

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

Henrique Luiz de Moura

**Políticas públicas para a indústria de combustível renovável: aspectos tocantes à aviação
civil no Brasil**

Florianópolis

2024

Henrique Luiz de Moura

Políticas públicas para a indústria de combustível renovável: aspectos tocantes à aviação civil no Brasil

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Ciências Econômicas do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador(a): Prof. André Luís da Silva Leite, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da
UFSC.

DE MOURA, Henrique Luiz

Políticas públicas para a indústria de combustível
renovável: aspectos tocantes à aviação civil no Brasil /
Henrique Luiz DE MOURA ; orientador, Dr André Luis da
Silva Leite, 2024.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Socioeconômico, , Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. . 2. Bioquerosene . I. Leite, Dr André Luis da
Silva Universidade Federal de Santa Catarina. . III.
Título.

Henrique Luiz de Moura

Políticas públicas para a indústria de combustível renovável: aspectos tocantes à aviação civil no Brasil

Florianópolis de dezembro de 2024.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. André Luís da Silva Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.a Eva Yamila Amanda da Silva Catela, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Caio Corrêa Costa, Doutorando
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a **versão original e final** do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Economia por mim e pelos demais membros da banca examinadora.

Prof. André Luís da Silva Leite, Dr
Orientador

Florianópolis, 2024.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, que sempre dedicou as suas vidas aos seus filhos. Todas conquistas são para vocês.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à grande generosidade do orientador professor André, a quem tive o privilégio de conhecer e compartilhar conhecimentos.

Agradeço ao doutorando Caio por sua valiosa contribuição; a UFSC certamente terá um professor extraordinário.

Foi uma imensa felicidade iniciar o curso com a professora Eva e concluí-lo sob sua orientação. O curso de Economia não seria o mesmo sem você.

RESUMO

Este trabalho explora as políticas públicas brasileiras voltadas para a promoção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), destacando suas implicações econômicas e os desafios tecnológicos associados à implementação dessa indústria emergente. A pesquisa analisa as rotas tecnológicas de produção do SAF, as barreiras de entrada no mercado e os incentivos governamentais necessários para superar esses desafios. Além disso, considera a experiência brasileira na produção de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, e sua aplicação como referência para o setor de aviação.

O estudo é estruturado em cinco seções principais. A introdução contextualiza o papel dos combustíveis sustentáveis na descarbonização do transporte aéreo, destacando a relevância global do Brasil como produtor de biocombustíveis. A revisão de literatura aborda a dinâmica entre Estado, mercado e política industrial, fornecendo a base teórica para compreender o desenvolvimento do SAF. São discutidos os principais biocombustíveis usados no Brasil, como etanol e biodiesel, suas cadeias produtivas e os impactos sociais e econômicos associados. Também são apresentados dados sobre as tecnologias de produção do SAF, incluindo o processo HEFA, a síntese Fischer-Tropsch e a rota álcool-para-querosene, bem como as matérias-primas disponíveis no país. A relevância das certificações internacionais, como ASTM D7566, também é abordada, enfatizando a importância de padrões técnicos para assegurar a qualidade e a segurança do SAF.

A pesquisa metodológica segue uma abordagem qualitativa, com revisão bibliográfica e coleta de dados em documentos governamentais, relatórios institucionais e estudos acadêmicos. São destacadas as políticas industriais que incentivam a produção de SAF no Brasil, como o programa Combustível do Futuro e as iniciativas de financiamento do BNDES. Além disso, analisa-se a experiência brasileira no uso de biocombustíveis em setores como o automotivo, e como essa expertise pode ser adaptada para a aviação. A discussão enfatiza a importância de instrumentos horizontais e verticais na política industrial, a coordenação com outras áreas políticas e a necessidade de superar falhas de mercado e fomentar o desenvolvimento tecnológico.

A conclusão destaca o papel crucial das políticas públicas na viabilização da indústria de SAF no Brasil, apontando as oportunidades econômicas e os benefícios ambientais que podem ser alcançados. Além disso, ressalta-se o potencial do Brasil para se tornar um líder global na produção de SAF, considerando sua vasta disponibilidade de biomassa e avanços tecnológicos. Ao articular os desafios e as potencialidades do setor, este trabalho fornece uma

contribuição relevante para o debate sobre a transição energética no setor de transportes, com ênfase na aviação civil.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Hidrocarbonetos Alternativos. Combustível Sustentável para Aviação.

ABSTRACT

This work explores Brazilian public policies aimed at promoting sustainable aviation fuels (SAF), highlighting their economic implications and the technological challenges associated with implementing this emerging industry. The research analyzes SAF production technological pathways, market entry barriers, and the government incentives necessary to overcome these challenges. Additionally, it considers Brazil's experience in producing biofuels, such as ethanol and biodiesel, and their application as a reference for the aviation sector.

The study is structured into five main sections. The introduction contextualizes the role of sustainable fuels in the decarbonization of air transportation, emphasizing Brazil's global relevance as a biofuel producer. The literature review addresses the dynamics between the State, market, and industrial policy, providing the theoretical foundation for understanding SAF development. It discusses the main biofuels used in Brazil, such as ethanol and biodiesel, their production chains, and their social and economic impacts. Data on SAF production technologies, including the HEFA process, Fischer-Tropsch synthesis, and the alcohol-to-jet pathway, as well as the raw materials available in the country, are presented. The relevance of international certifications, such as ASTM D7566, is also addressed, emphasizing the importance of technical standards to ensure SAF quality and safety.

The methodological research follows a qualitative approach, with a bibliographic review and data collection from government documents, institutional reports, and academic studies. It highlights industrial policies that encourage SAF production in Brazil, such as the Combustível do Futuro program and BNDES financing initiatives. Additionally, it analyzes Brazil's experience in using biofuels in sectors such as automotive and how this expertise can be adapted for aviation. The discussion emphasizes the importance of horizontal and vertical instruments in industrial policy, coordination with other policy areas, and the need to overcome market failures and foster technological development.

The conclusion underscores the crucial role of public policies in enabling the SAF industry in Brazil, pointing to the economic opportunities and environmental benefits that can be achieved. Furthermore, it highlights Brazil's potential to become a global leader in SAF production, considering its vast biomass availability and technological advancements. By articulating the sector's challenges and potentials, this work provides a relevant contribution to the debate on the energy transition in the transport sector, with an emphasis on civil aviation.

Keywords: Biofuels. Alternative Hydrocarbons, Sustainable Aviation Fuel, Emerging Industry

SUMÁRIO

1	Introdução.....	6
2	Objetivos.....	8
2.1	OBJETIVO GERAL.....	8
2.2	Objetivos específicos.....	8
3	METODOLOGIA.....	9
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	10
4.1	A DINÂMICA DA RELAÇÃO ENTRE ESTADO, MERCADO E POLÍTICA INDUSTRIAL.....	10
4.2	Contexto.....	10
4.3	Biocombustíveis.....	12
4.4	Etanol.....	13
4.5	Biodiesel.....	15
4.6	Associações.....	17
4.6.1	IATA.....	17
4.6.2	ICAO e CORSISA.....	18
4.6.3	Contribuição das medidas para reduzir as emissões líquidas de CO₂ da aviação internacional.....	19
4.7	Status global de uso SAF.....	23
4.8	Composição e certificação do combustível de aviação.....	24
4.8.1	Matéria prima no Brasil.....	26
4.8.2	Rotas de produção.....	28
4.8.3	Processo HEFA para produção de SAF.....	28
4.9	Processo Álcool para produção de SAF.....	30
4.10	Síntese de Fischer-Tropsch via Gaseificação da Biomassa (FT-SPK).....	30
4.11	POLÍTICA INDUSTRIAL.....	31
4.11.1	Políticas Industriais pela Ótica das Falhas de Mercado.....	33
4.11.2	Política Industrial pela Ótica Desenvolvimentista.....	37
4.11.3	Política Industrial na Prática: Instrumentos Horizontais e Verticais.....	39
4.11.4	Contexto brasileiro: políticas industriais ao longo do tempo.....	41
4.12	POLÍTICAS de incentivos do governo Brasileiro para a produção do SAF.....	42
4.12.1	Financiamento para a produção de combustível de aviação sustentável (SAF).....	42

4.12.2	Desafios e Perspectivas para o Desenvolvimento de Combustíveis Sustentáveis no Brasil.....	43
4.12.3	Projetos de biocombustíveis para aviação.....	44
4.12.4	Políticas Públicas elaboradas pelo programa ProBioQAV.....	44
4.12.5	Estabelecer mandato de redução de emissões do setor aéreo.....	44
4.12.6	Permitir todas as rotas tecnológicas homologadas pela ASTM e ANP.....	45
4.12.7	Permitir teores diferentes SAF em qualquer parte do território nacional.....	45
4.12.8	Isentar voos internacionais das obrigações do mandato.....	45
4.12.9	Conferir flexibilidade ao CNPE.....	45
4.12.10	Viabilizar aeroportos para o uso do SAF, considerando como critérios o desenvolvimento da produção do SAF e das cadeias logísticas, a demanda do aeroporto e a disponibilidade de matéria-prima.....	46
4.12.11	Viabilizar a aplicação do Book & Claim para casos específicos.....	46
5	Conclusão.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

O biocombustível para aviação civil surge com a necessidade de diminuir a emissão dos gases provocadores do efeito estufa (GEE). As viagens aéreas são de grande importância para o comércio global. A *International Air Transport Association* (IATA) relatou que a indústria da aviação mundial movimentou mais de 4,5 bilhões de viajantes aéreos e quase US\$ 6,7 trilhões em produtos no ano de 2019. A IATA estima que cerca de 7,2 milhões de passageiros devem viajar de avião em 2035 (Shahriar; Khanal, 2022).

Em novembro de 2021 a cidade de Glasgow, na Escócia, sediou a conferência das Partes (COP 26), a fim de mostrar a urgência de se acelerar a transição para uma economia carbono neutra. Para alcançar esse objetivo, é necessário descarbonizar a matriz de transportes, na qual os biocombustíveis exercem um papel central (Milanez *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o Brasil tem um destaque internacional do setor agropecuário, e pela sua experiência na produção e distribuição de biocombustíveis para veículos automotores tem muito a contribuir na transição para uma economia carbono neutra (Milanez *et al.*, 2021).

Toda essa experiência possibilitou ao país constituir uma grande infraestrutura para armazenagem e distribuição de biocombustíveis. Juntamente com as políticas públicas foram determinadas misturas aos combustíveis fósseis. Devido as políticas gerou a redução de emissões GEE (Milanez *et al.*, 2021).

Entretanto, ainda é pouco explorado no país a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *sustainable aviation fuels*). O país possui uma aviação doméstica bem desenvolvida e com grande potencial de desenvolvimento. Vale ressaltar a oportunidade de exportação do SAF tendo em vista os compromissos de redução de emissão de GEE assumidos pela indústria de aviação a nível global (Milanez *et al.*, 2021). A pesquisa mostra que o SAF pode ser uma alternativa atraente aos combustíveis convencionais e tem características físicas e químicas idênticas aos combustíveis fósseis e é fundamental sua fácil utilização.

O crescimento previsto nas viagens aéreas e no comércio tem importantes implicações ambientais, em 2019, a aviação foi responsável por aproximadamente 2% das emissões globais de GEE causados por atividades humanas. Organizações como a IATA têm direcionado esforços e investimentos para fomentar a produção e o uso de SAF como uma solução para os impactos ambientais da dependência de combustíveis fósseis nesse setor. O SAF se apresenta como uma alternativa viável aos combustíveis tradicionais, pois possui características físicas e químicas muito semelhantes, ao mesmo tempo que cumpre diversos requisitos de

sustentabilidade. No entanto, uma alternativa eficaz ao combustível convencional só é útil se puder ser prontamente incorporada no sistema atual da aviação, preservando a vida útil das aeronaves. O SAF, que tem equivalência funcional aos combustíveis derivados de petróleo e pode ser usado na infraestrutura já existente, é chamado de "combustível *drop-in*". Esse tipo de SAF precisa ser misturado ao combustível tradicional de aviação para assegurar um equilíbrio adequado de seus componentes, como parafinas, olefinas e aromáticos (Shahriar; Khanal, 2022).

Contudo, existem barreiras para o SAF ser competitivo economicamente para ser atrativo para a indústria de aviação. Os altos custos podem elevar os preços das passagens ocasionando uma pressão negativa na demanda por viagens aéreas. Esses custos podem ser atenuados por meio das políticas públicas industriais para indústrias nascentes.

Entender esta problemática é fundamental para criação de políticas públicas eficientes para a indústria da aviação civil. Desta maneira, aumentará as possibilidades de criar um mercado competitivo frente aos combustíveis fósseis.

Deste modo, questiona-se: Quais políticas públicas estão sendo elaboradas para viabilizar a produção do biocombustível para aviação civil? A regulamentação, as normas, as diretrizes e os incentivos do Estado desempenham um papel significativo para alavancar essa nova indústria?

A partir da problemática apresentada, este estudo tem como objetivo descrever as rotas de produção do SAF e as políticas públicas para o setor da aviação civil. Cada rota de produção do SAF tem um custo de acordo com a matéria prima utilizada. E para amenizar as barreiras de entradas desse novo biocombustível, políticas de incentivo para a indústria nascente podem contribuir para amenizar as imperfeições de mercados existentes.

As políticas públicas podem causar efeitos positivos nos setores de combustíveis sustentáveis de aviação. Na transição de combustíveis fósseis para energia limpa/renovável, um dos problemas mais difíceis de resolver é a viagem aérea (HoneyWell, 2022).

Uma solução promissora para fabricantes de aviões e reguladores governamentais é o SAF, uma alternativa de baixo carbono ao combustível de jatos convencionais à base de petróleo, feito de materiais renováveis, como sementes de mostarda, cana-de-açúcar, óleo de cozinha usado e resíduos agrícolas. Tais soluções necessitarão de políticas públicas para que essa nova indústria nascente seja viável a sua implementação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar as políticas públicas nacionais para o setor de biocombustíveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Apresentar as políticas públicas atuais de incentivo ao combustível sustentável de aviação (SAF);
- b) Realizar uma revisão da literatura acerca dos impactos econômicos decorrentes dessas políticas para o setor;
- c) Identificar a capacidade do Brasil na geração de bioquerosene.

