primeira geração como nas rotas OS/HEFA e CAN/ATJ.

Tabela 21 – Desvio acumulado (%) da renda real disponível e utilidade das famílias

Rota	Renda real disponível						Utilidade					
	C1			C2			C1			C2		
	H01- H03	H04- H07	H09- H10	H01- H03	H04- H07	H09- H10	H01- H03	H04- H07	H09- H10	H01- H03	H04- H07	H09- H10
Curto prazo												
CAN/ATJ	-0,13	-0,13	-0,11	-0,08	-0,08	-0,08	-0,20	-0,20	-0,19	-0,11	-0,12	-0,13
RCAN/ATJ	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,05	-0,01	-0,02	-0,05
RF/FT	-0,13	-0,11	-0,10	0,16	0,15	0,13	-0,23	-0,17	-0,14	0,23	0,24	0,21
OS/HEFA	-0,23	-0,21	-0,22	-0,32	-0,29	-0,33	-0,49	-0,46	-0,50	-0,72	-0,68	-0,76
SB/HEFA	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,01	-0,02	-0,01	0,00	-0,02	0,01	0,03
Médio prazo												
CAN/ATJ	-0,21	-0,21	-0,18	-0,15	-0,16	-0,17	-0,33	-0,32	-0,29	-0,23	-0,26	-0,28
RCAN/ATJ	-0,11	-0,12	-0,12	-0,11	-0,13	-0,13	-0,17	-0,17	-0,21	-0,18	-0,19	-0,22
RF/FT	-0,09	-0,09	-0,13	0,18	0,15	0,09	-0,17	-0,14	-0,17	0,27	0,23	0,16
OS/HEFA	-0,45	-0,43	-0,49	-0,43	-0,41	-0,49	-1,00	-0,95	-1,05	-1,00	-0,98	-1,12
SB/HEFA	-0,02	-0,01	-0,01	0,01	0,02	0,04	-0,04	-0,02	0,01	-0,01	0,03	0,05
Longo prazo												
CAN/ATJ	-0,20	-0,20	-0,23	-0,33	-0,30	-0,27	-0,31	-0,28	-0,36	-0,50	-0,44	-0,36
RCAN/ATJ	-0,23	-0,23	-0,23	-0,08	-0,03	-0,02	-0,37	-0,29	-0,35	-0,10	-0,02	0,02
RF/FT	0,17	0,14	0,07	-0,06	-0,10	-0,18	0,21	0,20	0,16	-0,15	-0,14	-0,20
OS/HEFA	-0,76	-0,73	-0,75	-0,66	-0,64	-0,66	-1,41	-1,33	-1,33	-1,24	-1,22	-1,24
SB/HEFA	0,09	0,09	-0,01	-0,07	-0,04	-0,03	0,14	0,14	0,03	-0,13	-0,07	-0,15

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

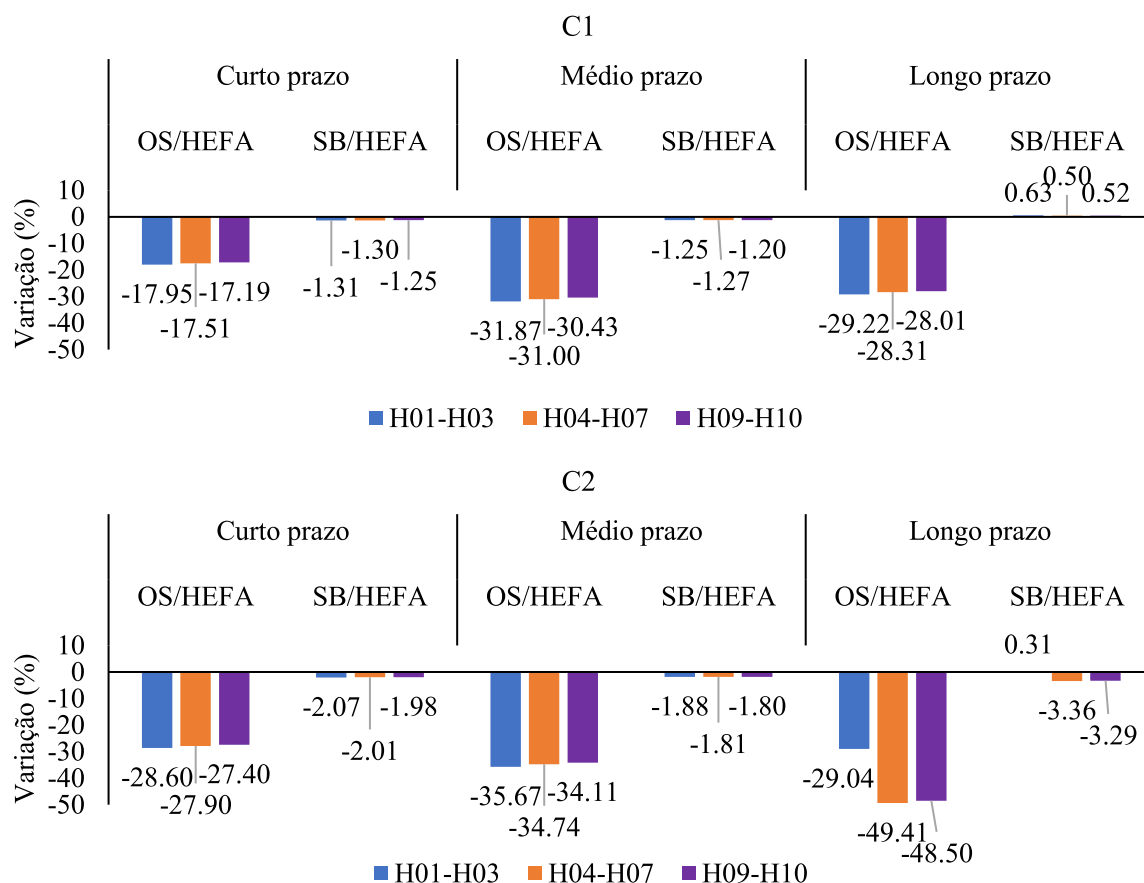
Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

O Gráfico 11 mostra a demanda por transporte aéreo por grupo familiar para as duas rotas que apresentariam os maiores (OS/HEFA) e menores (SB/HEFA) impactos sobre essa demanda³². No curto e médio prazo do C1 e C2, as famílias de baixa renda apresentariam as maiores retrações no consumo do transporte aéreo, com quedas de 31,87% (C1) e 35,67% (C2) no fim da LCF e do CORSIA na rota OS/HEFA. No longo prazo, as famílias de renda média seriam as mais afetadas com redução de 28,31% no C1 e de 49,41% no C2. No geral, as famílias de renda alta, apesar de apresentarem retração na demanda por transporte aéreo, seriam as menos impactadas negativamente. Isso está em linha com o argumento de que quanto menor a renda, maior a sensibilidade a aumentos nos preços desse serviço, refletindo uma maior elasticidade

³² O resultado completo para todas as rotas está no Apêndice E.

renda e preço da demanda nos grupos de menor renda quando comparados aos de renda mais elevada.

Gráfico 11 – Desvio acumulado (%) da demanda das famílias por transporte aéreo (rotas selecionadas)



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

A Tabela 22, por sua vez, apresenta os resultados da LCF e do CORSIA sobre a demanda por alimentos³³ de cada agrupamento familiar. Nesse contexto, fazer essa análise é importante, já que a maior demanda por SAF pode realocar para sua produção matérias-primas tradicionalmente destinadas à produção de alimentos, como cana-de-açúcar e óleo de soja. Essa realocação pode ocorrer, principalmente, porque, no curto e no médio prazo, os setores

³³ O grupo de alimentos refere-se aos seguintes itens: carne de bovinos e outros produtos de carne, carne de suíno, carne de aves, pescado industrializado, leite resfriado, esterilizado e pasteurizado, outros produtos do laticínio, açúcar, conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas, óleos e gorduras vegetais e animais, café beneficiado, arroz beneficiado e produtos derivados do arroz, produtos derivados do trigo, mandioca ou milho, rações balanceadas para animais, outros produtos alimentares e bebidas.

fornecedores desses insumos poderiam ter dificuldades em suprir, simultaneamente, às demandas por SAF e por alimentos.

Tabela 22 – Desvio acumulado da demanda das famílias por alimentos

Rota	C1			C2		
	H01-H03	H04-H07	H09-H10	H01-H03	H04-H07	H09-H10
Curto prazo						
CAN/ATJ	-0,12	-0,12	-0,12	-0,05	-0,05	-0,05
RCAN/ATJ	-0,03	-0,01	-0,03	-0,03	-0,01	-0,03
RF/FT	-0,10	-0,09	-0,08	0,16	0,18	0,18
OS/HEFA	-0,34	-0,33	-0,32	-0,53	-0,50	-0,49
SB/HEFA	-0,03	-0,02	-0,01	-0,03	0,00	0,03
Médio prazo						
CAN/ATJ	-0,18	-0,18	-0,16	-0,10	-0,11	-0,11
RCAN/ATJ	-0,12	-0,12	-0,13	-0,13	-0,13	-0,14
RF/FT	-0,04	-0,03	-0,03	0,17	0,17	0,15
OS/HEFA	-0,68	-0,65	-0,64	-0,71	-0,67	-0,68
SB/HEFA	-0,05	-0,03	-0,01	-0,01	0,02	0,05
Longo prazo						
CAN/ATJ	-0,14	-0,12	-0,15	-0,24	-0,23	-0,17
RCAN/ATJ	-0,25	-0,21	-0,24	-0,13	-0,09	-0,08
RF/FT	0,15	0,15	0,13	0,03	0,02	0,01
OS/HEFA	-0,91	-0,84	-0,76	-0,84	-0,79	-0,68
SB/HEFA	0,11	0,15	0,10	-0,04	0,00	0,03

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

De modo geral, a Tabela 22 mostra que a demanda por alimentos das famílias de renda baixa seria a mais afetada. No acumulado do último ano das políticas de mitigação do setor aéreo (médio prazo na tabela), as reduções para esse grupo seriam maiores na rota OS/HEFA, com perdas de 0,68% no C1 e 0,71% no C2. Enquanto no C1, a menor perda seria na rota SB/HEFA (0,05%) e no C2 na rota RF/FT, com ganhos de 0,17%. Esses resultados mostram que a demanda por resíduos para produção de SAF poderia, em alguma medida, impulsionar a produção de matérias-primas de primeira geração, que seriam destinadas à produção de alimentos, reduzindo potenciais conflitos de insegurança alimentar nas rotas que fazem uso desses insumos.

7.6 Impactos de política

Esta seção discute os principais impactos de política da LCF e do CORSIA, considerando que as metas de redução nas emissões de CO₂ do setor aéreo seriam atingidas exclusivamente pela

substituição de QAV por SAF. A LCF estabelece reduções progressivas entre 2027 e 2037 para os voos domésticos, enquanto o CORSIA limita, entre 2027 e 2035, as emissões dos voos internacionais operados por companhias brasileiras a 85% do nível de 2019. O CORSIA demanda um volume total de abatimento superior ao da LCF (ver seção 6.5.3), mas em um horizonte de tempo mais curto, impondo maior pressão sobre o setor.

Esses dois regulamentos fomentariam a produção de SAF, que até então não apresentava viabilidade econômica devido ao seu custo de produção superior ao do QAV. Em 2026, ano imediatamente anterior ao início da LCF e do CORSIA, os SAF poderiam custar até sete vezes mais do que o QAV. A Tabela 23 mostra que o SAF produzido pela rota OS/HEFA e RCAN/ATJ apresentaria o maior custo, sendo 6,93 e 6,49 vezes mais caro que o QAV, correspondendo também aos maiores custos de abatimento, na ordem de R\$ 30.836,51/tCO₂evitada e de R\$ 9.505,09/tCO₂evitada, respectivamente. Enquanto as rotas SB/HEFA e CAN/ATJ, custando 2,81 e 2,99 vezes mais que o SAF, nesta ordem, apresentariam as menores diferenças de preço e os menores custos de abatimento – R\$ 3.054,42/tCO₂evitada e R\$ 3.974,61/tCO₂evitada. A rota RF/FT se situaria em posição intermediária, com custo relativo 4,48 vezes maior e abatimento de R\$ 4.395,42/tCO₂evitada.

