



PERSPECTIVAS E PROPOSTAS DE INSERÇÃO DE BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO NO TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL

Tamar Roitman

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

PERSPECTIVAS E PROPOSTAS DE INSERÇÃO DE BIOQUEROSENE DE
AVIAÇÃO NO TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL

Tamar Roitman

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.

Prof. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2018

Roitman, Tamar

Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil/ Tamar Roitman. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 146 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 135-146.

1. Biocombustível de aviação. 2. Transporte aéreo. 3. Emissões de CO₂. I. Szklo, Alexandre Salem. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, pelo amor, incentivo, apoio, carinho, por ser meu exemplo de dedicação aos filhos e ao trabalho, e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu irmão, pelo companheirismo e cumplicidade de tantos anos.

Aos meus avós, pelo amor, cuidado, dedicação e, principalmente, pelos exemplos de valorização dos estudos e do trabalho. À minha avó, engenheira química, a quem segui profissionalmente, agradeço pela sabedoria e firmeza.

Aos meus tios e tias, primo e primas, ao Mauro e família, pelo amor, carinho e torcida.

À FGV Energia, por permitir e incentivar a minha dedicação ao mestrado e por me apresentar um mundo profissional que me apaixona.

À Fernanda Delgado, pelo exemplo de profissional, pelo incentivo ao meu crescimento e pela amizade e amor.

Ao Bezerra, por ser um chefe que me estimula a melhorar a cada dia. Obrigada pelo seu cuidado, seus conselhos, por estar sempre atento e por ser um exemplo de compreensão e compaixão.

Ao Carlos Quintella, Felipe Gonçalves e toda a equipe da FGV Energia pelo meu desenvolvimento diário como profissional e pelo ambiente de tanto aprendizado, troca de experiências e de amizade.

Ao meu orientador, Alexandre Szklo, pela dedicação além dos limites aos seus alunos e à carreira de professor. Agradeço imensamente pelo direcionamento e suporte na orientação deste trabalho, pelo cuidado na leitura, pelas aulas inesquecíveis e pelo conhecimento inestimável transmitido.

Aos professores André Lucena e Susanne Hoffmann por participarem da banca.

A todos os professores do PPE, pelas excelentes aulas.

A todos os funcionários de PPE, pela atenção e cuidado com os alunos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PERSPECTIVAS E PROPOSTAS DE INSERÇÃO DE BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO NO TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL

Tamar Roitman

Dezembro/2018

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A indústria aérea mundial emitiu 859 milhões de toneladas de CO₂, o equivalente a, aproximadamente, 2% das emissões provocadas pela ação humana, em 2017. Associações do setor aéreo estabeleceram metas ambiciosas para mitigar os efeitos climáticos provocados pela aviação internacional e, para alcançá-las, foi proposto um conjunto de medidas, que inclui o desenvolvimento tecnológico de aeronaves, a melhoria da gestão e infraestrutura de tráfego aéreo, o uso de combustíveis sustentáveis, e a implantação de medidas baseadas em mercado. Os combustíveis sustentáveis de aviação representam uma oportunidade de redução de emissões sem restringir a demanda por transporte aéreo, e o Brasil tem potencial para ser um importante produtor deste biocombustível. Entre os desafios para a criação de uma indústria de bioquerosene no Brasil estão a disponibilidade de matérias-primas sustentáveis e a necessidade de criação de uma cadeia de suprimento destas, além dos altos custos e investimentos envolvidos, principalmente, no estágio inicial de desenvolvimento da indústria. Ainda, as companhias aéreas encontram-se em uma posição delicada, uma vez que operaram com margens de lucro negativas de 2011 a 2016. Os combustíveis representam a maior parcela dos custos operacionais das companhias e qualquer aumento deste custo reflete diretamente nos seus resultados financeiros. Nesse sentido, o desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene no país depende da adoção de medidas de incentivo. Neste trabalho, foram elaboradas cinco propostas de políticas públicas voltadas para a introdução do bioquerosene no transporte aéreo de passageiros no Brasil, com foco no desenvolvimento de uma indústria deste biocombustível no país.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PERSPECTIVES AND PROPOSALS FOR THE INSERTION OF SUSTAINABLE
AVIATION FUEL IN BRAZILIAN AIR PASSENGER TRANSPORTATION

Tamar Roitman

December/2018

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

The global aviation industry has emitted 859 million tons of CO₂, around 2% of all human-induced CO₂ emissions, in 2017. Sector associations have set ambitious targets to face the challenges posed by climate change, and in order to achieve them, a basket of measures has been identified, which include aircraft-related technology development, alternative fuels, improving of air traffic management and infrastructure use, and market-based measures. Sustainable aviation fuels present an opportunity to reduce aviation CO₂ emissions without restricting demand, and Brazil has the potential to be a high-level producer of this biofuel. Amongst constraints for the creation of a biokerosene industry in Brazil, we can mention the feedstock availability and the need for a supply chain establishment, and the high production costs and investments involved, especially in the industry initial development phase. Besides that, airline companies are in a struggling position in Brazil, since they have operated with negative profit margins from 2011 to 2016. Fuels costs are the main cost element in the airline operational costs and any increase reflects directly in the airlines' financial results. In this sense, the development of a SAF industry relies on political measures. In this work, five policy instruments suggestions for the introduction of biokerosene in air transport in Brazil were prepared, focusing in the development of a, aviation biofuel industry in Brazil.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. A indústria de aviação civil internacional e os compromissos internacionais de redução de emissões.....	8
2.1. Tecnologias disponíveis, medidas operacionais e de infraestrutura	13
2.1.1. Ganhos de eficiência promovidos pelo desenvolvimento tecnológico	16
2.1.2. Ganhos de eficiência promovidos por melhorias operacionais e de infraestrutura	21
2.2. Medidas econômicas.....	25
2.3. Biocombustíveis	36
3. Descrição da indústria de aviação civil brasileira	51
3.1. Análise da atividade do setor aéreo brasileiro.....	51
3.2. Análise da oferta e demanda de combustível de aviação.....	62
3.3. Análise do desempenho financeiro do setor e das empresas	69
4. Instrumentos de mitigação de emissões de GEE aplicados a biocombustíveis.....	78
4.1. Regulações do tipo “Comando e Controle”	81
4.2. Instrumentos baseados em preços (ou mercado)	83
4.3. Políticas de apoio à tecnologia.....	90
4.4. Informação e abordagens voluntárias	91
5. Propostas para a inserção do bioquerosene de aviação no transporte aéreo brasileiro	94
5.1. Proposta 1: Aplicação de um fator de multiplicação ao bioquerosene no âmbito do RenovaBio	96
5.2. Proposta 2: Mandato de mistura de bioquerosene no QAV.....	105
5.3. Proposta 3: Incentivo fiscal para as empresas aéreas que utilizarem bioquerosene	112
5.4. Proposta 4: Uso de bioquerosene na aviação militar brasileira	114
5.5. Proposta 5: Criação de uma tributação sobre carbono com a reciclagem dos recursos.....	117
5.6. Resumo das propostas	127
6. Considerações finais e recomendações	131
Referências	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do transporte aéreo mundial, de 2004 a 2017	8
Figura 2: Variação na demanda por transporte aéreo, no consumo de QAV e nas emissões de CO ₂ , entre 2004 e 2017	9
Figura 3: Metas de redução de emissões da IATA	11
Figura 4: Emissões de CO ₂ da aviação internacional, de 2005 a 2050, com a participação estimada de cada estratégia de redução.....	13
Figura 5: Consumo médio de combustível por passageiro-km em novas aeronaves comerciais, de 1960 a 2014 (1968=100)	15
Figura 6: Intervalo de potencial de redução de CO ₂ como função de investimentos em combinações de tecnologias relevantes, em diferentes períodos de tempo	18
Figura 7: Variação da Energia utilizada (Eu) com a distância percorrida.....	22
Figura 8: Projeção de demanda por compensação de emissões	32
Figura 9: Custos estimados da compensação de emissões	33
Figura 10: Demanda acumulada por compensação de emissões.....	34
Figura 11: Avaliação de Ciclo de Vida de seis rotas de produção de bioquerosene	43
Figura 12: Oferta e demanda por transporte aéreo no Brasil, de 2000 a 2017, em bilhões de assentos-km disponíveis (ASK) e passageiros-km pagos transportados (RPK).....	52
Figura 13: Demanda por transporte aéreo no Brasil, de 2000 a 2017, em bilhões de passageiros-km pagos transportados (RPK)	53
Figura 14: Participação dos voos domésticos e internacionais na demanda por transporte aéreo, em RPK.....	53
Figura 15: Comparação da evolução do PIB per capita e do RPK de voos domésticos	54
Figura 16: Evolução das tarifas de transporte aéreo, de 2002 a 2016	56
Figura 17: Distribuição percentual das tarifas de transporte aéreo em 2002 e 2016.....	57
Figura 18: Distribuição percentual do <i>yield</i> de transporte aéreo em 2002 e 2016	57
Figura 19: Evolução da taxa de aproveitamento (RPK/ASK), de 2000 a 2017	58
Figura 20: Transporte aéreo por país em 2017	59
Figura 21: Passageiros pagos transportados nas 20 principais rotas de voos domésticos, em 2016	60
Figura 22: Participação das empresas aéreas no transporte aéreo doméstico em 2017..	61
Figura 23: Participação das empresas aéreas no transporte aéreo internacional em 2017	61
Figura 24: Série histórica do consumo, produção e importação de querosene de aviação no Brasil, em bilhões de litros	63
Figura 25: Demanda de QAV por região, em 2017.....	64
Figura 26: Consumo de QAV por país, em 2015	65
Figura 27: Preços médios de Petróleo WTI e QAV na Costa do Golfo e no Brasil.....	66
Figura 28: Alíquotas de ICM sobre o QAV nos estados do Brasil.....	67
Figura 29: Preço do QAV em aeroportos brasileiros em 2016.....	68
Figura 30: Preço do QAV em aeroportos de diferentes cidades em 2016.....	69
Figura 31: Análise do resultado da indústria e dos fatores: PIB per capita (R\$ 2017), preço do QAV e taxa de câmbio (R\$/US\$ 2018)	74
Figura 32: Evolução da quantidade de voos no Brasil	76
Figura 33: Evolução da quantidade de aeronaves por empresa.....	76
Figura 34: Produção e Capacidade instalada de biodiesel, de 2005 a 2017	107

Figura 35: Complexo da soja (valores de 2017).....	108
Figura 36: Unidades operacionais da Força Aérea Brasileira	117
Figura 37: Projeções de emissões e consumo de QAV em voos domésticos.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Demanda e oferta de permissões da aviação no EU ETS, de 2015 a 2017	30
Tabela 2: Resultados de avaliações técnico-econômicas da produção de bioquerosene	48
Tabela 3: Produção de QAV por refinaria, em 2017	64
Tabela 4: Receita dos serviços das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017	70
Tabela 5: Custos e despesas das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2010 a 2017	71
Tabela 6: Resultado líquido das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017	72
Tabela 7: EBIT das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017	73
Tabela 8: Participação dos gastos com combustíveis e lubrificantes nos custos das empresas	75
Tabela 9: Exposição cambial das empresas aéreas brasileiras em 2017	75
Tabela 10: Opções de políticas de mitigação das emissões de GEE, com ênfase na promoção de biocombustíveis	80
Tabela 11: Motivações e barreiras para o desenvolvimento da indústria de biocombustíveis de aviação	94
Tabela 12: composição dos custos do óleo diesel (S500 e S10) em junho/2018 (média de preços no Brasil)	109
Tabela 13: Metas volumétricas de adição de bioquerosene ao QAV no mundo.....	111
Tabela 14: Diferença entre oferta e demanda de QAV nas regiões brasileiras, em 2017 (milhões de litros).....	116
Tabela 15: Efeito da aplicação de um tributo de 20% sobre os custos de combustíveis (dados de 2017)	122
Tabela 16: Quantidade de plantas de bioquerosene construídas com recursos arrecadados e capacidade de produção de bioquerosene entre 2021 e 2035	125
Tabela 17: Resumo das propostas para a inserção do bioquerosene no transporte aéreo brasileiro	130

LISTA DE SIGLAS

ABEAR - Associação Brasileira das Empresas Aéreas
ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
ATAG - *Air Transport Action Group*
CAAFI - *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative*
CAEP - *Committee on Aviation Environmental Protection*
CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CLEEN - *Continuous Lower Energy, Emissions and Noise*
CORSIA - *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*
CNT - Confederação Nacional do Transporte
EASA - *European Aviation Safety Agency*
EPA - *Environmental Protection Agency*
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EEA - *European Environment Agency*
EEA - *European Economic Area*
EU-ETS - *European Union Emission Trading System*
FAA – *Federal Aviation Administration*
FGV-EAESP - Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas
FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FT - Fischer-Tropsch
GAO - *United States Government Accountability Office*
GEE - Gases responsáveis pelo efeito estufa
GVces - Centro de Estudos em Sustentabilidade
HEFA - *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*
HTL - *Hydrothermal Liquefaction*
IATA - Associação Internacional de Transporte Aéreo
ICAP - *International Carbon Action Partnership*
ICAO - Organização da Aviação Civil Internacional
ICCT - Conselho Internacional de Transporte Limpo
ICSA - *International Coalition for Sustainable Aviation*
IEA – *International Energy Agency*
IMO - Organização Marítima Internacional
IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável
MBM - Medidas baseadas em mercado
MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME - Ministério de Minas e Energia
OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU - Organização das Nações Unidas
QAV - Querosene de aviação
RFS - *Renewable Fuel Standard*

RIN - *Renewable Identification Number*

RPK - *Revenue Passenger Kilometer*

SPK - *Synthesized Paraffinic Kerosene*

UE - *União Europeia*

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

WRI - *World Resources Institute*

1. Introdução

Se a indústria de aviação fosse um país, estaria na 20ª posição mundial em termos de Produto Interno Bruto (PIB), gerando US\$ 704,4 bilhões em PIB por ano. Em 2036, estima-se que a aviação contribuirá com US\$ 1,5 trilhão ao PIB mundial (*Air Transport Action Group* - ATAG, 2018a). No Brasil, a aviação e o turismo induzido por essa atividade geram 1,1 milhão de empregos e contribuem com US\$ 32,9 bilhões ao PIB, valor equivalente a 1,4% do PIB do país (IATA, 2017a).

A indústria aérea mundial consumiu 341 bilhões de m³ (ou cerca de 6 milhões de barris por dia) de querosene de aviação (QAV) em 2017 (IATA, 2018a). No mesmo ano, a aviação civil mundial emitiu, aproximadamente, 859 milhões de toneladas de CO₂, o que representa algo em torno de 2% das emissões provocadas pelo homem (ATAG, 2018a).

Segundo a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, 2016), as aeronaves atuais são cerca de 80% mais eficientes em relação ao uso de combustível por passageiro-km do que na década de 1960. Tais níveis de eficiência foram alcançados com mudanças no *design* das aeronaves, assim como melhorias incrementais no *design* e na operação dos motores (SCHLUMBERGER e WANG, 2012).

O peso dos custos com combustíveis no custo operacional das companhias aéreas é o principal incentivo para que a indústria de aviação invista em eficiência energética (ATAG, 2018). O combustível de aviação representou, aproximadamente, 21% dos custos operacionais das empresas aéreas, em 2017, segundo a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, 2018a). No Brasil, o custo de combustíveis tem um impacto ainda maior. De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), os combustíveis e lubrificantes mantiveram-se como o principal item de custos e despesas de serviços aéreos, representando 33% dos custos e despesas de voo, em média, em 2016.

O consumo de combustível por passageiro-km foi reduzido em, aproximadamente, 45% entre 1968 e 2014 (KHARINA e RUTHERFORD, 2015). Há uma relação direta entre a redução do consumo de combustível e o desempenho ambiental da aeronave, de forma que cada tonelada de combustível economizado evita a emissão de, aproximadamente, 3,15 toneladas de CO₂ (ATAG, 2010). Contudo, ainda que o aumento de eficiência no consumo de combustível tenha contribuído para a redução das emissões de GEE por aeronave, o aumento da demanda por transporte aéreo de passageiros previsto para as próximas décadas refletirá no aumento dos impactos ambientais causados pelo setor.

Segundo as projeções da IATA (2017b), o número de passageiros transportados, em 2036, deve chegar a 7,8 bilhões, quase o dobro dos 4,1 bilhões de passageiros em 2017. Em 2017, a IATA estimou um crescimento anual de 3,6% na demanda por transporte aéreo global para os próximos quase vinte anos, o que pode até ser considerada uma projeção conservadora, considerando que a demanda cresceu 7,4%, entre 2015 e 2016, e 8,1% entre 2016 e 2017, segundo dados da própria associação (IATA, 2018a). No Brasil, a demanda por transporte aéreo cresceu 172% entre 2000 e 2017, em termos de quantidade de passageiros-quilômetros pagos transportados (RPK), segundo dados da ANAC (2017; 2018a). O país está em 10º lugar na quantidade de passageiros, com 96 milhões de passageiros transportados em voos domésticos e internacionais, em 2016, de acordo com dados do Banco Mundial (SCHLUMBERGER e WANG, 2012).

O consumo de combustível de aviação aumentou mais de 4%, em 2016 e 2017, e deve crescer em mais de 2% ao ano até 2025, de acordo com (IHS Markit, 2018). A partir de 2015, (IHS Markit, 2018) estima que a taxa de crescimento da demanda pelo combustível se reduza para 1% ao ano, até 2040, como resultado de ganhos de eficiência no setor aéreo. No Brasil, foram consumidos 6,7 bilhões de litros de combustível de aviação, em 2017, de acordo com dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2018a), e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017) estima um crescimento médio de 2,6% ao ano para a demanda por QAV no país, de 2018 até 2026.

No sentido de reduzir as contribuições do setor aéreo para as mudanças climáticas globais, os membros da IATA se comprometeram, em 2009, com metas ambiciosas de redução de emissões de GEE, baseadas na melhoria da eficiência de consumo de combustível, crescimento neutro em carbono e redução de 50% das emissões líquidas em 2050, em relação aos níveis de 2005 (IATA, 2013). Para alcançar tais metas, a associação estabeleceu uma estratégia baseada em quatro pilares: tecnologias para fuselagem e motores, uso de biocombustíveis, eficiência em operações de voos, melhorias do espaço aéreo e da infraestrutura aeroportuária, e o uso de instrumentos econômicos.

O Acordo de Paris, que entrou em vigor em 2016, propõe a manutenção da temperatura global em níveis abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, sugerindo que sejam empenhados esforços para que o aumento da temperatura global não ultrapasse 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (*United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC, 2018). As emissões do setor aéreo têm origem, predominantemente, em voos internacionais (62%), e tais emissões não são contabilizadas nas emissões nacionais de nenhum país (CAMES *et al.*, 2015). As emissões decorrentes do tráfego aéreo internacional estão sob a responsabilidade da ICAO (ICAO, 2016), organização que, assim como a IATA, estabeleceu um conjunto de medidas voltadas para a redução das emissões da aviação, entre elas o *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA), uma medida de compensação global de emissões. A medida determina que a indústria de aviação civil internacional, por meio dos países signatários (de forma voluntária), deverá a neutralizar ou compensar suas emissões de GEE acima dos níveis de 2020 (ICAO, 2018a). A ideia do CORSIA é associar medidas de eficiência com o uso de biocombustíveis, essencialmente pela compra de créditos de carbono, para atingir o objetivo de crescimento neutro em carbono a partir de 2020.

MAWHOOD *et al.* (2016) indicam que as aeronaves modernas são altamente eficientes, logo as melhorias tecnológicas tendem a ser incrementais, e avanços na gestão do tráfego aéreo e na eficiência de motores têm um potencial de redução das emissões da aviação estimado em 0,8% ao ano até 2050. Assim, essas reduções não devem ser suficientes para compensar o aumento da demanda por transporte aéreo. Ou ainda, a

maior parte das reduções de emissões terá que advir da utilização de combustíveis líquidos de baixo carbono. IATA (2015) também avalia que, embora os avanços tecnológicos sejam importantes para atingir as metas de crescimento neutro em carbono, a partir de 2020, os combustíveis sustentáveis de aviação têm um papel crucial nesse sentido, por ajudar a desvincular as emissões do crescimento do setor. Isto quer dizer que, com o uso de biocombustíveis de aviação, o tráfego aéreo pode aumentar sem que as emissões aumentem em igual proporção.

A indústria de aviação é altamente dependente de combustíveis fósseis devido à ausência de alternativas para aeronaves que voam longas distâncias. Em um horizonte de tempo de 30 a 40 anos, novos combustíveis e fontes de energia, como a solar, e aeronaves movidas a energia elétrica devem fazer parte da indústria de aviação, mas serão necessários esforços para desenvolver essas tecnologias, que estão em escala de laboratório. Os biocombustíveis, portanto, devem permanecer como a principal alternativa sustentável aos combustíveis fósseis por, pelo menos, duas a três décadas (IATA, 2015). Tal fato é ainda mais verdadeiro, quando se consideram percursos longos, a necessidade de reduzir a ocupação da aeronave com o armazenamento do combustível, e o imperativo de se garantir o voo seguro sob qualquer condição operacional (combustível especificado para critérios de segurança bem restritos - DE CARVALHO, 2017).

Assim, o requisito mais importante dos biocombustíveis de aviação é que estes sejam *drop-in*, o que significa que devem ser totalmente compatíveis e miscíveis com o combustível convencional – ou serem passíveis de uso no sistema logístico e de consumo de combustíveis existente. Logo não podem requerer adaptações nas aeronaves, no motor ou na infraestrutura de suprimento de combustível, e o seu uso não deve implicar em restrições no que se refere à utilização da aeronave.

O bioquerosene pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas, entre elas amidos, açúcares, álcoois, biomassa celulósica, óleos e gorduras, e materiais residuais. Até 2018, cinco rotas de produção estavam aprovadas pela *American Society for Testing and Materials* - ASTM, e diversas outras estavam em processo de certificação ou em fase

de estudo (*Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative* - CAAFI, 2018). A maior parte dos biocombustíveis de aviação produzidos em 2017 foi derivada de matérias-primas oleaginosas, como óleos vegetais, gorduras animais e óleo de cozinha residual, segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2017).

DE CARVALHO (2017) avaliou as fontes de resíduos de biomassa com maior potencial para a produção de bioenergia no Brasil e a viabilidade da sua utilização para a produção de bioquerosene de aviação, concluindo haver um potencial energético expressivo, concentrado, principalmente, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Ademais, CORTEZ *et al.* (2014) consideram que as experiências brasileiras no desenvolvimento de matérias-primas para a produção de biocombustíveis mostraram a importância fundamental da larga escala produtiva para a competitividade econômica com os combustíveis fósseis. Nesse sentido, o Brasil acumulou experiência técnica, tanto agrícola quanto industrial, além de possuir vasta disponibilidade de terra cultivável, fatores que tornam o país um local favorável ao desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene.

Os biocombustíveis de aviação são tecnicamente viáveis e estão se aproximando do estágio comercial, segundo GEGG, BUDD e ISON (2014). Nos últimos dez anos, esses biocombustíveis passaram de uma relativa obscuridade para um ponto em que a produção por diferentes rotas está certificada para uso comercial em misturas de até 50% no combustível convencional, e diversas parcerias comerciais entre companhias aéreas e produtores de biocombustíveis foram estabelecidas. Contudo, apesar de inúmeros voos testes bem-sucedidos, os biocombustíveis de aviação ainda não são amplamente comercializados. GEGG, BUDD e ISON (2014) avaliam que a sua comercialização é limitada por fatores como o alto custo de produção, a disponibilidade restrita de matérias-primas adequadas, incertezas a respeito da definição de critérios de sustentabilidade, e uma notável falta de políticas de incentivo, tanto nacionais quanto internacionais, aos biocombustíveis de aviação.

De fato, os estudos a respeito das possibilidades de introdução deste novo biocombustível no Brasil devem considerar, além das questões tecnológicas

relacionadas à sua produção, como a seleção das matérias-primas mais propícias e das rotas de produção mais convenientes para o caso brasileiro, aspectos econômico-sociais que se associam a impactos nas empresas aéreas e nos custos ao usuário do transporte aéreo. Com efeito, a indústria de aviação civil brasileira vem enfrentando resultados econômicos negativos há seis anos, em função de fatores internos, como a recessão econômica, que impacta na redução da demanda por transporte aéreo, e fatores externos, entre eles o preço internacional do petróleo.

Assim, o desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene no Brasil demanda esforços de políticas públicas que promovam o aumento da escala de produção e, como consequência, a redução dos custos de investimento e operacionais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar propostas de políticas públicas voltadas para a introdução do bioquerosene no transporte aéreo de passageiros no Brasil, com foco no desenvolvimento de uma indústria deste biocombustível no país. O enfoque escolhido para este estudo, com a sugestão de instrumentos políticos, foi pouco abordado na literatura e tem grande utilidade para os gestores públicos e para as empresas aéreas, as principais interessadas e promotoras de mudanças, dado que são as principais consumidoras de combustível de aviação. Os trabalhos a respeito dos biocombustíveis de aviação voltam-se, principalmente, para aspectos técnicos do seu processo de produção, efeitos em termos de redução de emissões em comparação ao querosene fóssil, e para avaliações econômicas, sendo pouco expressiva a quantidade de estudos voltados para a estruturação de políticas públicas aplicadas ao bioquerosene.

O trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2, serão apresentados e discutidos os compromissos internacionais de redução de emissões assumidos pela indústria de aviação civil e as suas estratégias para alcançar as metas propostas; no capítulo 3 será apresentada uma descrição da indústria de transporte aéreo de passageiros no Brasil, com o objetivo de compreender a sua capacidade em suportar um aumento de custos associado à introdução do bioquerosene; no capítulo 4, serão discutidas as opções de políticas de mitigação de emissões de GEE com ênfase no incentivo ao desenvolvimento de biocombustíveis; no capítulo 5, são apresentadas

propostas de políticas voltadas para a introdução do bioquerosene na aviação brasileira;
e o capítulo 6 conterá as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2. A indústria de aviação civil internacional e os compromissos internacionais de redução de emissões

A indústria de aviação global transportou 4,1 bilhões de passageiros, em 2017, e a demanda por transporte aéreo foi equivalente a 7,7 trilhões, em termos de RPK (passageiros-quilômetros pagos transportados) (IATA, 2018a). A Figura 1 mostra a evolução de alguns dados do transporte aéreo mundial, incluindo voos domésticos e internacionais, entre 2004 e 2017. Nesse período, o número de passageiros da aviação cresceu 111%, a demanda por transporte aéreo (RPK) cresceu 113% e o consumo de combustível por RPK caiu 36%. Após o setor ter sido impactado pela crise financeira internacional de 2008, a demanda por transporte aéreo cresceu, em média, 7% ao ano, entre 2010 e 2017. Segundo as projeções da IATA (2017b), o número de passageiros transportados, em 2036, deve chegar a 7,8 bilhões, quase o dobro dos 4,1 bilhões de passageiros em 2017, e a demanda por transporte aéreo global deve crescer a taxas anuais de 3,6% nos próximos quase vinte anos.