3 METODOLOGIA

O procedimento metodológico utilizado nesta pesquisa foi de natureza exploratória com base em literatura especializada, analisando dados e a manifestação de seus fenômenos, de conclusões originais de diversos autores de artigos científicos, monografias e livros relacionados à temática, além de páginas oficiais do governo e revistas científicas brasileiras e estrangeiras; ademais, também serão consultados documentos institucionais nacionais da ANAC e legislações da política energética nacional, além de relatórios e portfólios de instituições internacionais. Foi realizada uma pesquisa com artigos científicos que demonstraram os meios de produção do SAF. E para encontrar as políticas públicas elaboradas para esse setor foram consultados jornais e o site do Ministério de Minas e Energia (MME).

Este trabalho adota uma abordagem qualitativa, com o objetivo de explorar o fenômeno de combustível sustentável para aviação. A pesquisa é de natureza exploratória, pois busca encontrar quais são as tecnologias elaboradas para o desenvolvimento de bioquerosene e quais políticas públicas industriais estão sendo elaboradas pelo Brasil para o setor de biocombustível da aviação.

Optou-se pelo método documental, que utilizou como base documentos primários, que não foram originalmente produzidos com o propósito de pesquisa científica. E pelo método bibliográfico, que por sua vez baseia-se na análise de material já produzido e publicado, com o objetivo de compreender o estado da arte ou sustentar teoricamente uma pesquisa. As fontes incluem: livros, artigos científicos, dissertações, teses, revistas e periódicos especializados. Este método foi selecionado devido à sua adequação para o levantamento dos dados disponíveis referentes a elaboração de políticas públicas para os combustíveis sustentáveis de aviação civil no Brasil.

Os dados foram coletados por meio de análise documental, atas de reuniões, relatórios institucionais, leis e regulamentos. A seleção das fontes foi realizada com base em menções nos artigos científicos, atas de reuniões de programas governamentais e relatórios institucionais.

Esta pesquisa foi delimitada a partir de estudos elaborados nos anos 2000, de algumas publicações nacionais e internacionais, que tratavam sobre o tema de combustíveis sustentáveis para aviação civil. Entre as principais limitações essas destacam-se por ainda não existir uma indústria estabelecida no Brasil de bioquerosene, o que implica em informações não consolidadas sobre o total de benefícios que essa indústria possa trazer ao país.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 A DINÂMICA DA RELAÇÃO ENTRE ESTADO, MERCADO E POLÍTICA INDUSTRIAL

A política industrial não opera isoladamente, está interligada a outras políticas públicas, como a política macroeconômica de comércio exterior, de infraestrutura e de ciência e tecnologia. A eficácia da política industrial depende da coordenação com essas outras áreas, garantindo que as intervenções do Estado sejam coerentes e complementares. Por exemplo, uma política industrial voltada para a inovação deve ser apoiada por investimentos em educação e pesquisa científica, bem como por políticas comerciais que facilitem o acesso a mercados internacionais (Kupfer; Hasenclever, 2013).

A relação entre Estado e mercado tem oscilado historicamente. Inicialmente, os mercantilistas defendiam a intervenção estatal no comércio e na indústria, com Adam Smith, a ideia da "mão invisível" do mercado ganhou destaque, promovendo o liberalismo. No início do século XX houve um retorno à intervenção estatal para atingir metas nacionais, exemplificado pelo keynesianismo nos EUA e o marxismo-leninismo na União Soviética. Após a Segunda Guerra Mundial, alguns países seguiram trajetórias intervencionistas, enquanto outros adotaram o liberalismo (Ferraz; Paula; Kupfer, 2013).

Nos anos 1980, o liberalismo ressurgiu com as políticas de Thatcher e Reagan, focando na estabilidade macroeconômica e liberalização dos mercados em detrimento da política industrial. Esse movimento pendular também se refletiu nos países em desenvolvimento, que passaram das políticas de substituição de importações para as do "Consenso de Washington" (Ferraz; Paula; Kupfer, 2013).

Atualmente, há um esforço teórico para compreender melhor a relação entre Estado e mercado. Três constatações são importantes: (i) o sucesso do desenvolvimento asiático nos anos 1980; (ii) a formalização da "Nova Teoria do Crescimento", que justifica a ação estatal; (iii) e a discussão das limitações do mercado, como racionalidade limitada e informação imperfeita (Ferraz; Paula; Kupfer, 2013).

4.2 CONTEXTO

Nas décadas de 1970 e 1980, à medida que a volatilidade dos preços do petróleo e as interrupções no seu fornecimento se tornaram uma constante na economia global, o Brasil buscou alternativas no setor agrícola para se proteger dessas oscilações. Como um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, o país aproveitou um processo relativamente simples para a produção de combustíveis líquidos: a fermentação do açúcar, resultando em etanol que foi misturado à gasolina. Desde o início desse programa todos os veículos de pequeno porte, como motocicletas, carros de passeio e caminhonetes, foram adaptados para rodar com misturas elevadas de etanol ou até mesmo etanol puro (Shell Scenarios, 2024).

O governo desempenhou um papel crucial no avanço dessa tendência, implementando em 1993 uma exigência de mistura de etanol na gasolina. Essa política abrange todas as vendas de combustíveis à base de gasolina, com o percentual de etanol aumentando progressivamente ao longo dos anos. Em 2024, o percentual da mistura está em 27%, e há iniciativas em curso para elevar esse número para 30%. De maneira semelhante, para veículos a diesel, existe uma exigência de adição de 14% de biodiesel, que entrou em vigor em março de 2024 e deve aumentar gradualmente (Shell Scenarios, 2024).

O bagaço, um subproduto relevante da indústria da cana-de-açúcar, é o material fibroso e seco que sobra após a extração do suco dos colmos. Esse material é aproveitado como combustível para gerar calor, energia elétrica e é utilizado na fabricação de polpa e materiais de construção. No Brasil, o milho tem sido cada vez mais utilizado como matéria-prima na produção de etanol, mas, comparado com a cana-de-açúcar, ele apresenta uma maior proporção de celulose voltada para alimento, resultando em menos resíduos celulósicos disponíveis. Isso implica na necessidade de mais energia no processo, que pode vir tanto do gás natural, como ocorre nos Estados Unidos, quanto de outras fontes de biomassa comercial (Shell Scenarios, 2024).

O Brasil exerce um papel significativo no cenário global, até 2050, o país deve contribuir com a remoção de 700 milhões de toneladas de CO₂ por ano, o que desperta grande interesse no desenvolvimento de mercados capazes de sustentar essa meta. À medida que os avanços iniciais no combate ao desmatamento forem alcançados, os projetos futuros com base na natureza passarão a focar na remoção de carbono, em vez de se concentrarem na proteção florestal ou na prevenção de emissões (Shell Scenarios, 2024).

O setor de transporte aéreo global enfrenta crescente pressão para diminuir suas emissões de CO₂, já que a aviação é responsável por aproximadamente 3% dessas emissões, há indicativos de que essa participação pode aumentar devido ao crescimento previsto no setor.

Além disso, os combustíveis representam cerca de 40% dos custos operacionais das companhias aéreas brasileiras (Velásquez; Kubotani; Velásquez, 2012).

Para lidar com esses desafios, o setor procura um combustível alternativo ao querosene de aviação, derivado do petróleo. Esse combustível ideal precisa ter baixa emissão de gases de efeito estufa, ser compatível com os motores e aeronaves em operação e utilizar a infraestrutura de distribuição existente, sem a necessidade de alterações significativas (Velásquez; Kubotani; Velásquez, 2012).

4.3 BIOCOMBUSTÍVEIS

As fontes de energia podem ser classificadas como renováveis, consideradas inesgotáveis, sendo acessíveis por períodos prolongados na natureza, entre elas, destacam-se a energia solar, a energia eólica, a energia hidráulica e a biomassa, entre outras, e como não renováveis, caracterizadas por sua limitação e esgotabilidade, uma vez que sua regeneração natural ocorre em escalas de tempo extremamente longas, se incluem nessa categoria combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, além da energia gerada por fissão nuclear (Duarte *et al*, 2022).

Os biocombustíveis, obtidos a partir de fontes biológicas renováveis, surgem como uma alternativa viável para a substituição parcial ou completa dos combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes, que contribui substancialmente para a emissão de gases de efeito estufa. A relevância de combustíveis como o etanol e o biodiesel não está apenas na capacidade de reduzir as emissões de carbono, mas também no fato de promoverem a diversificação da matriz energética, um fator crucial para a sustentabilidade ambiental (Gonçalves, 2024).

A produção de biocombustíveis desempenha um papel relevante na geração de empregos ao longo de sua cadeia produtiva, sendo um dos objetivos de diversos programas sociais promovidos pelo governo. Conforme apontado por Magalhães (2007), a substituição de 1% de combustíveis fósseis por biocombustíveis oriundos da agricultura familiar tem o potencial de gerar cerca de 45 mil empregos no meio rural, com uma renda média mensal estimada em R\$ 4.900,00 por trabalhador. Além disso, estima-se que para cada emprego criado no campo, outros três postos de trabalho sejam gerados nas áreas urbanas, totalizando aproximadamente 180 mil empregos. Projeções indicam que, se 6% dos agricultores familiares passarem a se dedicar à produção de matérias-primas destinadas aos biocombustíveis, é

possível alcançar a marca de 1 milhão de novos empregos nos próximos anos (Silva; Rodrigues, 2016).

Desde a criação do Proálcool nos anos 1970, o Brasil tornou-se um líder global na produção e utilização de biocombustíveis, destacando-se no uso de energias renováveis. Historicamente, a cana-de-açúcar sempre foi relevante para a economia nacional, adquiriu uma nova função ao ser a principal fonte de produção de etanol, que juntamente com a bioeletricidade, tem um papel fundamental na oferta de energia no país. O progresso tecnológico e as políticas públicas implementadas nesse campo foram essenciais para que o Brasil se diferenciasse mundialmente, possuindo uma matriz energética equilibrada e predominantemente limpa (Gonçalves, 2024).

Entretanto, a ampliação da produção de biocombustíveis enfrenta desafios importantes, o alto custo de produção, por exemplo, é um dos principais obstáculos que demanda políticas públicas eficazes para ser superado. A incorporação dos biocombustíveis na matriz energética global deve vir acompanhada de tecnologias avançadas e políticas que minimizem os impactos sociais e ambientais, assegurando que essa transição promova de fato a sustentabilidade e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (Gonçalves, 2024).

4.4 ETANOL

O etanol é um biocombustível derivado da fermentação de biomassa e possui uma longa trajetória no Brasil. Sua produção remonta ao período colonial, quando Martim Afonso de Souza trouxe a cana-de-açúcar ao país em 1525, dando início a uma das indústrias mais importantes da economia brasileira. Durante o império até a Proclamação da República em 1889, diversas medidas foram tomadas para incentivar o cultivo de cana, consolidando o açúcar como principal produto exportado. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar ganhou maior destaque com o Proálcool, criado como resposta à crise do petróleo e à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Desde então, a cana passou a ser dividida entre os mercados de açúcar e de etanol (Gonçalves, 2024).

A indústria sucroalcooleira é um exemplo significativo de como a produção de biocombustíveis pode impactar positivamente nos empregos e nas condições sociais de uma região. No sudeste brasileiro, especialmente, a produção de etanol envolve cerca de 60 mil produtores de cana-de-açúcar, além de fomentar a economia local, o setor contribui diretamente para o desenvolvimento social, mantendo aproximadamente 600 escolas, mais de 200 creches e mais de 300 ambulatórios médicos em diferentes partes do Brasil (Silva, Rodrigues, 2016).

O etanol pode ser produzido a partir de diferentes tipos de matérias-primas, incluindo as sacarinas, como a cana-de-açúcar, além de materiais amiláceos e biomassa lignocelulósica, utilizada na produção de etanol de segunda geração. No caso específico da cana-de-açúcar, que é a principal matéria-prima para a produção de etanol no Brasil, há uma geração significativa de resíduos, como o bagaço e a palha. Esses subprodutos lignocelulósicos possuem um elevado potencial para serem convertidos em etanol de segunda geração, permitindo um aproveitamento mais eficiente e integral da cana-de-açúcar (Ribeiro, Schirmer, 2017).

O Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário mundial como um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, consolidando-se também como líder na produção de etanol. Diversos incentivos governamentais têm impulsionado o desenvolvimento dessa matéria-prima, promovendo o etanol como uma alternativa viável à gasolina, o que contribuiu para reduzir a dependência do país em relação à importação de combustíveis. Um marco significativo para a expansão do uso de etanol no Brasil foi a introdução, em 2003, dos motores bicombustíveis, conhecidos como *flex-fuel*. Esses motores permitem o uso de gasolina, etanol ou qualquer combinação dos dois combustíveis, garantindo um desempenho eficiente em ambas as situações (Ribeiro, Schirmer, 2017).

O Brasil é hoje um dos maiores produtores e consumidores de etanol do mundo. Em 2023, o país atingiu uma produção recorde de 713 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o equivalente a cerca de 40% da produção mundial. Existem dois tipos principais de etanol no Brasil: o anidro, que é misturado à gasolina, e o hidratado, que pode ser utilizado puro em veículos *flex-fuel*. Desde 2015, a mistura obrigatória de etanol na gasolina é de 27% (Gonçalves, 2024). Além disso, o desenvolvimento de veículos *flex-fuel* ampliou a demanda pelo biocombustível e incentivou a criação de uma infraestrutura robusta para sua produção e distribuição.

A importância do etanol brasileiro também se reflete no mercado internacional, exportado especialmente para países como Países Baixos, Coreia do Sul e Estados Unidos, o aumento da produção de etanol no país se deve a fatores como a alta dos preços dos grãos, que afeta outros produtores. Em 2022, o Brasil tornou-se o principal exportador de etanol para a União Europeia, beneficiado pela desvalorização do Real em relação ao Euro e ao Dólar (Gonçalves, 2024).

Além do etanol de primeira geração que é produzido a partir do caldo da cana, o Brasil tem investido também no etanol de segunda geração, que utiliza resíduos agrícolas e celulose. Essa tecnologia contribuiu para a redução de emissões de *CO2* e a diversificação da matriz energética. A produção de etanol no Brasil está concentrada nas regiões Sudeste e Centro-

Oeste, que respondem por 89% da produção total. Contudo, o setor enfrenta desafios, como a concorrência com a gasolina e questões relacionadas à sustentabilidade e ao impacto ambiental (Gonçalves, 2024).

O avanço tecnológico no setor sucroalcooleiro, com inovações como a mecanização das lavouras e o desenvolvimento do etanol celulósico, promete aumentar a eficiência produtiva e melhorar a sustentabilidade do setor. O etanol de cana-de-açúcar é economicamente mais competitivo que o de milho, o que torna o biocombustível brasileiro uma opção atraente para o mercado global (Gonçalves, 2024).