Tabela 23 – Preço relativo dos SAF e custos de abatimento (2026)

Combustível	Preço por litro (R\$)	Diferença em relação ao QAV (R\$/L)	Custo de abatimento (em R\$/t de CO ₂ evitada)
QAV (fóssil)	3,88	–	–
SAF – CAN/ATJ	11,6	2,99	3974,61
SAF – RCAN/ATJ	25,20	6,49	9505,09
SAF – RF/FT	17,40	4,48	4395,42
SAF – OS/HEFA	26,90	6,93	30836,51
SAF – SB/HEFA	10,90	2,81	3054,42

Fonte: Elaboração própria a partir da simulação de baseline do modelo SAFBR.

No geral, os dados da Tabela 23 mostram que o SAF poderia custar entre duas e sete vezes mais do que o QAV em linha com as estimativas da IATA (2021) e dos estudos de Dyk e Saddler (2024) e de Brodzik *et al.* (2025), que projetam preços entre duas e oito vezes mais caros. Em se tratando das rotas de produção de SAF, a literatura brasileira apresenta estimativas heterogêneas. Por um lado, este estudo posiciona as rotas OS/HEFA e RCAN/ATJ como as menos competitivas entre as cinco analisadas, encontrando respaldo nos estudos de Klein *et al.* (2018) para esta última e de Capaz *et al.* (2021a) para a primeira. Por outro lado, coloca a rota SB/HEFA como a mais competitiva, seguida da CAN/ATJ, contrastando com os estudos de

Walter *et al.* (2021) e Montoya (2021) que posicionam a rota OS/HEFA como a mais viável economicamente. Esses diferentes resultados podem estar associados à metodologia adotada, bem como à estimativa dos custos ao longo da cadeia produtiva do SAF.

Embora os resultados da Tabela 23 reforcem que nenhuma rota tecnológica de produção de SAF apresentaria condições de competir economicamente com o QAV (Dyk; Saddler, 2024), o SAF se mantém como a alternativa tecnicamente mais viável para a descarbonização do setor aéreo (Becken; Mackey; Lee, 2023; Klimczyk *et al.*, 2025). A IATA (2021) projeta que até 65% da redução das emissões necessárias para que o setor aéreo atinja suas metas climáticas deverá advir do uso de SAF, o que reforça a relevância de instrumentos de política capazes de estabelecer uma cadeia produtiva de SAF competitiva em relação ao QAV.

A implementação da LCF e do CORSIA, no contexto desta tese, levaria o setor aéreo a demandar SAF. O volume requerido estaria condicionado não apenas às metas de redução de cada regulamento, mas também à intensidade de carbono das rotas tecnológicas e às limitações técnicas de mistura com o QAV. Nesse cenário, a rota OS/HEFA se destacaria como a que demandaria maior volume de SAF, por apresentar a maior intensidade de carbono em relação às demais. Entre 2034 e 2037, a quantidade de SAF dessa rota necessária para o cumprimento das metas representaria mais da metade do consumo total de combustível do setor aéreo (ver Tabela 14 da seção 7.1). Isso implica que o setor não poderia atingir as metas de redução de emissões da LCF e do CORSIA exclusivamente por meio do SAF proveniente da rota OS/HEFA, uma vez que o limite técnico de mistura com o QAV é de 50% (ANP, 2021b).

Além dessa restrição técnica, o uso de SAF está condicionado à disponibilidade de matéria-prima, que representa o principal custo de produção em todas as rotas, e da tecnologia de conversão disponível. A rota HEFA é a mais madura tecnologicamente (Navarrete; Pavlenko; O'Malley, 2024) e responsável pela produção de aproximadamente 95% de todo o SAF produzido no mundo (Washington, 2023). A depender da matéria-prima utilizada nessa rota, os impactos econômicos e ambientais gerados seriam muito diferentes. Quando baseada em óleo de soja, que é um insumo de primeira geração, apresentaria os efeitos mais severos. Enquanto, quando derivada de sebo bovino, insumo de segunda geração, os efeitos seriam os menos intensos.

A Tabela 24 faz uma síntese dos principais resultados acumulados (em desvios percentuais) ao fim da vigência de cada política. Em termos econômicos, a rota OS/HEFA apresentaria nos dois cenários os maiores impactos negativos; o setor aéreo reduziria sua produção em 21,5% e

23,77%, o PIB em 0,51% e 0,48%, e renda real disponível das famílias em 0,46% e 0,44% no C1 e no C2, respectivamente. Enquanto na rota SB/HEFA, a queda da produção do setor aéreo seria 0,85% e 1,23% e do PIB 0,03% e 0,01% no C1 e no C2, nesta ordem. Esses resultados para produção e PIB corroboram os de Mueller, Winter e Grote (2024) para a Alemanha. Segundo os autores, a produção do setor aéreo cairia entre 3,1% e 7,1% e do PIB entre 0,23% e 0,35% a depender do cenário considerado. Também corroboram os resultados de Winchester *et al.* (2015) para os EUA, que reportam queda de 0,33% a 0,44% no PIB e de 2,3% a 3,6% na receita da aviação ao fim de uma política de uso de um biocombustível para a aviação.

Tabela 24 – Síntese dos principais resultados ao fim de cada política

Rota	C1						C2					
	Prod. setor aéreo	PIB	Emp.	Util.	Renda real disp.	Emi.	Prod. setor aéreo	PIB	Emp.	Uti.	Renda real disp.	Emi.
CAN/ATJ	-1,92	-0,14	0,00	-0,31	-0,20	0,31	-5,17	-0,13	-0,02	-0,26	-0,16	0,69
RCAN/ATJ	-6,12	-0,06	0,05	-0,18	-0,12	0,25	-5,40	-0,09	-0,03	-0,19	-0,12	0,16
RF/FT	-2,50	-0,12	-0,04	-0,16	-0,10	0,28	-3,15	0,04	-0,02	0,22	0,14	0,32
OS/HEFA	-21,50	-0,51	-0,11	-0,99	-0,46	1,26	-23,77	-0,48	-0,06	-1,02	-0,44	1,42
SB/HEFA	-0,85	-0,03	0,07	-0,01	-0,01	0,55	-1,23	-0,01	0,13	0,02	0,02	0,63

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Por seu turno, na rota SB/HEFA, a renda real disponível das famílias diminuiria 0,01% no C1 e se elevaria em 0,02% no C2. No C2, na rota RF/FT, a segunda rota com menores impactos, o PIB cresceria 0,04%, a utilidade 0,22% e a renda real disponível 0,14%. Esses resultados estão em consonância com o que propõem Jiang e Yang (2021), que formularam um modelo teórico para testar os impactos de um mandato de mistura de SAF sobre o bem-estar. Também encontram respaldo nos resultados do estudo de Wang *et al.* (2019), embora estes autores não modelem a LCF e o CORSIA.

Em se tratando das emissões totais, os resultados da Tabela 24 indicam que haveria aumento em todas as rotas, especialmente naquelas baseadas em insumos de primeira geração, como a OS/HEFA e a CAN/ATJ. Isso mostra que, embora a LCF e o CORSIA cumpram seu papel de reduzir as emissões do setor aéreo, esse ganho ambiental setorial ocorreria acompanhado de custos econômicos para a aviação e de custos econômicos e ambientais para a economia como um todo. O encarecimento do transporte aéreo levaria a uma realocação parcial da demanda

para outros modais, o que demandaria mais combustíveis fósseis, ao passo que a maior demanda por matérias-primas pressionaria o setor agropecuário que, ao produzir mais, emitiria mais CO₂. Conjuntamente, esses fatores explicariam por que as emissões totais aumentariam mesmo com uma política de redução das emissões para o setor aéreo.

Em síntese, os resultados da Tabela 24 evidenciam que as rotas tecnológicas de produção de SAF que utilizam matérias-primas de segunda geração, como as rotas SB/HEFA, RF/FT e RCAN/ATJ, apresentariam os impactos econômicos e ambientais menos severos comparadas às de primeira geração (OS/HEFA e CAN/ATJ). No caso da RF/FT, haveria até um efeito positivo sobre o PIB no cenário C2 (+0,04%), o que sinaliza seu potencial competitivo no longo prazo. Embora, ao fim da LCF e do CORSIA, apresentassem emissões positivas e reduções no PIB e na produção, as rotas de segunda geração partiriam de uma posição relativamente menos desfavorável em comparação às demais alternativas tecnológicas frente ao QAV. Desse modo, o esforço de intervenção requerido para torná-las viáveis seria relativamente baixo.

Nos cenários simulados neste estudo, ao término do período de vigência da LCF (2037) e CORSIA (2035), o setor aéreo poderia escolher entre o SAF e o QAV, optando por aquele que apresentasse o menor custo relativo. A curta duração dessas políticas pode constituir um entrave ao desenvolvimento de uma cadeia produtiva de SAF (Navarrete; Pavlenko; O'Malley, 2024). Isso sugere que políticas de mitigação mais duradouras poderiam favorecer o estabelecimento de uma cadeia de produção de SAF competitiva, reduzindo volatilidades econômicas, sociais e ambientais.

Outra questão central no que diz respeito a essas políticas de mitigação é que não consideram em suas formulações as interações entre os sistemas econômicos e ambientais, que podem gerar resultados indesejados no total. A LCF e o CORSIA, por exemplo, resultariam efeitos econômicos negativos e elevação das emissões de CO₂ no agregado, o que poderia dificultar o cumprimento das metas ambientais assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris, por exemplo. Portanto, a adoção de uma política ambiental específica para um setor pode não trazer benefícios ambientais em um contexto macro.

Nesse sentido, este estudo aponta dois conjuntos de instrumentos de política que poderiam ser combinados aos regulamentos já existentes para o setor aéreo. Do lado ambiental, destaca-se a disponibilidade de aproximadamente 28 milhões de hectares de pastagens degradadas no Brasil que poderiam ser destinados à expansão de biomassa de primeira geração (Bolfe *et al.*, 2024). Esse cultivo não incorreria em emissões associadas à mudança de uso da terra e poderia até

promover um aumento na produção de biomassas alimentícias. Essas áreas degradadas também poderiam ser utilizadas em projetos de reflorestamento, gerando créditos de carbono para o setor aéreo, que é outra medida de mitigação das emissões do setor (IATA, 2021). Adicionalmente, políticas específicas poderiam estimular o uso de matérias-primas de segunda geração na produção de SAF, que apresentam menor intensidade de carbono.

Do lado econômico, a criação de linhas de crédito específicas para financiar a produção de SAF é uma medida que pode auxiliar o surgimento e a consolidação desse mercado nascente. Nesse contexto, destaca-se uma parceria entre o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), que visa incentivar a cooperação empresarial e fortalecer os primeiros empreendimentos na produção e no desenvolvimento tecnológico de SAF. No total, R\$ 6 bilhões serão distribuídos entre 42 planos de negócios aprovados (BNDES, 2025). Políticas nessa linha podem ser ampliadas, priorizando, por exemplo, projetos que utilizem terras degradadas para o cultivo de matéria-prima, dado o benefício ambiental. Outra medida seria a criação de linhas de crédito com juros reduzidos para a construção e ampliação de plantas dedicadas à produção de SAF ou para a adaptação de biorrefinarias. Por fim, políticas de subvenções fiscais ao longo da cadeia produtiva de SAF até que ele se torne competitivo com o QAV podem favorecer a consolidação do mercado de SAF no Brasil.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de SAF constitui uma alternativa promissora para a descarbonização do setor aéreo, cujas emissões de CO₂ tendem a crescer nas próximas décadas em função da expansão da demanda por transporte aéreo. Embora diversos estudos tenham explorado os aspectos tecnológicos, as condições técnico-econômicas e o potencial ambiental do SAF, ainda há uma lacuna em relação à avaliação dos impactos econômicos mais amplos associados a sua utilização no Brasil. A ausência dessas avaliações se torna particularmente relevante diante das metas de redução de CO₂ que o setor deverá cumprir no âmbito da LCF (2027-2037) e do CORSIA (2027-2035). Nesse sentido, esta tese busca preencher essa lacuna ao avaliar os impactos econômicos e ambientais do cumprimento dessas metas por meio da substituição de QAV por SAF. Portanto, este estudo contribui com uma nova perspectiva e fornece resultados inéditos a partir de uma modelagem macroeconômica.