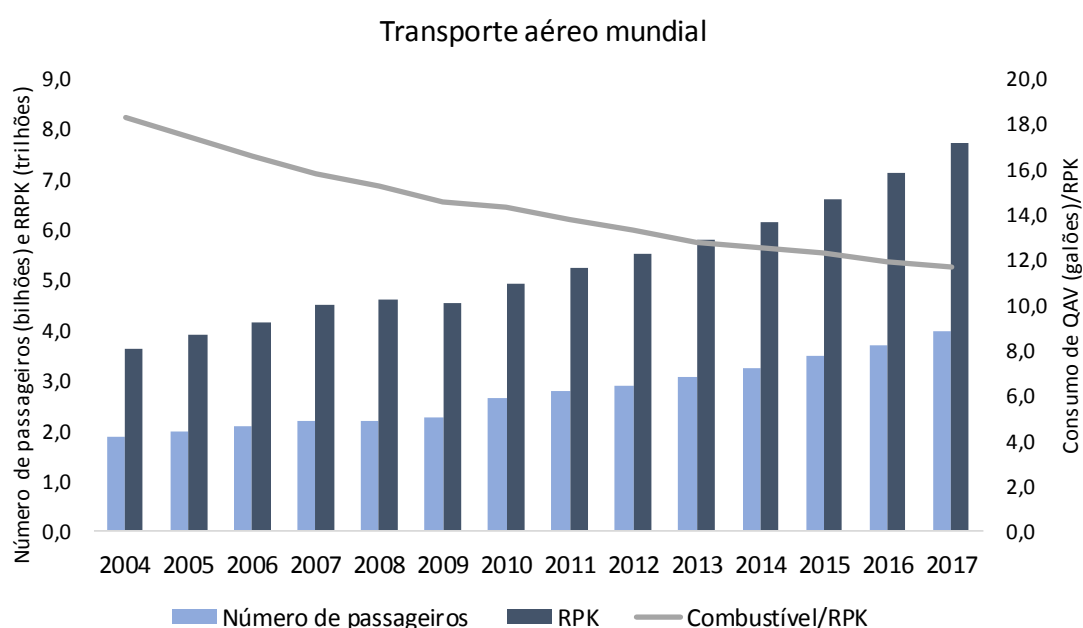


Figura 1: Evolução do transporte aéreo mundial, de 2004 a 2017
Fonte: Elaboração própria a partir de dados de IATA (2018a) e ICAO (2018b)

Em 2017, a indústria aérea mundial consumiu 341 bilhões de litros de QAV (IATA, 2018a), e foi responsável pela emissão de 859 milhões de toneladas de CO₂, o que representa algo em torno de 2% das emissões provocadas pelo homem (ATAG, 2018a). Enquanto a demanda por transporte aéreo cresceu 113%, entre 2004 e 2017, o consumo de combustível aumentou 36% e as emissões de CO₂ aumentaram 37%, no mesmo período. A Figura 2 apresenta a variação percentual da demanda por transporte aéreo (RPK), do consumo de QAV e das emissões de CO₂, em relação ao ano de 2004, utilizado como ano-base, mostrando o descolamento entre o crescimento da demanda e o comportamento do consumo de QAV e das emissões associadas.

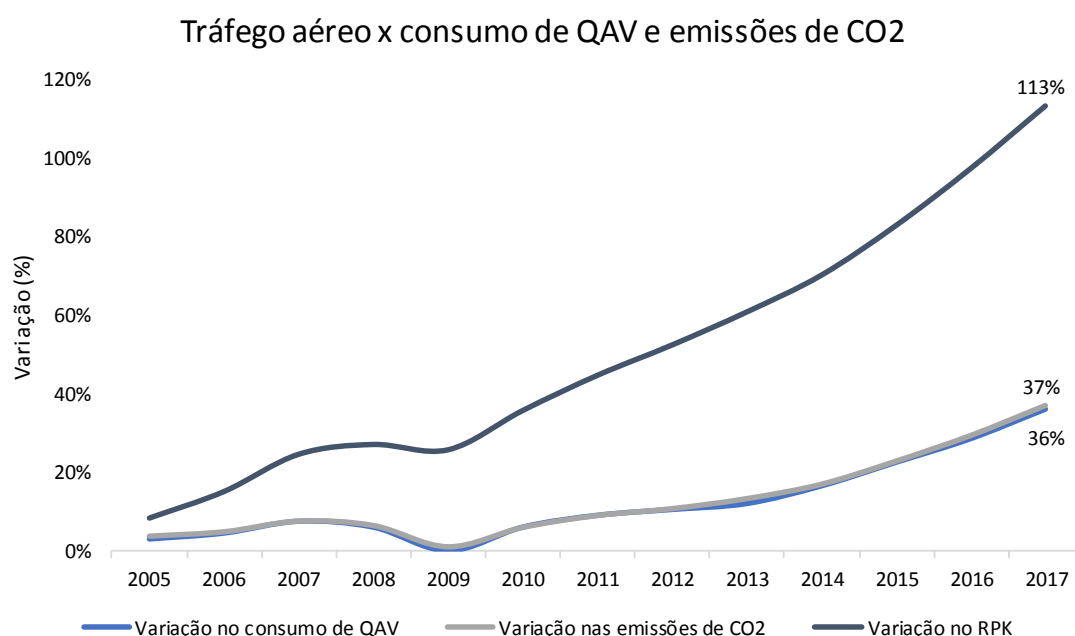


Figura 2: Variação na demanda por transporte aéreo, no consumo de QAV e nas emissões de CO₂, entre 2004 e 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de IATA (2018a) e ICAO (2018b)

Ainda que o setor venha aumentando a sua eficiência em termos de consumo de combustível a cada ano, e que o ritmo de crescimento das emissões de CO₂ não seja tão intenso quanto o aumento da demanda por transporte aéreo, os impactos ambientais do setor aéreo não são desprezíveis. As projeções apresentadas para o futuro do setor corroboram com a necessidade de ações voltadas para a redução de tais impactos.

De acordo com dados de IATA (2018), dos 4,1 bilhões de passageiros que utilizaram o serviço de transporte aéreo, em 2017, 1,7 bilhão realizaram voos internacionais, o que corresponde a 40%. Em termos de RPK, os voos internacionais representaram 63% da demanda total de 7,7 trilhões, em 2017. A maior parte das emissões do setor aéreo têm origem, portanto, em voos internacionais e essas emissões não são contabilizadas nas emissões de nenhum país (CAMES *et al.*, 2015), estando sob a responsabilidade da ICAO (ICAO, 2016).

Apesar de a aviação internacional não estar contemplada no âmbito do Acordo de Paris, celebrado na COP 21, em 2015, entidades internacionais, como a IATA e a ICAO, se comprometeram com metas ambiciosas de redução de emissões de GEE. Segundo (ARVANITAKIS e DRANSFELD, 2017), com o Acordo de Paris, pela primeira vez na história, tanto países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento concordaram com uma abordagem multilateral com o objetivo de reduzir as emissões de GEE, de forma que a temperatura global não ultrapasse 2°C acima dos níveis pré-industriais. Contudo, o acordo não inclui uma definição a respeito das emissões provenientes dos setores internacionais marítimo e aéreo, os quais são tratados separadamente pela Organização Marítima Internacional (IMO) e pela ICAO.

Os membros da IATA, 290 companhias aéreas em 120 países (IATA, 2018b), se comprometeram com as seguintes metas de redução de emissões, em 2009, segundo IATA (2013):

- Aperfeiçoar a eficiência de consumo de combustíveis (por meio de melhorias em tecnologia de aeronaves, operações e infraestrutura) em 1,5% ao ano, de 2009 a 2020;
- Limitar as emissões de CO₂ a partir de 2020 (crescimento neutro em carbono);
- Reduzir as emissões líquidas de dióxido de carbono em 50% até 2050, relativamente aos níveis de 2005.

Segundo IATA (2013), de forma a atingir essas metas (Figura 3), foi estabelecida uma estratégia baseada em quatro pilares:

- 1- Tecnologia para fuselagem e motores, uso de biocombustíveis
- 2- Eficiência em operações de voos
- 3- Melhorias do espaço aéreo e da infraestrutura aeroportuária
- 4- Instrumentos econômicos



Figura 3: Metas de redução de emissões da IATA
Fonte: Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR, 2017a)

No âmbito da ICAO, entidade que faz parte da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2013, os seus Estados-membros (192 países em 2018 (ICAO, 2018)) estabeleceram como objetivos o aumento da eficiência de consumo de combustível em 2% ao ano e o crescimento neutro em carbono a partir de 2020 (ICAO, 2016). Para alcançar tais metas, decidiram desenvolver um conjunto de medidas voltadas para a redução das emissões, com estratégias semelhantes às propostas pela IATA, incluindo o desenvolvimento de novas tecnologias de aeronaves, o uso de combustíveis sustentáveis alternativos de aviação, a melhoria da eficiência de operações, e o uso de medidas econômicas ou medidas baseadas em mercado (MBM). Entre as medidas econômicas propostas estão tributos, sistemas de comercialização de emissões e mecanismos de compensação de emissões de GEE (ICAO, 2017).

Cabe, aqui, uma explicação a respeito dos termos “medidas econômicas” e “medidas baseadas em mercado” utilizados pela ICAO, os quais não são corretamente

empregados. Tais termos referem-se aos instrumentos de política que fazem uso de preços ou outras variáveis econômicas para promover incentivos à redução das emissões, conforme será visto em mais detalhes no Capítulo 4. Tratam-se de formas de colocar em prática medidas de eficiência energética, utilizando instrumentos baseados em preço ou mercado. Apesar de os termos não serem considerados corretos, serão empregados neste trabalho por serem reconhecidos nas publicações da indústria de aviação.

Nesse sentido, a ICAO lançou, em 2016, uma medida de compensação global denominada CORSIA, como estratégia para alcançar a meta de crescimento neutro em carbono a partir de 2020. A medida determina que a indústria de aviação civil internacional, por meio dos países signatários (de forma voluntária), deverá a neutralizar ou compensar suas emissões de GEE acima da linha de crescimento neutro. Até outubro de 2018, 74 países, representando mais de 75% das emissões da aviação internacional, declararam a intenção em participar desse mecanismo de compensação de emissões (ICAO, 2018a), que terá como linha de base as emissões de 2019 e 2020. O CORSIA será discutido em maiores detalhes mais adiante.

Conforme mencionado, as associações internacionais IATA e ICAO elaboraram conjuntos semelhantes de estratégias para reduzir as emissões de GEE da aviação civil internacional e cada estratégia contribuirá com uma parcela das reduções pretendidas, conforme mostra a Figura 4.

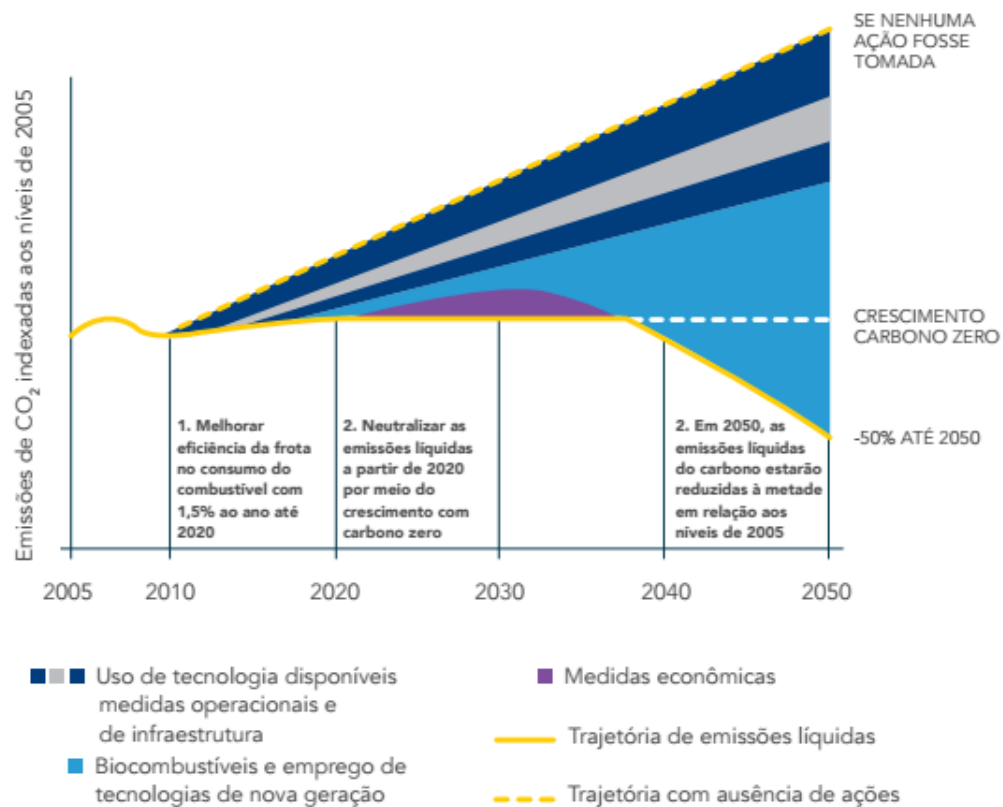


Figura 4: Emissões de CO₂ da aviação internacional, de 2005 a 2050, com a participação estimada de cada estratégia de redução
Fonte: ABEAR (2017a)

Neste capítulo, cada um dos seguintes conjuntos de medidas será avaliado em termos de perspectivas de redução de emissões, estágio de desenvolvimento tecnológico e custos envolvidos:

- Tecnologias disponíveis, medidas operacionais e de infraestrutura
- Medidas econômicas
- Biocombustíveis

2.1. Tecnologias disponíveis, medidas operacionais e de infraestrutura

Os custos com combustível representam uma parcela relevante dos custos operacionais das empresas aéreas. Em 2017, os gastos com combustíveis corresponderam a 33% dos custos operacionais, segundo ATAG (2018). Esse fator é um forte incentivo para que as

companhias aéreas e os fabricantes de motores e aeronaves invistam em aumento de eficiência das operações e das aeronaves, no que se refere ao consumo de combustíveis. A aviação comercial é reconhecida por produzir contínuas melhorias de eficiência pela rápida adoção de tecnologias e design que reduzem o consumo de combustível, como uma resposta natural ao aumento de preço do combustível (RUTHERFORD e ZEINALI, 2009).

A melhoria da eficiência energética das aeronaves, além de promover a redução de custos, dado que diminui o consumo de combustível, também contribui para a redução das emissões de GEE. Segundo ICAO (2016), além da evolução tecnológica da indústria, os avanços alcançados nas operações e na infraestrutura aeroportuária foram de extrema importância para aumentar eficiência do setor.

KHARINA e RUTHERFORD (2015) estudaram a eficiência energética de aeronaves comerciais, de 1968 a 2014, e mostraram que o consumo de combustível por passageiro-km foi reduzido em, aproximadamente, 45% nesse período, conforme mostra a Figura 5. No estudo, o ano de 1968 foi utilizado como base de comparação. As duas curvas apresentadas envolvem metodologias diferentes: a curva identificada como “Métrica ICAO” considera apenas o consumo de combustível na fase de cruzeiro¹; enquanto a curva identificada como “Combustível/pkm” leva em consideração todo o combustível consumido, incluindo as fases de taxiamento, decolagem, cruzeiro, aproximação e pouso. A maior taxa de redução do consumo de combustível foi observada na década de 1980, em decorrência do investimento agressivo em novas tecnologias e modelos de aeronaves mais eficientes. O estudo também mostra que, a partir do ano 2000, os ganhos de eficiência vêm ocorrendo em um ritmo mais lento. Segundo os autores, os principais motivos para tal desaceleração são a falta de novos modelos de aeronaves mais eficientes e o aumento da prevalência de uso de aviões regionais, os quais, em geral, são menos eficientes do que aeronaves maiores.

¹ A fase *Cruise* ou *Cruzeiro* é definida como a etapa de voo realizada pelas aeronaves em altitudes superiores aos 914,4 metros (ANAC, 2014).

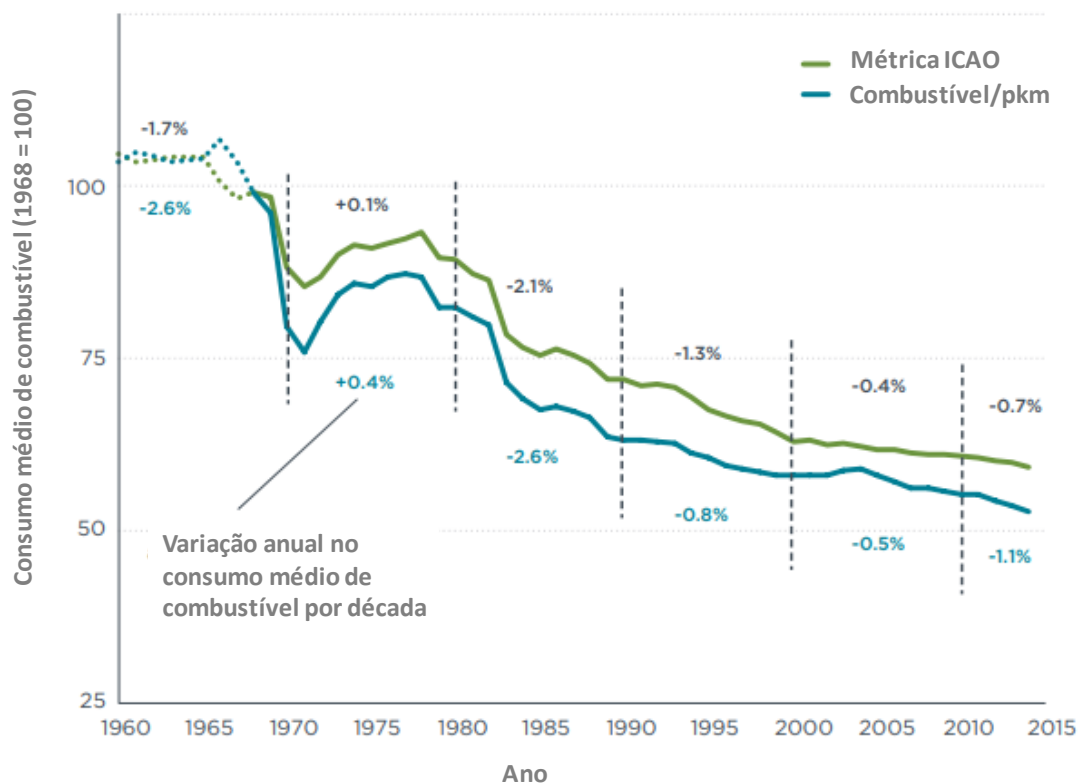


Figura 5: Consumo médio de combustível por passageiro-km em novas aeronaves comerciais, de 1960 a 2014 (1968=100)

Fonte: Adaptado de KHARINA e RUTHERFORD (2015)

Segundo SCHLUMBERGER e WANG (2012), os ganhos de eficiência a partir da década de 1960 foram alcançados com mudanças radicais no *design* de motores, associadas com melhorias incrementais no *design* e operação de motores a cada ano. Na metade da década de 1970, maiores reduções de consumo de combustível foram alcançadas com o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de voos que definem automaticamente a velocidade de cruzeiro mais eficiente e as configurações de potência dos motores, baseados no consumo de combustível e em outros custos operacionais envolvidos. Mais recentemente, as companhias aéreas têm se utilizado de diversos procedimentos relacionados à operação, manutenção e planejamento para garantir que as suas aeronaves voem em níveis ótimos de eficiência.

A seguir serão apresentadas medidas de ganhos de eficiência que deverão ser implementadas na indústria nos próximos anos, no que se refere às tecnologias de aeronaves, medidas operacionais e de infraestrutura.

2.1.1. Ganhos de eficiência promovidos pelo desenvolvimento tecnológico

Os novos modelos de aeronaves são, em média, cerca de 15 a 20% mais eficientes do que os modelos que eles substituem (ATAG, 2015). Uma vez que um modelo novo passa a operar, ele pode promover um profundo impacto na pegada de carbono do setor, conforme foi visto no histórico do setor. Diversos avanços tecnológicos, incluindo motores mais eficientes, que consomem menos combustível, e o uso de materiais mais leves, permitirão que a eficiência da aviação continue a aumentar (ATAG, 2017).

O aumento de eficiência relacionado ao uso de novas tecnologias está totalmente relacionado ao investimento em pesquisa e desenvolvimento. ATAG (2018b) cita que fabricantes de aeronaves e motores gastam um valor estimado em US\$ 15 bilhões a cada ano em pesquisa e desenvolvimento, e que as companhias aéreas investiram US\$ 1 trilhão na aquisição de mais de 12.200 novas aeronaves, entre 2009 e 2016. Na próxima década, as empresas aéreas deverão investir US\$ 1,3 trilhão em novas aeronaves, de acordo com IATA (2018c).

Com a introdução de novas aeronaves, as emissões das companhias aéreas dos Estados Unidos reduziram em 8%, enquanto o tráfego aéreo aumentou em 24% (ATAG, 2018b). Na Europa, diversos fatores, incluindo novas tecnologias e a gestão do tráfego aéreo, contribuíram para manter as emissões, em 2014, nos mesmos níveis de 2005, apesar do crescimento de 25% no tráfego de passageiros (EASA, EEA e EUROCONTROL, 2016).

A média anual de ganhos de eficiência deve superar a meta de 1,5%, de 2009 a 2020, estabelecida pela IATA. Segundo ATAG (2018b), a média anual de aumentos de eficiência da frota, entre 2009 e 2016, foi de 2,1%. Para 2018, a IATA (2017c) estima que a eficiência aumentará em 1,5% em 2018, em função da entrega de novas aeronaves e de expectativas de aumentos de preços do combustível.

Em relação às expectativas de ganhos de eficiência futuros, IATA (2013) avalia que o cumprimento dos objetivos depende fortemente do desenvolvimento e implementação de novas tecnologias pelos fabricantes de aeronaves, motores e equipamentos. Os

benefícios ambientais dessas tecnologias, pelo aumento da eficiência energética e consequente redução das emissões de carbono, serão efetivos primordialmente com a modernização da frota e, em menor escala, com *retrofits* em aeronaves já operantes. Um dos principais desafios é selecionar as tecnologias apropriadas, uma vez que tal seleção se baseia, muitas vezes, em fatores incertos, como: estágio atual de desenvolvimento, benefícios, riscos e custos de pesquisa e desenvolvimento.

Em um estudo aprofundado a respeito das diversas possibilidades de novas tecnologias capazes de aprimorar a eficiência energética das aeronaves, a IATA (2013) avaliou desenvolvimentos nas áreas de aerodinâmica, materiais e estruturas, propulsão e sistemas de equipamentos. As tecnologias foram classificadas considerando o horizonte de tempo para a implementação, da seguinte forma:

- Adaptações (*retrofits*) e atualizações (*upgrades*): tecnologias que podem ser implementadas em aeronaves produzidas atualmente, no curto prazo
- Novos modelos: tecnologias a serem implementadas em novos projetos de aeronaves
- Radicais: tecnologias a serem aplicadas em configurações de aeronaves completamente novas

O estudo da IATA (2013), denominado de *Roadmap* Tecnológico, selecionou 16 tecnologias consideradas mais relevantes e robustas, a partir das quais foram calculados os potenciais de redução de emissões de CO₂, levando em conta diversos cenários no curto e no médio prazo. Entre elas estão as tecnologias para controle de fluxo, o uso de aeroestruturas avançadas de alumínio, o uso de ligas de lítio e alumínio e o desenvolvimento de motores avançados. O *Roadmap* não incluiu avaliações de tecnologias consideradas radicais, dada a dificuldade em modelar configurações para as quais não se tem qualquer tipo de base de comparação. As tecnologias foram agrupadas, então, nas seguintes categorias:

- 1- Tecnologias que podem ser adaptadas a aeronaves disponíveis atualmente
- 2- Tecnologias que podem ser integradas a aeronaves em produção atualmente

- 3- Tecnologias que podem ser integradas a novos modelos de aeronaves antes de 2020
- 4- Tecnologias que podem ser integradas a novos modelos de aeronaves após 2020
- 5- Tecnologias disruptivas após 2030 (essa categoria foi incluída devido às mudanças anunciadas pelas fabricantes de aeronaves, relacionadas à substituição dos modelos de curto alcance após 2025)

Os resultados mostraram que os percentuais de redução de emissões de CO₂ podem chegar a valores de 12%, no caso de adaptações dos modelos existentes atualmente, até 40%, para novos modelos após 2020. Foi estabelecida, ainda, uma correlação entre o potencial de eficiência em termos de combustível das novas tecnologias e os seus respectivos custos estimados de desenvolvimento, considerando a magnitude dos investimentos necessários em pesquisa e desenvolvimento até que a tecnologia esteja em operação, e o horizonte de tempo para a introdução das tecnologias. O resultado obtido (Figura 6) mostrou que a categoria de tecnologias a serem implementadas após 2020 apresentam o maior potencial de redução de emissões e também envolvem os maiores custos com P&D, chegando a US\$ 3,5 bilhões.

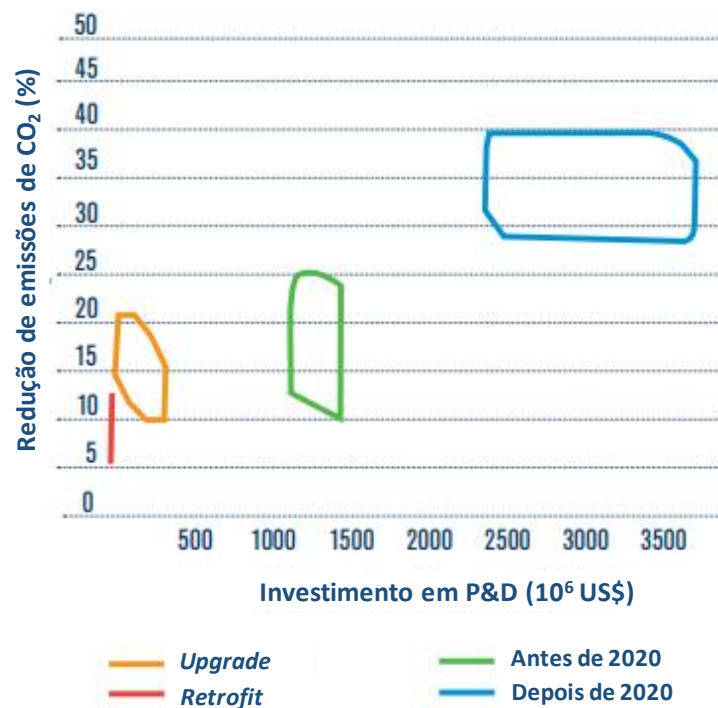


Figura 6: Intervalo de potencial de redução de CO₂ como função de investimentos em combinações de tecnologias relevantes, em diferentes períodos de tempo
 Fonte: Adaptado de IATA (2013)

O uso de combinações de tecnologias, unindo inovações nos campos da aerodinâmica, materiais e motores podem resultar em reduções ainda maiores, porém os gastos e os riscos aumentam. De acordo com IATA (2013), para que se possa obter os benefícios potenciais de redução de emissões proporcionadas por uma nova tecnologia, é fundamental que os fabricantes sejam capazes de incorporar tal tecnologia em novos modelos de aeronaves dentro do período de tempo necessário para o desenvolvimento da aeronave. Somente as tecnologias que alcancem a maturidade necessária nos momentos críticos de decisão, poderão ser incluídas na nova configuração da aeronave; caso contrário, os resultados em termos de redução de emissões serão adiados por muitos anos.

A Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA, 2018) lançou, em 2010, o *Continuous Lower Energy, Emissions and Noise* (CLEEN), o seu principal programa com viés ambiental, com o objetivo de acelerar o desenvolvimento de novas aeronaves e tecnologias de motores, além de combustíveis alternativos. Durante os cinco anos de duração do CLEEN I, a FAA investiu US\$ 125 milhões e empresas participantes investiram mais US\$ 125 milhões. Em 2015, teve início uma segunda fase do programa, denominada CLEEN II, com conclusão em 2020. A FAA planeja investir US\$ 100 milhões no CLEEN II e estima uma participação equivalente das empresas participantes. Em relação às metas propostas, o CLEEN I determinou a redução de 33% do consumo de combustível, entre 2010 e 2015, e, no CLEEN II, a meta aumentou para 40% de redução no consumo de combustível, entre 2015 e 2020. MAVRIS, TAI e PERULLO (2016) avaliaram algumas das tecnologias desenvolvidas no âmbito do programa CLEEN I e identificaram que elas poderiam promover reduções do consumo de combustível em 2% ao ano, de 2025 a 2050. As melhorias tecnológicas avaliadas enquadram-se em categorias de *retrofit* e *upgrade*, mencionadas no estudo da IATA (2013), portanto a ordem de grandeza dos custos envolvidos está de acordo com o indicado pela IATA.

No estudo da consultoria TECOLOTE (2015), foram avaliados os custos e benefícios da introdução de tecnologias de redução de emissões de CO₂ em novas aeronaves. Os resultados indicaram que o consumo de combustível das novas aeronaves pode ser reduzido em, aproximadamente, 25%, em 2024, e 40%, em 2034, de forma econômica.

O desenvolvimento de novos modelos de aeronaves mais eficientes, a partir de melhorias incrementais, aumenta os custos de fabricação e desenvolvimento, enquanto proporciona economias relacionadas ao consumo de combustível e à manutenção. Os custos de desenvolvimento de dois novos modelos de aeronaves da Boeing, o 737-800 e o 777-200LR, foram estimados em US\$ 5,9 MM e US\$ 17,8 MM, enquanto os custos de aquisição das aeronaves foram estimados em US\$ 98 MM e US\$ 309 MM, respectivamente (valores em US\$ 2013).

Em 2016, a frota de aviões das empresas aéreas brasileiras era composta de 498 aeronaves, segundo dados da ANAC (2017). Supondo que toda a frota fosse substituída pelo novo modelo de aeronave que apresenta o custo de US\$ 98 MM, as empresas aéreas brasileiras teriam que investir, aproximadamente, US\$ 49 Bi. Esse cálculo simplificado tem como objetivo, apenas, apresentar uma estimativa para os custos envolvidos na adoção de uma medida deste tipo pelas empresas aéreas brasileiras como estratégia para a redução das suas emissões. Entre as quatro principais companhias aéreas brasileiras (Latam, Gol, Azul e Avianca), apenas a Azul investiu em P&D em 2017, um valor de R\$ 4,4 MM (ANAC, 2018b).

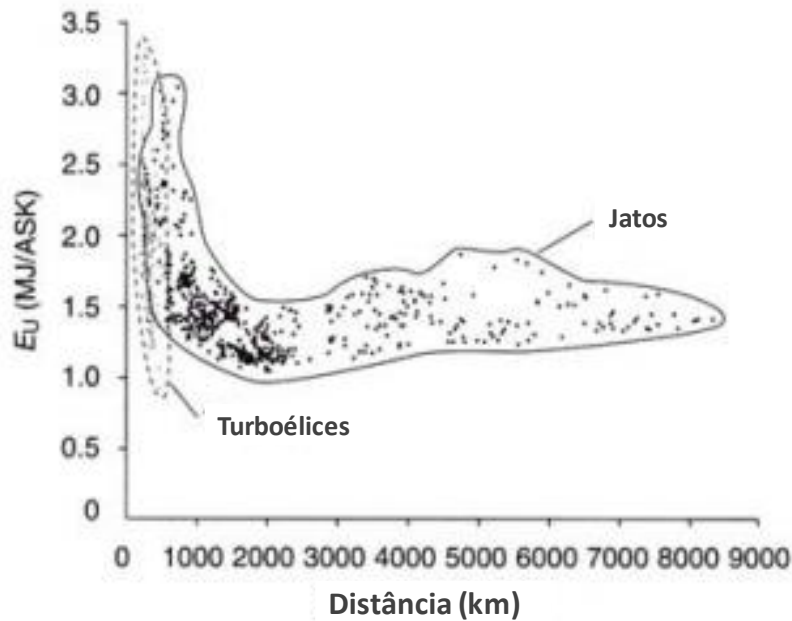
Em resumo, para alcançar a média anual de aumentos de eficiência da frota, de 2,1% entre 2009 e 2016, superando a meta de 1,5% de ganhos de eficiência anuais estabelecida pela IATA, os fabricantes de aeronaves e motores investiram, aproximadamente US\$ 15 bilhões a cada ano em pesquisa e desenvolvimento, e as companhias aéreas gastaram mais de US\$ 1 trilhão com a aquisição de novas aeronaves. Os custos envolvidos no desenvolvimento de novos modelos de aeronaves podem variar de valores inferiores a US\$ 1 MM, quando são realizados *retrofits* de aeronaves, por exemplo, a mais de US\$ 3 Bi, no caso de tecnologias avançadas. Nos próximos anos, as empresas deverão investir US\$ 1,3 trilhão na aquisição de novas aeronaves, portanto, para manter os mesmos níveis de ganhos de eficiência, serão necessários investimentos, pelo menos, da mesma ordem de grandeza dos praticados atualmente em P&D.

2.1.2. Ganhos de eficiência promovidos por melhorias operacionais e de infraestrutura

A qualidade das operações de tráfego aéreo e da infraestrutura aeroportuária também exercem influências significativas na eficiência energética dos voos. Quando a aeronave se desloca em solo fazendo trajetos não relacionados com o voo, há um consumo de combustível de forma ineficiente, já que o seu uso não tem como fim o transporte de passageiros ou carga. No ar, também pode haver ineficiências na operação, quando as rotas são mal determinadas, quando a aeronave faz muitos movimentos de subida e descida ou quando fica dando voltas aguardando para aterrissar (“taxiando”), entre outros exemplos (SCHLUMBERGER e WANG, 2012). Quanto melhores forem as operações de tráfego e de infraestrutura, menor será o consumo “extra” de combustível.

Segundo SCHLUMBERGER e WANG (2012), estima-se que até 8% de todo o combustível de aviação sejam desperdiçados em decorrência de rotas aéreas ineficientes às quais as aeronaves são submetidas. Melhorias na gestão de tráfego aéreo proporcionam, no curto prazo, as melhores oportunidades para aprimorar a performance ambiental e de eficiência energética do sistema de transporte aéreo. Entretanto, a eficiência nessa gestão reduzirá significativamente com o aumento do congestionamento causado pelo aumento projetado do tráfego aéreo, a não ser que haja um aumento de capacidade dos aeroportos e do espaço aéreo.

Além disso, voos longos são considerados mais eficientes do que os curtos. De acordo com LEE *et al.* (2004), aeronaves voando distâncias menores do que 1000km utilizam de 1,5 a 3 vezes mais energia por ASK (assentos-quilômetros disponíveis) do que aquelas que voam mais de 1000km. Aeronaves que fazem trajetos regionais, comparadas aos grandes aviões, fazem percursos menores e, por isso, gastam mais tempo em aeroportos taxiando, ociosas e manobrando, e passam uma parcela maior do tempo de voo em estágios não ótimos. A Figura 7 mostra a variação da Energia utilizada (Eu) com a distância percorrida, para aeronaves do tipo turboélice e jato.



*ASK: assentos-quilômetros disponíveis

Figura 7: Variação da Energia utilizada (Eu) com a distância percorrida
 Fonte: Adaptado de LEE *et al.* (2004)

Outro parâmetro importante para medir a eficiência energética de uma aeronave é a taxa de ocupação da mesma, que corresponde à razão entre passageiros-quilômetros transportados (pkm) e assentos-quilômetros disponíveis (ASK), sendo uma medida do quão eficiente é a forma como os assentos são preenchidos. Uma vez que a quantidade de passageiros transportados afeta pouco o consumo de combustível, quanto maior a taxa de ocupação, menor é o consumo por passageiro. SCHLUMBERGER e WANG (2012) mencionam que o uso de energia dos voos depende não apenas da eficiência de consumo de combustível, mas também de fatores como a taxa de ocupação e a duração dos voos.

A melhoria da eficiência da indústria de aviação inclui, ainda, o desenvolvimento tecnológico dos diversos instrumentos e procedimentos utilizados nas operações de tráfego aéreo e da melhoria da infraestrutura de aeroportos.

As melhorias operacionais incluem a redução do uso da unidade auxiliar de potência², procedimentos de voos mais eficientes e medidas de redução de peso (SCHLUMBERGER e WANG, 2012). Segundo ATAG (2018c), as estratégias da indústria para a maximização da eficiência das operações estão voltadas para a forma como as aeronaves são conduzidas quando estão em serviço, e incluem ações que vão desde a redução de pesos desnecessários, com o uso de materiais mais leves em assentos e carrinhos, por exemplo, até a instalação de estruturas para a redução do arraste nas asas das aeronaves e alterações de procedimentos de subida e descida que evitam a utilização de um motor adicional, reduzindo o consumo de combustível.

Já as estratégias relacionadas com a infraestrutura referem-se, principalmente, à melhoria dos sistemas e procedimentos de navegação, garantindo que as aeronaves sejam guiadas de forma eficiente (ATAG, 2018). A operação de aeronaves nos aeroportos representa a maior fonte de consumo de energia em muitos aeroportos e, para aumentar a sua eficiência, devem ser adotadas medidas de otimização do uso de energia das aeronaves durante os procedimentos de pouso e decolagem, incluindo o taxiamento, as filas e o tempo gasto em terminais (SCHLUMBERGER e WANG, 2012).

As emissões da aviação podem ser reduzidas por meio de medidas operacionais, as quais incluem o taxiamento utilizando um único motor, o taxiamento elétrico, o processo de subida contínua durante a decolagem, alcançar a altitude eficiente de cruzeiro mais rápido, e garantir que a aeronave utilize energia elétrica quando estacionadas em aeroportos (ATAG, 2017). Diversas maneiras que possibilitam às aeronaves evitarem o uso dos motores no solo podem ser exploradas, sendo a mais comum o uso de fontes fixas de energia elétrica em aeroportos, nas quais as aeronaves são conectadas à rede elétrica do aeroporto para prover energia a sistemas pré-voos. Muitas companhias aéreas também passaram a utilizar apenas um motor durante o taxiamento (ATAG, 2018c). Outro procedimento que permite a melhoria da eficiência energética e a redução de emissões é o chamado espaço aéreo com rota livre, que, ao contrário das

² A unidade auxiliar de potência, ou APU (*Auxiliary Power Unit*, em inglês) é um equipamento formado por uma turbina a gás conectada a um gerador elétrico, que se destina a suprir energia elétrica e pneumática durante as operações em solo (ANAC, 2014).

rotas fixas, permite que a aeronave planeje rotas mais diretas e eficientes, com trajetórias estáveis, economizando tempo de voo e combustível, reduzindo as emissões. Esse procedimento demanda cooperação entre os países que são sobrevoados, e, na Europa há alguns exemplos de experiências deste tipo (ATAG, 2018c).

Em relação aos investimentos necessários para promover melhorias desse tipo, pode-se analisar dois exemplos de iniciativas que estão em andamento atualmente, nos Estados Unidos e na Europa.

Nos Estados Unidos, a *Federal Aviation Administration* - FAA está implementando o *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), que foi desenhado para promover a transição do sistema de controle de tráfego aéreo em terra para um sistema baseado em navegação por satélite, rastreamento automatizado e comunicação digital. A iniciativa tem como objetivo aumentar a capacidade do transporte aéreo, aumentar a segurança do espaço aéreo, reduzir atrasos, promover economia do consumo de combustível e diminuir os efeitos ambientais adversos provocados pela aviação. O planejamento desse sistema começou em 2003 e, em 2007, foram estimados custos entre US\$ 29 e US\$ 42 bilhões até 2025. Em 2016, a FAA estimou os custos até 2030, com a implementação do programa, dos quais US\$ 20,6 Bi adviriam da própria FAA, enquanto a indústria de aviação precisaria investir US\$ 15,1 Bi. Dos US\$ 20,6 Bi, a FAA indicou já ter gasto US\$ 5,8 bilhões até o ano de 2014 (GAO, 2017).

A Europa também possui um programa voltado para a modernização da infraestrutura de tráfego aéreo, denominado *Single European Sky ATM Research Programme* (SESAR). De acordo com *SESAR JOINT UNDERTAKING* (2018), SESAR é o pilar tecnológico da iniciativa chamada de *Single European Sky* (SES), concentrando a coordenação de todas as atividades de pesquisa e desenvolvimento em gestão de tráfego aéreo da Europa. O programa é financiado com recursos públicos e privados, tendo como membros financiadores a União Europeia, a organização intergovernamental *Eurocontrol* e parceiros da indústria aérea. Segundo EASA, EEA e EUROCONTROL (2016), o SESAR está buscando soluções para melhorar o desempenho do tráfego aéreo, de forma a reduzir o consumo de combustível por voo em, até, 50% até 2035.

De acordo com a ICAO (2017), a implementação do SESAR demandará um investimento total de EUR 3,7 Bi, de 2008 a 2024. Já o investimento global necessário para a expansão e construção de aeroportos é estimado em US\$ 1,8 trilhão, de 2015 a 2030.

2.2. Medidas econômicas

Em adição ao desenvolvimento tecnológico de aeronaves e motores, e às melhorias operacionais e de infraestrutura, outras medidas se fazem necessárias para o atingimento das metas definidas para a aviação internacional. A indústria está empenhando significativos esforços no desenvolvimento e uso de combustíveis alternativos, o que ainda envolve muitos desafios a serem superados, conforme será visto mais adiante neste capítulo. Para ATAG (2018c), apesar dos progressos que estão sendo alcançados no que se refere às estratégias de tecnologias (o que inclui os combustíveis sustentáveis), operações e infraestrutura, para atingir o crescimento neutro em carbono a partir de 2020, outras medidas precisam ser tomadas. Por esse motivo, a indústria, organizada no âmbito da ICAO, optou pela implantação de uma medida baseada em mercado global para o setor de aviação internacional.

A medida, denominada CORSIA, foi definida em 2016, como um mecanismo de compensação global de emissões. O CORSIA determina que a indústria de aviação civil internacional, por meio dos países signatários (de forma voluntária), deverá neutralizar ou compensar as suas emissões de GEE acima dos níveis de 2020 (ICAO, 2018a). Como uma forma de evitar que medidas desencontradas começassem a ser tomadas pelos diferentes países e regiões do mundo, a indústria de aviação optou, de forma pragmática, pelo desenvolvimento de um mecanismo global, definido sob a direção dos estados-membros da ICAO (ATAG, 2015).

O CORSIA foi estruturado para atuar como um instrumento político que permitiria uma resposta imediata à necessidade de estabilização das emissões, de uma forma econômica, para que a aviação internacional cumpra as suas metas (ICAO, 2016).

Segundo ATAG (2015), a indústria de aviação demonstrou preferência pela compensação de carbono como o mecanismo a ser adotado em função de ser mais fácil de implementar, ser mais econômico, e mais rápido, dado o prazo de 2020.

De acordo com ICAO (2015), no contexto da aviação, podem ser adotadas três principais tipos de medidas baseadas em mercado: tributos, sistemas de comércio de emissões e mecanismos de compensação. Os tributos são uma forma de coletar receitas de uma atividade específica e podem ser classificados de duas formas: aqueles em que as receitas provenientes de uma atividade são somadas a outras receitas advindas de outros tributos e aqueles em que as receitas possuem destinação certa (nesse caso, são denominados contribuição), sendo utilizados para investimentos na própria atividade. No sistema de comércio de emissões, é estabelecido um limite máximo de emissões para um país, um estado ou um setor, por exemplo, e são criadas unidades de emissões em quantidade igual ao limite, as quais são distribuídas para os participantes. Cada emissor precisa obter ou adquirir unidades para atender às suas metas e tais unidades podem ser transacionadas. A compensação é um conceito no qual as reduções de emissões ocorrem em outro setor ou local, ao invés de reduzir as emissões do próprio agente emissor. O sistema de compensação pode apresentar um custo menor do que o de redução das emissões do próprio emissor, como é o caso do setor de aviação.

Algumas companhias aéreas já participam de mercados de carbono, como, por exemplo, na União Europeia e na Nova Zelândia, onde sistemas de comércio de emissões estão em vigor. Além disso, algumas empresas se envolvem em mecanismos voluntários de compensação de carbono, tanto em nível corporativo quanto oferecendo oportunidades de compensação para os passageiros (BECKEN e MACKEY, 2017). O caráter internacional da aviação, contudo, torna as iniciativas nacionais ou regionais pouco efetivas em termos de redução de impactos climáticos, sendo necessárias ações de escopo mais amplo, o que implica na necessidade, portanto, de negociações entre os países. Regras diferentes entre os países afetam diretamente as companhias aéreas, criando condições desiguais nas operações. Companhias que fazem determinadas rotas em que estão obrigadas a compensar as emissões incorrem em um custo a mais do que

aquelas que realizam voos que não estão submetidos a mecanismos de compensação, por exemplo, e isso gera distorções no mercado.

Para ATAG (2017), o CORSIA é uma solução econômica em comparação aos custos que resultariam da introdução de múltiplos esquemas nacionais ou regionais, os quais criariam diferentes requerimentos de adequação, além do risco de distorções de mercado. Quando se analisam as operações domésticas, tributos e multas podem representar custos adicionais significativos às companhias aéreas, e podem não resultar nos efeitos ambientais esperados; e sistemas de comércio de emissões domésticos podem ter impactos positivos em termos de redução de emissões, mas, em geral, são complexos.

O CORSIA pretende promover a aquisição, pelas companhias aéreas, de compensações de carbono geradas por outros setores da economia, uma vez que os ganhos de eficiência do próprio setor de aviação não deverão ser suficientes para atingir as reduções de emissões de GEE necessárias ao atingimento das metas propostas. Segundo BECKEN e MACKEY (2017), a indústria de aviação entende que, dado que existem limites para a melhoria da eficiência de uso de combustível, e, considerando perspectivas de crescimento da demanda por transporte aéreo internacional, as metas de mitigação somente deverão ser atingidas por meio de esquemas que permitem a compra de créditos de carbono, em que as emissões de GEE são reduzidas em outros setores, mas os benefícios são acreditados à aviação.

É preciso considerar, contudo, que os mecanismos de compensação envolvem riscos de resultados considerados perversos, incluindo falhas dos projetos em reduzir a concentração atmosférica de GEE, o objetivo principal das atividades de mitigação (MACKEY *et al.*, 2013). A compensação de carbono ocorre quando indivíduos, empresas ou estados, investem em projetos que resultem em uma redução de emissões de GEE que não aconteceria na ausência do projeto (RANGANATHAN, Janet *et al.*, 2004). Isso significa que, para que se tenha uma compensação real das emissões, não se pode considerar projetos que já iriam ocorrer de todo modo, mesmo que não existisse a preocupação climática. Nesse sentido, BECKEN e MACKEY (2017) avaliam que um

conceito fundamental é o de adicionalidade, o qual diferencia as reduções de emissões produzidas por um projeto de compensação daquelas emissões da linha de base de um cenário “*business-as-usual*” sem o projeto.

A seguir, serão apresentados e discutidos dois exemplos de mecanismos baseados em mercado: o da União Europeia, no qual as emissões do setor de aviação já estão incluídas; e o CORSIA, que terá início em 2020.

A) EU ETS (*European Union Emissions Trading System*)

O sistema de comércio de emissões europeu entrou em vigor em 2005 com o objetivo de reduzir as emissões em 20% até 2020 e em, pelo menos, 40% até 2030, em relação aos níveis de 1990. As emissões de GEE da aviação foram incluídas nesse sistema em 2012 e, entre 2013 e 2020, as emissões devem ficar 5% abaixo da média anual dos anos de 2004 a 2006 (COMISSÃO EUROPEIA, 2016). A legislação, adotada em 2008, foi projetada para ser aplicada às emissões de voos que chegam, saem ou fazem trajetos internamente à Área Econômica Europeia (EEA, na sigla em inglês), que engloba os 28 países da UE e, ainda, Groenlândia, Liechtenstein e Noruega. A UE, no entanto, decidiu limitar o escopo do EU ETS aos voos internos à EEA até 2016, para apoiar o desenvolvimento de uma medida global pela ICAO (COMISSÃO EUROPEIA, 2018). Em fevereiro de 2017, a Comissão Europeia propôs uma regulação para prolongar a exclusão dos voos externos à EEA, reduzir gradualmente o número de permissões de emissões da aviação a partir de 2021, e se preparar para a implementação do CORSIA (PARLAMENTO EUROPEU, 2018).

O EU ETS se baseia no princípio de “*cap and trade*”, no qual é estabelecido um limite máximo para a quantidade de poluentes que as empresas podem emitir e, dentro desse limite, elas recebem ou compram permissões de emissões, as quais podem ser comercializadas (COMISSÃO EUROPEIA, 2018). No âmbito do EU ETS, cada permissão garante ao proprietário o direito de emitir uma tonelada de CO₂ equivalente (CO₂e). As

empresas aéreas submetidas ao sistema precisam monitorar, reportar e verificar as suas emissões, e entregar permissões como uma contrapartida em relação às suas emissões. O número total de permissões (limite) foi estabelecido em 95% das emissões históricas de 2004 a 2006, e as companhias aéreas receberam permissões em quantidades relativas às suas atividades em 2010, de forma que 82% das permissões foram distribuídas sem custos, 15% por meio de leilões, e 3% foram reservadas para novos entrantes (PARLAMENTO EUROPEU, 2018).

Segundo NAVA *et al.* (2018), por ser um instrumento baseado em mercado, o EU ETS promove o incentivo à redução de emissões de GEE por meio da sinalização do preço de carbono. Uma vez que as permissões são distribuídas, as empresas comparam o preço do carbono com o custo marginal de abatimento, ou seja, o custo marginal necessário para reduzir as emissões em uma unidade de poluição. No caso de uma empresa com emissões de GEE acima das permissões alocadas a ela, se o preço do carbono for menor do que o custo marginal de abatimento, essa empresa comprará permissões no mercado. Por outro lado, se o preço do carbono for superior ao custo de abatimento, a empresa investirá em medidas de redução de emissões. Finalmente, as empresas podem vender as permissões que superarem as suas emissões, gerando receitas.

O EU ETS também prevê que as empresas usem créditos gerados por projetos de redução de emissões para compensar parte das suas emissões. Segundo COMISSÃO EUROPEIA (2016), tais projetos precisam ser reconhecidos pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo ou pelo mecanismo Implementação Conjunta, criados pelo Protocolo de Kyoto, confirmando que contribuem com reduções de emissões reais e genuinamente adicionais. Créditos advindos de outros mecanismos de mercado também poderão ser aceitos, quando estiverem disponíveis.

EEA (2017) analisou o histórico e das tendências das emissões sob o sistema de comercialização europeu, tanto do setor de aviação como das demais indústrias, chamadas de instalações estacionárias. As emissões dessas instalações reduziram em 26% entre 2005 e 2016, ficando abaixo do limite determinado para 2020, sendo que entre 2013 e 2016 a queda foi de 8%. De acordo com projeções dos países membros,

tais emissões devem reduzir em 8,8% entre 2015 e 2020, e em mais 6,2% entre 2020 e 2030. O setor de aviação, no entanto, apresenta o movimento contrário, com tendência de crescimento contínuo até 2030. As emissões verificadas do setor de aviação, entre 2013 e 2016, superaram a oferta de permissões reservadas para essa indústria em todos os anos. O setor de aviação é, portanto, um comprador líquido de permissões de outros setores. Em 2016, a demanda acumulada líquida do setor de aviação alcançou 65Mt.

O escopo futuro das emissões da aviação no EU ETS é incerto, devido à adoção do CORSIA; no entanto, é interessante analisar os resultados alcançados com esse mecanismo. Entre 2014 e 2017, as emissões da aviação, incluídas no escopo do EU ETS, aumentaram 17% (de 54,8 para 64,2 Mt CO₂e), conforme mostra a Tabela 1. A oferta de permissões, por outro lado, foi reduzida em 3,8% (de 39,0 para 37,5 milhões de permissões). Em todos os anos, a demanda superou a oferta, e esta diferença aumentou de 15,8 milhões de permissões, em 2014, para 26,7 milhões, em 2017.

Tabela 1: Demanda e oferta de permissões da aviação no EU ETS, de 2015 a 2017

	2014	2015	2016	2017	Variação (%) 2014-2017
Demanda total (Mt CO₂e)	54,8	57,1	61,5	64,2	17%
Emissões da aviação	54,8	57,1	61,5	64,2	17%
Oferta total (milhões de permissões)	39,0	38,1	37,7	37,5	-4%
Alocação de permissões	32,3	32,4	31,6	32,7	1%
Leilão de permissões	5,4	5,4	6,0	4,7	-13%
Créditos internacionais	1,3	0,2	0,1	0,129	-90%
Demanda - Oferta (milhões de permissões)	15,8	19,0	23,8	26,7	69%
Preço da permissão (EUR)	5,8	7,3	5,5	7,2	24%
Custo de aquisição de permissões (MM EUR)	91,64	138,70	130,90	192,24	110%

Fonte: Adaptado de EEA (2016; 2017; 2018)

O sistema de comércio de emissões europeu contribuiu com a redução de mais de 85 milhões de toneladas de CO₂e, entre 2014 e 2017, quantidade correspondente à diferença entre a demanda e a oferta de permissões. Considerando a mitigação das emissões das companhias aéreas apenas com a compra de permissões, o custo total de mitigação, em 2017, seria de 192 milhões de euros, aproximadamente. Desde a inclusão da aviação no EU ETS, as emissões do setor aumentaram a cada ano, como reflexo do crescimento da demanda por transporte aéreo, segundo EEA (2018). Isso significa que,

além do aumento de custos para o setor, a cada ano a aviação fica mais dependente de ações de redução de emissões em outros setores.

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

Em outubro de 2016, a 39ª Assembleia da ICAO decidiu implementar uma Medida Baseada em Mercado, na forma do CORSIA, para endereçar qualquer aumento anual das emissões de CO₂ da aviação internacional acima dos níveis de 2020 (ICAO, 2018a). A Resolução estabeleceu a implementação do CORSIA em fases, iniciando com a participação de países em caráter voluntário, seguida da participação de todos os países exceto aqueles dispensados das exigências de compensação. A fase piloto (de 2021 a 2023) e a fase inicial (de 2024 a 2026) se aplicam aos países que se voluntariaram a participar do esquema; enquanto a segunda fase (de 2027 a 2035) se aplicaria a todos os países que apresentam participação individual na aviação internacional, em termos de receita-tonelada-km (RTK), acima de 0,5% em 2018, ou cujas participações acumuladas na lista de países, da maior para a menor quantidade de RTK corresponde a 90% do total de RTK, exceto os países menos desenvolvidos, pequenos estados insulares em desenvolvimento e países em desenvolvimento sem acesso ao mar, a menos que estes se voluntariem a participar dessa fase. A abordagem adotada considera que uma rota entre dois países só faz parte do esquema se ambos os países participam do esquema; quando um ou os dois não participam, as emissões de tal rota não serão contabilizadas dentro do CORSIA.