O governo brasileiro tem desempenhado um papel fundamental na promoção do etanol, por meio de políticas públicas que vão desde os primeiros decretos incentivando a produção até as atuais regulamentações sobre a mistura obrigatória de etanol na gasolina. O Proálcool, instituído em 1975, foi uma resposta à crise do petróleo, visando reduzir a dependência do país em relação ao petróleo importado. O programa foi bem-sucedido em suas primeiras décadas, incentivando a produção de etanol e o desenvolvimento de veículos movidos exclusivamente a álcool (Gonçalves, 2024).

Apesar dos desafios enfrentados a partir da década de 1980, como a queda dos preços internacionais do petróleo e a desestabilização do Proálcool devido à competição com o mercado de açúcar, o programa permitiu ao Brasil desenvolver a maior tecnologia de produção de etanol do mundo, criando uma base sólida para o setor de biocombustíveis. A tecnologia e infraestrutura desenvolvidas continuam a ser fundamentais, especialmente com a introdução dos veículos *flex-fuel* nos anos 2000. Além disso, o Proálcool contribuiu para a redução do déficit comercial brasileiro, ao diminuir as importações de petróleo e promover uma matriz energética mais diversificada e sustentável (Gonçalves, 2024).

Em suma, o Proálcool foi uma política pública essencial para transformar a matriz energética brasileira e posicionar o país como líder global na produção de biocombustíveis. As inovações e políticas resultantes desse programa continuam a influenciar o setor até os dias de hoje (Gonçalves, 2024).

4.5 BIODIESEL

O biodiesel é um combustível composto por uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, produzido por meio da reação de transesterificação entre triglicerídeos e álcoois de cadeia curta, como metanol ou etanol. Os triglicerídeos utilizados nesse processo são

originados de fontes renováveis, incluindo óleos vegetais e gorduras de origem animal (Silva; Rodrigues, 2016).

Ele se destaca como uma alternativa ao diesel convencional, principalmente por suas vantagens ambientais, como a redução de emissões de gases poluentes. A história do biodiesel no Brasil está ligada às iniciativas do Proálcool, que visavam diversificar as fontes de energia e reduzir a dependência do petróleo. Contudo, o interesse pelo biodiesel foi renovado nos últimos anos devido ao aumento do consumo e da produção na Europa, o que levou à criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em 2004, regulamentado pela Lei nº 11.097 de 2005 (Gonçalves, 2024).

No Brasil, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, que se destacam como as maiores consumidoras de diesel no país, o óleo de soja é a principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel. A capacidade de produção nacional de soja é suficiente para atender ao aumento na demanda por biodiesel. Nessas duas regiões, a produção gira em torno de 8 bilhões de litros de biodiesel, considerando um consumo anual total de 40 bilhões de litros de diesel, com uma mistura de 5% de biodiesel (Luz Jr. *Et al*, 2009).

O PNPB estabeleceu metas progressivas para a mistura de biodiesel ao diesel de origem fóssil, começando com 2% de biodiesel em 2008 e atingindo 5% em 2013. Atualmente, o percentual está fixado em 14%, com projeções para aumentar para 20% até 2030. Além de diversificar a matriz energética, o programa também busca promover o desenvolvimento regional e a inclusão social, com foco especial na agricultura familiar e nas regiões menos favorecidas, como o Nordeste. Apesar de desafios, como as dificuldades no cultivo de mamona, o programa se consolidou como um pilar importante na política energética do país, impulsionando a produção de biodiesel, especialmente a partir da soja, que responde por mais de 70% da matéria-prima utilizada. (Gonçalves, 2024)

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi lançado em um contexto de crescente demanda por combustíveis renováveis, em resposta ao aumento dos preços do petróleo e às pressões para a redução do uso de combustíveis fósseis. Esse programa foi essencial para a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, conforme previsto na Lei nº 11.097/2005, que obrigou a adição de biodiesel ao diesel fóssil em todo o país (Gonçalves, 2024).

O PNPB foi estruturado para fomentar o desenvolvimento de uma cadeia produtiva sólida e promover tanto a oferta quanto a demanda pelo biodiesel. Entre as medidas adotadas, destacam-se o financiamento de investimentos, a criação de incentivos fiscais e o estímulo à agricultura familiar, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Uma das estratégias de maior

impacto foi a adoção de metas progressivas de mistura obrigatória de biodiesel ao diesel convencional, que começou com o B2 (2% de biodiesel) em 2008 e evoluiu para o B5 em 2010, antecipando a meta de 2013 e demonstrando o compromisso do governo em ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz energética (Gonçalves, 2024).

No entanto, o programa enfrentou desafios ao longo de sua implementação. A partir da década de 2010, a redução da demanda interna e as políticas de controle de preços contribuíram para a ociosidade nas plantas de biodiesel. Além disso, a dependência excessiva da soja como principal matéria-prima gerou críticas, especialmente devido ao impacto ambiental de seu cultivo intensivo e à exclusão de outras oleaginosas, como a mamona, da cadeia produtiva (Gonçalves, 2024).

Outro aspecto importante do PNPB foi a promoção da inclusão social por meio do Selo Combustível Social, que incentivava a compra de matéria-prima de agricultores familiares. No entanto, a redução dos percentuais mínimos de aquisição de produtos da agricultura familiar, implementada em 2009, gerou debates sobre a efetividade dessa política para promover a inclusão social de maneira mais abrangente (Gonçalves, 2024).

Economicamente, o biodiesel trouxe benefícios ao Brasil, com a geração de empregos, principalmente no setor agrícola. Estima-se que a substituição de 1% do diesel convencional por biodiesel poderia criar cerca de 180 mil empregos, sobretudo no campo. Porém, o número de empregos gerados até hoje é consideravelmente menor, com cerca de 20 mil postos de trabalho ligados diretamente à cadeia produtiva do biodiesel (Gonçalves, 2024).

Por fim, a competitividade do biodiesel no Brasil está fortemente atrelada ao preço internacional do petróleo, quando está baixo, por exemplo, a atratividade dos biocombustíveis tende a diminuir, o que evidencia a importância da continuidade e do fortalecimento de políticas públicas que garantam a viabilidade econômica e ambiental do biodiesel a longo prazo (Gonçalves, 2024).

4.6 ASSOCIAÇÕES

4.6.1 IATA

Dados do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), em parceria com o Instituto Clima e Sociedade (ICS), atestam que a aviação representa uma fonte significativa de emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), principalmente devido à dependência de combustíveis fósseis. Atualmente, a aviação

internacional é responsável por aproximadamente 2% das emissões antropogênicas globais de dióxido de carbono (CO₂), e as projeções indicam que esses números tendem a aumentar nas próximas décadas (COPPE/UFRJ; ICS, 2021).

Nesse cenário, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) estabeleceu metas específicas para reduzir as emissões de GEE no setor. Essas metas incluem uma redução de 50% na pegada de carbono da aviação até o ano de 2050, em comparação com os níveis registrados em 2005 (IATA, 2020). No entanto, o setor aéreo é frequentemente caracterizado como um "setor de difícil descarbonização", principalmente devido à falta de tecnologias viáveis para reduzir emissões e ao crescimento projetado da demanda (COPPE/UFRJ; ICS, 2021).

Embora diversas medidas tenham sido propostas, como a melhoria da eficiência e das operações, elas provavelmente não serão suficientes para compensar o crescimento esperado do setor. Desta forma, o desenvolvimento e a utilização de combustíveis renováveis e neutros em carbono tornam-se essenciais para alcançar as metas de descarbonização propostas (COPPE/UFRJ; ICS, 2021).

Para alcançar essa meta, as principais estratégias incluem o aprimoramento contínuo da eficiência dos motores e a substituição de combustíveis derivados do petróleo por alternativas sustentáveis. Com essas iniciativas, a produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) aumentou de 7 milhões de litros em 2018 para mais de 140 milhões de litros em 2019. No entanto, esse volume ainda representa uma parcela pequena diante do consumo anual de querosene de aviação (QAV), estimado em 360 bilhões de litros. Com a previsão de que os SAFs respondam por cerca de 30% do mercado até 2040, espera-se um crescimento ainda mais expressivo da indústria de SAFs nos próximos anos (Prauchner *et al*, 2022).

4.6.2 ICAO e CORSISA

Para mitigar as mudanças climáticas e regular as emissões do setor de aviação, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), composta por 191 países, estabeleceu em 2016 uma resolução histórica que visa limitar as emissões internacionais da aviação civil. Essa resolução propõe que o nível de emissões de 2020 seja uma referência, com a meta de que o crescimento do setor a partir desse ponto seja neutro em carbono (Soares, 2018).

Durante a 39^a Assembleia da ICAO, em outubro de 2016, foi adotada a Resolução A39-312, que instituiu o “Esquema de Compensação e Redução de Emissões para a Aviação Internacional” (CORSIA), sendo o primeiro mecanismo global de compensação de emissões

específico para o setor de aviação, implementado em 2021 e segue em vigor, com previsão de aplicação até 2035. (Soares, 2018). Esse esquema faz parte de uma série de ações planejadas pela ICAO para alcançar as metas de redução de emissões, incluindo:

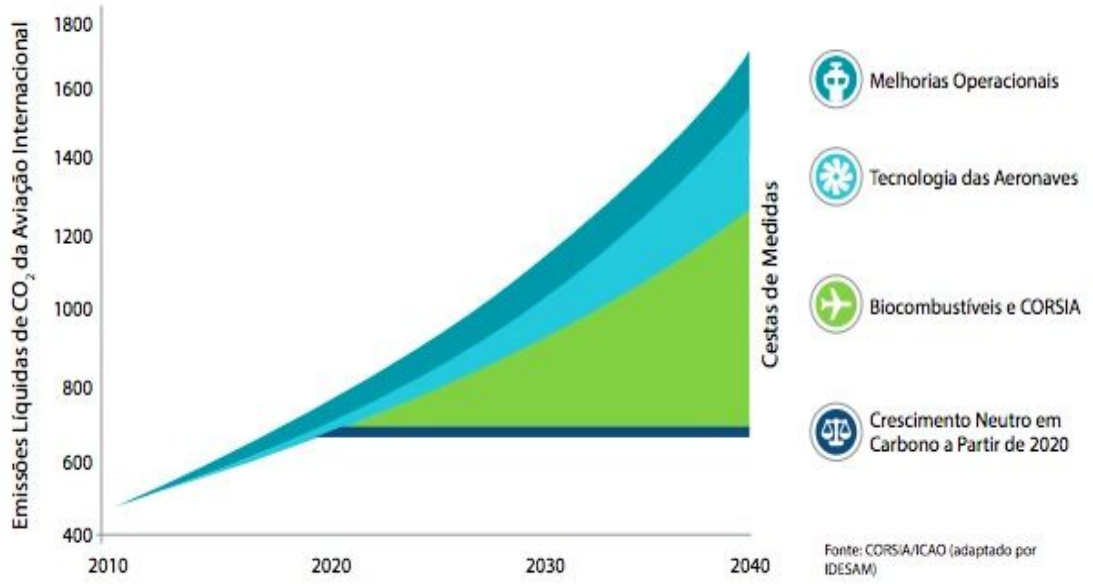
- a) Desenvolvimento de novas tecnologias e padrões para aeronaves;
- b) Melhoria no gerenciamento do tráfego aéreo e operações em solo visando economia de combustível;
- c) Utilização de biocombustíveis na aviação;
- d) Implementação de mecanismos de mercado para compensação de emissões (como o próprio CORSIA).

O principal objetivo do CORSIA é complementar as medidas internas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor, evitando que o nível de emissões de CO₂ supere os níveis de 2020. Como as ações internas de redução podem não ser suficientes, o CORSIA prevê a utilização de mecanismos de compensação, através da compra de créditos de carbono de outros setores, para compensar eventuais excessos de emissões (Soares, 2018).

4.6.3 Contribuição das medidas para reduzir as emissões líquidas de CO₂ da aviação internacional

O mecanismo do CORSIA está sendo implementado em três fases, as duas primeiras ocorrem por adesão voluntária de países e companhias aéreas (uma fase “piloto” entre 2021 e 2023, seguida por uma fase “inicial” entre 2024 e 2026). A partir de 2027 as medidas e metas de redução de emissões valerão para todos os países, com exceção de países menos desenvolvidos, pequenas ilhas em desenvolvimento e países que não atinjam um percentual mínimo na contribuição das emissões totais do setor (Soares, 2018).

Figura 1 - Potencial demanda por redução de emissões pela CoRSIA, entre 2021-2040.



Fonte: Soares (2018).

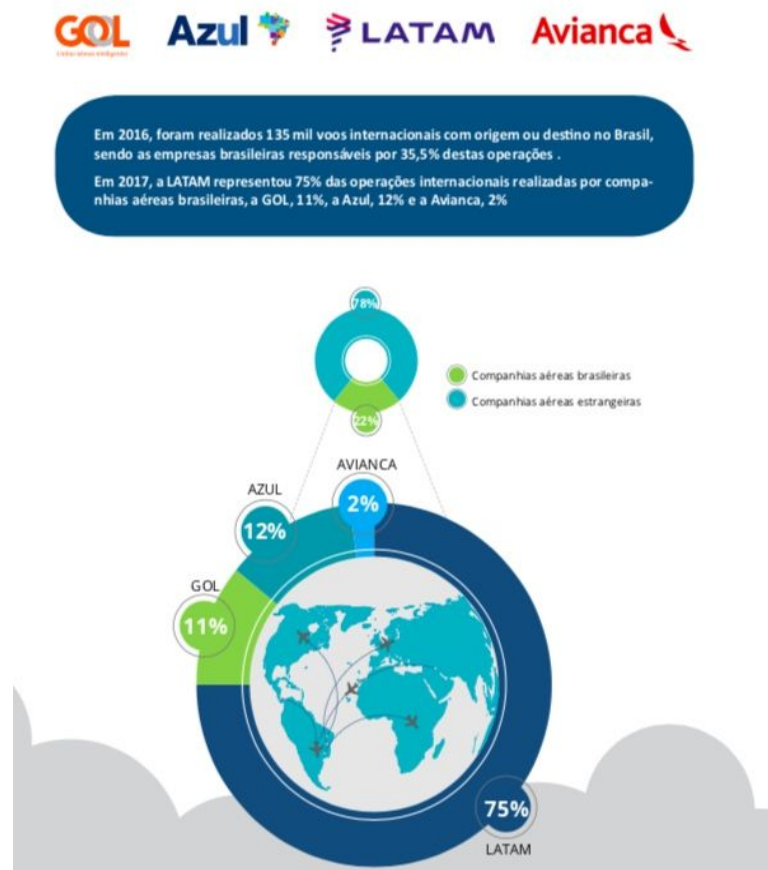
Figura 2 - Cronograma de Implementação do CORSIA.