Este estudo desenvolveu cinco modelos de EGC, genericamente denominados SAFBR, construídos especificamente para analisar a inserção do SAF na economia brasileira e sua utilização pelo setor aéreo. Para isso, foi realizada uma análise abrangente da cadeia de suprimentos de cinco tipos de SAF para identificar seus custos de produção e, em seguida, integrá-los à estrutura de dados do SAFBR. Essa abordagem permitiu avaliar de forma integrada os efeitos econômicos e ambientais da substituição do QAV por SAF em dois cenários. O Cenário 1 (C1) simula o cumprimento das metas da LCF e o Cenário 2 (C2) do CORSIA.

As estimativas de custo de produção de SAF mostraram que nenhuma rota tecnológica seria competitiva frente ao QAV. O SAF poderia custar de duas a sete vezes mais caro do que o QAV, sendo o produzido pela rota SB/HEFA o mais barato e o OS/HEFA o mais caro, em conformidade com a literatura. No que se refere aos custos de abatimento, as rotas SB/HEFA e RF/FT, cujos insumos são resíduos, apresentariam os menores custos, enquanto a rota OS/HEFA os maiores. Esses resultados apontam caminhos estratégicos para viabilizar a produção de SAF: a utilização de matérias-primas de segunda geração tem potencial competitivo com o QAV mesmo na ausência de políticas adicionais.

Ao fim da vigência da LCF e do CORSIA, os resultados acumulados indicam que os custos de produção do setor aéreo cresceriam em todas as rotas, sobretudo na rota OS/HEFA, com aumentos de 40% no C1 e 43,8% no C2, o que levaria a produção a cair 21,5% e 23,8%, respectivamente. Já na rota SB/HEFA, os efeitos seriam mais modestos, com elevação de custos

de apenas 1,65% no C1 e 2,36% no C2, e queda de produção de 0,85% e 1,23%, nesta ordem. Esses impactos se propagariam por toda a cadeia de produção do setor aéreo.

A montante, o setor de refino de petróleo, que produz o QAV, principal componente dos custos do setor aéreo, reduziria sua produção em 0,18% no C1 e 0,24% no C2 na rota CAN/ATJ. Na rota SB/HEFA, a queda seria de 0,02% em ambos os cenários, enquanto na RF/FT seria de 0,08% no C1 e 0,04% no C2. A jusante, a produção do setor de organizações associativas e serviços pessoais (OASP), maior demandante dos serviços de transporte aéreo, registraria queda de 1,5% no C1 e 1,6% no C2 na rota OS/HEFA. Na SB/HEFA, a redução seria de 0,07% no C1 e de 0,09% no C2, enquanto na RF/FT seria de 0,09% no C1, com ganhos de 0,05% no C2.

Não só a cadeia produtiva do transporte aéreo seria afetada, mas também a cadeia de produção de SAF, em especial os setores ligados ao fornecimento de matérias-primas. No acumulado, ao término dessas políticas, a rota que mais alavancaria a produção de seu setor fornecedor de insumos seria a RF/FT com ganhos de 5,2% no C1 e 6,4% no C2 para o setor de exploração vegetal, seguida da rota OS/HEFA com crescimento de 2,5% no C1 e 3,2% no C2 para a agricultura. Já o setor de abate bovino, fornecedor do sebo para a rota SB/HEFA, registraria aumentos de produção menores: 0,65% no C1 e 0,74% no C2. Por um lado, os setores ligados à produção do setor aéreo registrariam perdas; por outro, aqueles ligados à produção de SAF, ganhos de produção.

No contexto macroeconômico, os resultados acumulados da LCF e do CORSIA seriam negativos. O PIB cairia 0,51% e 0,48% na rota OS/HEFA, seguido por quedas de 0,14% e 0,13% na rota CAN/ATJ no C1 e C2, respectivamente. Na rota SB/HEFA, o recuo seria menor de 0,03% no C1 e 0,02% no C2, enquanto na rota RF/FT apresentaria um crescimento de 0,04% no C2. No geral, essas perdas do PIB se refletiriam na redução do emprego e da utilidade agregada, impactando o bem-estar das famílias, sobretudo as de baixa renda. Esse grupo teria perdas na renda real disponível de 0,77% no C1 e 0,68% no C2 da rota OS/HEFA. Na rota SB/HEFA, essa perda seria menor de 0,03% no C1; na rota RF/FT, no C2 teria até ganhos de 0,17%. Esses resultados mostram que, no agregado, os efeitos econômicos da substituição e QAV por SAF para cumprimento das metas ambientais do setor aéreo poderiam ter efeitos adversos, afetando principalmente as famílias de baixa renda, em especial quando o SAF é produzido por rotas com maiores custos de abatimento.

Em relação às emissões acumuladas de CO₂, ao fim da vigência da LCF e do CORSIA, os resultados setoriais seriam distintos de acordo com a estrutura produtiva de cada rota de

produção de SAF. O setor agropecuário, que é o maior emissor no modelo SAFBR, emitiria mais CO₂ em relação ao *baseline* das políticas em todas as rotas, com destaque para a OS/HEFA com crescimento de 1,75% no C1 e 2,10% no C2. O aumento das emissões acumuladas desse setor ajudaria a explicar a variação positiva nas emissões totais da economia brasileira dada sua importância relativa. Na rota OS/HEFA, o aumento seria de 1,26% no C1 e de 1,42% no C2. Nas demais rotas, os resultados também seriam positivos, mas com magnitudes menores, como na rota RCAN/ATJ, com 0,25% no C1 e 0,16% no C2. De modo geral, as rotas com menor impacto ambiental e econômico combinados seriam as SB/HEFA, RF/FT e RCAN/ATJ.

A análise conjunta dos resultados econômicos e ambientais evidencia a complexidade de políticas ambientais setoriais. Essas políticas devem considerar que a economia é um sistema integrado, portanto, mudanças em um setor se propagam por toda a economia, podendo alterar os preços relativos dos produtos, a estrutura de demanda setorial e os padrões de consumo. No caso da LCF e do CORSIA, o uso de SAF, cujo custo de produção é superior ao do QAV, elevaria os custos do setor aéreo, reduzindo sua produção e impactando negativamente sua cadeia produtiva. Em contrapartida, a maior demanda por SAF impulsionaria os setores fornecedores de matérias-primas, ampliando sua produção e suas emissões de CO₂. O efeito líquido dessas interações resultaria, portanto, em ganhos ambientais para o setor aéreo, mas impactos econômicos negativos tanto para este setor quanto para a economia como um todo, que também experimentaria aumento nas suas emissões de CO₂, comprometendo as metas climáticas do Brasil junto ao Acordo de Paris.

Esses resultados evidenciam que, isoladamente, a LCF e o CORSIA podem gerar efeitos adversos no agregado, tornando necessária a adoção de políticas complementares que combinem instrumentos econômicos e ambientais. Do lado econômico, o desafio central é reduzir o custo de produção do SAF, que encarece os serviços aéreos, propagando seus efeitos por toda a economia. Assim, sugerem-se: (i) a criação de incentivos fiscais à sua produção; (ii) o desenvolvimento de linhas de crédito especiais para a instalação ou modernização de plantas produtivas; (iii) investimentos em infraestrutura e logística de transporte; e (iv) investimentos em pesquisa e desenvolvimento voltados à melhoria de eficiência nas aeronaves. Do lado ambiental, recomendam-se as seguintes medidas: (i) incentivo ao uso de terras degradadas para o cultivo de matérias-primas; (ii) a criação de mecanismos que priorizem o uso de insumos de segunda geração na produção de SAF; e (iii) a consolidação de um mercado nacional de carbono alinhado às exigências do CORSIA. Essas medidas, conjuntamente, têm o potencial de reduzir os custos de produção de SAF e as emissões de CO₂.

Em resumo, a análise dos impactos da LCF e do CORSIA revela que, de forma agregada, o cumprimento das metas de redução de emissões de CO₂ impostas por esses regulamentos ao setor aéreo implicaria custos econômicos, sociais e ambientais. Esses custos variam em magnitude conforme a rota tecnológica escolhida para a produção de SAF. Embora cumpra as metas de redução das emissões, a produção do setor aéreo cairia independentemente da rota escolhida. Em um contexto sem políticas complementares, os resultados econômicos, ambientais e sociais, analisados conjuntamente, sugerem que as rotas derivadas de matéria-prima de segunda geração seriam as mais recomendadas, nesta ordem: SB/HEFA, RF/FT e RCAN/ATJ. Esses resultados são inéditos, pois não há, até o momento, nenhum estudo publicado que avalie esses dois regulamentos, considerando as interdependências setoriais por meio de uma abordagem de EGC.

Portanto, esta tese contribui para a literatura empírica ao integrar economia e meio ambiente, oferecendo uma visão sistêmica dos impactos da substituição de QAV por SAF no âmbito de uma política setorial de mitigação de emissões. Metodologicamente, desenvolve os modelos SAFBR, que incorporam a sua estrutura teórica tradicional módulos fiscal, de emissões e de volume. Ademais, incorpora um novo setor à base de dados, responsável pela produção de SAF. Os modelos SAFBR são capazes de avaliar os impactos de diferentes rotas tecnológicas de SAF, isoladamente ou em combinação com outras políticas públicas. Assim, constituem-se como uma ferramenta metodológica inovadora que pode ser utilizada tanto por formuladores de políticas públicas quanto por agentes do setor privado para tomada de decisão.

Ressalta-se que algumas escolhas metodológicas e de construção dos cenários são pontos a serem explorados em estudos futuros. A LCF estabelece metas de redução de emissões para outros setores da economia que não foram considerados neste estudo, mas que poderiam ser integrados a análises futuras. Além disso, devido à ampla variedade de combinações de matérias-primas e tecnologias de conversão para produção de SAF, este estudo analisou um conjunto selecionado de rotas, não contemplando todas as possibilidades existentes. Em termos metodológicos, considerar os coprodutos gerados no processo de produção de SAF, incorporar as emissões relacionadas ao uso da terra e modelar o mercado de créditos de carbono, se constituem como inovações pertinentes à temática. Adicionalmente, uma abordagem regionalizada poderia oferecer novas perspectivas sobre os impactos das políticas de mitigação no setor aéreo brasileiro. Esses pontos devem ser considerados, mais que limitações, como contribuições para a agenda de pesquisa sobre descarbonização da economia brasileira.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Philip D. *et al.* Forecasts for the Australian economy using the MONASH model. **International Journal of Forecasting**, v. 10, n. 4, p. 557–571, 1 dez. 1994.

ADAMS, Philip D.; HORRIDGE, Mark; PARMENTER, Brian R. MMRF-GREEN: A Dynamic, Multi-Sectoral, Multi-Regional Model of Australia. **Centre of Policy Studies (CoPS)**, 2000.

ADAMS, Philip D.; PARMENTER, Brian R. (ORGS.). ORANI-F and MONASH: General Equilibrium Models of the Australian Economy for Medium-Run Forecasting. Preliminary Working Paper No. OP-80. 1994.

ADAMS, Philip; HORRIDGE, Jonathan; WITTEWER, Glyn. MMRF-GREEN: A dynamic multi-regional applied general equilibrium model of the Australian economy, based on the MMR and MONASH models. 2002.

ALALWAN, Hayder A.; ALMINSHID, Alaa H.; ALJAAFARI, Haydar A. S. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. **Renewable Energy Focus**, v. 28, p. 127–139, 1 mar. 2019.

ALAM, M. Shahid. **Economic Growth with Energy**. MPRA Paper. Disponível em: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/1260/>>. Acesso em: 3 jul. 2024.

ALMEIDA, Eduardo Simões de. **Um modelo de equilíbrio geral aplicado espacial para planejamento e análise de políticas de transporte**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2003.