De acordo com a Resolução que estabeleceu o CORSIA, o nível médio de emissões em 2019 e 2020 representa a linha de base para o crescimento neutro a partir de 2020, em relação à qual as emissões a partir de 2021 serão comparadas. A ICAO optou por um mecanismo de compensação, o qual requer que as empresas aéreas adquiram unidades de emissões (créditos de carbono ou permissões de emissões) para cada tonelada de CO₂ emitida acima dos níveis estabelecidos (ICAO, 2018a).

Diferentemente do EU ETS, um mecanismo do tipo “*cap and trade*”, que estabelece um limite superior para o total de emissões, o CORSIA é um mecanismo de compensação, o que significa que as emissões podem aumentar, mas precisam ser compensadas por meio de créditos de compensação (PARLAMENTO EUROPEU, 2018).

O programa também valoriza o uso de combustíveis sustentáveis de aviação, os quais contribuem para a redução das emissões das companhias aéreas e estas poderão ser deduzidas das quantidades de créditos de compensação a serem adquiridas. ICAO (2017) menciona que, para as empresas utilizarem os combustíveis sustentáveis de aviação como forma de redução das suas emissões, eles deverão cumprir critérios de sustentabilidade, que estabelecem que o biocombustível deve promover a redução de, pelo menos, 10% das emissões associadas ao ciclo de vida, em comparação ao combustível fóssil, além de ser produzido por empresas certificadas.

ICAO (2016) calculou as emissões anuais de CO₂ das operações internacionais, chegando ao valor de 448 Mt em 2010, e estimou as quantidades de emissões que deveriam ser compensadas, chegando a valores da ordem de 142 a 174 Mt em 2025, de 288 a 376 Mt em 2030, e entre 443 e 596 Mt de CO₂ em 2035 (Figura 8).

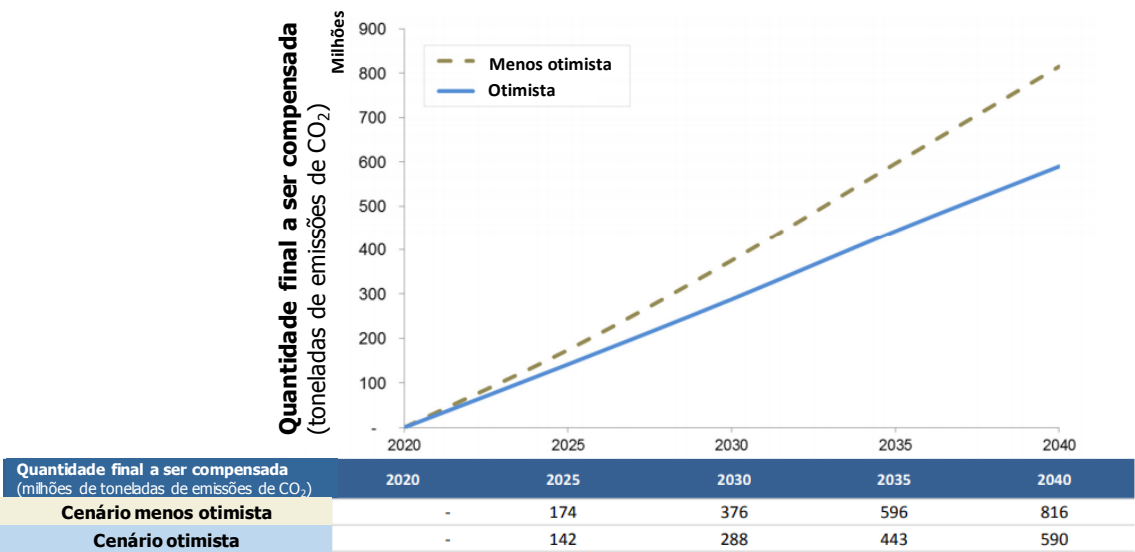


Figura 8: Projeção de demanda por compensação de emissões
Fonte: Adaptado de ICAO (2016)

ICAO (2016) também calculou os possíveis custos de compensação das emissões, no âmbito do CORSIA, multiplicando-se as quantidades estimadas de compensações pelos preços admitidos para uma unidade de emissões (ou preço do carbono). Os preços do carbono apresentam grande incerteza, portanto os custos estimados variam significativamente dependendo das premissas adotadas para essa variável. Foram considerados dois cenários (otimista e pessimista) e três suposições de preços da tonelada de carbono para 2020, 2030 e 2035: uma suposição de preços altos e uma de preços baixos (propostos pela IEA, conforme mencionado no documento) e uma de preços adicionalmente baixos, da própria ICAO. Os cálculos resultaram em custos totais de compensação entre EUR 1,5 e 6,2 bilhões (valores em EUR 2012), em 2025, e entre EUR 5,3 e 23,9 bilhões, em 2035, conforme mostra a Figura 9.

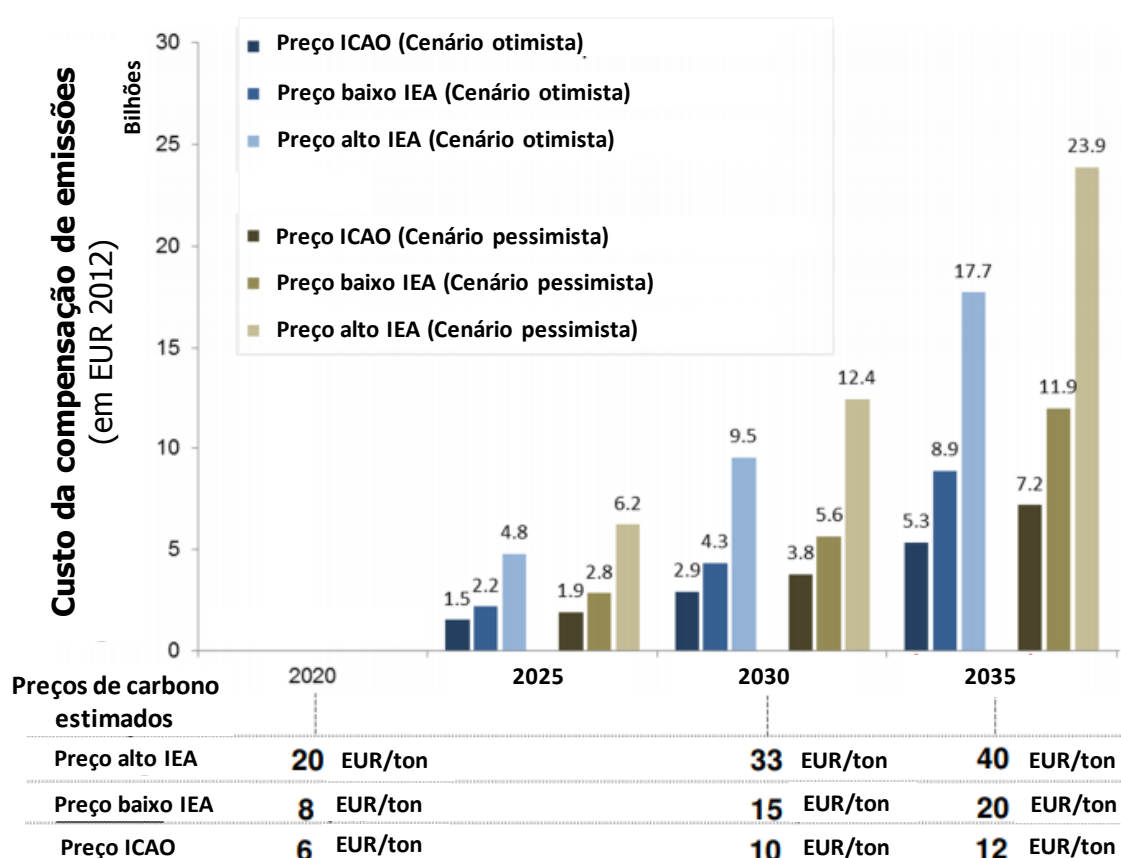


Figura 9: Custos estimados da compensação de emissões
Fonte: Adaptado de ICAO (2016)

Com base nas projeções da ICAO (2016), BAILIS, BROEKHOFF e LEE (2016) calcularam a demanda acumulada por compensações, chegando às quantidades de 3,3 a 4,5 Gt de CO₂ a serem compensadas de 2020 a 2035, conforme mostra a Figura 10. Isso significa que, nesse período, serão necessários projetos que gerem essas quantidades de créditos de compensação.

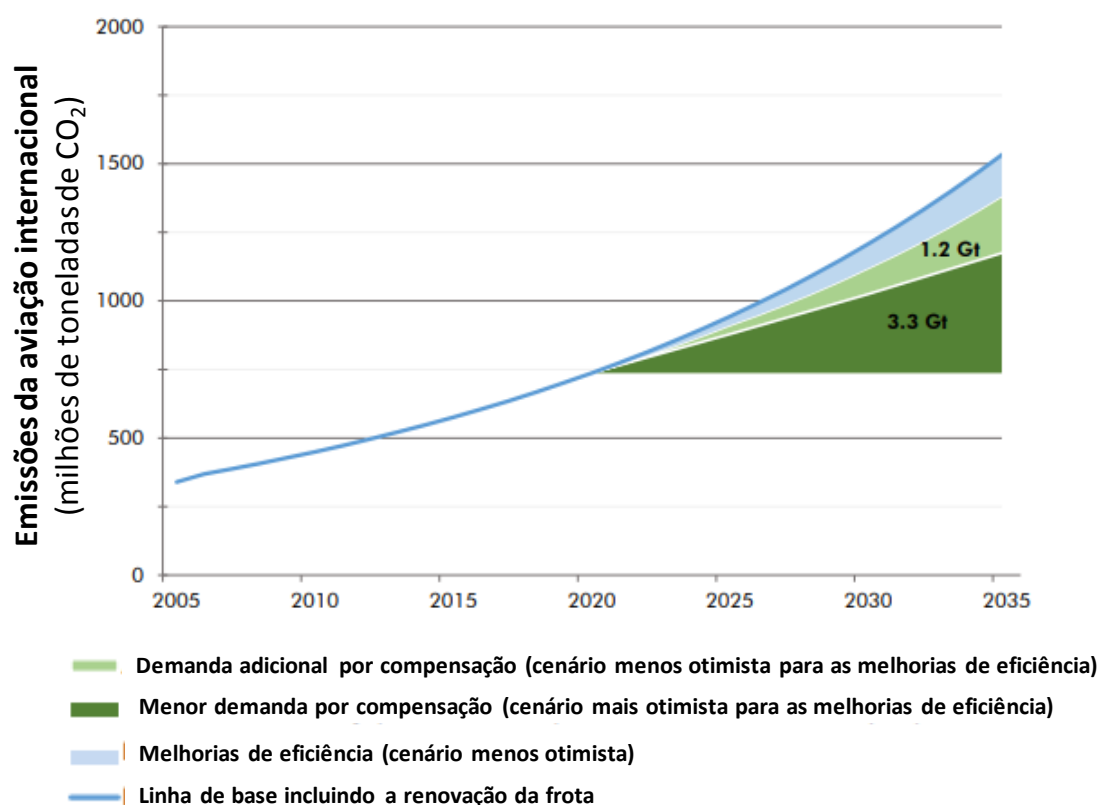


Figura 10: Demanda acumulada por compensação de emissões
Fonte: Adaptado de BAILIS, BROEKHOFF e LEE (2016)

Para ARVANITAKIS e DRANSFELD (2017), enquanto a estrutura regulatória do CORSIA está desenhada e a direção e o cronograma para o detalhamento dos aspectos técnicos estão estabelecidos, existem questões-chaves da política e de princípios, bem como fatores técnicos, que ainda estão em aberto, particularmente no que concerne às regras de monitoramento, reporte e verificação (MRV, na sigla em inglês), ao desenvolvimento dos registros de emissões online e ao critério que determina quais créditos de compensações podem ser usados para o cumprimento das metas. A definição de tais

aspectos técnicos vai determinar a qualidade dos projetos e programas, os quais por sua vez determinarão a efetividade ambiental do esquema como um todo. Além disso, evitar a dupla contagem de créditos é de extrema relevância, ou seja, garantir que as reduções de emissões de GEE certificadas previstas para serem utilizadas para a compensação dentro do esquema do CORSIA serão contabilizadas apenas uma vez (dentro do CORSIA) e que não serão usadas em outros esquemas.

Conforme mencionado anteriormente, os créditos de compensações de carbono a serem utilizados no âmbito do CORSIA, em sua maior parte, terão origem em outros setores da economia, advindo, principalmente, de programas de compensações de carbono, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o *Verified Carbon Standard* (VCS), e o *Gold Standard*.

BAILIS, BROEKHOFF e LEE (2016) avaliaram a capacidade de oferta global de créditos e verificaram a possibilidade de atingimento da meta de crescimento neutro, considerando que a ICAO limite o uso de compensações de carbono aos créditos considerados como tendo maior integridade (definido tanto em termos de redução de emissões como de benefícios de desenvolvimento sustentável). Os resultados apresentados mostram que a oferta total acumulada de créditos de 2020 a 2035 pode chegar a 28,8 Gt CO₂e, valor bem acima dos 3,3 a 4,5 Gt CO₂e estimados para a demanda. Os números da oferta potencial incluem 11,6 Gt que seriam provenientes de projetos de compensação já cadastrados, 14,8 Gt que adviriam de projetos novos, e mais 2,4 Gt a partir de programas classificados no REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*). Os autores avaliam que esse potencial é amplo e considera diversos tipos de projetos, de forma que existe a possibilidade de que a ICAO crie restrições para a elegibilidade dos projetos, buscando aqueles com confiança relativamente alta em termos de integridade ambiental e os que possuem claro potencial de benefícios de desenvolvimento sustentável, ao determinar padrões de certificação. Nesse caso, apenas estariam elegíveis projetos com um potencial de oferta de compensações de 3,0 Gt CO₂e, quantidade inferior à necessária para o cumprimento das metas. No entanto, a demanda poderia ser suprida caso a ICAO também incluísse os

créditos do REDD+, ainda que compradores de outros setores possam vir a competir pela mesma fonte de compensações.

CAMES (2015) também realizou um estudo para avaliar se há oferta unidades de compensação em quantidade suficiente para atender à demanda do setor de aviação. O trabalho levou em consideração apenas as fontes de créditos de compensação existentes no âmbito do MDL, em função de terem sido cadastrados mais de 7500 projetos até agosto de 2015. Apesar de existirem outras fontes potenciais deste tipo de crédito, esse mecanismo tem sido a maior fonte de créditos para a compensação de emissões de GEE até o momento. O autor destaca que a integridade de determinados projetos considerados no MDL tem sido questionada na literatura por alguns motivos: provavelmente não trariam ganhos adicionais ao que já aconteceria sem o mecanismo; promovem incentivos perversos para o aumento das emissões em vez de reduzi-las; ou têm a sua permanência questionada. Considerando os créditos gerados a partir do início do CORSIA, em 2020, e apenas pelos projetos já registrados (sem estimar a entrada de novos projetos), a oferta corresponderia a aproximadamente o dobro da demanda. Caso os projetos que possam ser considerados controversos sejam excluídos, a oferta seria suficiente para suprir à demanda por oito anos. Se todos os projetos relacionados à energia eólica forem elegíveis, apenas os créditos gerados por estes já seriam suficientes para suprir a demanda neste período de oito anos. Em uma segunda hipótese, incluindo ainda os créditos potencialmente gerados a partir de 2017, a nova oferta seria equivalente a mais de três vezes a demanda e, retirando os projetos controversos, tal oferta seria suficiente para mais de dez anos. Os períodos nos quais a oferta é capaz de superar a demanda, em ambos os casos, são suficientes para permitir que novos projetos sejam desenvolvidos e registrados no âmbito do mecanismo.

2.3. Biocombustíveis

Os biocombustíveis de aviação são considerados por muitos autores como a principal estratégia para a redução das emissões da aviação nas próximas décadas. MAWHOOD *et al.* (2016) acreditam que as melhorias tecnológicas tendem a ser incrementais e que

avanços na gestão do tráfego aéreo e na eficiência de motores não devem ser suficientes para compensar o aumento da demanda por transporte aéreo, o que somente será possível com a utilização de combustíveis líquidos de baixo carbono. Além disso, como as aeronaves possuem uma vida útil de 25 anos (LEE, LIM e OWEN, 2013), a difusão das melhorias na frota global tende a ser lenta (MAWHOOD *et al.*, 2015). EL TAKRITI, PAVLENKO e SEARLE (2017) avaliam que, antes de as tecnologias de fabricação de aeronaves contribuírem efetivamente para a diminuição dos impactos climáticos da aviação, a maior parte das reduções das emissões deverá advir de uma transição para combustíveis alternativos. Segundo WISE, MURATORI e KYLE (2017), dado que a demanda por transporte aéreo é crescente, e praticamente não há substituto para os combustíveis líquidos, os biocombustíveis têm atraído atenção como uma solução promissora para reduzir a pegada de carbono e aumentar a segurança energética da aviação. GEGG, BUDD e ISON (2014) realizaram entrevistas com agentes do setor de aviação para identificar os fatores que afetam o desenvolvimento do mercado de biocombustíveis de aviação e, na pesquisa, foi identificado que, apesar de o foco da indústria ser a melhoria da eficiência, não há tecnologias que possam substituir os modelos de aeronaves atuais oferecendo o mesmo desempenho. As outras tecnologias que estão sendo estudadas, como aeronaves movidas por hidrogênio ou energia elétrica estão longe de serem técnica e economicamente viáveis, portanto os biocombustíveis são vistos como essenciais e como a única solução custo-efetiva nos próximos 40 anos.

A falta de alternativas tecnológicas com menores impactos ambientais é um dos principais motivos para a busca por outros tipos de solução para a descarbonização do setor aéreo, entre elas o uso de mecanismos de compensação ou comércio de emissões e a substituição de parte do combustível fóssil por biocombustível. ICAO (2017) menciona que, algumas tecnologias revolucionárias têm sido propostas para reduzir o consumo de combustível, como a utilização de células fotovoltaicas, células a combustível e ultracapacitores, no entanto não há alternativas ao combustível líquido no curto a médio prazo. Nesse sentido, os combustíveis sustentáveis são a opção mais promissora, uma vez que, além da vantagem de reduzir as emissões de GEE, utilizam a mesma infraestrutura de distribuição de combustível e os mesmos motores já utilizados atualmente.

O requisito mais importante dos biocombustíveis de aviação é que estes sejam *drop-in*. Logo, devem ser totalmente compatíveis e miscíveis com o combustível convencional, não podendo exigir adaptações nas aeronaves, no motor ou na infraestrutura de suprimento de combustível, e o seu uso não deve implicar em restrições no que se refere à utilização da aeronave. Dependendo do processo produtivo, o biocombustível pode ser considerado *drop-in* apenas até um determinado percentual de mistura, pois, em teores maiores, deixaria de cumprir os requisitos mencionados.

O bioquerosene pode ser produzido a partir de uma variedade de matérias-primas e empregando diferentes processos. Até outubro de 2018, cinco rotas de produção estavam aprovadas pela ASTM, e diversas outras estão em processo de certificação ou em fase de estudo. As rotas aprovadas estão detalhadas a seguir, conforme CAAFI (2018):

1. Querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (rota FT)
 - a. Ano de Certificação: 2009
 - b. Limite de mistura, em volume (ICAO, 2017): 50%
 - c. Matérias-primas: biomassas como resíduos sólidos urbanos, resíduos agrícolas e florestais e culturas de madeira e energéticas; além de matérias-primas não renováveis, como carvão e gás natural
 - d. Descrição do processo produtivo: o processo de síntese por Fischer-Tropsch (FT) é uma reação química catalisada, na qual o gás de síntese, uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio, é convertido em hidrocarbonetos líquidos, com o uso de um reator e empregando um catalisador de cobalto. A matéria-prima é, inicialmente, gaseificada, produzindo monóxido de carbono e hidrogênio (gás de síntese), que, em seguida, são convertidos em parafinas de cadeia longa via síntese de FT. As parafinas, então, são craqueadas e isomerizadas para produzir combustíveis líquidos essencialmente idênticos às parafinas presentes no combustível de aviação de origem fóssil, mas não incluem em sua composição compostos aromáticos. O limite de mistura (50%, em volume) deriva do fato de que o

produto gerado contém apenas moléculas de parafina de cadeia normal, enquanto o QAV é composto de iso-parafinas e aromáticos. Contudo, a nafta é um coproduto do mesmo processo e ela poderia passar por um processo de reforma, dando origem aos aromáticos necessários à mistura, garantindo um bioqueresene capaz de substituir em 100% o combustível fóssil.

2. Querosene parafínico sintetizado por hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (rota HEFA)
 - a. Ano de Certificação: 2011
 - b. Limite de mistura, em volume (ICAO, 2017): 50%
 - c. Matérias-primas: óleos e gorduras animais e vegetais
 - d. Descrição do processo produtivo: os óleos naturais são convertidos de lipídios a hidrocarbonetos utilizando-se o processo de hidrogenação para remover oxigênio e outras moléculas indesejáveis. Os hidrocarbonetos são, então, craqueados e isomerizados, gerando um componente sintético passível de ser misturado ao combustível de aviação. De acordo com DE CARVALHO (2017), o hidroprocessamento é um processo comum em refinarias de petróleo convencionais, tendo como objetivo a remoção de compostos indesejáveis, como nitrogênio e enxofre. O processo envolve a desoxigenação, a dessulfurização e a desnitrificação de óleos por meio da hidrogenação catalítica, produzindo hidrocarbonetos líquidos ricos em parafinas saturadas de cadeia normal. Uma das principais barreiras à utilização desta rota é a necessidade de grandes quantidades de hidrogênio, que, em geral, tem origem fóssil, o que acaba aumentando a pegada de carbono do bioquerosene produzido.

3. Iso-parafinas sintetizadas por hidroprocessamento de açúcares fermentados (rota HFS-SIP)
 - a. Ano de Certificação: 2014
 - b. Limite de mistura, em volume (ICAO, 2017): 10%
 - c. Matérias-primas: açúcares
 - d. Descrição do processo produtivo: leveduras geneticamente modificadas são utilizadas para fermentar açúcares, produzindo moléculas de hidrocarbonetos. O processo produz uma molécula de hidrocarboneto denominada farneseno, que, após ser hidroprocessada a farnesano, pode ser utilizada misturada ao combustível de aviação. Por ser composto apenas de iso-parafinas, a mistura do bioquerosene ao QAV é limitada em 10% em volume.
 - e.
4. Querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch com aromáticos (FT/A)
 - a. Ano de Certificação: 2015
 - b. Limite de mistura, em volume (ICAO, 2017): 50%
 - c. Matérias-primas: biomassas como resíduos sólidos urbanos, resíduos agrícolas e florestais e culturas de madeira e energéticas; além de matérias-primas não renováveis, como carvão e gás natural
 - d. Descrição do processo produtivo: utiliza o processo de síntese de Fischer-Tropsch e, ainda, a alquilação de aromáticos leves (principalmente benzeno) para produzir uma mistura de hidrocarbonetos que inclui compostos aromáticos necessários para garantir a qualidade das vedações elastoméricas em componentes da aeronave, prevenindo vazamentos de combustível. O combustível produzido por esse processo contém todos os tipos de moléculas encontradas no combustível de origem fóssil, e não apenas parafinas, o que permitiria a substituição de 100% do QAV fóssil.

5. Querosene parafínico sintetizado a partir de álcoois – “*Alcohol to Jet*” (rota ATJ)
 - a. Ano de Certificação: 2016
 - b. Limite de mistura, em volume (ICAO, 2017): 30%
 - c. Matérias-primas: amidos, açúcares e biomassa celulósica
 - d. Descrição do processo produtivo: desidratação de matéria-prima contendo álcoois, seguida de oligomerização e hidrogenação para produzir um combustível de aviação hidrocarbônico. Segundo DE CARVALHO (2017), este processo não envolve o uso de microorganismos ou enzimas especiais para a fermentação, pois ele se inicia com um álcool que já foi previamente obtido por fermentação. Apesar de haver uma variedade de álcoois passíveis de serem utilizados neste processo, o etanol e o isobutanol são os mais apropriados.

No Brasil, a Resolução ANP nº63/2014, que estabelece as especificações dos Querosenes de Aviação Alternativos e do Querosene de Aviação B-X (QAV B-X), abrange três tipos de biocombustível: o querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (FT) e o querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (HEFA), que podem ser misturados ao querosene de origem fóssil em até 50% em volume; e iso-parafinas sintetizadas (SIP), que possuem o limite de 10% de adição, em volume. O uso dos biocombustíveis é voluntário, mas deve obedecer à regulamentação da ANP.

As rotas aprovadas estão em diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico. Apenas as rotas FT e HEFA são consideradas comercialmente viáveis, de acordo com DE JONG *et al.* (2017). Segundo IRENA (2017), a maior parte dos volumes comercialmente disponíveis de bioquerosene é produzida pela rota HEFA. Para DE JONG *et al.* (2017), apesar de esta tecnologia ser comercialmente viável, a limitação da disponibilidade de matérias-primas produzidas de forma sustentável restringe o aumento de escala do processo HEFA, principalmente pela utilização das mesmas matérias-primas empregadas na produção de combustíveis rodoviários.

Conforme mencionado anteriormente, a principal vantagem da utilização de biocombustíveis de aviação é o potencial de redução de emissões de GEE dessa indústria. A Diretiva Europeia para a promoção e uso de energias renováveis, de 2009, apresenta alguns valores de redução de emissões de GEE com o uso de biocombustíveis, em comparação aos derivados fósseis, que podem servir como base para verificar o potencial de contribuição do bioquerosene. No documento, o óleo diesel produzido a partir de resíduos de madeira pelo processo Fischer-Tropsch reduz as emissões em 95%, enquanto óleos vegetais hidrotratados apresentam reduções variando de 40% a 68%.

DE JONG *et al.* (2017) empregaram o método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para comparar as emissões associadas ao bioquerosene obtido a partir de seis rotas de produção (Figura 11). Das rotas avaliadas, quatro delas estão aprovadas pela ASTM (HEFA, FT, fermentação de açúcares e síntese a partir de álcoois) e duas estão em processo de certificação (liquefação hidrotérmica e pirólise). Em termos de matérias-primas, mostrou-se que resíduos e biomassas lignocelulósicas apresentam os menores valores de emissões, independente da rota de produção. As matérias-primas alimentícias e as oleaginosas consideradas no estudo caracterizaram-se por apresentar maiores emissões no processo de cultivo, em função, principalmente, do maior uso de fertilizantes (com exceção da cana de açúcar). A maior parte dos processos levou a reduções de mais de 60% das emissões, comparativamente ao combustível de origem fóssil, sendo a síntese de FT a rota que apresentou os menores valores de emissões, considerando todas as matérias-primas e métodos de alocação, devido ao fato de o hidrogênio demandado na síntese ser produzido na gaseificação, e por gerar energia elétrica em excesso. Os piores resultados em termos de emissões foram encontrados na síntese a partir de álcoois empregando o milho como matéria-prima e na fermentação direta de açúcares provenientes da cana de açúcar. O estudo ressalta que não foram consideradas as emissões decorrentes de mudanças de uso do solo, o que poderia levar a alterações dos resultados obtidos.