Fonte: Soares (2018).

O Brasil tem uma participação significativa nas emissões provenientes do setor de aviação civil internacional. De acordo com o Anuário do Transporte Aéreo de 2016, publicado pela ANAC, há quatro companhias aéreas brasileiras que operam voos comerciais internacionais, conforme a Figura 3:

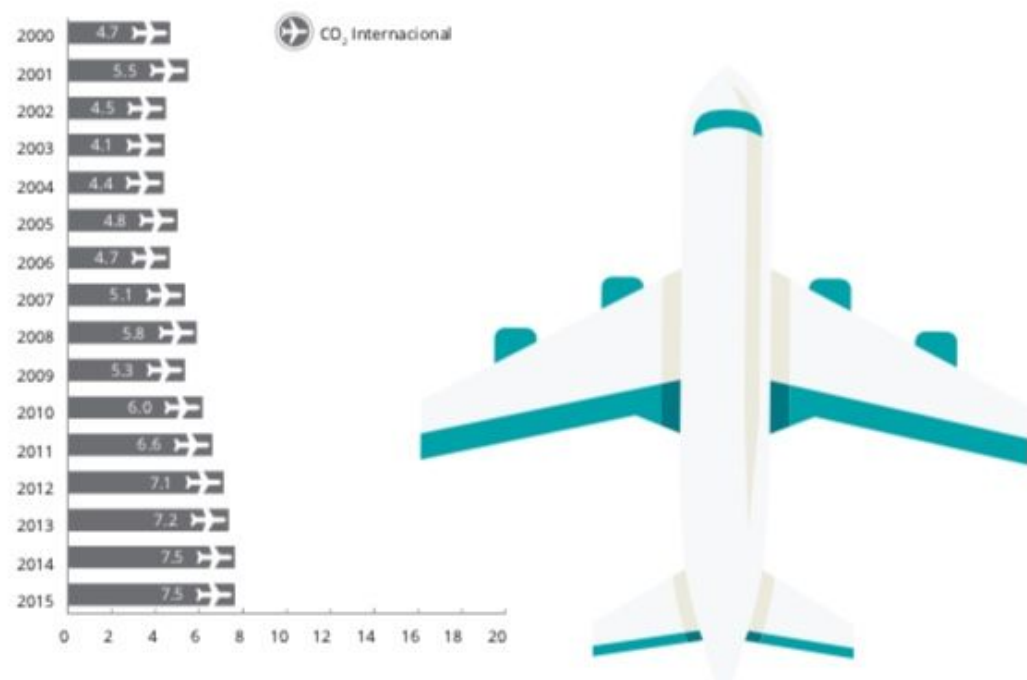
Figura 3 - Perfil das emissões das companhias brasileiras em voos internacionais.



Fonte: Soares (2018).

Nos últimos dez anos, as emissões provenientes da aviação civil internacional no Brasil apresentaram um aumento expressivo. Em 2006 os voos internacionais com origem ou destino no Brasil, realizados por companhias aéreas nacionais e estrangeiras, geraram 4,7 milhões de toneladas de CO₂ (MtCO₂). Em 2010 esse número subiu para 6,0 MtCO₂ e em 2015 alcançou 7,5 MtCO₂ (Soares, 2018).

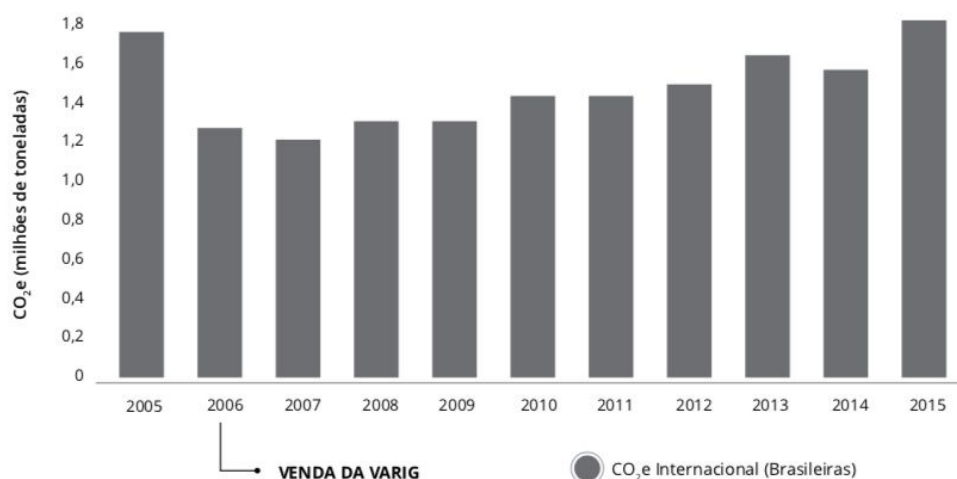
Figura 4 - Emissões de GEEs do setor da aviação civil internacional no Brasil (empresas brasileiras e internacionais) - 1990-2015.



Fonte: Soares (2018).

No mesmo período, as emissões das companhias aéreas brasileiras em rotas internacionais também cresceram. Em 2006 os voos internacionais operados por empresas brasileiras emitiram um total de 1,2 milhões de toneladas de CO₂ (MtCO₂). Esse valor aumentou para 1,4 MtCO₂ em 2010, e chegou a 1,7 MtCO₂ em 2015. Desta forma, é possível calcular o aumento médio nas emissões dos voos internacionais com destino e origem no Brasil, operados pelas empresas brasileiras.

Figura 5 - Volume de emissões por empresas brasileiras em voos internacionais.



Fonte: Soares (2018).

Figura 6 - Aumento das emissões em voos internacionais, com destino ou origem no Brasil

	2006	2010	2015	2006-2015
Emissão total de voos internacionais	4,7 MtCO ₂	6,0 MtCO ₂	7,5 MtCO ₂	Aumento de 6,0% a.a.
Emissão total de voos internacionais operados por Cias brasileiras	1,2 MtCO ₂	1,4 MtCO ₂	1,7 MtCO ₂	Aumento de 4,2% a.a

Fonte: Soares (2018).

As médias apresentadas acima superam a estimativa global de aumento nas emissões de voos internacionais, de 3-4% ao ano. Entretanto, o CORSIA estabelece um fator de crescimento setorial global para o período de 2021-2029, que é aplicado para todas as companhias aéreas que entrarem no acordo. Isso é de fundamental importância, pois mesmo que a expectativa de crescimento dos voos internacionais no Brasil (ou por companhias aéreas brasileiras) seja superior ao estabelecido globalmente para o setor, isso não acarretaria responsabilidade diferenciada, visto que o fator permaneça igual para todas as companhias neste período (Soares, 2018).

4.7 STATUS GLOBAL DE USO SAF

O uso do SAF tem ganhado gradualmente aceitação, impulsionado por diversos incentivos e subsídios governamentais. Em fevereiro de 2008 a *Virgin Atlantic* realizou o primeiro voo no mundo utilizando SAF, ainda sem passageiros, marcando um avanço importante na viabilidade desse combustível para o transporte aéreo. Posteriormente, em 29 de junho de 2011, a KLM Airlines realizou o primeiro voo comercial transportando passageiros

com uma mistura de 50% de SAF. Esse voo, operado por um Boeing 737-800, partiu do Aeroporto Schiphol, em Amsterdã, com destino ao Aeroporto Charles de Gaulle, em Paris, transportando 171 passageiros (Shahriar; Khanal, 2022).

Entre os anos de 2011 e 2015 o SAF ganhou maior relevância, com mais de 2.500 voos comerciais realizados por 22 companhias aéreas diferentes, utilizando misturas de até 50% de SAF. A produção do combustível, nesse período, foi derivada de diversas matérias-primas, como *jatropha*, óleo de cozinha usado, camelina e cana-de-açúcar (Shahriar; Khanal, 2022).

Apesar dessa crescente aceitação, a produção de SAF em 2019 ainda representava menos de 1% da demanda total de combustíveis da aviação. Em 2019 a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) realizou o primeiro Seminário de Avaliação de Estoque para a Visão 2050 de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFS2019), em Montreal, que forneceu informações importantes sobre as perspectivas de crescimento da produção de SAF. Durante o período de 2013 a 2015, a produção global de SAF foi, em média, de 0,29 milhões de litros por ano, aumentando para 6,45 milhões de litros anuais entre 2016 e 2018. A projeção é que até 2032 a produção global atinja 6,5 milhões de toneladas — equivalente a 8 bilhões de litros anuais (Shahriar; Khanal, 2022).

Em 2021 a produção de SAF era dominada por quatro empresas principais: NESTE, *Lanzatech*, *World Energy* e *Gevo*. Embora outras regiões ainda não contassem com plantas ativas de produção de SAF, o cenário começava a mudar, com o anúncio de novas instalações na Europa, Ásia e América do Sul que prometiam contribuir significativamente para o aumento da capacidade produtiva, aprevisão para o curto prazo, até 2023, indicava uma capacidade de produção global de aproximadamente 450 mil toneladas por ano, segundo a SkyNRG, representando uma melhora substancial em relação aos níveis de produção anteriores (Shahriar; Khanal, 2022).

4.8 COMPOSIÇÃO E CERTIFICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Os combustíveis utilizados na aviação são classificados em duas categorias principais: combustíveis para jatos comerciais e combustíveis para jatos militares. Dentre os mais comuns na aviação comercial estão o Jet A e o Jet A-1, enquanto o JP-8 é amplamente utilizado em operações militares. O Jet A, introduzido na década de 1960, é hoje encontrado exclusivamente nos Estados Unidos, onde abastece tanto voos domésticos quanto internacionais com origem no país. Por outro lado, o Jet A-1 é amplamente empregado em voos ao redor do mundo, incluindo nos próprios EUA. Uma das principais diferenças entre os dois tipos de combustíveis está nos

aditivos, como dissipadores estáticos, inibidores de congelamento e antioxidantes presentes no Jet A-1, mas ausentes no Jet A. O Jet A-1 também se diferencia pelo seu ponto de congelamento mais baixo (-47°C) em comparação com o Jet A (-40°C), tornando-o mais adequado para voos internacionais de longa distância, especialmente em rotas polares, onde as temperaturas podem ser mais severas (Shahriar; Khanal, 2022).

Para combustíveis comerciais, são utilizados os padrões ASTM D1655 e D7566, que especificam os requisitos de qualidade. Já o padrão militar DEF STAN 91-91 requer níveis ligeiramente mais baixos de acidez. No caso dos combustíveis militares, como o JP-8, o padrão MIL-DTL-83133 J exige uma acidez ainda menor, limitada a $0,015\text{ mg KOH/g}$. Para que um combustível de jato seja utilizado comercialmente, deve atender às especificações estabelecidas pelos padrões ASTM D1655 ou DEF STAN 91-91 (Shahriar; Khanal, 2022).

O SAF também precisa ser certificado pelo padrão ASTM D7566, para que possa atender aos mesmos requisitos dos combustíveis convencionais. Há, ainda, especificações adicionais dependendo da via de produção do SAF, por exemplo: o padrão ASTM estabelece que a densidade dos combustíveis deve variar entre 775 e 840 kg/m^3 a 15°C . Contudo, SAFs produzidos via HEFA (ésteres e ácidos graxos hidrotratados) e pelo processo Fischer-Tropsch (FT) devem apresentar densidades que variam entre 730 e 770 kg/m^3 a 15°C . Outros processos, como SIP (isoparafinas sintéticas) e FT-SPK/A (querosene parafínico sintético com compostos aromáticos), exigem faixas de densidade entre 765 e 780 kg/m^3 e 755 e 800 kg/m^3 , respectivamente (Shahriar; Khanal, 2022).

De acordo com a APROBIO (2019), os biocombustíveis são materiais de origem biológica e orgânica não derivados de fósseis, geralmente produzidos a partir de um ou mais tipos de produtos agrícolas, como cana-de-açúcar, algas marinhas, milho, soja, entre outros. Esses combustíveis são reconhecidos como fontes de energia limpa e alternativa, pois, embora também liberem CO_2 na atmosfera, o impacto ambiental é mitigado devido ao ciclo produtivo. Isso ocorre porque as plantas usadas como matéria-prima absorvem dióxido de carbono durante seu crescimento, equilibrando as emissões geradas pela combustão. Sua utilização na geração de energia aproveita o processo de combustão de forma semelhante aos combustíveis fósseis (Pereira *et al*, 2023).

As restrições operacionais e de segurança do setor aéreo limitam significativamente as opções de combustíveis. Pelo menos no curto e médio prazo, ainda não há tecnologia viável para o uso de eletricidade na aviação; combustíveis gasosos possuem baixa densidade energética e enfrentam dificuldades de armazenamento; já combustíveis como etanol e

biodiesel, amplamente utilizados no setor automotivo, apresentam propriedades químicas e físico-químicas que criam obstáculos para o uso na aviação (Pereira *et al*, 2023).

Por exemplo, as moléculas de biodiesel e etanol contêm oxigênio, o que reduz o poder calorífico e aumenta os riscos de corrosão ácida e de contaminação microbiana, devido à sua característica higroscópica. No caso específico do biodiesel, o comprimento relativamente grande das suas cadeias de carbono (em comparação com as do querosene de aviação - QAV) causa interações intermoleculares mais intensas, resultando em propriedades inadequadas em baixas temperaturas, as quais os combustíveis enfrentam em altitudes elevadas. Além disso, as ligações duplas presentes no biodiesel reduzem sua estabilidade à oxidação e aumentam a tendência de formação de gomas, o que é inaceitável no setor aéreo (Pereira *et al*, 2023).

4.8.1 Matéria prima no Brasil

O Brasil possui uma vasta produção agropecuária com destaque para o etanol, o que resulta em uma grande quantidade de resíduos que apresentam um potencial significativo para a produção de SAFs. Em um estudo realizado em 2021 pela *Roundtable on Sustainable Biomaterials* (RSB) em parceria com a Agroicone, estimou-se que o país poderia produzir até 9 bilhões de litros de SAFs a partir desses resíduos. Entre as matérias-primas possíveis para essa produção foram identificados o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, resíduos de madeira, óleo de cozinha usado, sebo bovino e gases resultantes da produção de aço (Milanez *et al*, 2021).