ALVES, Catarina M. *et al.* Techno-economic assessment of biorefinery technologies for aviation biofuels supply chains in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 1, p. 67–91, 2017.

ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo - 2000**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo - 2015**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

ANAC. **RESOLUÇÃO Nº 496, 28/11/2018 — Agência Nacional de Aviação Civil ANAC**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2018/resolucao-no-496-28-11-2018/>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

ANAC. **Indicadores do transporte aéreo recuam em consequência da pandemia de Covid-19**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2021/indicadores-do-transporte-aereo-recuam-em-consequencia-da-pandemia-de-covid-19>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

ANAC. **Plano de ação para redução das emissões de GEE da aviação civil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/plano-de-acao>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo - 2023**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo>>.

ANAC. **CORSIA**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>>. Acesso em: 31 ago. 2023b.

ANAC. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoib2VhNDY1OTItY2Q0Yi00ZGM2LWE1OTMtNmQyMGNkODE1NGQ2IiwidCI6ImI1NzQ4ZjZILWI0YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiJ9>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

ANAC. **Dados Estatísticos**. , 2025a. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-estatisticos/dados-estatisticos>>. Acesso em: 17 abr. 2025

ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em: 6 set. 2025b.

ANP. **Combustíveis de aviação**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>>. Acesso em: 24 ago. 2024.

ANP. **Anuário Estatístico 2021**: Tabela 3.26 – Preço médio do querosene de aviação ao consumidor, segundo Municípios selecionados – 2011-2020. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2021>>. Acesso em: 21 ago. 2024a.

ANP. **RESOLUÇÃO ANP Nº 856, DE 22 DE OUTUBRO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou>>. Acesso em: 14 set. 2023b.

ANP. **CNPE aprova resolução que restabelece o aumento para 12% da mistura de biodiesel ao diesel a partir de abril**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/cnpe-aprova-resolucao-que-restabelece-o-aumento-para-12-da-mistura-de-biodiesel-ao-diesel-a-partir-de-abril>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ANP. **Dados estatísticos**. , 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/dados-estatisticos>>. Acesso em: 17 abr. 2025

ARROW, Kenneth J.; DEBREU, Gerard. Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. **Econometrica**, v. 22, n. 3, p. 265–290, 1954.

ATAG. **Aviation: Benefits Beyond Borders**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://aviationbenefits.org/downloads/aviation-benefits-beyond-borders-2020/>>. Acesso em: 9 ago. 2024.

AYDEMIR, M. Olcay; SOYTAŞ, Uğur. Quality of life and energy use: Is there a fair energy use level? In: **Routledge Handbook of Energy Economics**. [S.l.]: Routledge, 2019.

BANCO MUNDIAL. Transport Overview. **World Bank**, 2024.

BANDARA, Jayatilleke S. COMPUTABLE GENERAL EQUILIBRIUM MODELS FOR DEVELOPMENT POLICY ANALYSIS IN LDCs. **Journal of Economic Surveys**, v. 5, n. 1, p. 3–69, 1991.

BANN, Seamus J. *et al.* The costs of production of alternative jet fuel: A harmonized stochastic assessment. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 179–187, 1 mar. 2017.

BECKEN, Susanne; MACKEY, Brendan; LEE, David S. Implications of preferential access to land and clean energy for Sustainable Aviation Fuels. **Science of The Total Environment**, v. 886, p. 163883, 15 ago. 2023.

BELIK, Walter. Estudo sobre a Cadeia de Alimentos. **Instituto Ibirapitanga [Internet]**, 2020.

BETARELLI, Admir Antonio; DOMINGUES, Edson Paulo; HEWINGS, Geoffrey John Dennis. Transport policy, rail freight sector and market structure: The economic effects in Brazil. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 135, p. 1–23, 1 maio 2020.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio *et al.* **Caracterização da indústria nacional de SAF por suas diversas regiões a partir do padrão de custos e de demanda estabelecidos no sistema econômico, considerando especialmente os principais serviços de abastecimento dos aeroportos**. In: Estudos acerca das alternativas do setor aéreo relacionados ao uso de SAF, *Sustainable Aviation Fuel*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio *et al.* Research and development, productive structure and economic effects: Assessing the role of public financing in Brazil. **Economic Modelling**, v. 90, p. 235–253, 1 ago. 2020.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio *et al.* COVID-19, public agglomerations and economic effects: Assessing the recovery time of passenger transport services in Brazil. **Transport Policy**, v. 110, p. 254–272, 1 set. 2021.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antônio; BASTOS, Suzana Quinet de Andrade; PEROBELLI, Fernando Salgueiro. Interações e encadeamentos setoriais com os modais de transporte: uma análise para diferentes destinos das exportações brasileiras. **Economia Aplicada**, v. 15, p. 223–258, jun. 2011.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio Betarelli. **Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 25 mar. 2013.

BNDES. **Parcerias para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/parcerias>>. Acesso em: 2 out. 2025.

BOLFE, Édson Luis *et al.* Potential for Agricultural Expansion in Degraded Pasture Lands in Brazil Based on Geospatial Databases. **Land**, v. 13, n. 2, p. 200, fev. 2024.

BORGES, Antonio M. Applied general equilibrium models: An assessment of their usefulness for policy analysis. **OECD Economic Studies**, v. 7, p. 15, 1986.

BOULDING, Kenneth E. The Economics of the Coming Spaceship Earth. *In: Environmental Quality in a Growing Economy*. [S.l.]: RFF Press, 2011.

BRASIL. **Portal da Câmara dos Deputados**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 8 ago. 2023.

BRASIL. **Dnn213**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/anterior_a_2000/1991/dnn213.htm>. Acesso em: 10 ago. 2023.

BRASIL. **L8723**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8723.htm>. Acesso em: 11 ago. 2023.

BRASIL. **Lei nº 11.097**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111097.htm>. Acesso em: 8 ago. 2023.

BRASIL. **L12187**. 2009. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em: 2 fev 2024.

BRASIL. **L13576**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm>. Acesso em: 7 ago. 2023.

BRASIL. **LEI Nº 14.248, DE 25 DE NOVEMBRO DE 2021**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14248.htm>. Acesso em: 10 ago. 2023.

BRASIL. **D11003**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11003.htm>. Acesso em: 7 ago. 2023.

BRASIL. **LEI Nº 14.993, DE 8 DE OUTUBRO DE 2024**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BRASIL. **LEI Nº 14.993, DE 8 DE OUTUBRO DE 2024**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRODZIK, Łukasz *et al*. Minimizing the Environmental Impact of Aircraft Engines with the Use of Sustainable Aviation Fuel (SAF) and Hydrogen. **Energies**, v. 18, n. 3, p. 472, jan. 2025.

BUTTON, Kenneth; TAYLOR, Samantha. International air transportation and economic development. **Journal of Air Transport Management**, v. 6, n. 4, p. 209–222, 1 out. 2000.

CANTARELLA, Heitor *et al*. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 52–63, 1 jul. 2015.

CAPAZ, Rafael S. *et al*. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 2, p. 502–524, 2021a.

CAPAZ, Rafael S. *et al.* The carbon footprint of alternative jet fuels produced in Brazil: exploring different approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, p. 105260, 1 mar. 2021b.

CAPAZ, Rafael Silva. **Alternative aviation fuels in Brazil: environmental performance and economic feasibility**. [S.l.]: Universidade Estadual de Campinas [s.n.], 2021.

CARDOSO, Debora Freire. **Capital e Trabalho no Brasil no Século XXI: o impacto de políticas de transferência e de tributação sobre desigualdade, consumo e estrutura produtiva**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 17 mar. 2016.

CARVAHO, Francielle Mello de. **Evaluation of the Brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2017.

CARVALHO, Micaele Martins de. **Efetividade econômica, social e ambiental da precificação de carbono na economia brasileira para o alcance de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 24 fev. 2022.

CARVALHO, Terciane Sabadini. **Uso do solo e desmatamento nas regiões da Amazônia Legal Brasileira: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 24 mar. 2014.

CMAP. **Relatório de Avaliação Operação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB)**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/planejamento/pt-br/acao-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/cmap/politicas/2020/gastos-diretos/relatorio_avaliacao-cmag-2020-sisceab.pdf>

COASE, Ronald H. The Problem of Social Cost' (1960). **Journal of Law and Economics**, v. 3, p. 1, 1960.

CONAMA. **Atos Normativos - RESOLUÇÃO CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986**. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41>. Acesso em: 11 ago. 2023.

COPPIO, Gustavo José Lauer *et al.* Impacto da crise econômica brasileira no transporte aéreo no país: Uma análise da influência do PIB e da inflação. **TRANSPORTES**, v. 25, n. 2, p. 53–63, 31 ago. 2017.

COPS. **The ORANI-G Page**. Disponível em: <<https://www.copsmodels.com/oranig.htm>>. Acesso em: 19 jul. 2024.

CORONG, Erwin L. **Tariff elimination, gender and poverty in the Philippines: a computable general equilibrium (CGE) microsimulation analysis**. thesis—[S.l.]: Monash University, 2014.

CORONG, Erwin L.; HORRIDGE, J. Mark. PHILGEM: A SAM-based Computable General Equilibrium Model of the Philippines. **Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers**, Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers. abr. 2012.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa *et al.* **Roadmap for Sustainable Aviation Biofuels for Brazil: A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil.** [S.l.]: Editora Blucher, 2014.

COSTA, Ricardo Cunha da *et al.* Combustível sustentável de aviação. set. 2024. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26108>>. Acesso em: 20 jul 2025.

COSTANZA, Robert *et al.* **An Introduction to Ecological Economics.** Boca Raton: CRC Press, 1997.

COX, Kelly *et al.* Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane molasses. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 4, p. 579–593, 2014.

CSEREKLYEI, Zsuzsanna; RUBIO-VARAS, M. d. Mar; STERN, David I. Energy and Economic Growth: The Stylized Facts. **The Energy Journal**, v. 37, n. 2, p. 223–256, 1 abr. 2016.

DALY, Herman E. On Economics as a Life Science. **Journal of Political Economy**, v. 76, n. 3, p. 392–406, maio 1968.

DALY, Herman E. Allocation, distribution, and scale: towards an economics that is efficient, just, and sustainable. **Ecological Economics**, v. 6, n. 3, p. 185–193, 1 dez. 1992.

DALY, Herman E. Ecological Economics and Sustainable Development, Selected Essays of Herman Daly. In: [S.l.: S.n.]. 2007. Disponível em: <<https://www.elgaronline.com/monobook/9781847201010.xml>>. Acesso em: 7 jul 2024.

DALY, Herman E.; FARLEY, Joshua C. **Ecological Economics: Principles And Applications.** [S.l.]: Island Press, 2004.

DASGUPTA, Partha; HEAL, Geoffrey. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. **The Review of Economic Studies**, v. 41, p. 3–28, 1974.

DE ALMEIDA, Alexandre Nunes. Elasticidades renda e preços: análise do consumo familiar a partir dos dados da POF 2008/2009. **Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS)**, 2011.

DE JONG, Sierk *et al.* Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 64, 14 mar. 2017a.

DEVARAJAN, Shantayanan; ROBINSON, Sherman. The Influence of Computable General Equilibrium Models on Policy. In: WHALLEY, John; SRINIVASAN, T. N.; KEHOE, Timothy J. (Orgs.). **Frontiers in Applied General Equilibrium Modeling: In Honor of Herbert Scarf.** Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 402–428.

DIETZENBACHER, Erik; LINDEN, Jan A. van der; STEENGE, Alben E. The Regional Extraction Method: EC Input–Output Comparisons. **Economic Systems Research**, v. 5, n. 2, p. 185–206, 1 jan. 1993.

DIXON, Peter B. *et al.* **Orani, a multisectoral model of the Australian economy.** 1982. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.copsmodels.com/archivep.htm#bpmh0098>>. Acesso em 15 jul 2024.

DIXON, Peter B.; PARMENTER, B. R. Chapter 1 Computable general equilibrium modelling for policy analysis and forecasting. *In: Handbook of Computational Economics*. [S.l.]: Elsevier, 1996. v. 1 p. 3–85.