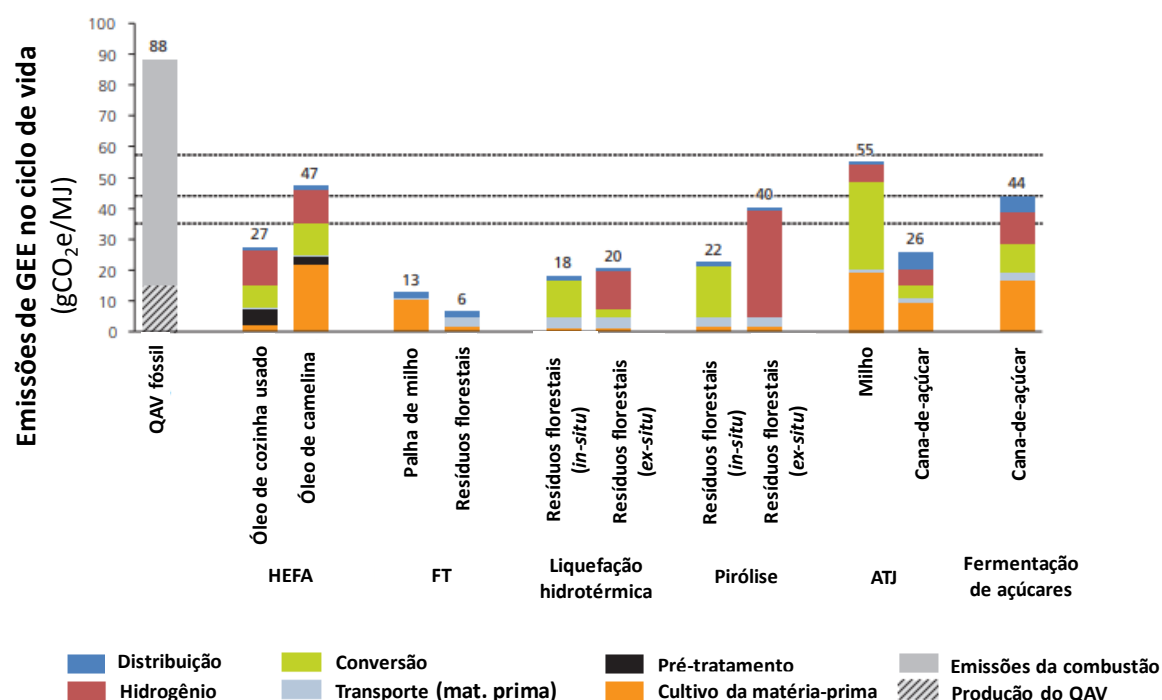


Figura 11: Avaliação de Ciclo de Vida de seis rotas de produção de bioquerosene

Fonte: DE JONG *et al.* (2017)³

Algumas rotas promovem menos de 50% de redução das emissões, em função do alto nível de emissões associadas ao cultivo das matérias-primas (devido ao uso de fertilizantes, por exemplo) ou ao consumo de hidrogênio, de acordo com DE JONG *et al.* (2017). Biocombustíveis baseados em resíduos ou biomassa lignocelulósicas geralmente apresentam resultados melhores em termos de redução de emissões do que aqueles que utilizam culturas alimentares. A tecnologia FT está associada às menores emissões de GEE. Segundo os autores, uma vez que o consumo de hidrogênio contribui fortemente para as emissões do processo produtivo, tecnologias alternativas de produção de hidrogênio (por exemplo, eletrólise baseada em energia renovável) poderiam contribuir para melhorar a performance em termos de emissões. As rotas que produzem correntes de CO₂ com relativa pureza, como síntese de Fischer-Tropsch ou fermentação, são particularmente adequadas para a aplicação em conjunto de bioenergia e captura e sequestro de carbono (BECCS⁴, na sigla em inglês) para se atingir

³ As rotas de Liquefação Hidrotérmica e Pirólise, que empregam resíduos celulósicos como matérias-primas, até novembro de 2018, não estavam aprovadas pela ASTM.

⁴ BECCS é a sigla para *Bioenergy and Carbon Capture and Storage*

resultados de emissão de GEE negativa. Mais ainda, novas tecnologias disponíveis no médio e longo prazo (por exemplo, sequestro de carbono de culturas perenes ou captura e uso de carbono – CCU⁵, na sigla em inglês) podem fornecer reduções ainda maiores das emissões.

Diversos trabalhos que avaliaram as emissões associadas à produção e uso dos biocombustíveis passaram a considerar as emissões provocadas por mudanças de uso do solo, relacionadas com a produção das matérias-primas. De forma simplificada, as mudanças diretas ocorrem quando se modifica uma determinada área de cultivo para a produção de biomassas com fins energéticos (bioenergia), enquanto que as mudanças indiretas ocorrem quando o cultivo que foi substituído pela bioenergia se desloca para outra região. Uma vez que as emissões associadas a esses fenômenos podem alterar significativamente os resultados de avaliações de impacto ambiental, a metodologia de cálculo deve considerar as particularidades de cada região.

DE CARVALHO (2017) avaliou as emissões decorrentes da produção de biocombustíveis de aviação no Brasil, levando em consideração as emissões provenientes de mudanças de uso do solo diretas. Foram selecionadas duas rotas de produção de bioquerosene (FT empregando resíduos florestais e HEFA utilizando óleo de soja) e os resultados mostraram que podem ser obtidas reduções importantes de emissões de GEE em ambos os casos. Os biocombustíveis produzidos a partir de resíduos florestais e de óleo de soja apresentaram reduções de 94% e 52%, respectivamente, das emissões de GEE, em comparação com o combustível fóssil.

Segundo IATA (2015), os chamados combustíveis sustentáveis de aviação só podem ser considerados sustentáveis se apresentarem um balanço de GEE substancialmente melhor do que a alternativa fóssil, não prejudicarem o meio ambiente e não envolverem impactos socioeconômicos negativos. Considerando esses critérios, nem todas as matérias-primas de origem renovável podem ser consideradas adequadas para a produção dos biocombustíveis de aviação. O tipo e a origem da biomassa contribuem

⁵ CCU é a sigla para *Carbon Capture and Use*

enormemente na determinação da sustentabilidade do combustível, incluindo o ciclo de vida das emissões durante a produção e o transporte, uso de fertilizantes e efeitos decorrentes de mudança do uso do solo. Alguns tipos de biomassas podem, inclusive, emitir maior quantidade de GEE do que o combustível convencional, especialmente quando são considerados os impactos indiretos da mudança de uso do solo. O documento apresenta os resultados de um trabalho que avaliou as emissões de diferentes rotas de produção de combustíveis de aviação e mostra que, apesar de os biocombustíveis promoverem redução de emissões na maioria das rotas, no caso do hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos empregando as matérias-primas óleo de palma e óleo de soja e incluindo as mudanças de uso do solo, os resultados são piores do que a própria produção de querosene a partir do petróleo.

As matérias-primas em potencial a serem utilizadas para uma indústria de bioquerosene no Brasil têm sido estudadas por diversos autores. CORTEZ *et al.* (2014) consideram que não há um material perfeito para a produção de bioquerosene no país, dada a diversidade de matérias-primas disponíveis em diferentes condições de cultivo, mas avaliam que, no cenário de crescimento neutro de carbono a partir de 2020, proposto pela aviação internacional, as fontes de bioenergia mais viáveis do ponto de vista de produtividade agrícola e balanço de energia são a cana-de-açúcar e materiais florestais. MORAES *et al.* (2014) discutem a respeito dos desafios da sustentabilidade da produção de biocombustíveis de aviação no Brasil a partir de quatro grupos de matérias-primas: açúcares e amidos, óleos, materiais lignocelulósicos e materiais residuais. CANTARELLA *et al.* (2015) entendem que, apesar de a expansão de culturas energéticas no Brasil provavelmente não afetar o suprimento de alimentos, os biocombustíveis de aviação se destinam a um mercado global e alguns países podem impor restrições a combustíveis produzidos a partir de culturas alimentares. Nesse sentido, DE CARVALHO (2017) avalia as fontes de resíduos de biomassa com maior potencial para a produção de bioenergia no Brasil e a viabilidade da sua utilização para a produção de bioquerosene, concluindo haver um potencial energético expressivo, concentrado, principalmente, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Segundo DE CARVALHO (2017), os resíduos da cana-de-açúcar e da soja foram os que apresentaram a maior contribuição em termos

energéticos, dentre as fontes analisadas, as quais incluem resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.

Nesse sentido, é interessante mencionar a iniciativa Plataforma de Bioquerosene de Juiz de Fora, que pretende fazer da Zona da Mata mineira a primeira região do Brasil a desenvolver uma cadeia integrada para a produção de diesel verde e bioquerosene, com a utilização de fração orgânica de lixo urbano e de óleos vegetais extraídos de espécies nativas da Mata Atlântica, como é o caso da palmeira macaúba (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2018). Segundo a Prefeitura de Juiz de Fora, a plataforma tem o apoio de órgãos dos governos municipal e estadual, universidades, centros de pesquisas e empresas nacionais e internacionais ligadas ao setor de transportes, além da Embaixada Britânica no Brasil (FIEMG, 2018).

De acordo com ICAO (2017), os aspectos cruciais a serem considerados em estudos de viabilidade para o uso de materiais residuais (resíduos da agroindústria, de florestas e municipais, por exemplo) são os custos de coleta e logística, além da disponibilidade em quantidades suficientes para se alcançar uma escala econômica de produção. ICAO (2017) destaca que, em geral, há uma relação de compromisso entre as matérias-primas e os custos de conversão: materiais mais baratos, em geral, demandam processos de conversão mais caros.

A rota de produção a partir de lipídios (HEFA) tem sido reportada como a principal tecnologia disponível em escala comercial no mundo, por envolver menores custos de investimento do que as rotas de FT e a partir de álcoois, segundo ICAO (2017). No caso do Brasil, DE CARVALHO (2017) verifica que, apesar de a rota FT envolver maiores valores de investimento inicial, quando comparada com a rota HEFA, o produto final pode apresentar preços mais competitivos, por utilizar matérias-primas mais baratas (resíduos de biomassas). Conforme já mencionado, o uso de materiais residuais na produção do biocombustível reduz a sua intensidade de carbono, tornando-o capaz de promover maiores reduções de GEE quando comparado ao combustível fóssil, e, ainda, não compete com a produção de alimentos ou outros biocombustíveis.

Ainda que diversas tecnologias já estejam disponíveis e satisfaçam a condição de produzir um biocombustível *drop-in*, a maior penetração do bioquerosene no mercado depende de um fator relevante para torná-lo viável: o custo de produção. Os combustíveis representam em torno de 21% dos custos operacionais das companhias aéreas, segundo IATA (2018). No Brasil, o custo de combustíveis tem um impacto ainda maior. De acordo com ANAC (2017), os combustíveis e lubrificantes mantiveram-se como o principal item de custos e despesas de serviços aéreos, representando 33% dos custos e despesas de voo, em média, em 2016.

De acordo com IRENA (2017), o bioquerosene produzido a partir da rota HEFA, historicamente sempre custou mais do que combustíveis de aviação fósseis, visto que somente as matérias-primas potenciais para esta rota já custam mais do que o querosene convencional. Em janeiro de 2016, por exemplo, o preço pago ao produtor do óleo de palma estava em US\$ 0,45/L, enquanto o querosene de aviação custava US\$ 0,25/L. O preço pago aos produtores de biocombustíveis de aviação avançados produzidos a partir de materiais lignocelulósicos não é tão claro, uma vez que essas tecnologias ainda estão em fase de demonstração e não estão disponíveis comercialmente.

Por se tratar de uma indústria nova, com a produção de bioquerosene ainda em pequena escala, não é possível saber ao certo qual seria o custo exato deste produto ou o seu preço de venda em escala comercial, mas diversos autores estimaram esses valores, para diferentes rotas e matérias-primas, conforme mostra a Tabela 2, retirada de ICAO (2017). A rota HEFA é a que apresenta os menores custos de produção e/ou preço mínimo de venda, principalmente a que emprega o óleo de palma como matéria-prima. A produção de bioquerosene por meio da rota FT envolve custos semelhantes ou pouco acima da rota HEFA, com valores menores quando emprega materiais como palha de milho e gramíneas. Já a rota a partir de álcoois apresenta custos relativamente superiores às demais.

Tabela 2: Resultados de avaliações técnico-econômicas da produção de bioquerosene

Rota de produção	Matéria-prima	Custo (US\$/L)	Referência
HEFA	Óleo de camelina	0,80	Natelson <i>et al.</i> , 2015
	Óleo de palma	0,70-0,79	Hilbers <i>et al.</i> , 2015
	Óleo de soja	1,01-1,16	Pearlson <i>et al.</i> , 2013
	Óleo de cozinha usado	0,88-1,06 (PMV)*	Seber <i>et al.</i> , 2014
	Sebo	1,05-1,25 (PMV)*	Seber <i>et al.</i> , 2014
	Óleo residual	1,03	De Jong <i>et al.</i> , 2015
FT	Palha de milho	0,90	Agusdinata <i>et al.</i> , 2011
	Gramíneas	1,10	Agusdinata <i>et al.</i> , 2011
	Lignocelulose	1,96 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016
	Madeira	1,14-1,22 (PMV)*	Zhu <i>et al.</i> , 2011
	Madeira	1,13	Ekbom <i>et al.</i> , 2009
ATJ	Etanol de cana de açúcar	1,56 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Etanol de milho	1,75 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Etanol de gramíneas	2,30 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Lignocelulose (gás de síntese)	1,80 (PMV)*	Atsonios <i>et al.</i> , 2015
	Lignocelulose (gás de síntese)	2,00 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016
	Lignocelulose (gás de síntese)	2,76 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016

*PMV: Preço Mínimo de Venda

Fonte: Adaptado de ICAO (2017)

DE CARVALHO (2017) estimou os custos de produção de bioquerosene em plantas localizadas no Brasil, empregando rota HEFA, a partir de óleo de soja, e a rota FT, a partir de resíduos florestais. Na rota FT, os custos nivelados do bioquerosene variaram entre US\$ 0,47 e 0,89 por litro, em função das capacidades das plantas analisadas, de 42 a 529 milhões de litros por ano. Os cálculos da rota HEFA resultaram em valores de custos nivelados entre US\$ 2,05 e 2,22 por litro de biocombustível, para plantas com capacidade de produção entre 116 e 348 milhões de litros por ano. Os custos de investimento, no caso da rota FT, foram estimados entre US\$ 148 e 834 milhões, enquanto na rota HEFA, esses custos ficaram entre US\$ 65 e 101 milhões. DE CARVALHO (2017) verificou, portanto, que, no caso do Brasil, apesar de a rota FT envolver maiores valores de investimento inicial, quando comparada com a rota HEFA, o produto final apresentou preços mais competitivos, por utilizar matérias-primas mais baratas (resíduos de biomassas).

DE JONG *et al.* (2017) avaliam que são necessários volumes significativos de recursos para alcançar o desenvolvimento em larga escala dos biocombustíveis de aviação. Os autores estimaram as despesas com a introdução de bioquerosene na União Europeia,

chegando ao valor de 10,4 bilhões de euros. Tais investimentos referem-se apenas à diferença de preços entre o bioquerosene e o combustível fóssil, não incluindo os recursos necessários para pesquisa e desenvolvimento. Os valores médios obtidos de 2020 a 2030, correspondentes aos prêmios de preço em relação ao querosene fóssil (762 euros por tonelada de biocombustível) e aos custos de mitigação das emissões (242 euros por tonelada de CO₂ evitado), são relativamente altos comparados com outras opções de mitigação. Entretanto, o custo por passageiro que parte de um aeroporto da União Europeia (0,9 a 4,1 euros por passageiro) é baixo e representa um pequeno aumento em relação ao custo de compensação de carbono durante o período (0,41 a 1,5 euros por passageiro). Esse sobrecusto, no entanto, pode afetar a demanda por transporte aéreo e, portanto, impactar o resultado financeiro das empresas aéreas, o que deve ser avaliado no momento de se propor políticas de introdução do bioquerosene na aviação.

Para MAWHOOD et al. (2016), os anos recentes testemunharam um crescimento de atividades relacionadas com pesquisa, desenvolvimento e implantação, voos testes, contratos de compra (*off-take agreements*) de combustíveis e certificação, com as principais operadoras de aeronaves, tanto comerciais quanto militares, desempenhando um papel de destaque. Até o momento, quase todos os voos que utilizam biocombustíveis de aviação fazem uso de bioquerosene derivado de óleos e gorduras. Apesar de a produção a partir desses materiais ser tecnologicamente mais simples, o potencial de aumentos de escala em termos de volume é restringido pela falta de matérias-primas sustentáveis e com custo baixo. De fato, como antes mencionado, em muitos casos, óleos vegetais não processados já são mais caros do que o querosene fóssil.

Uma vez que os biocombustíveis de aviação se destinam a um mercado global e alguns países podem impor restrições a combustíveis produzidos a partir de culturas alimentares (CANTARELLA et al., 2015), deve-se direcionar a indústria de bioquerosene para a utilização de matérias-primas alternativas que possam oferecer o menor impacto ambiental possível, além da necessidade de produção de forma econômica e em larga escala.

É interessante mencionar que o Brasil já teve produção de biocombustíveis de aviação. Em 2013, a empresa Amyris, em parceria com a petroleira Total, passou a produzir um biocombustível de aviação a partir da cana-de-açúcar, em seu complexo industrial de Brotas, SP. O biocombustível foi certificado e aprovado pela ASTM e ANP, em 2014, e companhias aéreas como a Gol e a Azul já usaram este biocombustível em voos comerciais (GARBIN e HENKES, 2018). No começo de 2017, a companhia anunciou que o projeto voltado para a produção de bioquerosene e biodiesel de cana no país estava "em suspenso" (DCI, 2017) e, em novembro do mesmo ano, a empresa DSM adquiriu a planta da Amyris (DSM, 2017), a qual está operando, porém, voltada para a produção de produtos diversos a partir da mesma molécula que serviria para a produção de bioquerosene.

Dada a demanda da indústria internacional pela redução de emissões do setor aéreo, é preciso avaliar como o Brasil pode se posicionar, não apenas como um participante da indústria com obrigações relacionadas às metas internacionais, mas como um protagonista na produção de bioquerosene de aviação. Conforme visto nesse capítulo, as estratégias de redução de emissões da indústria incluem melhorias de eficiência em tecnologia e operações e mecanismos de compensação de carbono, as quais, além de apresentarem custos relevantes, poderão não ser suficientes para atingir as metas estabelecidas. Os biocombustíveis de aviação são vistos por diversos autores como tendo um papel crucial na descarbonização do setor aéreo nas próximas décadas, sendo necessário, ainda, resolver alguns gargalos para a sua adoção em maior escala.

No caso brasileiro, o desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene traria outras externalidades positivas além da redução de emissões do setor aéreo, como a criação de empregos, geração de renda, desenvolvimento tecnológico e geração de inovação. O Brasil, como um produtor de biocombustíveis reconhecido internacionalmente, precisa estabelecer estratégias nacionais para o desenvolvimento desta indústria.

3. Descrição da indústria de aviação civil brasileira

Neste capítulo, será apresentado um levantamento de informações referentes à oferta e demanda por transporte aéreo e por combustível de aviação, além do desempenho financeiro do setor e das principais companhias aéreas brasileiras. O objetivo desse capítulo é apresentar uma descrição da situação da indústria de aviação civil no Brasil, de forma a entender o seu estado atual e compreender a sua capacidade em suportar um possível aumento de custos associado à introdução do bioquerosene, o que será levado em consideração nas medidas propostas no Capítulo 5.

3.1. Análise da atividade do setor aéreo brasileiro

De acordo com os dados publicados pela ANAC (2017; 2018a), a demanda por transporte aéreo, no Brasil, incluindo voos domésticos e internacionais, cresceu 172% entre 2000 e 2017, em termos de quantidade de passageiros-quilômetros pagos transportados (RPK). No mesmo período, a oferta do transporte cresceu 124%, em termos de assentos-quilômetros disponíveis (ASK). É interessante notar o aumento do ritmo de crescimento da demanda a partir de 2009. Entre 2009 e 2014, a procura por transporte aéreo (RPK) aumentou 68% e a indústria de aviação foi se preparando para responder à demanda, até que, em 2015, com a crise econômica, a taxa de crescimento passou a cair. A Figura 12 apresenta a oferta e a demanda por transporte aéreo no Brasil, de 2000 a 2017, em termos de assentos-km disponíveis (ASK) e passageiros-km pagos transportados (RPK), respectivamente.

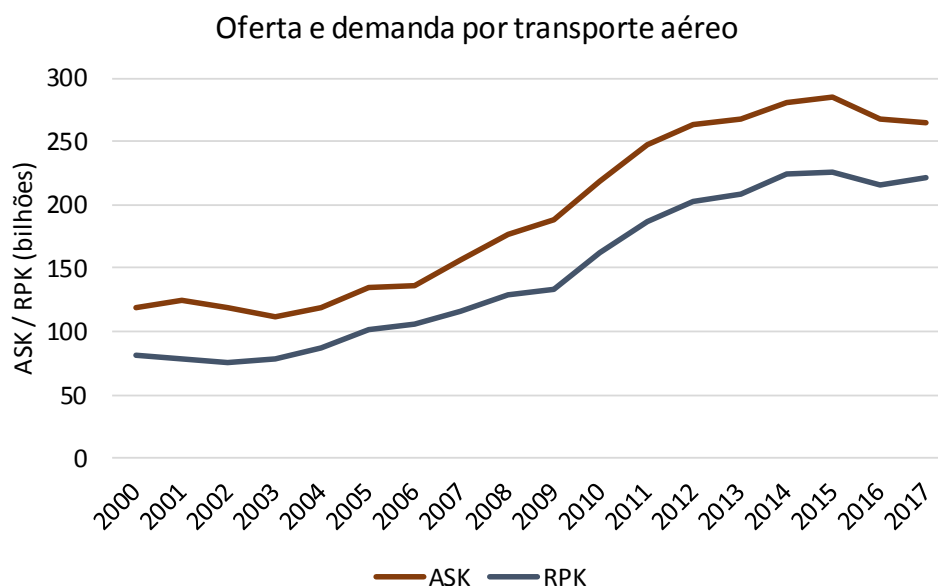


Figura 12: Oferta e demanda por transporte aéreo no Brasil, de 2000 a 2017, em bilhões de assentos-km disponíveis (ASK) e passageiros-km pagos transportados (RPK)
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018a)

A demanda por voos domésticos mais do que triplicou desde 2000, apresentando um crescimento médio de 8% ao ano. Apesar de o ano de 2016 ter sido fortemente impactado pela recessão econômica vivida pelo país, com queda de 6% da demanda, o ano de 2017 apresentou aumento de 3% na procura por voos domésticos. Em relação aos voos internacionais, a demanda na última década aumentou, em média 5% ao ano, sendo que o ano de 2017 registrou crescimento de 2%, após queda de 4% em 2016. A Figura 13 apresenta a evolução da demanda por transporte aéreo no Brasil, em termos passageiros-km pagos transportados (RPK) em voos domésticos e internacionais.

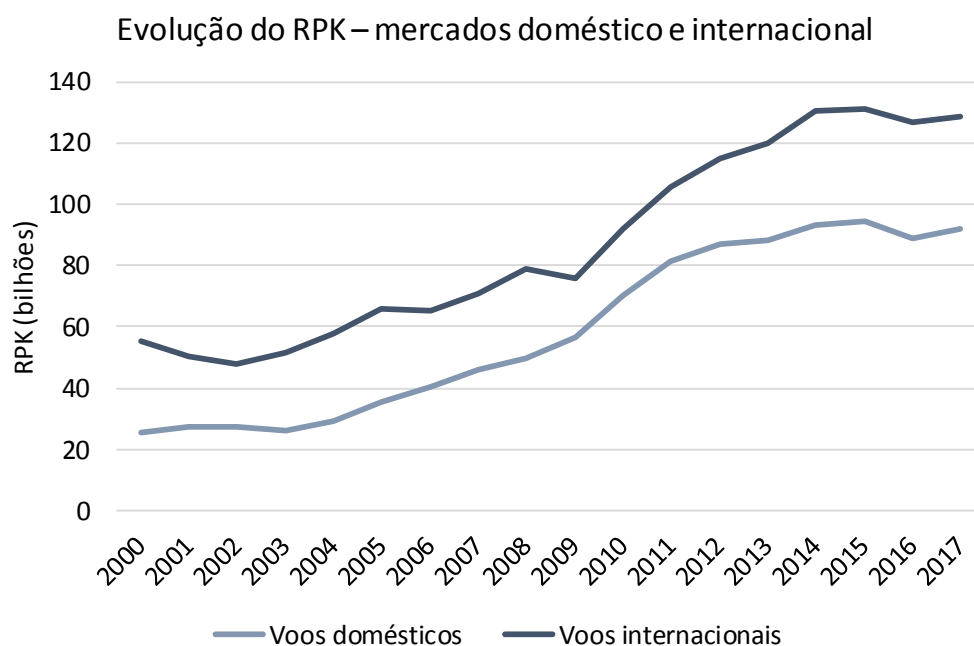


Figura 13: Demanda por transporte aéreo no Brasil, de 2000 a 2017, em bilhões de passageiros-km pagos transportados (RPK)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018a)

Apesar de a quantidade de voos domésticos ser, em média, quase sete vezes superior ao número de voos internacionais, em termos de RPK, a demanda internacional supera a nacional. Em 2017, os voos domésticos foram responsáveis por 42% do RPK da indústria, enquanto os trechos internacionais responderam por 58% da demanda (Figura 14).

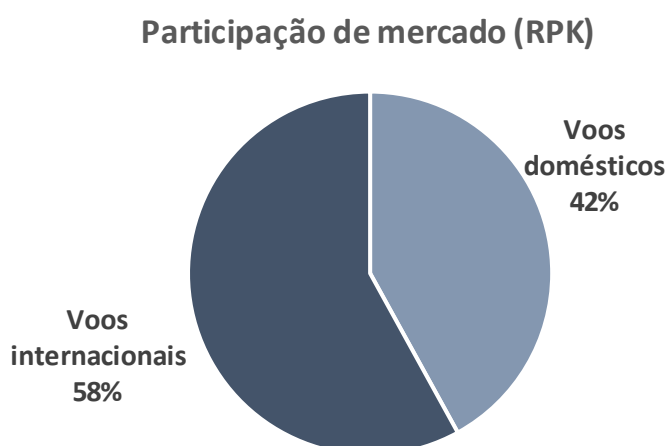


Figura 14: Participação dos voos domésticos e internacionais na demanda por transporte aéreo, em RPK

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018a)

São diversos os fatores que afetam a demanda por transporte aéreo. Segundo SMYTH e PEARCE (2008), o aumento de renda, em geral aproximado pelo PIB, foi constatado ser um parâmetro fundamental na demanda por esse meio de transporte. A Figura 15 mostra a evolução do RPK (doméstico e internacional) e do PIB per capita. Enquanto o PIB per capita brasileiro cresceu, em média, 1,3% ao ano entre 2000 e 2017, o número de passageiros-km transportados por aeronaves cresceu em torno de 6,3% ao ano. Os anos de 2010 e 2011 registraram os maiores crescimentos na demanda, com aumento de 22,2% e 15,1%, respectivamente. No mesmo período, o PIB per capita cresceu 6,5% (em 2010) e 3,0% (em 2011). As quedas no PIB em 2015 e 2016 também impactaram a demanda por transporte aéreo, conforme já mencionado anteriormente.