O estudo avaliou tanto a disponibilidade de resíduos quanto os locais estratégicos para o desenvolvimento da produção de SAFs, incluindo usinas de biocombustíveis, refinarias e aeroportos. Com base nessa análise, que compatibilizou a oferta de matéria-prima com a capacidade industrial necessária, estimou-se o potencial de produção nacional de SAFs (Milanez *et al*, 2021).

Especificamente o bagaço e a palha da cana-de-açúcar podem ser convertidos em SAFs por meio das rotas de Síntese Fischer-Tropsch (FT) e álcoois para jatos (ATJ). A rota ATJ mostrou-se mais eficiente, gerando um volume maior de SAF. A quantidade total de resíduos disponíveis foi estimada em cerca de 61 milhões de toneladas, sendo aproximadamente 31,4 milhões de toneladas de bagaço e 29,9 milhões de toneladas de palha. Cerca de 60% desses resíduos estão concentrados no estado de São Paulo, o que torna essa região particularmente estratégica para a rota ATJ, pois São Paulo também possui refinarias e elevada demanda por combustível de aviação (Milanez *et al.*, 2021).

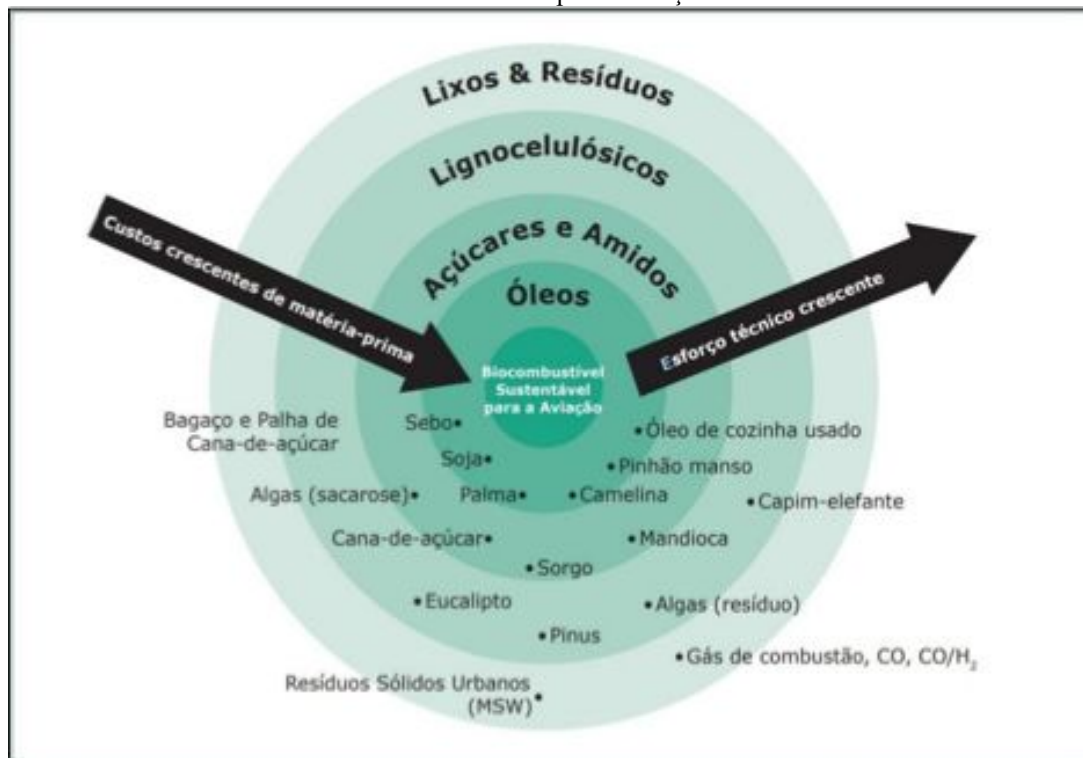
Tabela 1 - Resíduos e potencial máximo de produção de SAFs no Brasil.

Matéria-prima	Resíduos estimados	Volume de SAF (bilhões de litros)
Bagaço e palha de cana-de-açúcar	61,0 milhões de toneladas	6,48
Resíduos de madeira	21,0 milhões de toneladas	1,9
Selo bovino	0,53 milhões de toneladas	0,36
Óleo de cozinha usado	0,21 milhão de toneladas	0,11
Gases de aciaria	2,823 milhões de Nm ³	0,23

Fonte: Milanez *et al* (2021).

Existem várias matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de biocombustíveis voltados para o setor de aviação. No entanto, a seleção dessas matérias-primas deve atender a certos critérios, como apresentar baixas emissões diretas e indiretas de poluentes, uso eficiente da terra, impacto social e econômico positivo, baixo custo de refino, alto poder energético e uma produção eficiente. A Figura 7 ilustra que, quanto mais próximo do centro, maior é o custo da matéria-prima, mas a tecnologia de conversão torna-se mais simples ou menos dispendiosa (Pereira *et al*, 2023).

Figura 7 - Matérias-primas e sua posição relativa segundo custos e esforços técnicos para serem convertidas em biocombustível para a aviação.



Fonte: FAPESP (2013, p. 33).

O QAV é o combustível utilizado em motores a jato, presentes na maioria das aeronaves comerciais e militares ao redor do mundo. Para ser adequado às operações aéreas, esse combustível precisa atender a certas características essenciais, como manter-se no estado líquido e homogêneo até chegar à zona de combustão das aeronaves, além de apresentar resistência química e física às variações de temperatura e pressão. Outra característica importante é possuir boas propriedades lubrificantes para garantir o bom funcionamento dos motores (Pereira *et al*, 2023).

4.8.2 Rotas de produção

O uso de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) atualmente, e nas próximas décadas, baseia-se em combustíveis do tipo *drop-in*, que são compatíveis com os motores das aeronaves e a infraestrutura aeroportuária existente, o que elimina a necessidade de modificações mecânicas (ProQR, 2022).

No Brasil, a ANP aprovou cinco tipos de bioquerosenes. De acordo com Souza (2019), apenas o bioquerosene de aviação obtido a partir de iso-parafinas sintetizadas (SIP) é produzido no país, ainda em escala de demonstração. A produção ocorre na unidade da Amyris do Brasil, localizada em Brotas, São Paulo, e utiliza como matéria-prima a cana-de-açúcar (ProQR, 2022).

Este estudo foca nas principais rotas tecnológicas para produção de SAF: o hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA), a gaseificação seguida pela Síntese Fischer-Tropsch (FT), conhecida como BTL (FT-SPK), e o processo de conversão de álcool em SAF (ATJ) (ProQR, 2022).

4.8.3 Processo HEFA para produção de SAF

O processo HEFA utiliza diferentes matérias-primas, como óleos vegetais, gorduras animais, óleo residual de cozinha, óleo de pirólise e até óleo de algas, para produzir querosene de aviação (QAv) por meio de hidrocessamento. Estima-se que sejam necessárias cerca de 1,2 toneladas de óleo vegetal para a obtenção de 1 tonelada de combustível HEFA (ProQR, 2022).

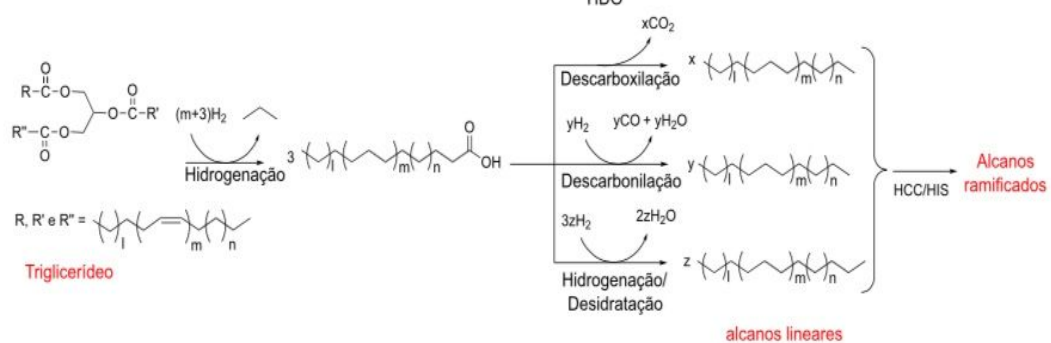
O processo consiste em várias etapas, incluindo a extração de ácidos graxos livres (FFA) da biomassa, seguida por reações de isomerização, que reorganizam as moléculas, e hidrocraqueamento, que reduz o comprimento das cadeias de carbono. Esses procedimentos

resultam na produção de um SAF compatível com as especificações técnicas exigidas para combustíveis de aviação (ProQR, 2022).

A utilização de precursores lipídicos na produção de biocombustíveis enfrenta diversos desafios, sendo um dos principais o alto custo dos óleos vegetais, amplamente utilizados na indústria alimentícia. Nesse cenário, o uso de óleos e gorduras residuais surge como uma alternativa viável, embora sua produção seja insuficiente para atender à elevada demanda global (Prauchner *et al*, 2022).

Diante disso, têm-se direcionado esforços para o aproveitamento de óleos não comestíveis, como os extraídos do pinhão-manso e da mamona, que apresentam a vantagem de poderem ser cultivados em terras marginais, inadequadas para a produção de óleos destinados à alimentação. Além disso, os óleos provenientes de microalgas despontam como uma alternativa promissora, apesar dos desafios relacionados ao alto custo de produção e à limitada produtividade atualmente observada (Prauchner *et al*, 2022).

Figura 8 - Esquema de reações para a rota HEFA.



Fonte: Prauchner *et al* (2022).

O processo HEFA tem como principal produto o diesel renovável. Sob condições normais de operação, apenas cerca de 15% do rendimento líquido total é convertido em combustível de aviação, a menos que haja craqueamento adicional para formar hidrocarbonetos menores. Políticas públicas que incentivam significativamente a produção de diesel renovável levam a maioria dos produtores de HEFA a comercializar sua produção integralmente nesse formato, deixando de lado a fração destinada ao combustível de aviação (ProQR, 2022).

A produção de SAF, por sua vez, envolve custos mais elevados devido à necessidade de infraestrutura e processamentos adicionais, o que torna o processo economicamente menos competitivo em comparação à produção de diesel renovável (ProQR, 2022). A fabricação de

diesel renovável é mais simples e barata, tornando-o uma opção mais atrativa sob a perspectiva econômica (Van Dyk; Saddler, 2021).

Apesar disso, o processo HEFA representa a alternativa mais viável a curto prazo para a produção de SAF, uma vez que a tecnologia já está bem estabelecida em escala comercial, apresenta um processo relativamente simples e custos menores em comparação a outras rotas tecnológicas (ProQR, 2022).

4.9 PROCESSO ÁLCOOL PARA PRODUÇÃO DE SAF

O processo ATJ (álcool para querosene) consiste na conversão de álcoois de cadeia curta, como metanol, etanol e butanol, em hidrocarbonetos de cadeia longa, típicos dos alcanos C8-C16 (ProQR, 2022). Para a produção de combustível de aviação a partir de álcoois, duas rotas principais podem ser empregadas:

- a) **Metanol para Olefinas (MTO)**, seguido pelo processo Olefina para Gasolina/Destilado da Mobil (MOGD);
- b) **Processamento de álcoois como etanol, isobutanol ou butanol**, utilizando etapas de desidratação, oligomerização e hidrogenação.

A produção do álcool base pode ser realizada por meio de processos termoquímicos, como gaseificação e pirólise, ou rotas bioquímicas, como a fermentação. Além disso, tecnologias emergentes, como a síntese microbiana para a obtenção de álcoois, têm ganhado destaque devido ao seu potencial atrativo (ProQR, 2022).

Esse método de refinamento permite a produção de hidrocarbonetos a partir de álcoois, sendo tecnicamente viável. No entanto, quando se utiliza um produto comercial como matéria-prima inicial, o custo final do combustível se torna elevado. A economia do processo pode ser otimizada com a hidrólise de materiais celulósicos provenientes da cana-de-açúcar, de outras culturas agrícolas ou de resíduos, além de outros métodos que convertam resíduos em álcoois (Ribeiro; Ribeiro, 2019).

4.10 SÍNTESE DE FISCHER-TROPSCH VIA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA (FT-SPK)

A síntese de Fischer-Tropsch (FT) pode ser integrada a diferentes processos de conversão de biomassa, como gaseificação, pirólise e liquefação, com o objetivo de obter combustíveis sintéticos. Este trabalho dará enfoque à rota gaseificação-FT, reconhecida como a alternativa comercialmente viável e certificada para a produção de combustível de aviação (ProQR, 2022).

A gaseificação consiste em um processo que transforma materiais carbonáceos, como a biomassa, em gás de síntese sob altas temperaturas, geralmente superiores a 800°C. O gás de síntese (syngas) é composto principalmente por CO e H₂, que são componentes essenciais para a produção de líquidos via síntese FT. A integração entre a gaseificação da biomassa e a síntese FT possibilita a obtenção de um combustível de aviação mais limpo e de alta qualidade, em termos de eficiência, estima-se que entre 5 e 6 toneladas de biomassa sejam necessárias para produzir 1 tonelada de combustível líquido FT (ProQR, 2022).

4.11 POLÍTICA INDUSTRIAL

Ao longo da história, as ideias sobre a relação entre o Estado e o mercado têm variado de forma cíclica, como um pêndulo. O pensamento sistemático inicial sobre essa relação surgiu com os mercantilistas, que defendiam a intervenção estatal no comércio e na indústria. Posteriormente, com Adam Smith, foi introduzido o conceito de "mão invisível", que enfatizava a capacidade do mercado de alocar recursos de maneira eficiente, marcando a ascensão do liberalismo econômico e o padrão-ouro no final do século XIX (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Já no século XX, especialmente em sua primeira metade, o movimento do pêndulo direcionou-se para uma maior atuação estatal, tanto para alcançar objetivos nacionais quanto sob diferentes vertentes ideológicas. Exemplos disso incluem o keynesianismo nos Estados Unidos, com o *New Deal*, e o marxismo-leninismo na União Soviética. Após a Segunda Guerra Mundial, a atuação do Estado passou a variar significativamente entre os países: algumas nações adotaram políticas mais intervencionistas, enquanto outras optaram por estratégias mais alinhadas ao liberalismo (Kupfer; Hasenclever, 2013).

A partir da década de 1980, o liberalismo econômico voltou a se expandir, impulsionado pelas políticas adotadas por Margaret Thatcher no Reino Unido e Ronald Reagan nos Estados Unidos. Nesse contexto, os Estados nacionais passaram a priorizar a estabilidade macroeconômica e a liberalização dos mercados, frequentemente em detrimento de políticas industriais (Kupfer; Hasenclever, 2013).