DIXON, Peter B.; RIMMER, Maureen T. **Dynamic general equilibrium modelling for forecasting and policy. A practical guide and documentation of Monash**. [S.l.]: Elsevier, 2002.

DOLIENTE, Stephen S. *et al.* Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, 2020.

DOMINGUES, Edson P.; HADDAD, Eduardo A. Política tributária e re-localização. **Revista Brasileira de Economia**, v. 57, p. 849–871, dez. 2003.

DOMINGUES, Edson Paulo. **Dimensão regional e setorial da integração brasileira na Área de Livre Comércio das Américas**. Doutorado em Teoria Econômica—São Paulo: Universidade de São Paulo, 24 out. 2002.

DOMINGUES, Edson Paulo *et al.* Repercussões setoriais e regionais da crise econômica de 2009 no Brasil: Simulações em um modelo de equilíbrio geral computável de dinâmica recursiva. **38 Encontro Nacional de Economia da ANPEC**, 2010.

DYK, Susan van; SADDLER, Jack. **Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies**. 2024. Disponível em: <<https://task39.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/37/2024/05/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>>. Acesso em: 12 set 2025.

EFTHYMIIOU, Marina; RYLEY, Tim. Chapter 8 - Governance and policy developments for sustainable aviation fuels. *In: YOUSUF, Abu; GONZALEZ-FERNANDEZ, Cristina (Orgs.). Sustainable Alternatives for Aviation Fuels*. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 201–214.

EMBRAPA. **Artigo: Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3344909/artigo-materias-primas-oleaginosas-para-a-producao-de-bioquerosene--oportunidades-e-desafios>>. Acesso em: 31 out. 2023a.

EMBRAPA. **Artigo: Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3344909/artigo-materias-primas-oleaginosas-para-a-producao-de-bioquerosene--oportunidades-e-desafios>>. Acesso em: 31 out. 2023b.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>>. Acesso em: 21 jun. 2023a.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>>. Acesso em: 7 ago. 2023b.

ESCALANTE, Edwin Santiago Rios *et al.* Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production: Focus in the Brazilian context. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111716, 1 jan. 2022.

FAN, Xinxin *et al.* Spatially Varying Costs of GHG Abatement with Alternative Cellulosic Feedstocks for Sustainable Aviation Fuels. **Environmental Science & Technology**, v. 58, n. 26, p. 11352–11362, 2 jul. 2024.

FAO. Sustainable bioeconomy and FAO. 2022. Disponível em: <<https://www.fao.org/4/al464E/al464E.pdf>>. Acesso em: 15 jun 2025.

FARIA, Weslem Rodrigues. **Modelagem e avaliação de fenômenos relacionados ao uso da terra no Brasil**. text—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 23 nov. 2012.

FERREIRA FILHO, Joaquim Bento. **INTRODUÇÃO AOS MODELOS DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL: CONCEITOS, TEORIA E APLICAÇÕES**. 2018. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/123136504-Modelos-de-equilibrio-geral-computavel-conceitos-teoria-e-aplicacoes-ambientais-aula-1-joaquim-bento-de-souza-ferreira-filho-esalq-usp.html>>. Acesso em: 19 fev 2024.

FERREIRA, Pedro Cavalcanti; ISSLER, João Victor; PESSÔA, Samuel de Abreu. **On the nature of income inequality across nations**. 1 mar. 2000. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10438/791>>. Acesso em: 26 ago 2024.

FIORINI, Ana Carolina Oliveira *et al.* Sustainable aviation fuels must control induced land use change: an integrated assessment modelling exercise for Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 1, p. 014036, jan. 2023.

FOCHEZATTO, Adelar. Modelos de equilíbrio geral aplicados na análise de políticas fiscais: uma revisão da literatura. **Análise – Revista de Administração da PUCRS**, v. 16, n. 1, 2005.

GOLDSTEIN, Joshua S.; HUANG, Xiaoming; AKAN, Burcu. Energy in the World Economy, 1950–1992. **International Studies Quarterly**, v. 41, n. 2, p. 241–266, 1 jun. 1997.

GONZAGA, Gustavo; CORSEUIL, Carlos Henrique. Emprego Industrial no Brasil: Análise de Curto e Longo Prazos. **Revista Brasileira de Economia**, v. 55, p. 467–491, set. 2001.

GUARENGHI, Marjorie Mendes *et al.* Areas Available for the Potential Sustainable Expansion of Soy in Brazil: A Geospatial Assessment Using the SAFmaps Database. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1628, jan. 2022.

GUILHOTO, Joaquim. **Um Modelo Computavel De Equilibrio Geral Para Planejamento E Analise De Politicas Agrícolas (PAPA) Na Economia Brasileira (A Computable General Equilibrium Model for Planning and Analysis of Agricultural Policies (PAPA) in the Brazilian Economy)**. , 1995. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=2420141>>. Acesso em: 16 jul. 2024

GUILHOTO, Joaquim; HASEGAWA, Marcos M.; LOPES, Ricardo L. **A Estrutura Teórica Do Modelo Inter-Regional Para a Economia Brasileira - MIBRA (The Theoretical Structure of Inter-Regional Model for the Brazilian Economy - MIBRA)**. Rochester, NY, 2002. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=2412209>>. Acesso em: 16 jul. 2024

GUILHOTO, Joaquim José Martins. **Análise de Insumo-Produto: Teoria e Fundamentos**. MPRA Paper. Disponível em: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/32566/>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

HADDAD, Eduardo A. **Regional Inequality and Structural Changes: Lessons from the Brazilian Experience**. London: Routledge, 1999.

HADDAD, Eduardo Amaral. **Retornos crescentes, custo de transporte e crescimento regional**. text—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 25 out. 2004.

HADDAD, Eduardo Amaral *et al.* Assessing the ex ante economic impacts of transportation infrastructure policies in Brazil. **Journal of Development Effectiveness**, v. 3, n. 1, p. 44–61, 25 mar. 2011.

HAFNER, Sarah *et al.* Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review. **Ecological Economics**, v. 177, p. 106779, 1 nov. 2020.

HARDIN, Garrett. The Tragedy of the Commons: The population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. **Science**, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, 13 dez. 1968.

HARRIS, Jonathan; GOODWIN, Neva. Reconciling Growth and Environment. *In: [S.l.: S.n.]*.

HARTWICK, John M. Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. **The American Economic Review**, v. 67, n. 5, p. 972–974, 1977.

HOLLADAY, Johnathan; ABDULLAH, Zia; HEYNE, Joshua. **Sustainable Aviation Fuel: Review of Technical Pathways**. [S.l.]: DOE EERE; Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States); National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States); University of Dayton, OH (United States), 9 set. 2020. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1660415>>. Acesso em: 2 dez. 2023.

HORRIDGE, J. M.; PARMENTER, B. R.; PEARSON, K. R. ORANI-G: A General Equilibrium Model of the Australian Economy. **Centre of Policy Studies and Impact Project, Monash University, Australia**, 1998.

HORRIDGE, Mark. **ORANI-G: A general equilibrium model of the Australian economy**. [S.l.]: Centre of Policy Studies (CoPS), 2000.

HORRIDGE, Mark. ORANIGRD: a Recursive Dynamic version of ORANIG. **Centre of Policy Studies and Impact Project, Monash University, Australia**, 2002.

HOTELLING, Harold. The Economics of Exhaustible Resources. **Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137–175, 1931.

IATA. **VALOR DO TRANSPORTE AÉREO NO BRASIL**. 2019. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/brazil-o-valor-do-transporte-aereo.pdf>>

IATA. **IATA Annual Review 2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2020.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2024.

IATA. **Net zero carbon 2050 resolution**. 2021. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet----iata-net-zero-resolution/>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

IATA. **CCR Information and Data for Transparency-Part II**. 2022. Disponível em: <[https://www.icao.int/sites/default/files/environmentalprotection/CORSIA/Documents/CORSIA A%20Central%20Registry/CCR-Info-Data-Transparency_PartII_Oct2022.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/environmentalprotection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Central%20Registry/CCR-Info-Data-Transparency_PartII_Oct2022.pdf)>. Acesso em: 19 ago. 2024.

IATA. **Fact sheet: CORSIA**. 2023a. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia/>>. Acesso: 4 fev. 2024.

IATA. **Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)**. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>>. Acesso em: 19 jun. 2023b.

IATA. **Offsetting CO2 Emissions with CORSIA**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/corsia-handbook.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2025a.

IATA. **The story of the world's first airline**. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/about/history/flying-100-years/firstairline-story/>>. Acesso em: 9 ago. 2024b.

IATA. **Air Passenger Numbers to Recover in 2024**. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>>. Acesso em: 11 ago. 2024c.

IATA. **SAF Handbook Section 5**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/programs/sustainability/reports/saf-handbook/section-5/>>. Acesso em: 19 ago. 2024.

IATA. **Disappointingly Slow Growth in SAF Production**. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03/>>. Acesso em: 18 jul. 2025a.

IATA. **Offsetting CO2 Emissions with CORSIA**. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/programs/sustainability/corsia/>>. Acesso em: 18 jul. 2025b.

IBAMA. **Programa de controle de emissões veiculares (Proconve)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

IBGE. **Matriz de Insumo-Produto** | IBGE. 2015. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html>>. Acesso em: 22 ago. 2024

IBGE. **Matriz de Insumo-Produto** | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=publicacoes>>. Acesso em: 14 maio. 2024.

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais: Brasil** | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

IBGE. **Tabela 5457: Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>>. Acesso em: 21 maio. 2024a.

IBGE. **IBGE | Concla | Busca online**. Disponível em: <<https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html>>. Acesso em: 22 maio. 2024b.

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais: Brasil** | IBGE. 2025a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>>. Acesso em: 17 abr. 2025

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais Trimestrais** | IBGE. 2025b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 17 abr. 2025

IBGE. **Projeções da População** | IBGE. 2025c. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 17 abr. 2025

IEA. **IEA Bioenergy Task42 Biorefining Brochure**. 2014. Disponível em: <<https://task42.ieabioenergy.com/publications/iea-bioenergy-task42-biorefining/>>. Acesso em: 2 maio. 2024

IEA. **Biorefining in a Circular Economy – Bioenergy**. 2022. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/blog/task/biorefining-sustainable-processing-of-biomass-into-a-spectrum-of-marketable-biobased-products-and-bioenergy/>>. Acesso em: 3 maio. 2024

IEA. **Aviation**. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>>. Acesso em: 6 fev. 2025.

IPCC. **SAR Climate Change 1995: Synthesis Report — IPCC**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar2/syr/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

IPCC. **Carbon Dioxide Capture and Storage — IPCC**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2018.

IPCC. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 16 jun. 2023a.

IPCC. **History — IPCC**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/about/history/>>. Acesso em: 20 jun. 2023b.

IPEADATA. **Produto interno bruto (PIB) a preços de mercado - deflator implícito: variação anual (SCN10_DIPIBG10).** Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=1184389724&module=M>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ISHUTKINA, Mariya A.; HANSMAN, R. John. Analysis of the Interaction Between Air Transportation and Economic Activity: A Worldwide Perspective. 14 out. 2011.

JIANG, Changmin; YANG, Hangjun. Carbon tax or sustainable aviation fuel quota. **Energy Economics**, v. 103, p. 105570, nov. 2021.

JOHANSEN, Leif. **A multi-sectoral study of economic growth**. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1960.

JORGENSEN, Dale W.; WILCOXEN, Peter J. Chapter 27 - Energy, The Environment, and Economic Growth. In: KNEESE, Allen V.; SWEENEY, James L. (Orgs.). **Handbook of Natural Resource and Energy Economics**. [S.l.]: Elsevier, 1993. v. 3 p. 1267–1349.

KASARDA, John D.; GREEN, Jonathan D. Air cargo as an economic development engine: A note on opportunities and constraints. **Journal of Air Transport Management**, v. 11, n. 6, p. 459–462, 1 nov. 2005.

KLEIN, Bruno Colling *et al.* Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. **Applied Energy**, v. 209, p. 290–305, 1 jan. 2018.