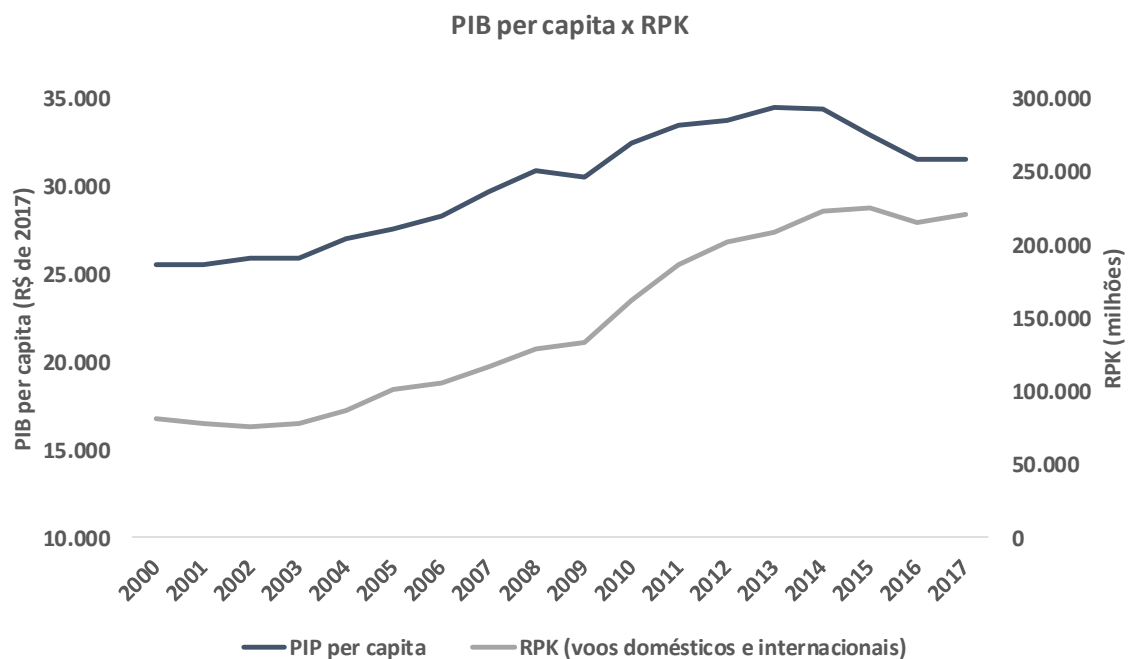


Figura 15: Comparação da evolução do PIB per capita e do RPK de voos domésticos
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018a) e Banco Central do Brasil (2018)

A demanda por transporte aéreo no país está associada, ainda, à evolução dos preços das passagens aéreas, os quais sofreram reduções significativas, tornando o transporte mais acessível para uma parcela da população que antes não o utilizava. Um dos principais motivos para a redução das tarifas foi a implementação da liberdade tarifária, ocorrida em 2002 para os voos domésticos e 2008 para os voos internacionais.

Segundo a ABEAR (2015), o conceito de liberdade tarifária – o direito de empresas competirem praticando livremente seus preços, e ajustando-os conforme a receptividade do mercado consumidor e de acordo com os níveis de oferta e demanda – passou a se disseminar no mercado de aviação a partir do final da década de 1970. Os Estados Unidos foram pioneiros nesse movimento, sendo seguidos por países europeus. No Brasil, o governo continuou tabelando os preços dos bilhetes aéreos até meados da década de 1990. Depois disso, ainda sob a gestão do Departamento de Aviação Civil (DAC), o país passou por um período de transição e os preços passaram a ser fixados dentro de faixas de valores máximos e mínimos. Somente a partir da virada do século XXI, o mercado doméstico finalmente viu a liberação dos preços, que foi estendida gradualmente para o mercado internacional, após o surgimento da ANAC. Em ambos os casos, o resultado foi a redução dos valores médios reais ao longo do tempo. Dentro desse sistema, as classes tarifárias são outro elemento central para o barateamento e popularização das viagens aéreas. No passado, os clientes só podiam optar por classes de serviço: primeira classe, classe executiva ou classe econômica. Com a liberdade tarifária, hoje os clientes podem escolher por classes tarifárias: tarifa cheia, tarifa regular ou tarifa promocional. Nesse caso, a lógica é que quanto mais barato um bilhete, mais restritas são as possibilidades de alteração ou cancelamento (o que explica a existência de taxas para estes procedimentos). Já os bilhetes de preços mais elevados têm grande flexibilidade de remarcação ou cancelamento sem novos desembolsos.

A Tarifa Aérea Média Doméstica é um indicador que representa o valor médio pago pelo passageiro em um sentido da viagem, ida ou volta, em razão da prestação dos serviços de transporte aéreo, enquanto o *Yield* Tarifa Aérea Médio Doméstico é um indicador que representa o valor médio pago pelo passageiro por quilômetro voado (ANAC, 2017). A Figura 16 mostra a evolução das tarifas e *yields*, de 2002 a 2016. Em 2002, os passageiros pagavam, em média, R\$ 682,10 pelo trecho viajado, o que representava um gasto de R\$ 0,99 por km. Em 2016, a tarifa média paga por passagem foi de R\$ 349,14, valor 49% inferior a 2002, e o *yield* reduziu 68%, chegando a R\$ 0,31 por km. Em 2008, a cotação do barril de petróleo subiu rapidamente, afetando os preços do combustível de aviação e, conseqüentemente, as tarifas aéreas.

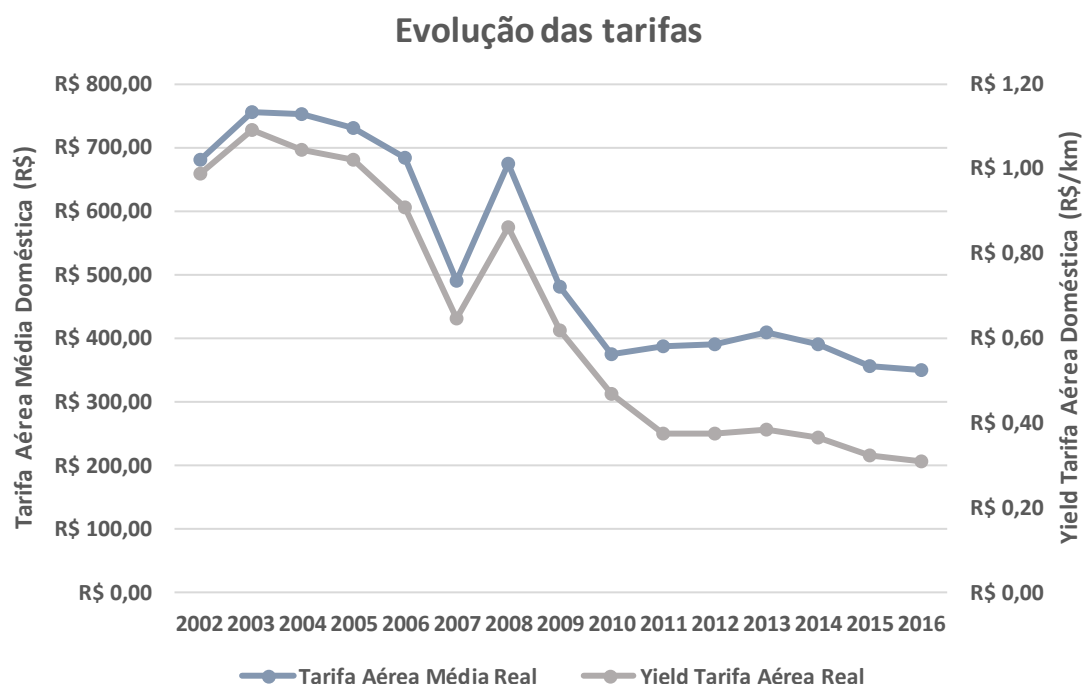


Figura 16: Evolução das tarifas de transporte aéreo, de 2002 a 2016

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017)

As Figuras 17 e 18 mostram as distribuições percentuais de assentos comercializados pelas empresas aéreas por intervalo de Tarifa Aérea Doméstica Real e de *Yield* Tarifa Aérea Doméstica, respectivamente, dos anos 2002 e 2016. Enquanto, em 2002, o maior número das passagens vendidas custou entre R\$ 300,00 e R\$ 400,00, em 2016, a maior parcela das passagens custou de R\$ 100,00 a R\$ 200,00. Em relação ao *yield*, em 2002 este indicador apresentou maior proporção na faixa de R\$ 0,60 a 0,70 por km, enquanto em 2016 a maior proporção desse indicador esteve na faixa de R\$ 0,10 a 0,20 por km.

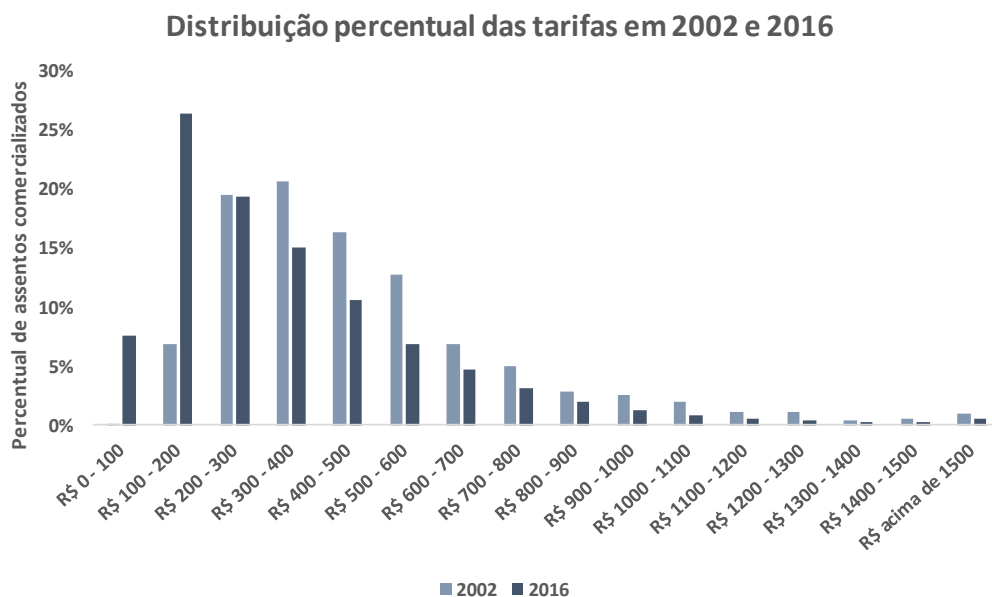


Figura 17: Distribuição percentual das tarifas de transporte aéreo em 2002 e 2016
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2011; 2017)

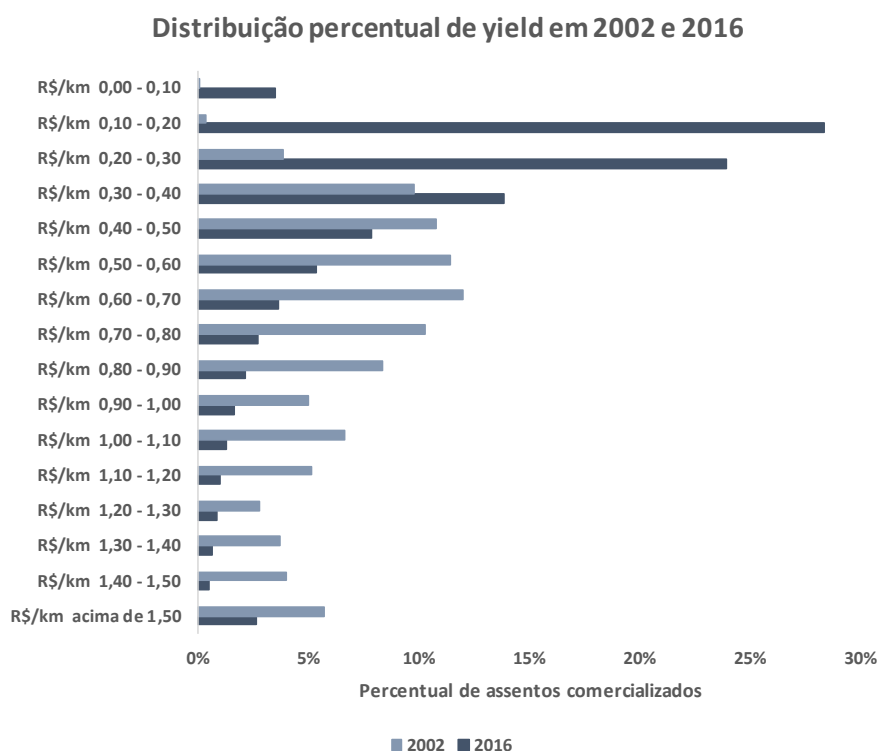


Figura 18: Distribuição percentual do *yield* de transporte aéreo em 2002 e 2016
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2011; 2017)

A taxa de ocupação das aeronaves, obtida pela razão entre passageiros-quilômetros transportados (RPK) e assentos-quilômetros disponíveis (ASK), mede o quão eficiente é a forma como os assentos são preenchidos. Esse parâmetro está fortemente relacionado com a eficiência energética, de forma que quanto maior for a taxa de ocupação, menor é o consumo de combustível por passageiro-quilômetro, logo maior é a eficiência no uso do combustível. A taxa de ocupação também é considerada uma informação estratégica nas análises dos resultados financeiros das empresas, uma vez que assentos vazios nas aeronaves representam perda de receita ou, muitas vezes, prejuízo. A Figura 19 apresenta a evolução da taxa de ocupação dos voos domésticos e internacionais, de 2000 a 2017. No caso dos voos domésticos, a razão RPK/ASK aumentou de 59%, em 2000, para 81% em 2017. No caso dos voos internacionais, a taxa de ocupação saltou de 74%, em 2000, para 84%, em 2017. O aproveitamento médio dos voos domésticos no período foi de 69%, enquanto no mercado internacional, a ocupação média foi de 78%.

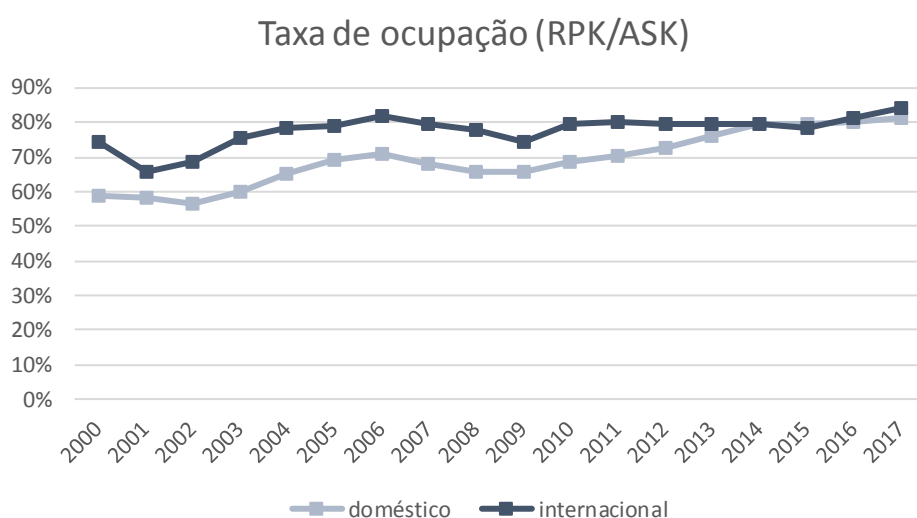


Figura 19: Evolução da taxa de aproveitamento (RPK/ASK), de 2000 a 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018a)

No cenário da aviação internacional, o Brasil está em 10º lugar na quantidade de passageiros transportados, com 96 milhões de passageiros transportados em voos domésticos e internacionais, em 2016, de acordo com dados do Banco Mundial (*The*

World Bank, 2018). A Figura 20 mostra o número de passageiros transportados por aeronaves em 2017 nos dez maiores países em termos de transporte aéreo.

Transporte aéreo por país em 2017 - 10 maiores no *ranking*
(milhões de passageiros transportados)

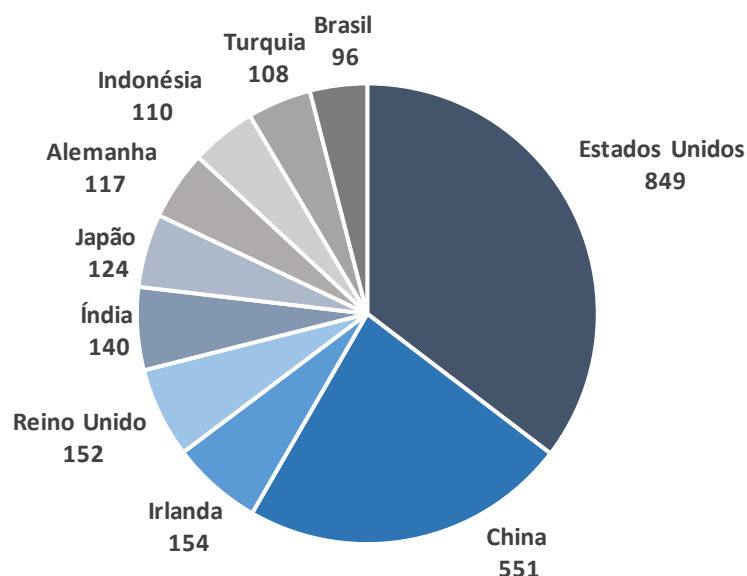


Figura 20: Transporte aéreo por país em 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *The World Bank* (2018)

Ao analisar as principais rotas de voos domésticos no país, percebe-se que os trechos com o maior número de passageiros apresentam um caráter de viagens corporativas, ligando as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília. A principal rota de transporte aéreo no Brasil é a que liga as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, conforme mostrado na Figura 21, que apresenta as vinte rotas aéreas com os maiores números de passageiros. Em relação aos voos internacionais, os cinco principais destinos dos voos brasileiros são Argentina, Estados Unidos, Chile, Panamá e Portugal, de acordo com dados da ANAC (2017).

Passageiros pagos transportados nas 20 principais rotas (2016)

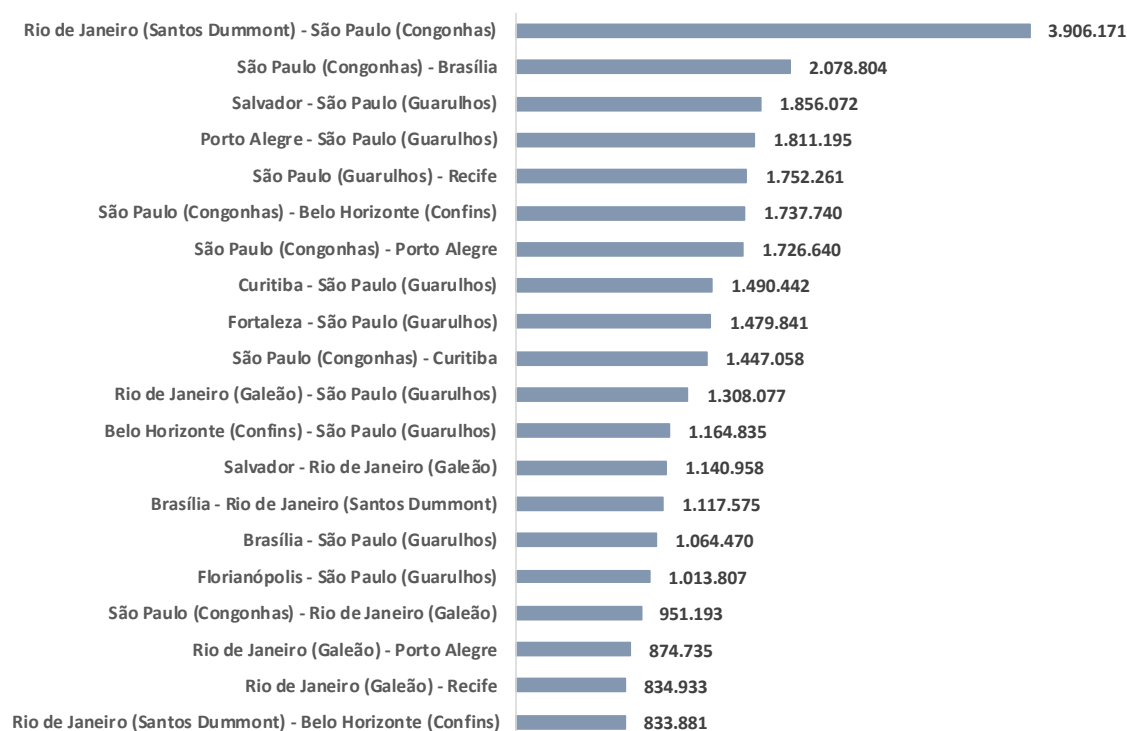


Figura 21: Passageiros pagos transportados nas 20 principais rotas de voos domésticos, em 2016

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017)

O mercado aéreo brasileiro é pouco competitivo, sendo composto por quatro empresas principais, que respondem por praticamente 100% da oferta e da demanda por transporte aéreo doméstico. A Latam manteve a liderança das operações de 2004 a 2015, mas a Gol passou a ocupar a primeira posição em 2016, com 36% do RPK dos voos domésticos tanto em 2016 quanto em 2017 (Figura 22). No mercado internacional, a Latam é a empresa brasileira com maior participação, tendo respondido por 22% do RPK em 2017 (Figura 23).

Participação das empresas no RPK doméstico (2017)

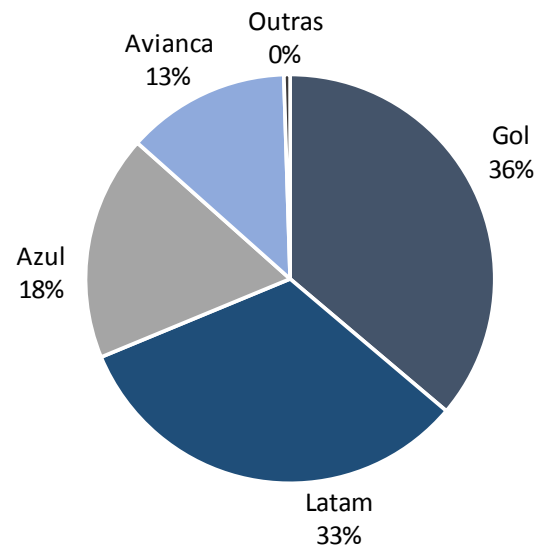


Figura 22: Participação das empresas aéreas no transporte aéreo doméstico em 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018a)

Participação das empresas no RPK Internacional

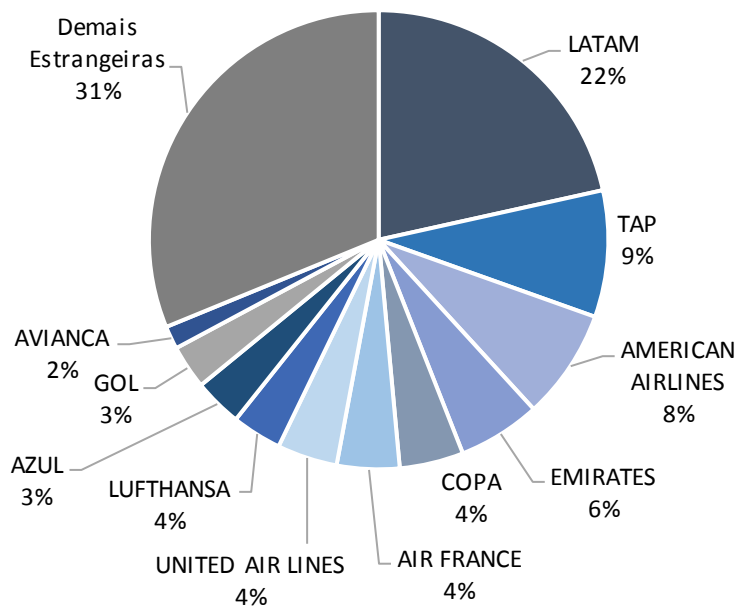


Figura 23: Participação das empresas aéreas no transporte aéreo internacional em 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018a)

3.2. Análise da oferta e demanda de combustível de aviação

De acordo com dados da ANP (2018a), o consumo de querosene de aviação, no país, foi de 4,3 bilhões de litros, em 2000, chegou ao valor máximo de 7,5 bilhões de litros, em 2014, e caiu para 6,7 bilhões em 2017, conforme mostra a Figura 24. Juntamente com o aumento da demanda por transporte aéreo no país, que ocorreu de forma mais significativa a partir de 2010, conforme visto anteriormente, o consumo de combustível de aviação cresceu de forma acelerada no mesmo período. A demanda nacional de querosene de aviação é suprida pela produção nacional e, também, pela importação do derivado. A produção nacional do derivado aumentou de 3,7 bilhões de litros, em 2000, para 6,2 bilhões de litros em 2017. Entre 2000 e 2017, a produção interna do combustível correspondeu, em média, a 80% da demanda, mas, em 2017, 92% do QAV consumido teve origem nacional.

Entre 2010 e 2014, o consumo de QAV aumentou, em média, 6,7% ao ano. De 2015 a 2017, no entanto, o consumo reduziu, em média, 3,5% ao ano. Em seu Plano Decenal de Energia (PDE 2026), a EPE (2017) estimou um crescimento médio de 2,6% ao ano para a demanda por QAV no país, de 2018 até 2026, o que corresponderia a um consumo de 8,5 bilhões de litros, em 2026. Considerando a mesma taxa de crescimento até 2030, a demanda nacional alcançaria o volume de 9,3 bilhões de litros.

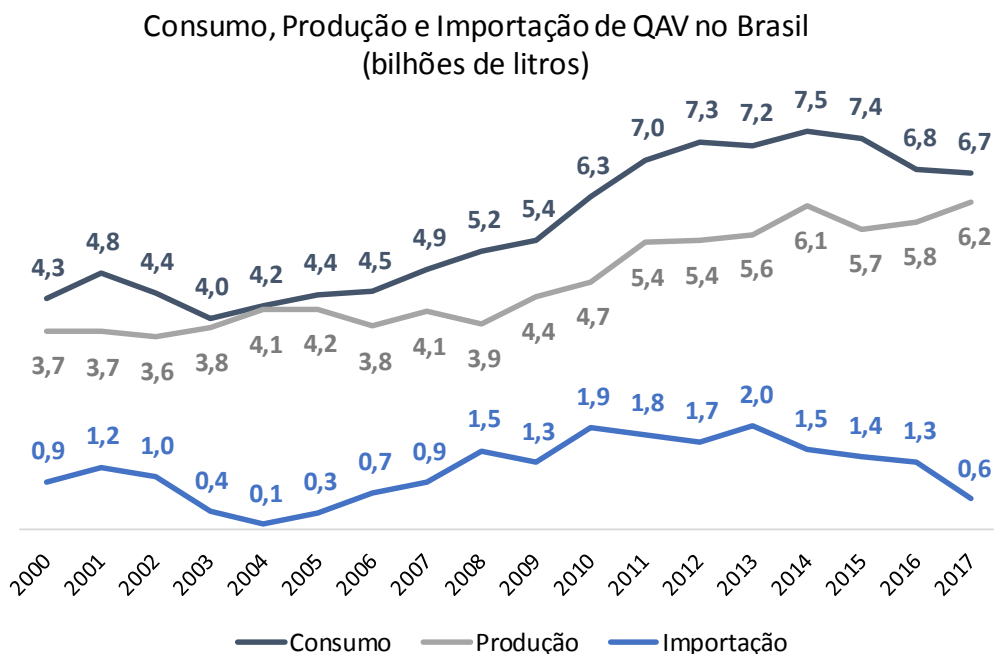


Figura 24: Série histórica do consumo, produção e importação de querosene de aviação no Brasil, em bilhões de litros

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2018a)

O QAV é produzido em 9 das 17 refinarias brasileiras e os maiores volumes saem da Revap (SP), Reduc (RJ) e Replan (SP), estados onde ficam os maiores mercados consumidores do combustível. A Tabela 3 contém os volumes de QAV produzidos em cada refinaria em 2017. As refinarias do Rio de Janeiro e São Paulo respondem por mais de 70% da produção do combustível aeronáutico. O maior mercado consumidor para esse produto encontra-se na Região Sudeste, a qual é responsável por 64% da demanda de QAV no Brasil, visto na Figura 25.