O movimento pendular entre Estado e mercado também se manifesta nos países em desenvolvimento ao longo do século XX. Inicialmente, essas economias priorizaram políticas de substituição de importações. Posteriormente, passaram a adotar o conjunto de medidas associadas ao chamado “Consenso de Washington”, expressão que sintetiza um decálogo de políticas econômicas formuladas em consenso por agências norte-americanas e internacionais sediadas em Washington (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Atualmente, observa-se um esforço teórico para fundamentar as análises sobre a interação entre Estado e mercado em bases mais sólidas. Nesse contexto, destacam-se três pontos principais: (i) o êxito do desenvolvimento asiático nos anos 1980, que levou os economistas a considerar o papel das instituições públicas nos modelos de desenvolvimento econômico; (ii) a relevância do progresso técnico e do aprendizado como fatores de eficiência foi formalizada pelas contribuições da “Nova Teoria do Crescimento”, que demonstrou os retornos crescentes de escala associados ao avanço tecnológico, justificando a intervenção estatal em algumas circunstâncias; (iii) e a ampliação de discussões sobre as limitações do funcionamento do mercado, como racionalidade limitada, informação imperfeita e interesses múltiplos, evidenciando a necessidade de aprimorar a qualidade das políticas públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Esses avanços sugerem que o debate polarizado entre Estado e mercado é inadequado, corroborando a visão de cientistas políticos que destacam a responsabilidade histórica dos Estados na transformação econômica das sociedades. Cada Estado opera em um contexto específico de relações sociais que definem os meios, os canais e os formatos de interação entre administração pública e agentes econômicos, de maneira dinâmica e dependente do estágio de desenvolvimento da nação públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Nas palavras de Peter Evans,

o debate estéril sobre o 'quanto' o Estado intervém deve ser substituído por discussões sobre os diferentes tipos de envolvimento estatal na sociedade e seus efeitos. O envolvimento do Estado é uma constante. A questão central não é 'quanto' o Estado intervém, mas sim 'que tipo' de intervenção ocorre e quais são suas consequências públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013, p.314).

Essa perspectiva resgata as contribuições de autores clássicos, como Friedrich List e Alexander Gerschenkron, que destacaram, a partir de análises históricas dos processos de industrialização na Europa, o papel fundamental do Estado como impulsionador do desenvolvimento industrial. Durante o século XIX, na Europa, a intervenção estatal assumiu formas variadas, dependendo do nível de desenvolvimento das forças produtivas de cada

economia nacional. Nesse contexto, a disseminação da ideologia do livre-comércio servia principalmente aos interesses da economia britânica, então hegemônica. Nos demais países europeus, o Estado era frequentemente visto como defensor dos interesses dos capitalistas nacionais públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Para List, a capacidade de uma nação em expandir sua riqueza era mais relevante do que a riqueza acumulada em si, diferindo das ideias de Adam Smith. Em situações de atraso econômico relativo cabia aos Estados nacionais, como no caso alemão, promover esforços para melhorar a qualificação do capital humano e acessar tecnologias avançadas. Isso demandava a implementação de políticas industriais ativas e de longo prazo, envolvendo uma combinação de protecionismo e incentivos, como tarifas de importação e crédito a longo prazo em condições vantajosas. Para List, a escolha entre liberalização e protecionismo não era um fim em si, mas sim um meio para alcançar o objetivo maior: o desenvolvimento das capacidades produtivas. A eficácia de cada política dependia do estágio de desenvolvimento de uma nação em relação aos países líderes no cenário internacional públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Em resumo, o debate sobre as relações entre Estado e mercado ganha relevância quando se questiona a capacidade do sistema privado de alocar recursos escassos de forma eficiente e em alinhamento com os objetivos de uma sociedade em determinado período. Esse debate deve estar vinculado às necessidades específicas de desenvolvimento de cada país, entendendo o desenvolvimento como um processo que envolve geração e distribuição de riqueza, eficiência e avanço do conhecimento. Assim, a estratégia e o modelo de intervenção estatal devem estar alinhados ao estágio de desenvolvimento dos agentes produtivos de uma nação, sempre considerando os parâmetros definidos pela fronteira internacional de progresso pública (Kupfer; Hasenclever, 2013).

4.11.1 Políticas Industriais pela Ótica das Falhas de Mercado

O mundo real frequentemente se afasta do cenário idealizado, e os mercados nem sempre conseguem cumprir plenamente sua função de coordenar a atividade econômica. Em determinadas circunstâncias, surgem situações que a teoria neoclássica classifica como "falhas de mercado". Essas falhas se manifestam, por exemplo, quando: (i) ocorrem assimetrias de informação, isto é, uma das partes envolvidas em uma transação possui informações mais completas ou mais precisas do que a outra, o que pode gerar problemas como risco moral e seleção adversa; (ii) há a presença de poder de mercado, caracterizada pela capacidade de um agente influenciar os termos de troca ou adotar práticas anticompetitivas, como ocorre em

estruturas de mercado imperfeitas, a exemplo de monopólios, oligopólios e mercados de concorrência monopolística, conforme abordado nos manuais de microeconomia; (iii) surgem externalidades, que correspondem a impactos positivos ou negativos sofridos ou usufruídos por agentes externos ao mercado diretamente envolvido na transação; (iv) verifica-se a existência de bens públicos, caracterizados pela impossibilidade de exclusão de usuários e pela não rivalidade no consumo (Costa, 2019).

Nessas circunstâncias, a teoria econômica reconhece a necessidade de intervenção estatal, mas essa atuação deve ser limitada à correção das falhas de mercado sem substituí-lo como principal mecanismo de alocação de recursos. O objetivo do Estado, nesse contexto, é restabelecer condições que aproximem o funcionamento do mercado das características da concorrência perfeita, que serve como um referencial normativo para orientar políticas públicas (Costa, 2019).

É amplamente reconhecido que mercados em condições de concorrência perfeita tendem a promover uma alocação eficiente de recursos. Nesse contexto, o comportamento racional dos consumidores, que buscam maximizar sua utilidade, e dos produtores, que visam maximizar seus lucros, resulta na distribuição de bens de forma que qualquer benefício adicional para um agente só possa ocorrer em detrimento de outro. Essa condição caracteriza a eficiência de Pareto, alcançada por meio das ações voluntárias dos agentes econômicos. No entanto, a realidade econômica frequentemente diverge das premissas desse modelo teórico. Em muitos casos, ocorrem violações dessas suposições, levando a falhas de mercado, situações em que o comportamento individual não gera a eficiência paretiana esperada (Ramos, 1996).

O conceito de poder de mercado é explorado como a capacidade de um agente econômico, seja vendedor ou comprador, de influenciar os preços de bens ou serviços. Essa ideia contrasta com a visão de um mercado em concorrência perfeita, no qual os preços são determinados exclusivamente pelas interações entre oferta e demanda de maneira eficiente (Kupfer; Hasenclever, 2013).

A perspectiva neoclássica apresenta o mercado competitivo como o mecanismo mais eficiente para a alocação de recursos. Nessa visão, ao se assumir informação perfeita e decisões reversíveis sem custos, os agentes racionais tomam decisões que maximizam tanto seu bem-estar individual quanto o coletivo. A livre mobilidade dos fatores de produção e a existência de agentes atomizados garantem que o equilíbrio entre oferta e demanda estabeleça preços socialmente ótimos, isso significa que qualquer ganho adicional na utilidade de um grupo só pode ser obtido à custa da utilidade de outro. Assim, em mercados plenamente competitivos, a

política industrial seria não apenas desnecessária, mas também indesejável (Kupfer; Hasenclever, 2013).

No entanto, a intervenção do governo torna-se justificável quando o mecanismo de preços falha em capturar integralmente os custos e benefícios associados à produção e ao consumo de bens. Essas situações são denominadas pelos economistas neoclássicos como falhas de mercado. Sob essa ótica, a intervenção pública é vista como passiva e direcionada exclusivamente para corrigir condições em que a alocação de recursos pelos mercados competitivos se revela subótima, nesses casos, a intervenção estatal só seria justificável se seus custos fossem inferiores aos benefícios esperados (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Passar de uma justificativa teórica geral, baseada na premissa de que as falhas de mercado justificam a intervenção, para a aplicação concreta em contextos específicos é uma tarefa desafiadora. O primeiro passo consiste em classificar, com base em critérios robustos, o que caracteriza uma falha de mercado. Embora a literatura econômica não apresente consenso absoluto, cinco tipos principais de falhas de mercado podem ser identificados:

- a) estruturas de mercado ou condutas não competitivas, como monopólios e oligopólios;
- b) externalidades;
- c) bens públicos;
- d) propriedade comum;
- e) diferenças entre as taxas de preferências intertemporais sociais e privadas.

Estruturas de mercado monopolizadas ou oligopolizadas frequentemente surgem devido à presença de economias de escala, em que os custos unitários de produção diminuem à medida que o volume produzido aumenta. Em situações em que uma empresa enfrenta custos médios de longo prazo decrescentes ou constantes, pode ocorrer o chamado monopólio natural. Isso cria um dilema para a sociedade: embora a minimização de custos seja alcançada, o monopólio confere poder de mercado à empresa, permitindo-lhe fixar preços acima do nível competitivo.

Atualmente, os mercados apresentam-se amplamente oligopolizados, o que torna a discussão sobre política industrial particularmente relevante. Nessa perspectiva, destacam-se dois principais mecanismos de ação: (i) a política de concorrência, que busca mitigar o poder de mercado das grandes empresas; (ii) e as iniciativas para prevenir condutas anticompetitivas e a concentração de mercado decorrente de fusões e aquisições. Sob a ótica das falhas de

mercado, políticas de regulação concorrencial têm como objetivo principal evitar que o exercício do poder de mercado comprometa o bem-estar dos consumidores, utilizando como referência o desempenho ideal de mercados competitivos (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Externalidades representam outra importante categoria de falhas de mercado. Elas surgem quando as decisões de um agente econômico impactam, de forma positiva ou negativa, outros agentes sem que esse efeito seja refletido nos preços de mercado. Um exemplo clássico é a externalidade negativa da poluição, considere-se uma refinaria de petróleo que gera resíduos poluentes e uma fábrica de pescado, enquanto a poluição é um custo para a fábrica, ela não é considerada nos custos da refinaria. Essa assimetria gera ineficiência alocativa, com produção excessiva de petróleo e insuficiência na produção de pescado. Já externalidades positivas, como os benefícios gerados por um distrito industrial, também podem ser negligenciadas, resultando em subinvestimento nessas atividades (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Para corrigir os problemas oriundos das externalidades, três abordagens são sugeridas: (i) fusões entre as empresas afetadas, internalizando os custos ou benefícios; (ii) aplicação de impostos ou subsídios para alinhar os preços aos custos de oportunidade; (iii) a criação de direitos de propriedade que estabeleçam um mercado para as externalidades. É fundamental, no entanto, que essas intervenções sejam cuidadosamente planejadas para evitar a criação de novas distorções (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Os bens públicos também exemplificam falhas de mercado, pois possuem características de não exclusividade e não rivalidade. Não exclusividade implica que o benefício do bem não pode ser restrito a um grupo específico, enquanto não rivalidade indica que o uso do bem por novos consumidores não afeta seu custo. Exemplos incluem a iluminação pública, cuja utilização é compartilhada por todos, independentemente de sua contribuição financeira. Esse cenário favorece o comportamento oportunista do “carona” (*free rider*), em que os indivíduos usufruem sem pagar. Como solução, a oferta desses bens deve ser garantida pelo Estado ou mediante concessões (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Os bens de propriedade comum, por sua vez, enfrentam problemas relacionados à ausência de incentivos para sua preservação. Quando os direitos de propriedade não são claramente definidos, agentes individuais tendem a explorar os recursos de maneira predatória, comprometendo sua sustentabilidade. Nesse contexto, cabe ao Estado regular o uso desses bens para evitar práticas que prejudiquem sua conservação (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Outra situação em que o mercado pode falhar está relacionada às preferências intertemporais sociais e privadas, especialmente em atividades como pesquisa básica. Embora de grande interesse público, esses investimentos apresentam retornos de longo prazo que

desestimulam os agentes privados. Nesse caso, a intervenção estatal torna-se essencial para garantir sua realização (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Em síntese, as falhas de mercado indicam a necessidade de políticas industriais que possam corrigir essas disfunções e promover uma alocação mais eficiente dos recursos. Contudo, a abordagem neoclássica tradicional apresenta limitações, dado que seus pressupostos de racionalidade e informação perfeitas restringem a identificação de falhas de mercado a poucas situações. Quando se considera a racionalidade limitada e a informação imperfeita, próprias do ambiente econômico real, surgem novas fontes de incerteza que justificam intervenções estatais. Essas circunstâncias ampliam o escopo para políticas industriais que vão além da visão ortodoxa, adaptando-se à complexidade das interações econômicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

4.11.2 Política Industrial pela Ótica Desenvolvimentista

A abordagem desenvolvimentista deve ser analisada considerando três fatores principais: (i) as particularidades da nação onde a política será implementada; (ii) o estágio de desenvolvimento do país; (iii) e o contexto internacional em que essa intervenção ocorre. O ambiente global, em momentos específicos, pode influenciar diretamente a aceitação ou rejeição de políticas intervencionistas, facilitando ou dificultando sua implementação. Por exemplo, entre o período da Grande Depressão e os anos 1980, diversas experiências bem-sucedidas de políticas desenvolvimentistas foram observadas em diferentes países (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Esse paradigma compreende o Estado como um agente ativo no processo de desenvolvimento, indo além do papel corretivo defendido pela visão das falhas de mercado. Um Estado desenvolvimentista baseia sua legitimidade na capacidade de promover crescimento econômico sustentado, combinado a mudanças estruturais no sistema produtivo (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Essa abordagem de crescimento econômico reforça a importância da atuação ativa dos Estados no estímulo à sofisticação produtiva, o que pode ser alcançado por meio de políticas industriais, entre outras medidas. Ademais, evidencia-se que o processo de desenvolvimento nunca é plenamente concluído, uma vez que a sofisticação produtiva se trata de uma dinâmica contínua. Nesse sentido, tanto os países em desenvolvimento (PED) quanto os países desenvolvidos (PD) continuam enfrentando obstáculos para alcançar cinco objetivos fundamentais do desenvolvimento: (i) assegurar a segurança; (ii) promover a liberdade; (iii)

impulsionar o progresso material; (iv) reduzir as desigualdades sociais; (v) proteger o meio ambiente (Bresser-Pereira, 2014; Zagato, 2019).