KLIMCZYK, Weronika *et al.* Sustainable Aviation Fuels: A Comprehensive Review of Production Pathways, Environmental Impacts, Lifecycle Assessment, and Certification Frameworks. **Energies**, v. 18, n. 14, p. 3705, jan. 2025.

KRETSCHMER, Bettina; PETERSON, Sonja. Integrating bioenergy into computable general equilibrium models — A survey. **Energy Economics**, v. 32, n. 3, p. 673–686, 1 maio 2010.

KURNIAWAN, Jermanto S.; KHARDI, S. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 3, p. 240–252, 1 abr. 2011.

LAU, Lee Chung; LEE, Keat Teong; MOHAMED, Abdul Rahman. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 5280–5284, 1 set. 2012.

LEE, David S. The current state of scientific understanding of the non-CO2 effects of aviation on climate. **UK Department for Transport, Manchester Metropolitan University**, 2018.

LEE, Roland Arthur; LAVOIE, Jean-Michel. From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. **Animal Frontiers**, v. 3, n. 2, p. 6–11, 1 abr. 2013.

LENAERTS, Bert; ALLROGGEN, Florian; MALINA, Robert. The economic impact of aviation: A review on the role of market access. **Journal of Air Transport Management**, v. 91, p. 102000, 1 mar. 2021.

LEONTIEF, Wassily W. Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. **The Review of Economics and Statistics**, v. 18, n. 3, p. 105–125, 1936.

LONG, S. P. *et al.* Feedstock for biofuels and bioenergy. **n Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps**, p. 258–301, 1 jan. 2015.

MAGALHAES, Aline Souza. **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 26 mar. 2013.

MAPA. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/mda/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>>. Acesso em: 8 ago. 2023.

MCGILVRAY, James W. 4 LINKAGES, KEY SECTORS AND DEVELOPMENT STRATEGY JAMES W. MCGILVRAY. **Structure, system and economic policy**, p. 49, 1977.

MCTIC. **PLANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Ciencia-Tecnologia-e-Inovacao-Para-Energias-Renovaveis-e-Biocombustiveis.pdf>>.

MDIC. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. Disponível em: <<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

MILLER, Ronald E.; BLAIR, Peter D. **Input-Output Analysis: Foundations and Extensions**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.

MMA. **PORTARIA No - 149, DE 10 DE MAIO DE 2016**. 2016 a. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80182/Portaria%20PNA%20_150_10052016.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024.

MMA. **Plano Nacional de Adaptação**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/arquivos-biomas/plano-nacional-de-adaptacao-a-mudanca-do-clima-pna-vol-ii.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023b.

MMA. **Plano Nacional de Adaptação**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/plano-nacional-de-adaptacao>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

MMA. **Programa Metano Zero**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-nacional-metano-zero>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

MME. **Resoluções 2021 - Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/resolucoes-2021>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

MME. **Resoluções 2022 - Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis**. Disponível em:

<<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

MME. **Documentos do Subcomitê**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/probioqav/documentos-do-subcomite-1/documentos-do-subcomite>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

MONTOYA, PAULO HENRIQUE POLLY. **Análise de custo e benefício do mandato de biocombustíveis de aviação no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Economia)—[S.l.]: Universidade Federal Fluminense., 2021.

MORAES, Marcia A. F. D. *et al.* Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 716–726, 1 dez. 2014a.

MORAES, Marcia A. F. D. *et al.* Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 716–726, 1 dez. 2014b.

MORETTI, Christian *et al.* Attributional and consequential LCAs of a novel bio-jet fuel from Dutch potato by-products. **Science of The Total Environment**, v. 813, p. 152505, 20 mar. 2022.

MTE. **Programa de Disseminação das Estatísticas do Trabalho (PDET)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/programa-de-disseminacao-das-estatisticas-do-trabalho-pdet-1>>. Acesso em: 14 ago. 2024.

MUELLER, Tobias; WINTER, Etti; GROTE, Ulrike. Economic impacts of power-to-liquid fuels in aviation: A general equilibrium analysis of production and utilization in Germany. **Energy Conversion and Management: X**, v. 23, p. 100632, 1 jul. 2024.

NAVARRETE, Andy; PAVLENKO, Nikita; O'MALLEY, Jane. SAF policy scorecard: Evaluating state-level sustainable aviation fuel policies in the United States. 2024.

NG, Kok Siew; FAROOQ, Danial; YANG, Aidong. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111502, 1 out. 2021.

OACI. **ICAO Environmental Reports**. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ICAO_environmental_reports.aspx>. Acesso em: 30 ago. 2023.

OACI. **Resolution A39-3: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Global Market-based Measure (MBM) scheme**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Resolution_A39_3.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2023.

OACI. **ICAO Vision**. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/pages/ICAO-Vision.aspx>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

OACI. **Documents - All Documents**. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Forms/AllItems.aspx>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

OACI. **2019 Environmental Report**. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep2019.aspx>>. Acesso em: 1 set. 2023.

OACI. **ICAO Environmental Report 2022**. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx>>. Acesso em: 31 ago. 2023a.

OACI. **ICAO document - CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels**. 2022b. Disponível em: <<https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05Sustainability-Criteria-November-2022.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

OACI. **CORSIA_Eligible_Fuels - All Documents**. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fenvironmental%2dprotection%2fCORSIA%2fDocuments%2fCORSIA%5fEligible%5fFuels&FolderCTID=0x0120001E0668FDCEB3914CB43AEE6773BAE9C0>>. Acesso em: 5 set. 2023c.

OACI. **Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation**. Disponível em: <<https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>>. Acesso em: 9 ago. 2024.

OLIVEIRA, Alessandro V. M. **Transporte Aereo: Economia e Politicas Publicas**. [S.l.]: arXiv, 2009. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2402.07190>>. Acesso em: 16 ago. 2024.

OLIVEIRA, Daniele Silva *et al.* Estudo da precificação de companhias aéreas em rotas domésticas de longo percurso. **Engevista**, 2006.

O'MALLEY, Jane; PAVLENKO, Nikita; KIM, Yi Hyun. Meeting the SAF grand challenge: Current and future measures to increase US Sustainable aviation fuel production capacity. **International Council on Clean Transportation**, v. 1, 2023.

OMM. **Proceedings of the World Climate Conference - a conference of experts on climate and Mankind**. Geneva: WMO, 1979.

OMM. **Greenhouse Gas Bulletin: Another Year Another Record**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-bulletin-another-year-another-record>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

ONU. Protection of global climate for present and future generations of mankind : resolution /: adopted by the General Assembly. 1988. Disponível em: <<https://digitallibrary.un.org/record/196935?v=pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

ONU. **The Paris Agreement**. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

OUEDRAOGO, Nadia S. Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model. **Energy**, v. 63, p. 28–41, 15 dez. 2013.

PEARCE, David W.; TURNER, R. Kerry. **Economics of Natural Resources and the Environment**. [S.l.]: JHU Press, 1989.

PEROBELLI, Fernando Salgueiro. **Análise espacial das interações econômicas entre os estados brasileiros**. text—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 17 jun. 2004.

PEROBELLI, Fernando Salgueiro *et al.* Estimativa da Matriz de Insumo-Produto da Bahia (2009): características sistêmicas da estrutura produtiva do Estado. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 46, n. 4, p. 97–115, 2015.

PETER, Matthew W. *et al.* **The Theoretical Structure of MONASH-MRF**. [S.l.]: Victoria University, Centre of Policy Studies/IMPACT Centre, jun. 1996. Disponível em: <<https://econpapers.repec.org/paper/copwpaper/op-85.htm>>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PIGOU, Arthur Cecil. **The Economics of Welfare**. [S.l.]: Macmillan, 1932.

PORSSE, Alexandre Alves. **Competição tributária regional, externalidades fiscais e federalismo no Brasil: uma abordagem de equilíbrio geral computável**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 14 dez. 2005.

PROFILLIDIS, V.; BOTZORIS, G. Air passenger transport and economic activity. **Journal of Air Transport Management**, v. 49, p. 23–27, 1 out. 2015.

PROQUE, Andressa Lemes. **Estrutura produtiva, renda e consumo: os efeitos econômicos da cide e contrapartidas ao transporte rodoviário de passageiros no Brasil**. Universidade federal de Juiz de Fora, 17 abr. 2019.

RBQAV. **REDE BRASILEIRA DE BIOQUEROSENE E HIDROCARBONETOS SUSTENTÁVEIS PARA AVIAÇÃO - RBQAV**. Disponível em: <<https://rbqav.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

RIAL, Rafael Cardoso. Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 196, p. 114369, 1 maio 2024.

ROBINSON, Sherman. Chapter 18 Multisectoral models. *In: Handbook of Development Economics*. [S.l.]: Elsevier, 1989. v. 2 p. 885–947.

ROITMAN, Tamar. **Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. dez. 2018.

RYAN, Lisa; TURNER, Karen; CAMPBELL, Nina. Energy efficiency and economy-wide rebound: Realizing a net gain to society? *In: Routledge Handbook of Energy Economics*. [S.l.]: Routledge, 2019.

SAIN, Chetan Kumar; KAZULA, Stefan; ENGHARDT, Lars. Electric Propulsion for Regional Aircraft-Critical Components and Challenges. 2022. Disponível em: <https://elib.dlr.de/193343/1/Electric%20Propulsion%20for%20Regional%20Aircraft-%20Critical%20Components%20and%20Challenges_DLRK2022_ID%20570151.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2025.

SALGADO, L. H.; OLIVEIRA, Alessandro V. M. **Constituição do Marco Regulatório para o Mercado Brasileiro de Aviação Regional**. *In: 2008*. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Constitui%C3%A7%C3%A3o-do-Marco->

Regulat%C3%B3rio-para-o-Mercado-de-Salgado-Oliveira/da867aa97705d6f8ef667b43709b99dda3ef7179>. Acesso em: 11 ago. 2024

SALGADO, Lucia Helena; VASSALLO, Moisés Diniz; OLIVEIRA, Alessandro VM. Regulação, políticas setoriais, competitividade e formação de preços: considerações sobre o transporte aéreo no Brasil. **Journal of Transport Literature**, v. 4, n. 1, p. 7–48, 2010.

SANTOS, Catarina I. *et al.* Integrated 1st and 2nd generation sugarcane bio-refinery for jet fuel production in Brazil: Techno-economic and greenhouse gas emissions assessment. **Renewable Energy**, 1st International Conference on Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability. v. 129, p. 733–747, 1 dez. 2018.

SANTOS, Gervásio Ferreira dos. **Política energética e desigualdades regionais na economia brasileira**. text—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 26 fev. 2010.

SCARF, Herbert. An Example of an Algorithm for Calculating General Equilibrium Prices. **The American Economic Review**, v. 59, n. 4, p. 669–677, 1969.

SCHIMANSKI, Silvana; ZHANG, L. Cadeias Globais de Valor e os países em desenvolvimento. **Boletim de Economia e Política Internacional (BEPI)**, 2014.

SEBER, Gonca *et al.* Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 108–118, 1 ago. 2014.

SEEG. **SEEG Brasil – O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2024.

SHAHRIAR, Md Fahim; KHANAL, Aaditya. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). **Fuel**, v. 325, p. 124905, 1 out. 2022.

SHOVEN, John B.; WHALLEY, John. **Applying general equilibrium**. [S.l.]: Cambridge university press, 1992.

SOARES, Thiago Costa; CUNHA, Dênis Antônio da. Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil. **Nova Economia**, v. 29, p. 429–458, 10 out. 2019.

SOLOW, R. M. Intergenerational Equity and Exhaustible Resources¹². **The Review of Economic Studies**, v. 41, n. 5, p. 29–45, 1 dez. 1974.

SOYTAŞ, Uğur; SARI, Ramazan. Introduction. *In*: **Routledge Handbook of Energy Economics**. [S.l.]: Routledge, 2019.

STEINBUKS, Jevgenijs; NARAYANAN, Badri G. Fossil fuel producing economies have greater potential for industrial interfuel substitution. **Energy Economics**, v. 47, p. 168–177, 1 jan. 2015.

STERN, David I. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: A neoclassical interpretation of ecological economics. **Ecological Economics**, v. 21, n. 3, p. 197–215, 1 jun. 1997.