Tabela 3: Produção de QAV por refinaria, em 2017

Refinaria	Produção de QAV em 2017 (m ³)
Revap (SP)	1.957.106
Reduc (RJ)	1.326.731
Replan (SP)	1.246.746
Regap (MG)	470.518
Rlam (BA)	335.213
Repar (PR)	301.037
Refap (RS)	205.389
RPCC (RN)	178.725
Reman (AM)	147.135
Total	6.168.600

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2018a)

Demanda de QAV por região (2017)

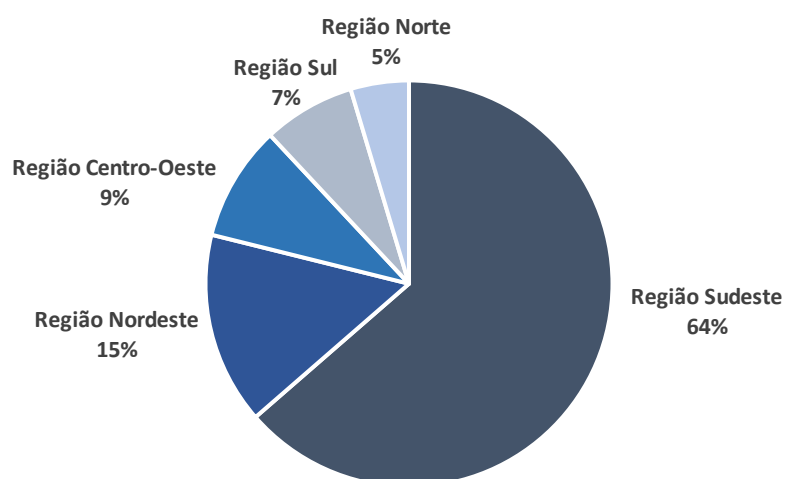


Figura 25: Demanda de QAV por região, em 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2018a)

O Brasil é o quinto maior consumidor de combustível de aviação do mundo, atrás de Estados Unidos, China, Rússia e Canadá, de acordo com dados das Nações Unidas (*UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION*, 2018), conforme mostra a Figura 26.

Consumo de QAV por país (2015) - 10³ Mt

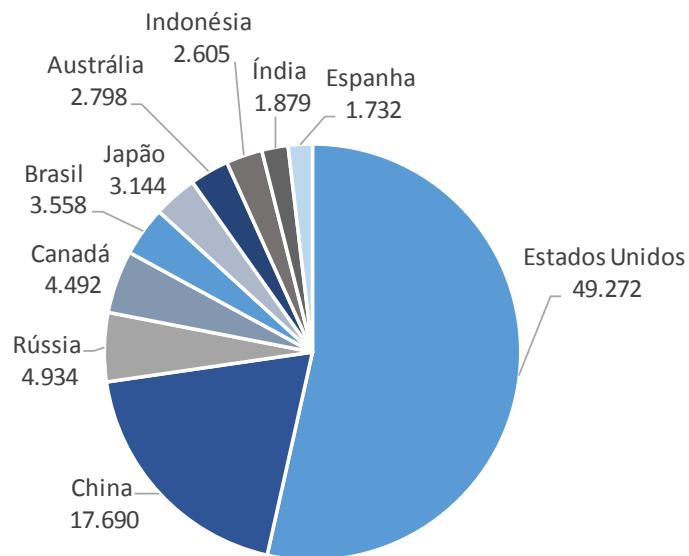
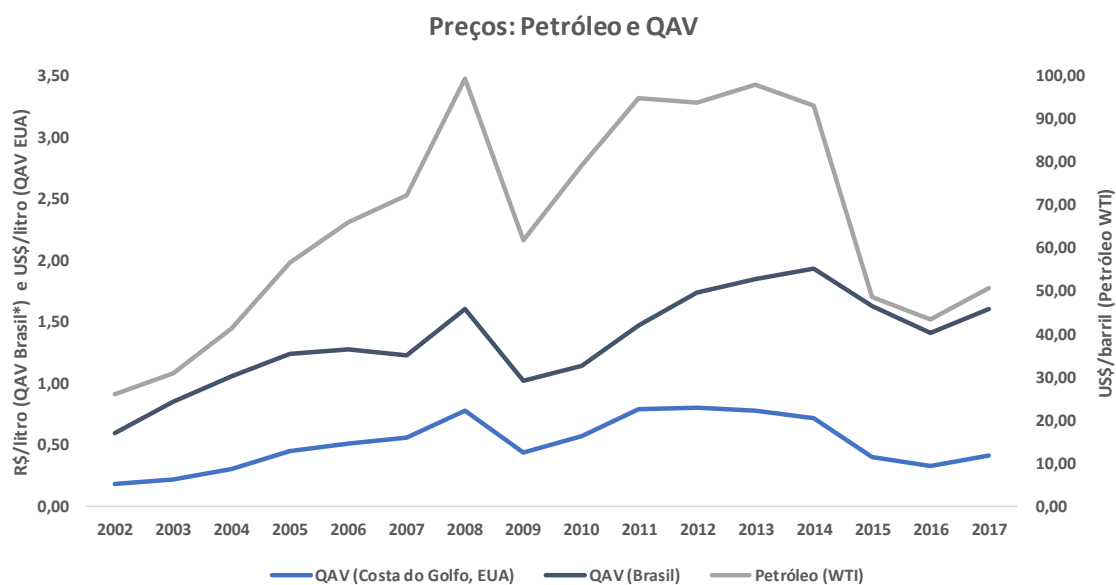


Figura 26: Consumo de QAV por país, em 2015

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de *UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION* (2018)

Os preços do petróleo (WTI) e do querosene de aviação nos Estados Unidos (*Gulf Coast*) e no Brasil, entre 2002 e 2017, estão apresentados na Figura 27. Devido aos aumentos de preços do barril de petróleo a partir de 2009, o preço do QAV também apresentou trajetória crescente, de 2009 a 2014, chegando a R\$ 1,94 por litro. A partir do final de 2014, o preço do barril de petróleo WTI passou de valores da ordem de 90 dólares para algo em torno de 40 dólares, em 2016, derrubando, também, os preços do combustível de aviação. De acordo com CNT (2015), nem toda variação pôde ser percebida no país, pois a desvalorização do real frente ao dólar reduziu os possíveis benefícios da redução do preço do QAV no mercado internacional.



*Preço médio ponderado de produtores e importadores. Os preços incluem, quando cabíveis, as parcelas de Cide, PIS/Pasep e Cofins. Não incluem ICMS.

Figura 27: Preços médios de Petróleo WTI e QAV na Costa do Golfo e no Brasil

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2018a) e EIA (2018)

O preço do QAV apresenta grandes variações entre os estados, o que é explicado, em grande parte, pela diferença de alíquota do imposto estadual ICMS, que varia de 12% a 25%, conforme mostra a Figura 28. Alguns estados possuem alíquotas mais baixas, estabelecidas em regimes especiais, condicionadas à oferta de voos pelas companhias aéreas.

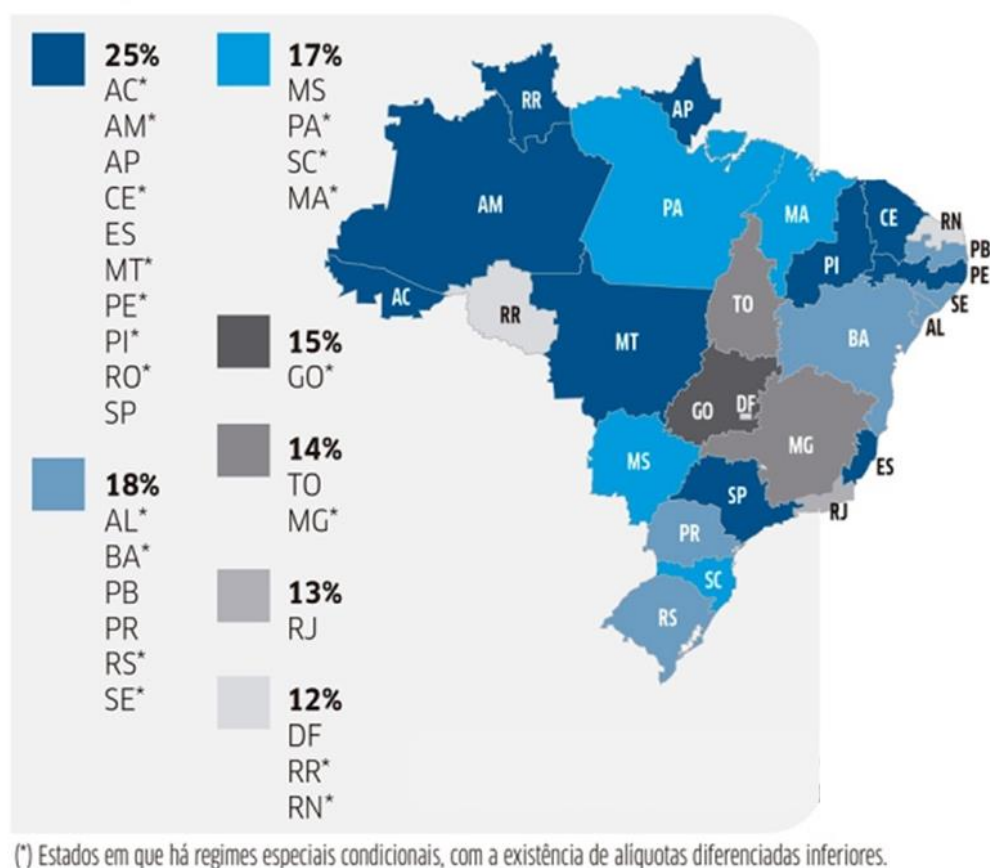


Figura 28: Alíquotas de ICMS sobre o QAV nos estados do Brasil

Fonte: Diário do Nordeste (2017)

Avaliando os preços do combustível, em voos domésticos e internacionais, em 35 aeroportos brasileiros (Figura 29), percebe-se que, em voos internacionais tais valores são, na maior parte dos casos, menores do que em voos domésticos. Isso ocorre porque o ICMS é cobrado apenas em voos domésticos, enquanto os voos internacionais são isentos, o que explica o fato de algumas rotas para o exterior serem, algumas vezes, comparativamente mais baratas do que trechos locais. Comparando os preços para as rotas domésticas, o aeroporto do Espírito Santo (Eurico Sales, em Vitória) apresentou o preço mais alto e o de Minas Gerais (Confins, em Belo Horizonte) apresentou o mais baixo. As alíquotas de ICMS nesses estados são, respectivamente, 25% e 14%.

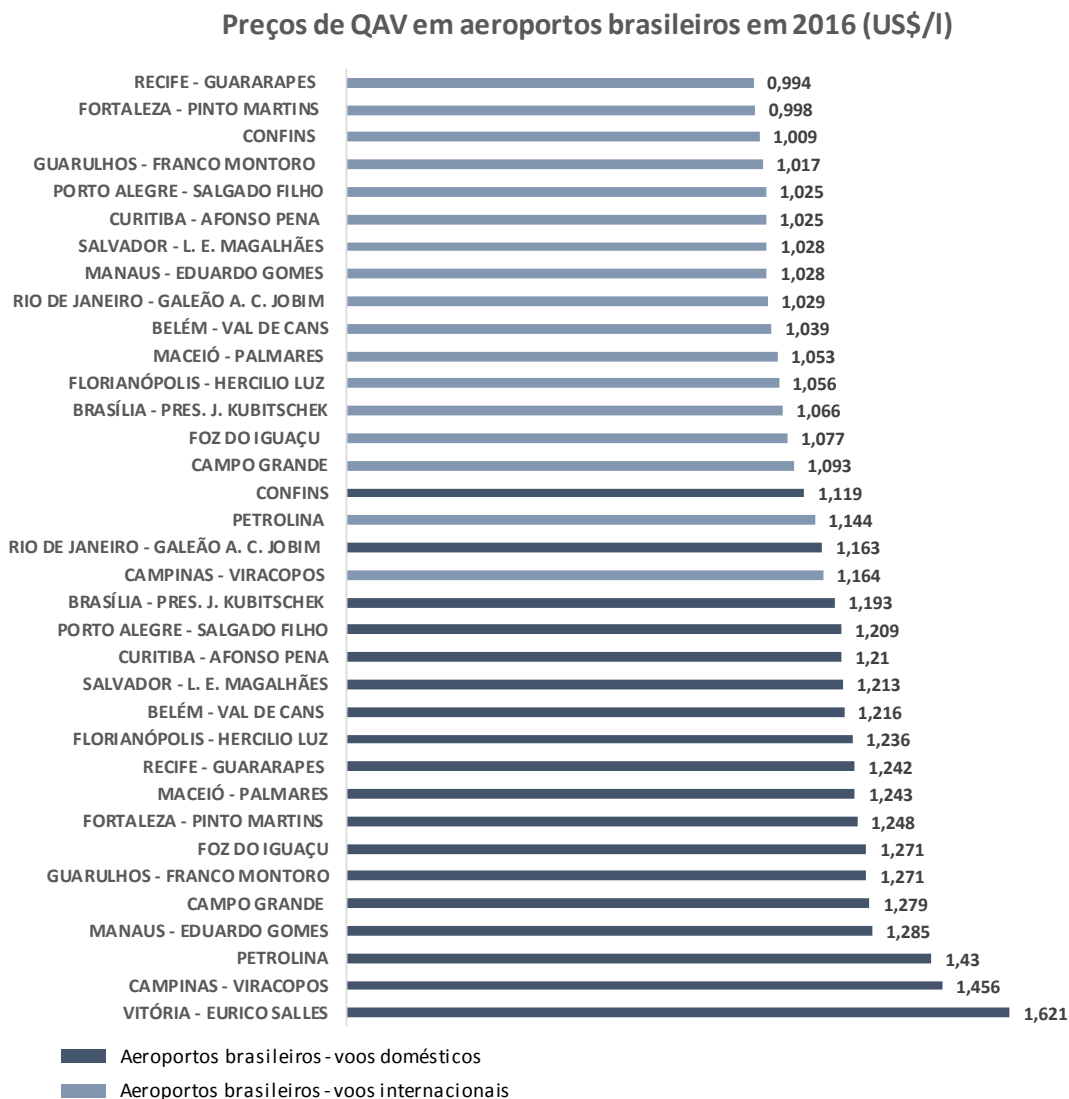


Figura 29: Preço do QAV em aeroportos brasileiros em 2016

Fonte: Adaptado de Shell Global (2016 apud ABEAR, 2016)

Ainda que a sua precificação seja vinculada ao mercado internacional, o QAV comercializado no Brasil tem preços significativamente superiores aos observados em aeroportos de outros países, o que eleva o custo da prestação do serviço de transporte aéreo de passageiros (CNT, 2015). A Figura 30 apresenta os preços de QAV em diversos aeroportos no mundo, sendo possível verificar que estão abaixo dos valores praticados nos aeroportos brasileiros (Figura 29).

Preços de QAV em aeroportos internacionais em 2016 (US\$/l)

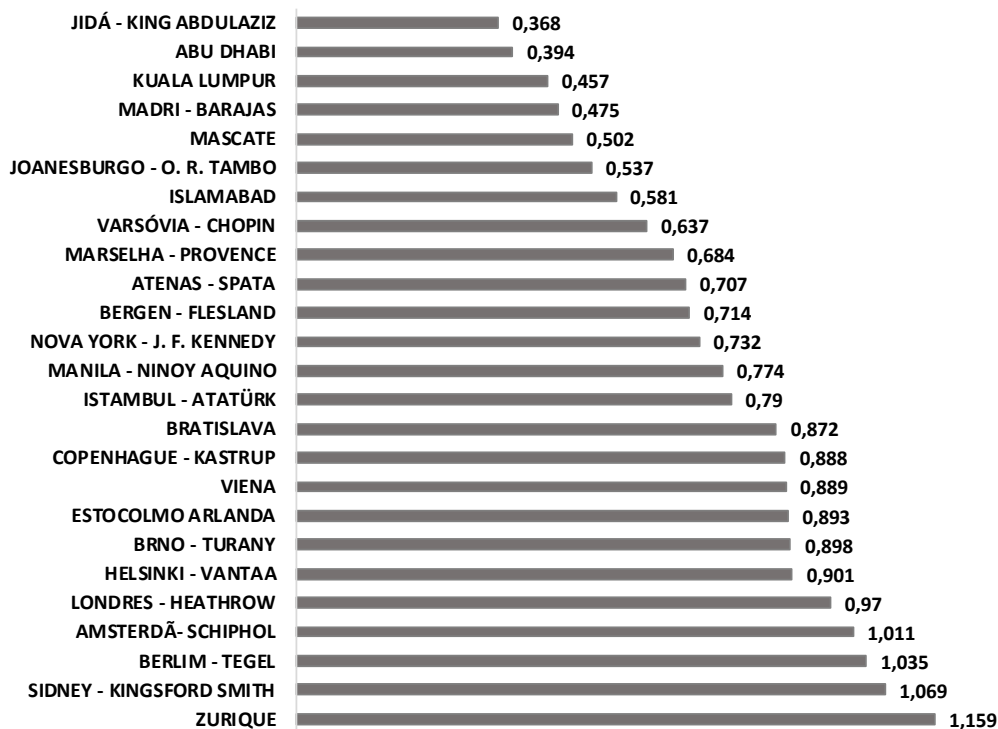


Figura 30: Preço do QAV em aeroportos de diferentes cidades em 2016

Fonte: Adaptado de Shell Global (2016 apud ABEAR, 2016)

3.3. Análise do desempenho financeiro do setor e das empresas

De acordo com dados da ANAC (2017; 2018b), a receita de serviços aéreos públicos compreende a receita auferida pelas empresas brasileiras de transporte aéreo público regular e não regular, exceto táxi-aéreo, tais como a venda de passagens, fretamentos (voos não regulares), transporte de carga e malote postal, entre outros. Em 2017, o faturamento das quatro maiores empresas aéreas com tais receitas correspondeu a R\$ 36,85 bilhões (Tabela 4), valor 8,2% superior ao de 2016 (as receitas das quatro empresas somaram R\$ 34,06 bilhões em 2016). No período de 2009 a 2016, o crescimento médio anual da receita de serviços aéreos públicos da indústria foi de 11,9%. A Latam foi a empresa que auferiu o maior montante com as receitas de serviços aéreos públicos em 2017, com R\$ 14,96 bilhões, o que corresponde a um aumento de

5,1% em relação a 2016. A empresa Avianca foi a que apresentou o maior crescimento percentual das receitas entre 2016 e 2017, com 19,0% de aumento.

Tabela 4: Receita dos serviços das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017

Receita de Serviços Aéreos Públicos (R\$ bilhões)					
Ano	Latam	Gol	Azul	Avianca	Indústria
2009	8,60	5,83	0,38	0,42	16,51
2010	10,29	6,92	0,87	0,58	20,96
2011	11,52	7,18	1,72	0,83	24,35
2012	12,17	7,10	2,55	1,32	26,55
2013	13,27	8,72	3,78	1,80	31,00
2014	13,87	9,66	5,37	2,22	32,89
2015	14,50	9,73	6,65	2,78	35,23
2016	14,30	9,61	7,02	3,13	35,59
2017	14,96	10,06	8,10	3,73	36,85*

*Os dados disponíveis referem-se às quatro maiores empresas

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018b)

Os custos e despesas operacionais dos serviços aéreos públicos das quatro maiores companhias aéreas somaram R\$ 33,65 bilhões em 2017, o que representou um aumento de 2,4% em relação ao ano anterior (Tabela 5). No período de 2010 a 2016, os custos e despesas de voo aumentaram, em média, 9,0% ao ano, valor um pouco abaixo do crescimento médio das receitas. A Latam foi a empresa que registrou o maior valor de custos e despesas operacionais dos serviços aéreos públicos em 2017 (14,06 bilhões de reais), sendo a única a apresentar redução dos custos em relação ao ano anterior. A Avianca registrou um aumento de 26,0% nos seus custos entre 2016 e 2017.

Tabela 5: Custos e despesas das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2010 a 2017

Custos e despesas de voo (R\$ bilhões)					
Ano	Latam	Gol	Azul	Avianca	Indústria
2010	10,76	6,32	0,92	0,64	20,73
2011	11,97	7,42	1,70	0,87	25,16
2012	14,00	7,87	2,60	1,37	29,51
2013	14,61	8,75	3,43	1,75	31,48
2014	14,96	9,59	5,02	2,18	33,29
2015	14,69	9,69	6,63	2,49	34,97
2016	14,80	8,70	6,55	2,80	34,16
2017	14,06	9,09	6,97	3,53	33,65*

*Os dados disponíveis referem-se às quatro maiores empresas

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018b)

Em relação ao resultado líquido, o setor apurou prejuízo durante seis exercícios sociais consecutivos, de 2011 a 2016, com um resultado negativo acumulado de R\$ 16,8 bilhões. Em 2017, no entanto, esse indicador apresentou recuperação, com as quatro maiores empresas aéreas somando um resultado positivo de R\$ 411,9 milhões (Tabela 6). A empresa Azul apresentou o maior resultado líquido em 2017, R\$ 278,6 milhões, e apenas a Gol teve um resultado negativo. Os anos de prejuízos levaram as empresas a adotarem medidas de redução de custos, como a diminuição do número de voos ofertados, de aeronaves operando e eliminação de rotas aéreas, além da redução de despesas gerais e administrativas, conforme será mostrado mais adiante.

Tabela 6: Resultado líquido das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017

Resultado Líquido (R\$ milhões)					
Ano	Latam	Gol	Azul	Avianca	Indústria
2009	1.253,7	725,7	- 149,8	- 72,1	1.701,8
2010	590,0	292,5	- 96,3	15,1	838,0
2011	- 507,7	- 518,3	- 56,7	- 88,8	- 1.648,0
2012	- 1.413,7	- 1.333,0	- 143,7	- 102,0	- 3.532,6
2013	- 1.653,3	- 709,8	136,5	- 36,5	- 2.500,1
2014	- 673,9	- 1.055,8	80,6	- 14,8	- 1.658,6
2015	- 1.571,0	- 3.493,7	- 754,6	- 12,4	- 5.935,3
2016	- 651,3	- 304,8	- 549,1	- 71,4	- 1.573,4
2017	120,5	28,8	278,6	41,6	411,9*

*Os dados disponíveis referem-se às quatro maiores empresas

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018b)

Além de apresentar prejuízos durante seis anos, o setor também teve resultados operacionais negativos de 2011 a 2016 (apenas em 2014 foi positivo). O EBIT (lucro antes de juros e impostos, em português) representa a diferença entre as receitas operacionais e os custos e as despesas operacionais, sem a inclusão de receitas ou despesas financeiras, por exemplo, e reflete o resultado das atividades-fim da empresa (ANAC, 2017). Em 2017, a indústria apresentou uma melhora sensível neste indicador, com três das quatro empresas com resultados operacionais positivos (a Avianca foi a única a apresentar um valor negativo para este indicador), conforme mostra a Tabela 7. Em 2016, as empresas Azul e Avianca tiveram lucro operacional (EBIT) positivo.

Tabela 7: EBIT das maiores empresas aéreas e da indústria, de 2009 a 2017

EBIT (R\$ milhões)						
Ano	Latam	Gol	Azul	Avianca	Indústria	
2009	197,7	422,5	- 138,2	- 70,0	334,8	
2010	777,4	716,2	- 51,9	- 60,3	1.482,7	
2011	457,7	- 246,6	20,2	- 40,4	93,6	
2012	- 928,4	- 971,5	- 48,4	- 50,6	2.348,3	
2013	- 888,5	6,5	351,0	50,8	565,8	
2014	- 325,1	173,7	350,5	50,0	288,4	
2015	- 403,2	- 578,8	- 262,1	127,3	1.113,5	
2016	- 1.259,2	- 109,1	212,4	167,2	951,3	
2017	323,9	391,3	768,0	- 26,3	1.456,9*	

*Os dados disponíveis referem-se às quatro maiores empresas

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 2018b)

As quatro principais empresas aéreas brasileiras, conforme descrito em suas Demonstrações Contábeis de 2015, 2016 e 2017, disponibilizadas na página da ANAC (2018b), avaliam que os fatores que mais impactaram os seus resultados em 2015 e 2016, e que estão entre os principais elementos de riscos financeiros aos quais as empresas estão expostas, são o preço do combustível de aviação e a variação na taxa de câmbio. As empresas também mencionaram que a retração da economia brasileira afetou os seus desempenhos. A Figura 31 mostra o comportamento do resultado líquido da indústria, do PIB per capita, do preço do QAV e da taxa de câmbio de 2009 a 2017. A situação financeira da indústria é afetada por um conjunto de fatores, sendo esses três apenas alguns deles, portanto não há uma correlação clara entre os fatores. Em 2015, ano com em que a indústria teve o resultado mais negativo, o preço do QAV caiu 16%, enquanto o PIB per capita reduziu em 4%, e a taxa de câmbio aumentou 42%, em relação a 2014. Em 2016, houve queda do PIB em 4% e aumento do câmbio em 5%, enquanto o preço do QAV reduziu em mais 13%.