A intervenção do Estado na economia encontra respaldo na literatura econômica, particularmente no conceito de Ótimo de Pareto, que estabelece que é impossível melhorar a situação de um indivíduo sem causar prejuízo a outro. Dessa forma, justifica-se a atuação estatal em situações que envolvam a presença de bens públicos, monopólios naturais, externalidades, mercados incompletos, falhas de informação, bem como nos casos de desemprego e inflação. Nessas condições, o papel do Estado é corrigir as disfunções do mercado e promover uma melhor alocação de recursos para alcançar maior eficiência e equidade econômica (Fütcher; Vargas, 2017).

A justificativa para a intervenção estatal na economia frequentemente remete ao conceito de proteção à indústria nascente, originalmente defendido por John Stuart Mill e aprofundado por Friedrich List, essa teoria parte da ideia de que, em países em desenvolvimento, as indústrias emergentes enfrentam custos iniciais superiores aos de países onde essas atividades já estão consolidadas. Sem a proteção do governo, essa disparidade tenderia a reforçar a divisão internacional do trabalho, perpetuando a dependência econômica. Assim, a lógica desenvolvimentista é mais intervencionista em países com processos de industrialização tardios.

O argumento a favor da proteção à indústria nascente baseia-se em dois pressupostos: (i) os custos de produção tendem a diminuir com o tempo, conforme os fabricantes aproveitam as economias de aprendizagem, reduzindo as desvantagens iniciais; (ii) e que a proteção deve ser temporária; caso contrário, a perpetuação de barreiras resultaria em consumidores pagando preços elevados e na manutenção de ineficiências produtivas. A partir dessa perspectiva, uma estratégia industrial ativa deve priorizar o setor manufatureiro, valorizar o aprendizado pelo fazer (*learning by doing*), e incorporar tecnologias estrangeiras avançadas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Alexander Gerschenkron sugere que os países desenvolvidos servem como um modelo a ser seguido pelos países em desenvolvimento. Nesse sentido, o desafio consiste em replicar um modelo produtivo já existente, buscando crescer em ritmo acelerado para alcançar os países líderes. Essa abordagem facilita a identificação de objetivos claros e reduz os erros nas políticas públicas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

No contexto desenvolvimentista, as políticas econômicas – incluindo as cambiais, as fiscais, as monetárias e as de comércio exterior – são integradas e direcionadas à industrialização. O Estado desenvolvimentista busca fomentar o setor privado nacional,

promovendo crescimento, produtividade e competitividade com base nas melhores práticas internacionais. Nesse modelo, o Estado lidera o mercado, definindo quais setores e tecnologias devem ser priorizados, mobilizando incentivos e regulações para alcançar tais metas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Apesar disso, as trajetórias desenvolvimentistas variam entre os países, refletindo diferenças na estrutura industrial, nos instrumentos utilizados e nas ideologias que fundamentam as políticas. A Coreia do Sul, por exemplo, destacou-se entre os países de industrialização tardia por exercer forte disciplina sobre o setor privado. O sucesso sul-coreano deve-se, em grande parte, à capacidade do Estado de criar distorções de preços para direcionar os investimentos, privilegiando grandes empresas nacionais e setores estratégicos, além de subsidiar iniciativas específicas. No entanto, a concessão desses benefícios estava condicionada ao cumprimento de rigorosos padrões de desempenho, especialmente relacionados ao sucesso exportador (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Na América Latina, o Estado também desempenhou um papel central no processo de industrialização, focando em setores de bens de consumo e bens intermediários. Essa estratégia, muitas vezes associada à substituição de importações, visava criar capacidades produtivas locais por meio de empresas estatais e privadas, nacionais e estrangeiras. Sob a influência de Raul Prebisch, a industrialização era vista como uma forma de mitigar as desigualdades nas relações comerciais internacionais e superar restrições externas ao crescimento. No entanto, diferentemente do modelo asiático, o foco latino-americano estava na criação de capacidade produtiva, enquanto os asiáticos priorizavam o desempenho no mercado externo como indicador de sucesso. Assim, as experiências desenvolvimentistas refletem diferentes abordagens de políticas industriais, que variam conforme os objetivos econômicos e a dinâmica institucional de cada país (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Apesar das diferenças nos níveis de sucesso entre o Leste Asiático e a América Latina – sendo evidente o maior dinamismo industrial dos países asiáticos após os anos 1980 –, uma análise das estruturas industriais dessas regiões indica que, sob a perspectiva desenvolvimentista, os resultados positivos estão ligados à coerência entre as estratégias e políticas estatais e o estágio de desenvolvimento das respectivas nações (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Os principais desafios para o modelo desenvolvimentista estão relacionados à capacidade do Estado de ajustar sua forma de intervenção às mudanças nas dinâmicas industriais. À medida que um país alcança maior maturidade industrial, o papel do Estado tende a diminuir, permitindo maior autonomia às decisões privadas e promovendo uma transição para

um mercado mais competitivo e menos dependente de incentivos estatais (Kupfer; Hasenclever, 2013).

4.11.3 Política Industrial na Prática: Instrumentos Horizontais e Verticais

A discussão sobre política industrial exige, como etapa inicial, compreender a relação intrínseca entre ela e a política macroeconômica. A política macroeconômica influencia a política industrial em diferentes aspectos, como: (i) a determinação dos preços relativos entre bens transacionáveis e não transacionáveis por meio da taxa de câmbio; (ii) o impacto sobre o nível de investimentos via taxa de juros; e (iii) a sinalização de estabilidade econômica e capacidade fiscal do Estado, o que condiciona a implementação de políticas de incentivo e investimentos em infraestrutura, educação, ciência e tecnologia. A política cambial, por exemplo, ilustra como diferentes indústrias são afetadas de forma diversa, considerando que a valorização ou desvalorização da moeda impacta de maneira oposta os setores exportadores e importadores. Por outro lado, uma política industrial bem estruturada pode beneficiar a gestão macroeconômica ao aumentar a eficiência e produtividade da economia (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Um aspecto crucial da política industrial é seu caráter deliberado. Existe uma distinção entre políticas industriais explícitas e implícitas. A política explícita manifesta-se por meio de leis, regulamentos, órgãos institucionais, planos de desenvolvimento e declarações oficiais. Já a política implícita é mais difícil de identificar, refere-se a ações não formalizadas ou que, mesmo implementadas, podem não atingir os objetivos propostos. Em contrapartida, também é possível que medidas industriais sejam adotadas sem estarem formalmente documentadas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

A política industrial pode ser classificada conforme a natureza de seus instrumentos e os alvos que pretende atingir. Os dois principais alvos são as políticas horizontais (ou funcionais) e as verticais (ou seletivas). As horizontais focam no aprimoramento geral do desempenho econômico, sem priorizar setores específicos, enquanto as verticais buscam desenvolver setores estratégicos, direcionando recursos para determinadas indústrias ou cadeias produtivas (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Os instrumentos da política industrial também podem ser categorizados conforme sua finalidade. O primeiro grupo diz respeito ao regime regulatório, que envolve a arbitragem da concorrência, políticas antitruste, regulação de propriedade intelectual, proteção ao consumidor e ao meio ambiente, além de políticas tarifárias. Esses instrumentos podem tanto aumentar a

pressão competitiva sobre as empresas, como no caso de políticas antitruste rigorosas, quanto reduzir essa pressão, através de mecanismos como a proteção tarifária. O segundo grupo engloba regimes de incentivos, que incluem benefícios fiscais, créditos direcionados e estímulos financeiros para exportações e pesquisa e desenvolvimento (Kupfer; Hasenclever, 2013).

As políticas horizontais visam alterar os mecanismos gerais de alocação de recursos na economia. Instrumentos regulatórios incluem a repressão de práticas anticompetitivas, políticas de concessões e controle de preços em serviços essenciais, como energia e telecomunicações. Outras medidas abordam comércio exterior, como tarifas e mecanismos de defesa comercial, e propriedade intelectual, envolvendo patentes e transferência tecnológica. Em termos de incentivos, destacam-se iniciativas voltadas à inovação, financiamento de longo prazo e deduções fiscais para atividades produtivas. Essas políticas abrangem, ainda, investimentos em infraestrutura, capacitação da força de trabalho e ciência e tecnologia (Kupfer; Hasenclever, 2013).

As políticas verticais, por sua vez, concentram esforços em setores específicos, buscando alterar as regras de alocação de recursos entre indústrias. Esse tipo de intervenção é justificado por quatro principais razões: o potencial de geração de maior valor agregado, os efeitos multiplicadores ao longo das cadeias produtivas, o dinamismo potencial de certos setores e a necessidade de apoiar indústrias nascentes ou com economias de escala crescentes (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Embora existam distinções entre políticas horizontais e verticais, os países geralmente adotam ambas de maneira complementar, com a ênfase variando ao longo do tempo. Desde os anos 1990, a tendência nos países industrializados tem sido priorizar instrumentos horizontais, embora medidas verticais ainda sejam aplicadas para apoiar indústrias em declínio ou nascentes, que demandam atenção estratégica. As intervenções incluem incentivos financeiros para pesquisa e desenvolvimento em setores de alta tecnologia e restrições comerciais não tarifárias para indústrias maduras, que desempenham um papel relevante na manutenção do emprego e da competitividade econômica (Kupfer; Hasenclever, 2013).

4.11.4 Contexto brasileiro: políticas industriais ao longo do tempo

No que toca às políticas industriais, existe atualmente certo consenso de que elas devem ser horizontais. Nos últimos anos, têm emergido novas abordagens e explicações sobre o processo de desenvolvimento econômico, que colocam a mudança estrutural como elemento

central. Essas perspectivas destacam, principalmente, dois fatores: a diversificação da estrutura produtiva e das exportações e a inovação tecnológica, ou, de forma mais ampla, a acumulação de conhecimento (Bonelli, 2007).

O trabalho de Hausmann e Rodrik (2003) ilustra bem essa nova direção, enfatizando a importância desses elementos no desenvolvimento. Além disso, reconhece-se que políticas industriais ou de competitividade, frequentemente descritas como intervenções microeconômicas, desempenham um papel fundamental dentro desse novo paradigma. A adoção dessas políticas muitas vezes segue critérios pragmáticos, adaptando-se às condições históricas e institucionais específicas, como apontado por Rodriguez-Clare (2005) (Bonelli, 2007).

No Brasil, a política industrial ganhou força com o modelo de substituição de importações iniciado nos anos 1930, que priorizou inicialmente os bens de consumo não duráveis. Posteriormente, expandiu-se para bens duráveis e setores de bens intermediários e de capital (Bonelli, 2007). Esse período foi caracterizado por uma abordagem ativa, com instrumentos de cunho vertical, e apresentou as seguintes particularidades:

- a) **protagonismo estatal:** criação de estatais nos setores de infraestrutura (energia e telecomunicações) e na indústria de transformação (siderurgia e petroquímica);
- b) **protecionismo:** adoção de barreiras comerciais, tanto tarifárias quanto não tarifárias, mesmo para indústrias maduras;
- c) **atração de investimentos estrangeiros:** estímulo à instalação de empresas transnacionais, muitas vezes com exigências de parcerias com capital local;
- d) **incentivos fiscais:** benefícios específicos para setores estratégicos e estímulos regionais para reduzir disparidades entre regiões do país.

A partir da década de 1990, o governo Collor iniciou uma reorientação das políticas industriais, priorizando instrumentos horizontais, como o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade (PBQP). Essa abordagem promoveu a abertura comercial, com eliminação de barreiras e redução tarifária, e iniciou o processo de privatizações. Instrumentos verticais foram limitados à indústria de informática, com incentivos fiscais voltados à inovação tecnológica (Bonelli, 2007).

Com o Plano Real, em 1994, as políticas industriais foram subordinadas à estabilização macroeconômica. As importações cresceram devido à redução tarifária e valorização cambial, pressionando os preços internos. O processo de privatização foi ampliado

para setores como telecomunicações e energia elétrica. Apesar disso, setores como o automotivo e a Zona Franca de Manaus continuaram a receber incentivos fiscais, enquanto iniciativas estaduais fomentaram a concessão de benefícios a indústrias específicas, como têxtil, calçados e confecções (Kupfer; Hasenclever, 2013).

Esse conjunto de ações ilustra as mudanças estruturais e estratégicas das políticas industriais no Brasil, marcadas por adaptações às condições econômicas internas e ao cenário internacional (Kupfer; Hasenclever, 2013).

4.12 POLÍTICAS DE INCENTIVOS DO GOVERNO BRASILEIRO PARA A PRODUÇÃO DO SAF

4.12.1 Financiamento para a produção de combustível de aviação sustentável (SAF)

Empresas interessadas no desenvolvimento de combustíveis sustentáveis para aviação, conhecidos como SAF (*Sustainable Aviation Fuels*), submeteram propostas com o objetivo de captar recursos federais. Esse apoio será viabilizado por meio de instituições financeiras como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Ao todo, serão disponibilizados R\$ 6 bilhões para fomentar a produção de combustíveis sustentáveis, tanto para o setor de aviação quanto para a navegação.

Essa iniciativa visa promover a cooperação entre empresas e impulsionar os primeiros projetos relacionados ao SAF e a combustíveis sustentáveis no Brasil. Além de fortalecer a economia nacional, a medida está alinhada às metas estabelecidas pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), que busca zerar a emissão líquida de carbono na aviação internacional até o ano de 2050.

4.12.2 Desafios e Perspectivas para o Desenvolvimento de Combustíveis Sustentáveis no Brasil

De acordo com Rodrigo Herve Quaranta, coordenador de Assuntos Regulatórios em Biocombustíveis da Petrobras, a implementação de um arcabouço regulatório abrangente é essencial para contemplar diferentes rotas tecnológicas, especialmente aquelas que envolvem produtos coprocessados em refinarias de petróleo, voltados para a descarbonização. Quaranta destaca a necessidade de incentivos específicos para combustíveis avançados, a exemplo das

práticas já observadas em países como Estados Unidos, Alemanha e Indonésia (TN Petróleo, 2024).

Nesse contexto, a Petrobras está investindo em um programa de biorefino no valor de US\$ 1,5 bilhão, com o objetivo de construir plantas voltadas para a produção de HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), um biocombustível coprocessado em refinarias convencionais, e SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), destinado ao setor de aviação (TN Petróleo, 2024).