STERN, David I. Economic growth and energy. **Encyclopedia of energy**, v. 2, n. 00147, p. 35–51, 2004.

STERN, David I. The role of energy in economic growth. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1219, n. 1, p. 26–51, 2011.

STERN, David I. Energy and economic growth. *In: Routledge Handbook of Energy Economics*. [S.l.]: Routledge, 2019.

STERNER, Michael; FRITSCH, Uwe. Greenhouse gas balances and mitigation costs of 70 modern Germany-focused and 4 traditional biomass pathways including land-use change effects. **Biomass and Bioenergy**, Land use impacts of bioenergy. Selected papers from the IEA Bioenergy Task 38 Meetings in Helsinki, 2009 and Brussels, 2010. v. 35, n. 12, p. 4797–4814, 1 dez. 2011.

STIGLITZ, Joseph E. Growth with Exhaustible Natural Resources: The Competitive Economy¹². **The Review of Economic Studies**, v. 41, n. 5, p. 139–152, 1 dez. 1974.

SWEENEY, J. L. Energy Economics. *In: SMELSER, Neil J.; BALTES, Paul B. (Orgs.). International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford: Pergamon, 2001. p. 4513–4520.

TAHERIPOUR, Farzad; SAJEDINIA, Ehsanreza; KARAMI, Omid. Oilseed Cover Crops for Sustainable Aviation Fuels Production and Reduction in Greenhouse Gas Emissions Through Land Use Savings. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2022.

TERRENOIRE, E. *et al.* The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 084019, jul. 2019.

TIMILSINA, Govinda R. Energy demand. *In: Routledge Handbook of Energy Economics*. [S.l.]: Routledge, 2019.

TOL, Richard S. J. Energy and climate. *In: Routledge Handbook of Energy Economics*. [S.l.]: Routledge, 2019.

TOURINHO, Octávio Augusto Fontes; KUME, Honório; PEDROSO, Ana Cristina de Souza. Elasticidades de Armington para o Brasil: 1986-2002. **Revista Brasileira de Economia**, v. 61, p. 245–267, jun. 2007.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its first session, held at Berlin from 28 March to 7 April 1995**. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/cop1/07a01.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **Text of the Kyoto Protocol** | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **History of the Convention** | UNFCCC. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/the-convention/history-of-the-convention#Climate-Change-in-context>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009.** Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **Cancun Agreements** | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/cancun-climate-change-conference-november-2010/statements-and-resources/Agreements>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **Essential Background - Durban outcomes** | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/conferences/the-big-picture/milestones/outcomes-of-the-durban-conference>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **The Paris Agreement** | UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **COP 27** | UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GCA_COP27_Summary_of_Global_Climate_Action_at_COP_27_1711.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2024.

UNFCCC. **Nationally Determined Contributions Registry** | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/NDCREG>>. Acesso em: 18 jun. 2023a.

UNFCCC. **What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?** | UNFCCC. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>>. Acesso em: 20 jun. 2023b.

VÁSQUEZ, Maria Cecilia *et al.* Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117796, 10 nov. 2019.

VENKATACHALAM, L. Environmental economics and ecological economics: Where they can converge? **Ecological Economics**, v. 61, n. 2, p. 550–558, 1 mar. 2007.

VICENTE, Clarice de Souza. **Environmental and direct land use impacts of aviation biofuel production in Brazil: A Georeferenced.** [*S.l.: S.n.*].

VITAL, Marcos Henrique Figueiredo. **Florestas independentes no Brasil.** 2009. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1962>>. Acesso em: 25 ago. 2024.

VYHMEISTER, Eduardo *et al.* Optimization of multi-pathway production chains and multi-criteria decision-making through sustainability evaluation: a biojet fuel production case study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 7, p. 1697–1719, 1 set. 2018.

WALTER, Arnaldo *et al.* Spatially Explicit Assessment of the Feasibility of Sustainable Aviation Fuels Production in Brazil: Results of Three Case Studies. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 4972, jan. 2021.

WANG, Bofan; TING, Zhao Jia; ZHAO, Ming. Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 13, p. 100263, 1 dez. 2024.

WANG, Zhizhen *et al.* Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 1036–1050, 1 set. 2019.

WASHINGTON, Thomas. SAF production to triple to 1.5 mil mt in 2024 but progress slow: IATA. 2023. Disponível em: < <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/120623-saf-production-to-triple-to-15-mil-mt-in-2024-but-progress-slow-iata>>. Acesso em: 19 set. 2025.

WATSON, M. J. *et al.* Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, p. 141472, 26 fev. 2024.

WEI, Yi-Ming; LIU, Lan-Cui. Carbon emissions and energy use. *In: Routledge Handbook of Energy Economics*. [S.l.]: Routledge, 2019.

WINCHESTER, Niven *et al.* The impact of advanced biofuels on aviation emissions and operations in the U.S. **Energy Economics**, v. 49, p. 482–491, 1 maio 2015.

WING, Ian Sue. Computable General Equilibrium Models and Their Use in Economy-Wide Policy Analysis | MIT Global Change. **Technical Note, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT**, 2004.

ZHANG, Fangni; GRAHAM, Daniel J. Air transport and economic growth: a review of the impact mechanism and causal relationships. **Transport Reviews**, v. 40, n. 4, p. 506–528, 1 jan. 2020.

ZHANG, Zongwei *et al.* Estimating Soil Carbon Sequestration of Jatropha for Sustainable Aviation Fuel Pathway. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 1, p. 47, 30 dez. 2023.

ZHAO, Xin *et al.* Estimating induced land use change emissions for sustainable aviation biofuel pathways. **Science of The Total Environment**, v. 779, p. 146238, 20 jul. 2021.

ZIMMERMANN, Nara; OLIVEIRA, Alessandro V. M. (PDF) Liberalização econômica e universalização do acesso no transporte aéreo: é possível conciliar livre mercado com metas sociais e ainda evitar gargalos de infraestrutura. **Journal of Transport Literature**, 2012.

ZWEIFEL, Peter; PRAKTIKNJO, Aaron; ERDMANN, Georg. **Energy Economics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.

APÊNDICE A – Emissões do setor aéreo por tipo de voo e emissões a serem reduzidas em cada cenários de política

Ano	C1			C2		
	Emissões voos domésticos	Redução (tCO ₂)	Redução (%) do total	Emissões voos internacionais	Redução (tCO ₂)	Redução (%) do total
2019				2244977,78		
2027	6868954,52	68689,55	0,76	2226589,07	318357,96	3,50
2028	6957289,01	69572,89	0,76	2255222,92	346991,81	3,77
2029	7094700,30	141894,01	1,51	2299765,14	391534,03	4,17
2030	7292545,24	218776,36	2,27	2363897,08	455665,97	4,72
2031	7550468,41	302018,74	3,02	2447503,53	539272,42	5,39
2032	7851061,69	392553,08	3,78	2544941,61	636710,50	6,12
2033	8173541,74	490412,50	4,53	2649474,33	741243,23	6,85
2034	8507824,64	595547,73	5,29	2757832,99	849601,88	7,54
2035	8854581,75	708366,54	6,04	2870235,19	962004,08	8,20
2036	9216656,33	829499,07	6,80			
2037	9593709,24	959370,92	7,55			

Fonte: Elaboração própria a parti do *baseline* dos modelos SAFBR e das metas de redução de CO₂ estabelecidas por cada regulamento.

Nota: No Cenário 2 (CORSIA), o cálculo de redução das emissões de CO₂ é a diferença entre as emissões do ano corrente e 85% do nível observado em 2019.

APÊNDICE B – Substituição de QAV por SAF em cada cenário e em cada rota de produção

Rota	Cenário	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
CAN/ATJ	C1	34445,2	34888,1	71154,4	109708,0	151450,9	196850,4	245923,2	298644,5	355218,8	415962,1	481087,9
	C2	159644,4	174003,2	196339,4	228499,1	270424,5	319286,0	371705,2	426042,9	482408,3	-	-
RCAN/ATJ	C1	30623,9	31017,7	63260,6	97536,9	134648,7	175011,5	218639,9	265512,2	315810,4	369814,9	427715,9
	C2	141934,7	154700,6	174558,5	203149,0	240422,3	283862,4	330465,5	378775,0	428888,6	-	-
RF/FT	C1	24627,9	24944,7	50874,8	78440,6	108287,2	140748,3	175835,8	213531,8	253982,7	297414,0	343979,0
	C2	114139,8	124406,3	140378,4	163376,7	193358,0	228297,5	265779,3	304631,5	344933,2	-	-
OS/HEFA	C1	214337,9	217094,9	442766,5	682670,9	942420,2	1224921,2	1530276,5	1858334,0	2210365,4	2588336,5	2993575,9
	C2	426474,3	464839,9	524514,6	610425,8	722420,1	852937,5	992954,6	1138097,7	1288656,3	-	-
SB/HEFA	C1	29886,8	30271,3	61738,7	95191,2	131411,6	170804,8	213385,3	259130,9	308219,9	360926,0	417434,5
	C2	138512,5	150974,8	170360,5	198272,7	234658,0	277059,5	322546,2	369693,7	418601,6	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir do *baseline* dos modelos SAFBR e das metas de redução de CO₂ estabelecidas por cada regulamento.

Nota: Os valores dispostos na Tabela são os volumes físicos de saída de CAV (negativo) e entrada de SAF (positivo) na proporção 1:1.

Valores “-” indicam que não houve substituição de CAV por SAF naquele ano.

APÊNDICE C – Desvio acumulado (%) do custo de produção do setor de transporte aéreo

Ano	C1					C2				
	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA	CAN/ ATJ	RCAN/ ATJ	RF/ FT	OS/ HEFA	SB/ HEFA
2027	0,54	1,33	0,69	4,16	0,44	3,62	1,33	3,32	23,28	2,04
2028	0,52	1,35	0,55	4,02	0,43	3,78	1,35	3,59	22,40	2,14
2029	1,05	2,85	1,15	8,20	0,84	4,81	2,85	4,00	23,56	2,26
2030	1,60	4,40	1,69	12,60	1,19	5,94	4,40	4,50	26,26	2,40
2031	2,11	5,99	2,28	17,04	1,47	7,07	5,99	5,05	29,97	2,50
2032	2,55	7,36	2,86	21,36	1,63	7,98	7,36	5,45	33,97	2,53
2033	2,85	8,41	3,34	25,43	1,70	8,66	8,41	5,83	37,63	2,48
2034	3,01	9,24	3,69	29,24	1,71	9,14	9,24	6,01	40,88	2,42
2035	3,18	10,05	4,07	32,87	1,72	9,54	10,05	6,13	43,84	2,36
2036	3,33	10,82	4,36	36,39	1,71	8,94	9,57	5,68	41,51	2,08
2037	3,44	11,57	4,65	39,88	1,65	8,45	9,20	5,31	39,57	1,85
2038	3,19	11,16	4,43	39,17	1,42	7,98	8,92	4,96	39,29	1,69
2039	3,03	10,80	4,29	38,70	1,20	7,59	8,65	4,70	39,05	1,49
2040	2,89	10,56	4,17	38,43	0,99	7,29	8,43	4,50	38,87	1,26
2041	2,79	10,36	4,05	38,30	0,81	7,06	8,28	4,34	38,73	1,05
2042	2,65	10,22	3,93	38,24	0,67	6,82	8,14	4,17	38,61	0,83
2043	2,51	10,09	3,81	38,23	0,57	6,64	8,02	3,99	38,44	0,62
2044	2,42	9,99	3,72	38,25	0,49	6,45	7,92	3,82	38,26	0,42
2045	2,33	9,90	3,63	38,23	0,38	6,28	7,81	3,67	38,08	0,25
2046	2,23	9,80	3,55	38,19	0,29	6,10	7,73	3,53	37,91	0,15
2047	2,14	9,70	3,47	38,12	0,21	5,93	7,66	3,39	37,79	0,01
2048	2,04	9,60	3,36	38,00	0,11	5,80	7,60	3,26	37,66	-0,12
2049	1,95	9,55	3,26	37,83	0,03	5,69	7,58	3,14	37,56	-0,25
2050	1,86	9,48	3,17	37,70	-0,08	5,57	7,53	3,03	37,46	-0,35

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

Agropecuária	0,15	0,29	1,07	0,54	0,12	0,18	0,41	1,37	0,76	0,17	0,00	0,33	1,04	0,75	-0,01
Indústria extrativa	-0,03	0,02	1,08	-0,11	0,10	-0,03	0,10	1,37	-0,28	0,07	-0,06	0,16	1,15	-0,03	0,03
Alimentos	-0,01	0,06	1,09	-0,02	0,04	0,01	0,15	1,38	-0,09	0,05	-0,03	0,19	1,07	0,19	-0,05
Textil e calçados	0,02	0,06	0,04	0,09	0,03	0,01	0,13	0,10	0,14	0,08	-0,11	0,08	-0,13	0,36	-0,01
Celulose, papel e madeira	0,07	0,13	0,12	0,15	0,07	-0,01	0,18	0,21	0,18	0,10	-0,17	0,12	-0,15	0,37	-0,16
Refino de petróleo	0,07	0,12	0,11	0,05	0,15	-0,02	0,17	0,18	0,02	0,16	-0,18	0,10	-0,10	0,16	-0,06
Etanol e Biocombustível	-0,20	-0,44	-0,07	-0,09	-0,01	-0,15	-0,32	-0,06	0,04	0,06	-0,30	-0,50	-0,16	-0,08	0,01
SAF	7736,1	14970,	7916,2	83110,	5829,2	7231,4	13953,	7295,5	108751	5338,2	6168,2	11939,	6033,1	93267,	4256,5
	3	20	8	80	3	8	90	3	,00	7	7	10	9	20	0
Produtos químicos	-0,17	-0,44	0,06	0,02	0,07	-0,14	-0,33	0,08	0,14	0,15	-0,35	-0,55	-0,16	-0,09	-0,01
Perfumaria e Farmácia	0,04	0,07	0,03	-0,18	0,04	0,10	0,22	0,09	-0,15	0,11	0,00	0,03	-0,06	-0,20	0,05
Indústrias diversas	0,06	0,15	0,10	0,06	0,08	0,06	0,29	0,15	0,12	0,12	0,00	0,08	-0,10	0,01	0,04
Construção e Siderurgia	0,06	0,18	0,07	0,00	0,06	0,06	0,31	0,10	0,09	0,08	0,01	0,10	-0,10	0,07	0,05
Eletrônicos e Comunicação	0,01	0,08	0,04	-0,19	0,04	-0,02	0,12	0,02	-0,30	0,03	-0,04	0,00	-0,10	-0,32	0,09
Máquinas e Equipamentos	-0,02	0,03	-0,03	-0,19	0,02	-0,04	0,08	-0,01	-0,29	0,01	-0,11	0,09	-0,15	-0,16	0,01
Veículos e Transporte	0,00	0,07	-0,02	-0,09	0,05	-0,04	0,11	0,03	-0,16	0,04	-0,15	0,17	-0,17	0,04	-0,06
SIUP	0,00	0,07	-0,02	-0,07	0,07	-0,04	0,13	0,04	-0,14	0,05	-0,14	0,21	-0,17	0,07	-0,03
Construção Civil	-0,02	0,00	-0,03	-0,13	0,04	-0,02	0,06	-0,02	-0,18	0,05	-0,11	0,06	-0,17	-0,07	0,00
Comércio	-0,10	-0,18	-0,06	-0,14	0,01	-0,07	-0,09	-0,06	-0,13	0,05	-0,18	-0,19	-0,18	-0,13	0,03
Transporte Geral	0,03	0,10	0,10	0,30	0,08	-0,03	0,12	0,13	0,44	0,07	-0,11	0,11	-0,12	0,53	-0,05
Transporte aéreo	-7,69	-7,31	-6,48	-6,21	-6,02	-11,26	-10,46	-8,92	-8,29	-9,07	-9,71	-8,79	-7,97	-6,16	-7,66
Armazenagem	-0,02	-0,05	0,00	-0,59	0,04	0,00	0,03	0,05	-0,85	0,12	0,01	0,11	-0,03	-0,79	0,09
Serviços Diversos	0,13	0,32	0,06	0,29	0,04	0,16	0,42	0,07	0,57	0,11	0,05	0,30	-0,15	0,73	0,04
Informação	0,00	0,03	-0,04	-0,07	0,01	0,04	0,09	-0,04	-0,01	0,05	-0,02	0,05	-0,14	0,19	0,08
Financeiro e Imobiliário	-0,04	-0,04	-0,03	-0,25	0,03	-0,02	0,00	-0,03	-0,33	0,06	-0,07	0,02	-0,14	-0,14	0,13
Serviços administrativos	-0,08	-0,03	-0,04	-0,17	0,01	-0,07	0,02	-0,03	-0,24	0,01	-0,16	0,04	-0,11	0,00	0,10

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

APÊNDICE E – Desvio acumulado (%) da demanda das famílias por transporte aéreo

Rota	C1			C2		
	H01-H03	H04-H07	H09-H10	H01-H03	H04-H07	H09-H10
Curto prazo						
CAN/ATJ	-2,42	-2,33	-2,29	-6,56	-6,40	-6,28
RCAN/ATJ	-5,81	-5,66	-5,57	-5,81	-5,66	-5,57
RF/FT	-2,64	-2,58	-2,51	-3,77	-3,70	-3,64
OS/HEFA	-17,95	-17,51	-17,19	-28,60	-27,90	-27,40
SB/HEFA	-1,31	-1,30	-1,25	-2,07	-2,01	-1,98
Médio prazo						
CAN/ATJ	-2,97	-2,82	-2,78	-7,73	-7,50	-7,37
RCAN/ATJ	-9,16	-8,83	-8,68	-8,15	-7,90	-7,76
RF/FT	-3,59	-3,52	-3,46	-4,26	-4,18	-4,13
OS/HEFA	-31,87	-31,00	-30,43	-35,67	-34,74	-34,11
SB/HEFA	-1,25	-1,27	-1,20	-1,88	-1,81	-1,80
Longo prazo						
CAN/ATJ	-1,23	-1,12	-1,17	-4,54	-6,40	-6,28
RCAN/ATJ	-7,46	-7,08	-7,04	-5,95	-8,94	-8,80
RF/FT	-1,92	-1,92	-1,91	-2,49	-6,15	-6,03
OS/HEFA	-29,22	-28,31	-28,01	-29,04	-49,41	-48,50
SB/HEFA	0,63	0,50	0,52	0,31	-3,36	-3,29

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Desvios (%) acumulados em relação ao cenário de referência.

ANEXO A - Critérios de sustentabilidade do CORSIA aplicáveis aos SAF produzidos em ou após 1 de janeiro de 2024 (continua)

Tema	Princípio	Critérios
1. Gases de Efeito Estufa (GEE)	Gerar uma menor emissão de carbono no seu ciclo de vida.	Critério 1.1: O SAF deve alcançar reduções líquidas de emissões de GEE de, pelo menos, 10% em comparação aos valores de emissões do ciclo de vida da linha de base do combustível de aviação.
2. Estoque de carbono	Não ser produzido a partir de biomassa obtida de sistemas terrestres/aquáticos com elevado estoque de carbono biogênico.	Critério 2.1: O SAF não será produzido a partir de biomassa obtida/extraída de ecossistemas terrestres ou aquáticos convertidos após 1 de janeiro de 2008 que tenham sido florestas primárias, pântanos, turfeiras, recifes de coral, florestas de algas, prados de ervas marinhas, estuários, salinas de maré ou florestas de mangais, nem contribua para a degradação das reservas de carbono nesses tipos de vegetação, uma vez que estes sistemas têm elevados estoques de carbono.
		Critério 2.2: Em caso de conversão do uso do solo após 1 de janeiro de 2008, tal como definido nas categorias de terras do Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - IPCC), as emissões de mudanças diretas do uso da terra (<i>Direct Land Use Change</i> – DLUC) devem ser calculadas. Se as emissões de GEE das DLUC excederem o valor padrão de mudança de uso da terra induzida (<i>Induced Land Use Change</i> – ILUC), o valor das DLUC deve substituir o valor padrão da ILUC.
3. Permanência na Redução de Emissões de GEE	As reduções de emissões atribuídas ao SAF devem ser permanentes.	Critério 3.1: Implementar práticas operacionais para monitorar, mitigar e compensar qualquer incidência material de não permanência resultante de atividades de captura e sequestro de carbono (<i>Carbon Capture and Sequestration</i> - CCS).
4. Água	Manter ou melhorar a qualidade e a disponibilidade da água.	Critério 4.1: Aplicar práticas operacionais para manter ou melhorar a qualidade da água.
		Critério 4.2: Implementar práticas operacionais para utilizar a água de forma eficiente e evitar o esgotamento dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos para além das capacidades de reabastecimento.
5. Solo	Manter ou melhorar a saúde do solo.	Critério 5.1: Implementar as melhores práticas de manejo agrícola e florestal para a produção de matéria-prima ou coleta de resíduos para manter ou melhorar a saúde do solo, como condições físicas, químicas e biológicas.
6. Ar	Minimizar os efeitos negativos sobre a qualidade do ar.	Critério 6.1: Limitar as emissões de poluentes atmosféricos.
7. Conservação	Manter a biodiversidade, o valor de conservação e os serviços ecossistêmicos.	Critério 7.1: A produção de SAF não deve ser feita a partir de biomassa obtida de áreas que, devido à sua biodiversidade, valor de conservação ou serviços ecossistêmicos, estejam protegidas pelo Estado com jurisdição sobre aquela área, a menos que sejam apresentadas evidências que demonstrem que a atividade não interfere com os propósitos de proteção.
		Critério 7.2: Serão selecionadas matérias-primas de baixo risco invasivo para cultivo e serão adotados controles apropriados com a intenção de evitar a disseminação descontrolada de espécies exóticas cultivadas e microrganismos modificados

		Critério 7.3: Práticas operacionais serão implementadas para evitar efeitos adversos em áreas que, por sua biodiversidade, valor de conservação ou serviços ecossistêmicos, estejam protegidas pelo Estado com jurisdição sobre aquela área.
8. Resíduos e Produtos Químicos	Promover a gestão responsável de resíduos e o uso de produtos químicos.	Critério 8.1: Serão implementadas práticas operacionais para garantir que os resíduos provenientes dos processos de produção, bem como os produtos químicos utilizados, sejam armazenados, manuseados e descartados de forma responsável.
		Critério 8.2: Serão implementadas práticas operacionais responsáveis e baseadas na ciência para limitar ou reduzir o uso de agrotóxicos.
		Critério 8.3: Práticas operacionais serão implementadas para prevenir, minimizar e mitigar quaisquer danos causados pela liberação não intencional de recursos fósseis, produtos combustíveis e/ou outros produtos químicos.
9. Direitos humanos e laborais	Respeitar os direitos humanos e trabalhistas.	Critério 10.1: A produção de SAF deve respeitar os direitos humanos e trabalhistas.
10. Direitos de uso da terra e uso da terra	Respeitar os direitos à terra e os direitos de uso da terra, incluindo os direitos indígenas e/ou consuetudinários.	Critério 11.1: A produção de SAF respeitará os direitos existentes à terra e os direitos de uso da terra, incluindo os direitos dos povos indígenas, formais e informais.
11. Direitos de uso da água	Respeitar os direitos formais ou consuetudinários anteriores de uso da água.	Critério 12.1: A produção de SAF respeitará os direitos existentes de uso da água das comunidades locais e indígenas.
12. Desenvolvimento local e social	Contribuir para o desenvolvimento social e econômico em regiões de pobreza.	Critério 13.1: A produção de SAF deve buscar, em regiões de pobreza, melhorar as condições socioeconômicas das comunidades afetadas pela operação.
13. Segurança alimentar	Promover a segurança alimentar em regiões de insegurança alimentar.	Critério 14.1: A produção de SAF deve, em regiões de insegurança alimentar, esforçar-se para melhorar a segurança alimentar local das partes interessadas diretamente afetadas.

Fonte: Adaptado de (OACI, 2022b).