Por outro lado, Tabita Loureiro, diretora técnica e presidente interina da PPSA, enfatiza que a competitividade no setor de combustíveis sustentáveis depende da previsibilidade jurídica proporcionada pelos órgãos reguladores. Segundo Loureiro, a existência de normas claras é um fator determinante para atrair investidores e possibilitar aportes no Brasil. Diante do cenário global, o país enfrenta desafios significativos, competindo com países como a Noruega, que oferece subsídios de aproximadamente 80%, e os Estados Unidos, que destinam mais de US\$ 300 bilhões em incentivos para soluções de baixo carbono. Nesse sentido, a adoção de regulamentações sólidas e a atuação eficiente das instituições reguladoras tornam-se fundamentais para que o Brasil avance nesse mercado competitivo (TN Petróleo, 2024).

4.12.3 Projetos de biocombustíveis para aviação

O potencial do Brasil para o desenvolvimento de biorrefinarias superou as expectativas iniciais do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). De acordo com José Luís Gordon, diretor de Desenvolvimento Produtivo, Inovação e Comércio Exterior, a demanda por projetos voltados para biocombustíveis, incluindo o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) e o “bunker verde” destinado à navegação, foi quase 30 vezes maior que o valor previsto na chamada pública realizada em parceria entre o BNDES e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) (UDOP, 2024).

O orçamento inicial do programa, estimado em R\$ 6 bilhões, foi dividido igualmente entre BNDES e Finep, oferecendo taxas diferenciadas de financiamento. No entanto, a demanda total apresentada alcançou R\$ 167 bilhões, distribuída em 76 propostas. Dentre os projetos, 43 têm como foco principal a produção de combustíveis sustentáveis para aviação, representando um investimento de R\$ 120 bilhões, enquanto os demais 33 projetos, somando R\$ 47 bilhões, visam o desenvolvimento de combustíveis para o setor de navegação. Até o final do ano, o BNDES deverá realizar a avaliação das propostas, selecionando aquelas elegíveis e definindo os mecanismos de financiamento mais adequados (UDOP, 2024).

4.12.4 Políticas Públicas elaboradas pelo programa ProBioQAV

O ProBioQAV tem como objetivos principais o incentivo à pesquisa, à produção, à comercialização e ao uso de SAF no Brasil. Ele institui um mandato para que operadores aéreos reduzam gradualmente suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em suas operações domésticas, a partir de 2027, por meio da utilização de SAF. Desta forma algumas políticas públicas foram elaboradas. E são elas:

4.12.5 Estabelecer mandato de redução de emissões do setor aéreo

Justificativa:

- Diferentes rotas tecnológicas e matérias-primas têm resultados distintos na redução de emissões, de modo que essa solução incentiva competição e eficiência;
- Mandato baseado nas reduções das emissões dos GEE na aviação. Volume SAF como consequência.

Instrumento: Lei + Decreto ou Resolução CNPE (Brasil, 2022).

4.12.6 Permitir todas as rotas tecnológicas homologadas pela ASTM e ANP

Justificativa:

- Ampliar as possibilidades de fornecimento de SAF, de acordo com o máximo aproveitamento tecnológico disponível;
- Viabilizar a expansão do uso de SAF também através de combustíveis sintéticos e de produção a partir de resíduos sólidos urbanos, além do bioquerosene de aviação.

Instrumento: Lei + Decreto ou Resolução CNPE (Brasil, 2022).

4.12.7 Permitir teores diferentes SAF em qualquer parte do território nacional

Justificativa:

- Não criar obrigação uniforme nacionalmente, como adotado em outros esquemas de mandatos;
- Evitar o passeio logístico do SAF pelo território e viabilizar os potenciais regionais de produção SAF;

- Uso flexível do SAF, com obrigação total mínima por empresa aérea, que pode voluntariamente usar mais.

Instrumento: Lei + Decreto ou Resolução CNPE (Brasil, 2022).

4.12.8 Isentar voos internacionais das obrigações do mandato

Justificativa:

- Necessidade de excluir operadores internacionais, dada potencial divergência com legislações estrangeiras e conflito com Convenção de Chicago;
- Prever aplicação da regra de reciprocidade no caso de imposição de obrigações por outros Estados aos operadores aéreos nacionais.

Instrumento: Lei + Decreto ou Resolução CNPE (Brasil, 2022).

4.12.9 Conferir flexibilidade ao CNPE

Justificativa:

- Permitir ao CNPE otimizar as metas de redução de emissões, visando a dar flexibilidade para a execução da política pública.

Instrumento: Lei (Brasil, 2022).

4.12.10 Viabilizar aeroportos para o uso do SAF, considerando como critérios o desenvolvimento da produção do SAF e das cadeias logísticas, a demanda do aeroporto e a disponibilidade de matéria-prima

Justificativa:

- Necessidade de otimização logística para cumprimento das obrigações de descarbonização pelas empresas aéreas e pelos distribuidores de combustíveis de aviação;
- Criar linhas de financiamento específicas para ajustes de infraestrutura e logística aeroportuária/distribuição para implementar medida;
- Critérios para viabilização de aeroportos deve considerar múltiplos fatores, conforme enunciado na premissa.

Instrumento: Lei + Decreto (Brasil, 2022).

4.12.11 Viabilizar a aplicação do Book & Claim para casos específicos

Justificativa:

- Benchmark internacional de medida baseada em mercado.
- Dados os desafios de escala de produção e de otimização logística na distribuição de SAF, o Book & Claim representa estratégia útil de eficiência alocativa e de redução de custos.
- Viabilizar cumprimento de obrigações por empresas que não operam nos principais aeroportos.

Instrumento: Lei + Decreto (Brasil, 2022).

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado demonstra que o desenvolvimento da indústria de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) no Brasil é uma oportunidade estratégica para alavancar o crescimento econômico, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa do setor de aviação. Apesar dos desafios relacionados aos custos elevados de produção, às barreiras tecnológicas e às limitações de mercado, o Brasil possui um conjunto único de condições que favorecem a implementação dessa nova indústria: vastos recursos naturais, experiência consolidada na produção de biocombustíveis e infraestrutura já existente.

As rotas tecnológicas para produção de SAF, como o processo HEFA, a síntese Fischer-Tropsch e a conversão de álcoois em querosene, foram analisadas à luz de suas potencialidades e limitações. Além disso, o trabalho destacou o papel essencial das matérias-primas disponíveis no Brasil, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, resíduos de madeira e óleos residuais. Esses recursos, associados a políticas públicas bem direcionadas, podem transformar o país em um líder global na produção de SAF, ao mesmo tempo em que atendem às demandas internas de uma aviação civil robusta e competitiva.

As políticas públicas existentes, como o programa Combustível do Futuro, e os incentivos financeiros do BNDES, oferecem bases promissoras para superar as falhas de mercado e fomentar a inovação tecnológica. Entretanto, o estudo também aponta para a necessidade de ampliar a coordenação entre diferentes áreas políticas – incluindo ciência, tecnologia, infraestrutura e meio ambiente – para criar um ecossistema favorável ao desenvolvimento sustentável do setor.

Além dos benefícios econômicos e ambientais, o desenvolvimento da indústria de SAF no Brasil tem um impacto estratégico no cenário internacional. Diante da crescente pressão global por soluções de baixo carbono e dos compromissos assumidos no âmbito de acordos climáticos, o Brasil pode se posicionar como um fornecedor-chave de combustíveis sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa.

Por fim, este trabalho reforça que o sucesso dessa transição depende não apenas de incentivos financeiros e regulações específicas, mas também do engajamento dos diversos agentes econômicos e sociais. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, parcerias público-privadas e uma visão de longo prazo são fundamentais para consolidar o Brasil como referência na produção de combustíveis sustentáveis para a aviação. Assim, o setor de SAF pode se tornar um pilar essencial da estratégia brasileira de descarbonização, promovendo não

apenas avanços tecnológicos, mas também uma contribuição significativa para os objetivos de desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- ANAC. **Governo financiará produção de combustível de aviação sustentável (SAF)**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/governo-financiara-producao-de-combustivel-de-aviacao-sustentavel-saf>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. PROBIOQAV – Premissas finais e próximos passos**. Brasília, DF: MME, 2022. 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-1/2022-02-03_probioqav-premissas-finais-e-proximos-passos-v02-1.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Proposição das Premissas da Futura Política Pública. – 12ª Reunião do Subcomitê ProBioQAV**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. 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-1/2021-12-23_ct-cf-probioqav-reuniao-sobre-premissas-v02.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.
- BRESSER-PEREIRA, Luiz Carlos. Desenvolvimento, progresso e crescimento econômico. **Lua Nova**, São Paulo, v. 93, p. 33-60, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ln/a/Qn76SFwhyHVMmJjRBX7ny/>. Acesso em: 28 out. 2024.
- COPPE/UFRJ; ICS. **Sinergias entre as metas de descarbonização dos setores de aviação e de transporte marítimo**. Rio de Janeiro: ICS, 2021. Disponível em: <https://climaesociedade.org/wp-content/uploads/2024/11/sinergias-entre-as-metas-de-descarbonizacao.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.
- COSTA, Achyles Barcelos da. Teoria econômica e política de inovação. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 281-307, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rec/a/Gc4pQGMMGy7RhJNzQJhJb5d/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 04 nov. 2024.
- FERRAZ, João Carlos; PAULA, Germano Mendes de; KUPFER, David. Política Industrial. In: KUPFER, David; HASENCLEVER, Lia (org.). **Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 313-323. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4869395/mod_resource/content/1/david-kupfer-economia-industrial-campus-grupo-elsevier-2012-1.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.
- FÜCHTER, Márcia; VARGAS, Tatiane Aparecida Viega. Fundamentos da política industrial: a influência dos incentivos fiscais, físicos e econômicos na geração de emprego no município de Rio do Sul – SC (2005-2010). **Revista Catarinense de Economia**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 120-136, 2017. Disponível em: <https://www.apec.org.br/rce/index.php/rce/article/view/9/6>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- GONÇALVES, Giullia de Paula. **Políticas públicas no setor de biocombustíveis no Brasil relacionadas à diminuição de gases de efeito estufa**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2024.
- HONEYWELL. **Produção de Combustível Sustentável de Aviação (Sustainable Aviation Fuel, SAF): O que vem aí**. New Jersey: HoneyWell, nov. 2022. Disponível em:

<https://www.honeywell.com/br/pt/news/2022/11/sustainable-aviation-fuel-saf-production-whats-next>. Acesso em: 15 out. 2024.

KUPFER, David; HASENCLEVER, Lia (org.). **Economia industrial: fundamentos teóricos e práticas no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4869395/mod_resource/content/1/david-kupfer-economia-industrial-campus-grupo-elsevier-2012-1.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

MILANEZ, Artur Yabe *et al.* Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. **Revista BNDES**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 361-398, dez. 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22048/1/PR_Biocombustiveis%20de%20Avia%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil_Revista%20BNDES_n.%2056.pdf. Acesso em: 17 out. 2024.

PEREIRA, Breno. Ferreira; SOUZA, Luiz Gustavo Antonio de; CAVALCANTE, Camila Bezerra Calherani. Energia alternativa na aviação: panorama e desafios. **Revista da UNIFA**, Rio de Janeiro, v. 36, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://revistadaunifa.fab.mil.br/index.php/reunifa/article/view/521/550>. Acesso em: 22 out. 2024.

PRAUCHNER, Marcos J. *et al.* Combustíveis Hidrocarbônicos Alternativos, com Ênfase para os Combustíveis Sustentáveis para Aviação. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 15, n. 3, p. 498-518, 2023. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/pdf/v15n3a11>. Acesso em: 08 out. 2024.

PROQR. **Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações; Deutsche Gesellschaft für Internationale, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 25 out. 2024.

RAMOS, Francisco de Sousa. Qualidade do meio ambiente e falhas de mercado. **Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 14, n. 25 e 26, p. 39-51, mar./set. 1996. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/AnaliseEconomica/article/view/10522/6163>. Acesso em: 04 nov. 2024.

RIBEIRO, Nathan Fraga; RIBEIRO, Elones Fernando. Redução na emissão de dióxido de carbono (CO₂) através da implementação de biocombustíveis na aviação comercial brasileira. **Revista Conexão Sipaer**, Brasília, v. 10, n. 1, p. 45-55, 2019. Disponível em: <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/viewFile/605/455>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SHAHRIAR, Md Fahim; KHANAL, Aaditya. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). **Fuel**, [s./l.], v. 325, n.1, p. 124905, october 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/363006653>. Acesso em: 18 out. 2024.

SHELL SCENARIOS. **Brasil: liderando o mundo rumo à neutralidade de emissões**. [s./l.]: Shell Scenarios, 2024. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energy-and-innovation/the->

energy-future/brazil-leading-the-world-to-net-zero-emissions/_jcr_content/root/main/section/promo_copy_648924166/links/item0.stream/1722618179074/e08214fd9f9d82a4cf129be894b10cba6b1566c0/scenarios-brazil-updated.pdf. Acesso em: 01 nov. 2024.

SOARES, Pedro G. **Esquema de redução de emissões da Aviação Civil Internacional (CORSA/ICO):** desafios e oportunidades para o Brasil. São Paulo: IDESAM, 2018. Disponível em: <https://idesam.org/wp-content/uploads/2018/08/corsia-oportunidades-para-o-brasil-v2.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

SOUZA, Lorena Mendes de. **O mercado brasileiro de bioquerosene de aviação:** mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA. 2019. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

TN PETRÓLEO. **Projeto Combustível do Futuro é alavanca para novas rotas de produção de biocombustíveis.** Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://tnpetroleo.com.br/noticia/projeto-combustivel-do-futuro-e-alavanca-para-novas-rotas-de-producao-de-biocombustiveis/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

UDOP. **Projetos de biocombustíveis para aviação e navegação superam expectativa do BNDES.** Araçatuba, 2024. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/11/08/projetos-de-biocombustives-para-aviacao-e-navegacao-superam-expectativa-do-bndes.html>. Acesso em: 23 nov. 2024.

VAN DYK, Susan; SADDLER, Jack. **Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF):** Technologies, potential and challenges. [s./l.]: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

VELÁSQUEZ, Ramón Stortini González; KUBOTANI, Rafael Toshim; VELÁSQUEZ, Sílvia Maria Stortini González. Novos combustíveis para a aviação: um estudo de caso. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 77-93, 2012. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/4269/3805>. Acesso em: 04 nov. 2024.

ZAGATO, Ligia. Ainda é possível que os países em desenvolvimento façam seu *catching up* no século XXI? **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 527-543, jul./set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ln/a/Qn76SFwhyHVMmJjBjRBX7ny/>. Acesso em: 15 out. 2024.