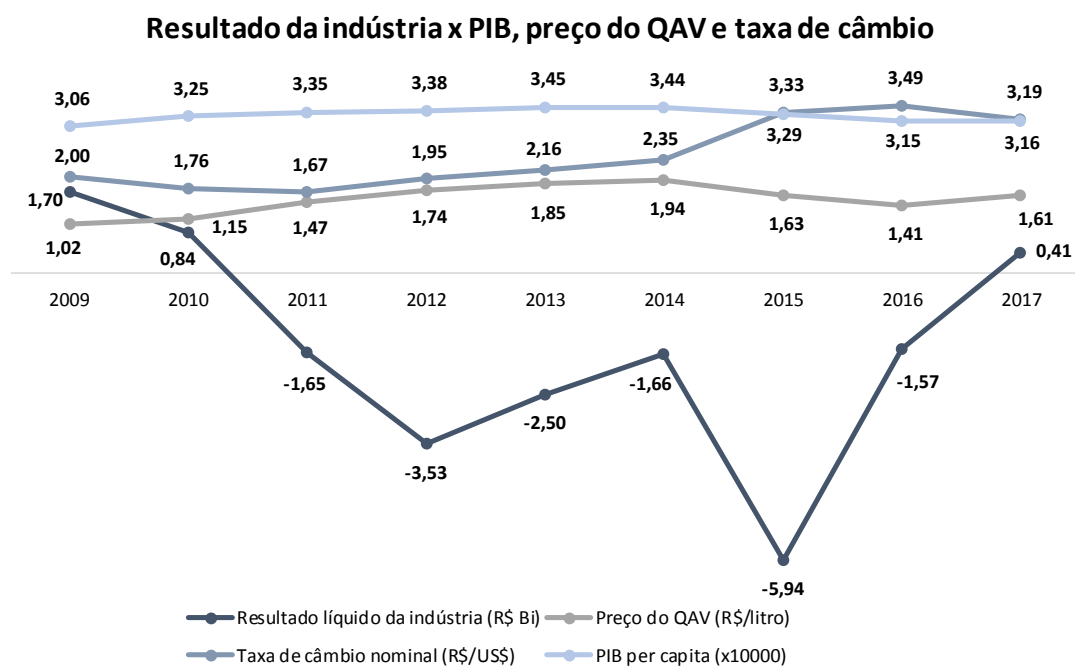


Figura 31: Análise do resultado da indústria e dos fatores: PIB per capita (R\$ 2017), preço do QAV e taxa de câmbio (R\$/US\$ 2018)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017; 18), ANP (2018a), IPEADATA (2018) e BANCO CENTRAL DO BRASIL (2018)

De acordo com ANAC (2017), os combustíveis e lubrificantes mantiveram-se como o principal item de custos e despesas de serviços aéreos públicos entre 2009 e 2016, representando 33% dos custos e despesas de voo, em média. O segundo item mais representativo em 2016 foram os custos com seguro, arrendamento e manutenção de aeronaves (23%) e o terceiro item foram as despesas operacionais (15%). Em 2017, a participação dos gastos com combustíveis e lubrificantes nos custos das empresas variou de 29%, no caso da Latam, a 39%, no caso da Gol, conforme apresentado na Tabela 8. Uma vez que o gasto com combustíveis é tão representativo na estrutura de custos das empresas, estas estão sujeitas ao risco de variação nos preços do petróleo e derivados.

Tabela 8: Participação dos gastos com combustíveis e lubrificantes nos custos das empresas

Companhia aérea	Custos dos Serviços Prestados em 2017 (R\$ MM)	Gastos com combustíveis e lubrificantes em 2017 (R\$ MM)	Participação dos gastos com comb&lub nos custos
Latam	12.235,62	3.536,32	29%
Gol	7.411,03	2.887,74	39%
Azul	6.096,03	1.848,19	30%
Avianca	3.008,95	1.098,17	36%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018b)

As empresas aéreas brasileiras estão expostas a outros riscos, como o da variação cambial, uma vez que possuem obrigações a serem pagas em moeda americana, como é o caso dos arrendamentos de aeronaves, peças e equipamentos, manutenção, financiamentos, entre outros. A Tabela 9 mostra a exposição cambial (em relação à moeda americana) das companhias aéreas em 2017. A empresa Gol foi a que apresentou o maior valor de gastos atrelados ao dólar em 2017.

Tabela 9: Exposição cambial das empresas aéreas brasileiras em 2017

Companhia aérea	Exposição cambial em 2017 (R\$ MM)
Latam	2.189
Gol	6.194
Azul	83
Avianca	362

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018b)

Conforme mencionado anteriormente, em função dos prejuízos vivenciados pelas companhias aéreas e da redução da demanda por transporte aéreo em decorrência da recessão econômica, as empresas adotaram estratégias de redução de custos, como a diminuição do número de voos ofertados. Entre 2012 e 2016, houve uma redução de 162 mil voos domésticos e 7 mil voos internacionais. Somente entre 2015 e 2016, a redução do número de voos domésticos foi de 107 mil, enquanto o número de voos

internacionais foi reduzido em 11,5 mil. A Figura 32 apresenta a evolução da quantidade de voos ofertados, de 2007 a 2016.

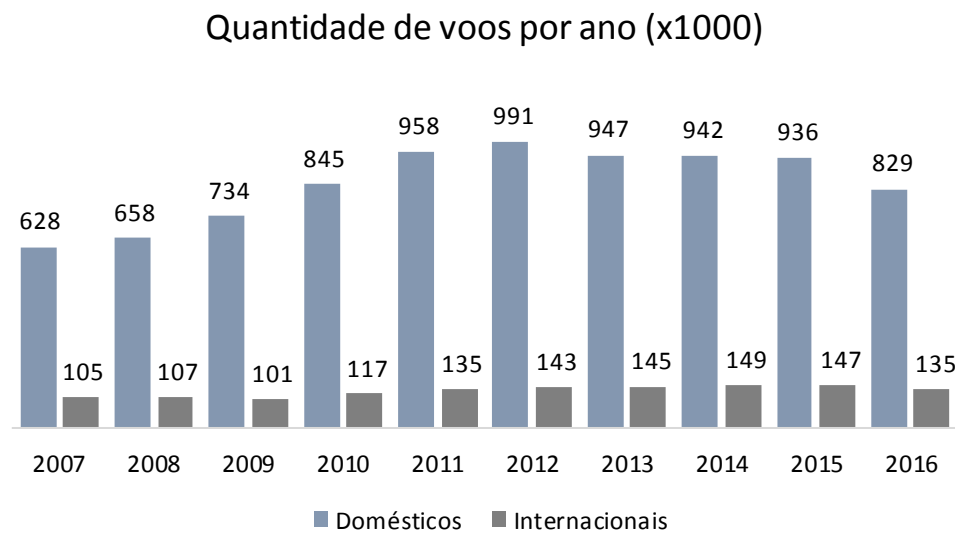


Figura 32: Evolução da quantidade de voos no Brasil

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2017)

A redução do número de aeronaves foi outra estratégia adotada pelas empresas para reduzir os custos e se adaptarem à demanda mais baixa. Entre 2015 e 2016, 30 aeronaves deixaram de operar nos voos das companhias brasileiras e, em 2017, as frotas apresentaram uma redução total de seis aeronaves (Figura 33).

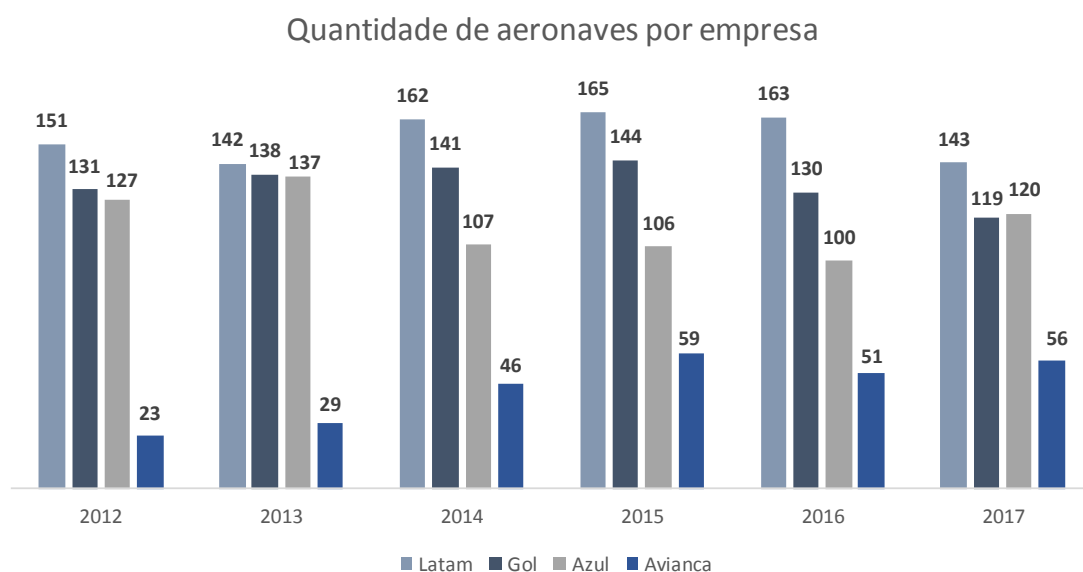


Figura 33: Evolução da quantidade de aeronaves por empresa

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018b)

A análise do desempenho econômico do setor aéreo é essencial para a discussão sobre as formas de promoção do bioquerosene de aviação no país. Os estudos a respeito das possibilidades de introdução deste novo biocombustível no país devem considerar, além das questões tecnológicas relacionadas à sua produção, como a seleção das matérias-primas mais propícias e das rotas de produção mais convenientes para o caso brasileiro, as questões econômico-sociais, que incluem a avaliação das políticas no que se refere aos seus impactos nas empresas aéreas e nos custos ao usuário do transporte aéreo.

Neste capítulo foi mostrado que a indústria de aviação civil brasileira vem enfrentando resultados negativos há seis anos, em função de fatores internos, como a recessão econômica, que impacta na redução da demanda por transporte aéreo, e fatores externos, como o preço dos combustíveis, os quais estão atrelados ao preço do petróleo no mercado internacional e representaram entre 29% e 39% dos custos das empresas aéreas brasileiras em 2017.

Conforme visto no Capítulo 2, uma vez que o setor aéreo mundial já se comprometeu com metas de redução de emissões, as empresas aéreas precisarão adotar estratégias de redução de consumo de combustíveis fósseis, o que pode implicar em aumentos dos seus custos operacionais. Os biocombustíveis de aviação ainda apresentam um custo mais alto do que o do querosene de origem mineral, e dependem de aumentos de escala de produção para que logrem reduzir custos unitários. Desse modo, é importante entender a capacidade atual e futura das empresas em incorporar novos gastos com medidas de redução de emissões e avaliar as políticas disponíveis para que um mercado de bioquerosene de aviação seja viabilizado com os menores impactos econômicos possíveis na indústria de aviação brasileira.

4. Instrumentos de mitigação de emissões de GEE aplicados a biocombustíveis

A transição para sistemas energéticos mais sustentáveis é complexa, envolvendo mudanças fundamentais e inter-relacionadas em tecnologias, combustíveis, infraestrutura, políticas, mercados e instituições. Um tema central desta discussão é o de que não existe um pacote de políticas de transição energética único, que seja adequado a todos os países e setores. Os objetivos e limitações das políticas nacionais darão forma ao conjunto de políticas de cada jurisdição. Os múltiplos objetivos, como desenvolvimento econômico, melhoria das condições de saúde afetadas pela qualidade do ar e segurança energética, e as limitações, como os desafios associados aos preços crescentes da energia final, a existência de infraestruturas altamente emissoras de poluentes ou a restrição de capital para investimentos, vão moldar a combinação de políticas nacionais para a transição do setor energético. Por isso, na prática, conjuntos de políticas que promovem resultados similares em termos de redução de GEE podem ser bem distintos em diferentes países ou regiões. Não obstante, países com objetivos e restrições semelhantes podem aprender com as suas experiências (IEA, 2017).

Uma vez que se constata a necessidade de intervenção governamental para endereçar um problema ambiental, os agentes envolvidos na elaboração das políticas têm diversas opções à sua disposição para influenciar os níveis de poluição. De modo a decidir qual abordagem deve ser implementada, os agentes devem ter ciência das limitações de cada uma delas em enfrentar um problema ambiental específico. É importante avaliar como os entraves políticos e informacionais, a competição imperfeita ou distorções de mercado pré-existentes interagem com as diversas opções de políticas (EPA, 2010).

Quando se pretende estimular uma indústria de biocombustíveis, pode-se utilizar como fonte de informação a literatura existente a respeito de inovações e transições tecnológicas. Entre os elementos principais de práticas que podem ser aprendidas da literatura e que são relevantes para uma indústria nascente de biocombustíveis estão o uso de um conjunto de políticas complementares e que sejam claras e estáveis, e a

estruturação de coalizões fortes para contrapor-se à inércia dos sistemas já existentes (DEANE e PYE, 2016).

A eficiência econômica é, claramente, um atributo desejável em um instrumento. O uso de um mecanismo economicamente eficiente envolve alocar a mínima quantidade de recursos para o controle da poluição, condicionada ao atingimento do objetivo estabelecido. Consequentemente, o uso de instrumentos economicamente eficientes é um pré-requisito para alcançar a alocação economicamente eficiente dos recursos (PERMAN et al., 2003).

EPA (2010) menciona que a avaliação do sucesso de uma política deve levar em consideração diversos critérios, entre eles: eficácia ambiental (o quanto ela é capaz de promover o atingimento de determinada meta ambiental); eficiência econômica (se a meta é alcançada com o menor custo possível às empresas e aos consumidores); redução de custos administrativos, de monitoramento e fiscalização (se a política proporciona redução destes custos em relação às outras medidas disponíveis); indução de inovação; e aumento da consciência ambiental.

No caso dos biocombustíveis de aviação, diversos fatores contribuem para o entendimento de que a adoção de políticas é essencial para que o seu desenvolvimento alcance escalas industriais. IRENA (2017) pontua que a falta de tecnologias maduras, o custo das matérias-primas⁶ e a competição do bioquerosene com outras indústrias de biocombustíveis, como a do biodiesel, por exemplo, são barreiras a serem superadas. ICAO (2017) menciona que, dependendo da rota de produção, os biocombustíveis podem custar de 1,5 a 3 vezes a mais do que o combustível fóssil, o que representa um aumento significativo no custo operacional das companhias aéreas. Desse modo, para que as metas de redução de emissões propostas pela indústria de aviação sejam alcançadas, são necessárias medidas de incentivo ao desenvolvimento do biocombustível, tanto da tecnologia de produção quanto da cadeia de suprimento, de modo a reduzir a diferença de preços entre o derivado fóssil e o bioquerosene.

⁶ No caso das rotas que utilizam resíduos, como a rota FT, por exemplo, o custo com matérias-primas não é alto, porém o custo de investimento em uma planta é mais elevado, conforme visto no capítulo 2.

O objetivo deste capítulo é conceituar os principais instrumentos disponíveis para a promoção de energias renováveis, em especial, os biocombustíveis. A teoria a respeito dos mecanismos disponíveis servirá como base para a elaboração das propostas aplicadas ao desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene no Brasil, as quais serão apresentadas no Capítulo 5.

As opções de políticas a serem analisadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 10. As medidas são divididas em quatro tipos: regulações do tipo comando e controle; instrumentos baseados em preços; políticas de apoio à tecnologia; e Informação e abordagens voluntárias. Cada um destes tipos será explicado em maiores detalhes a seguir.

Tabela 10: Opções de políticas de mitigação das emissões de GEE, com ênfase na promoção de biocombustíveis

Tipo de política	Opções de políticas
Regulações do tipo "Comando e Controle"	Padrões tecnológicos (ex: mandatos de mistura de biocombustíveis; padrões de desempenho energético)
	Padrões de desempenho (ex: eficiência média em emissões de CO ₂ da frota de veículos)
	Proibição ou obrigação de uso de certos produtos ou práticas
	Obrigação de divulgação de informações
	Obrigação de certificação para operação
	Planejamento do uso da terra / Zoneamento
Instrumentos baseados em preços	Tributos diretos sobre o CO ₂
	Tributos/Encargos em entradas ou saídas de processos (ex: impostos sobre combustíveis ou veículos)
	Incentivos/Subsídios para atividades que promovam redução de emissões
	Sistemas de comércio de emissões (ex: "cap and trade" ou "baseline and credit")
Políticas de apoio à tecnologia	Financiamento público ou privado de P&D
	Compras públicas
	Certificados verdes (padrão de portfolio renovável ou padrão de energia limpa)
	Tarifas "feed-in"
	Investimento público em infraestrutura de apoio a novas tecnologias
	Políticas para remover barreiras financeiras à aquisição de tecnologias verdes (empréstimos, fundos renováveis)
Informação e abordagens voluntárias	Programas de classificação e etiquetagem
	Campanhas de informação
	Educação e treinamento
	Certificação e rotulagem de produtos
	Programas de premiação

Fonte: Adaptado de HATTORI (2012)

4.1. Regulações do tipo “Comando e Controle”

Segundo PERMAN (2003), o principal método de redução da poluição na maioria dos países tem sido o uso de controles diretos sobre os agentes poluidores. Esses tipos de controles são conhecidos como instrumentos de comando e controle.

As medidas do tipo comando e controle empregam regras e padrões para controlar as emissões de poluentes. Na prática, os padrões estabelecem limites máximos de poluentes que podem ser emitidos ou determinam alguma tecnologia de redução de emissões que os poluidores deverão usar. Em ambos os casos, os agentes poluidores têm pouca ou nenhuma flexibilidade na decisão sobre como irão cumprir a lei (CALLAN e THOMAS, 2013).

O estabelecimento de padrões, geralmente, está associado ao uso de arcabouços jurídicos para os casos de não cumprimento. Os instrumentos de comando e controle são uma forma de intervenção política com relativa certeza da eficácia ambiental. Os tipos de mecanismos de Comando e Controle compreendem normas, padrões de eficiência e tecnologia, além da proibição de determinados produtos e práticas (CLIMATE POLICY INFO HUB, 2018).

DE SERRES, MURTIN e NICOLETTI (2010) explicam que as medidas de comando e controle impõem decisões diretas às escolhas e operações dos negócios, seja por meio de padrões tecnológicos, exigindo que os operadores usem uma tecnologia específica, seja por meio de padrões de desempenho, que estabelecem metas ambientais específicas. Um exemplo da primeira categoria seria a imposição de uma porcentagem mínima de uma fonte de baixo carbono em uma mistura de combustíveis para veículos; enquanto uma imposição de um limite para as emissões do mesmo veículo seria um exemplo da segunda categoria. Outras formas deste tipo de regulação incluem a proibição de certos produtos ou práticas, assim como a obrigação de se obter licenças especiais e certificados para operações envolvendo determinados produtos.

Os padrões determinados pelas devidas regulações podem ser classificados como padrões ambientais, padrões de tecnologias e padrões de desempenho. CALLAN e THOMAS (2013) os define conforme apresentado a seguir:

a. **Padrões ambientais:** representam o nível de qualidade desejada de algum elemento no meio ambiente e, usualmente, são expressos na forma de uma concentração máxima permitida de determinado poluente no meio ambiente, a exemplo dos padrões de qualidade da água e do ar. Os padrões ambientais não são exatamente impostos, mas servem como uma meta a ser alcançada por meio de um limite para a poluição, a qual é implementada por meio de um dos outros dois tipos de padrões.

b. **Padrões de tecnologia:** estabelecem o método de redução de emissões que deve ser usado por todos os agentes regulados. As regulações desse tipo visam garantir um limite específico para as emissões de poluentes controlando como esse limite será atingido. Um exemplo é a obrigatoriedade de instalação de sistemas de dessulfurização em plantas termelétricas a carvão, com o objetivo de reduzir as emissões de dióxido de enxofre nos Estados Unidos.

c. **Padrões de desempenho:** especificam limites de emissões a serem cumpridos pelos agentes regulados, mas sem determinar a tecnologia que será usada. Por definição, esses padrões são mais flexíveis do que os padrões tecnológicos, por permitir que os agentes poluidores decidam a forma que será usada da redução das emissões de poluentes, considerando que devem se enquadrar nos limites definidos.

Os padrões tecnológicos podem ser particularmente úteis em casos em que os custos do monitoramento de emissões são altos, enquanto determinar se uma tecnologia ou processo produtivo específico foi colocado em prática é relativamente fácil. No entanto, uma vez que esses tipos de padrões especificam a tecnologia necessária para reduzir as emissões, os agentes poluidores não têm um incentivo para investir em métodos mais econômicos ou em explorar estratégias novas e inovadoras ou processos produtivos que não são permitidos pela regulação (EPA, 2010).

Os padrões de desempenho, por outro lado, tendem a estimular o desenvolvimento de novas tecnologias. EPA (2010) avalia que esse tipo de medida encoraja as empresas a inovarem por permitirem que elas busquem formas mais baratas de atingir às metas; contudo, os padrões de desempenho geralmente não promovem incentivos para que as empresas reduzam a poluição para níveis abaixo do necessário para cumprir as regras.

No Brasil, os mandatos de mistura de etanol anidro na gasolina e de biodiesel no óleo diesel se enquadram nesta categoria de políticas. A adição de etanol à gasolina é obrigatória desde a década de 1970 e tal imposição estimulou a indústria deste biocombustível, de forma que o país é segundo maior produtor mundial de etanol, chegando a produzir em torno de 30 bilhões de litros em 2015, de acordo com dados da EPE (2018). A adição de biodiesel ao diesel mineral tornou-se obrigatória a partir de 2005 e os percentuais foram sendo gradualmente aumentados, chegando a 10% em 2018, segundo ANP (2018b).

Para IRENA (2017), as políticas de incentivo têm sido essenciais ao desenvolvimento global de biocombustíveis para o transporte rodoviário, a exemplo do Brasil, Estados Unidos e Europa; as medidas têm sido predominantemente desenvolvidas em nível nacional e baseadas, principalmente, em instrumentos regulatórios como mandatos de mistura ou obrigações de aquisição de combustíveis renováveis.

4.2. Instrumentos baseados em preços (ou mercado)

Diferentemente dos instrumentos de comando e controle, a abordagem de mercado faz uso de preços ou outras variáveis econômicas para promover incentivos à redução das emissões pelos agentes poluidores (CALLAN e THOMAS, 2013).

De acordo com EPA (2010), uma vez que os instrumentos baseados em mercado não impõem que cada poluidor atinja determinados padrões de emissões, eles geralmente conferem às empresas maior flexibilidade do que as regulações mais convencionais e fazem uso da heterogeneidade dos custos de redução de emissões por parte dos

poluidores para promover a diminuição da poluição total de forma eficiente. Os economistas ambientais geralmente preferem políticas baseadas em mercado, porque elas tendem a envolver custos menores, reduzir o nível de informação sob a responsabilidade do regulador, e promover incentivos para avanços tecnológicos.

EPA (2010) classificam esses instrumentos em quatro grandes categorias: tributos sobre emissões; subsídios; combinações de tributos e subsídios; e sistemas de comércio de emissões. Estes mecanismos serão definidos a seguir, conforme EPA (2010) e CALLAN e THOMAS (2013):

a. **Tributos sobre emissões:** são definidos pela regulação por unidade de poluição emitida e induzem o agente poluidor a considerar os custos externos das suas emissões. Os agentes irão reduzir as suas emissões até o momento em que o custo adicional de abatimento de mais uma unidade de poluição for igual ao valor pago como tributo. Os tributos também podem incidir diretamente sobre produtos que provoquem danos ao meio ambiente ao serem usados ou descartados (por exemplo, impostos ambientais sobre combustíveis), ou sobre usuários, no caso da cobrança por serviços públicos de tratamento de efluentes, por exemplo.

b. **Subsídios:** são incentivos dados pelo governo na forma de benefícios fiscais, subvenções de capital e financiamentos, entre outros. São exemplos os usos de subsídios para promover o uso de equipamentos de controle de poluição e para incentivar o uso e o desenvolvimento de combustíveis mais limpos e veículos mais eficientes.

c. **Combinações de tributos e subsídios:** os tributos e subsídios podem ser combinados, por exemplo em sistemas de depósitos e restituições, os quais impõem um tributo a produtos potencialmente danosos ao meio ambiente juntamente a incentivos financeiros para a sua correta disposição ou reciclagem.

d. **Sistemas de comércio de emissões:** as políticas desse tipo estabelecem a quantidade de poluição ou de redução de emissões a ser alcançada e deixam o mercado determinar

o preço. Em sistemas de comércio de permissões de emissões, isso é feito por meio do uso de créditos e permissões. Em mecanismos que utilizam créditos de emissões, o agente poluidor recebe créditos negociáveis, se as suas emissões forem inferiores aos padrões estabelecidos. Em mecanismos de comércio de permissões, cada permissão confere ao agente o direito de emitir uma determinada quantidade de poluentes. As permissões também são negociáveis.

De acordo com CALLAN e THOMAS (2013), os tributos sobre emissões incentivam os agentes poluidores a buscarem a estratégia de menor custo. Como resultado, aqueles que possuem baixos custos de abatimento realizam a maior remoção dos poluentes, enquanto aqueles que possuem custos altos de abatimento pagam mais tributos para compensar pelos danos gerados. Uma das vantagens desse tipo de medida é que os tributos geram receitas, que podem ser usados pelos governos para ajudar a custear as atividades de monitoramento e fiscalização.

Uma taxa imposta aos usuários (que usam o recurso como insumo ou receptor de poluição) foi inicialmente proposta por Pigou (1879-1959), de forma que essa taxa refletisse o custo marginal ambiental gerado por este uso. Diante dessa taxa pigouviana, os produtores internalizariam a externalidade e, assim, teriam restauradas as condições ótimas de alocação de recursos (MOTTA, 1996). O imposto de Pigou refere-se à tributação instituída pelo governo para corrigir os efeitos de uma externalidade negativa, conduzindo os agentes econômicos a considerarem os efeitos externos de suas ações (CAVALCANTI, 2011).

A adoção de tributos sobre as emissões, contudo, envolve uma dificuldade em relação à definição do preço ótimo a ser estabelecido para o poluente. CALLAN e THOMAS (2013) mencionam que os governos não sabem a alíquota para a qual os níveis de redução dos agentes serão capazes de, coletivamente, atingir os padrões, portanto eles terão que ajustar a taxa até que o objetivo ambiental seja alcançado.

SANTOS *et al.* (2018) avaliam que apesar de haver um amplo consenso entre os economistas sobre as vantagens a respeito da precificação das emissões de GEE, há um

debate intenso sobre qual seria a melhor opção de instrumento de precificação de carbono: sistemas de comércio de emissões ou tributação de carbono. A tributação apresenta como vantagem o fato de que o valor do tributo é conhecido por todos os agentes e não muda frequentemente, como ocorre em um sistema de comércio, o que confere maior segurança e estabilidade. Por outro lado, muitos economistas acreditam que os sistemas de comércio de emissões são instrumentos mais interessantes por serem mais dinâmicos e eficientes economicamente.

HATTORI (2012) explica que a principal diferença entre a tributação de carbono e os sistemas de comércio de emissões está no fato de que, enquanto os tributos determinam o preço que os emissores devem pagar por unidade de emissão, deixando a cargo dos emissores a decisão sobre a quantidade de emissões a serem reduzidas, os sistemas de comércio determinam um valor para a quantidade de emissões, deixando que o mercado defina o preço das unidades de emissões e, conseqüentemente, o custo que os emissores enfrentarão.

Os sistemas de comércio de emissões podem se apresentar de duas formas distintas. Em sistemas do tipo *cap and trade*, um limite total na quantidade de um poluente específico é definido por uma autoridade central, a qual, em seguida, emite direitos ou permissões de poluição equivalentes àquele teto. As permissões são alocadas às entidades cujas atividades contribuem para as emissões, segundo diferentes regras e condições. O ponto fundamental é que as regras e condições de alocação iniciais têm implicações distributivas, mas, em geral, não impactam na eficiência econômica do sistema, desde que as permissões possam ser transacionadas entre os participantes do sistema. Comparativamente, em vez de fixar um teto para a quantidade de emissões, os sistemas do tipo *baseline and credit*, geralmente, impõem um compromisso de desempenho mínimo em relação a um perfil de emissões (pré-determinado) utilizado como base de referência. Em geral, a base de referência é definida para cada participante pelo regulador e as emissões reais são monitoradas de acordo com um procedimento definido. Ao final do período, os participantes têm direito a créditos pelo volume de redução de emissões alcançado em relação à base de referência, de forma que podem vender os créditos (DE SERRES, MURTIN e NICOLETTI, 2010).

A alocação de permissões consiste na inserção de um volume de permissões de emissões no mercado, compatível com o limite (*cap*) previamente definido. De acordo com o ICAP (2018), existem basicamente duas formas de alocação, uma em que as permissões são livremente distribuídas, sem custo aos participantes, e outra em que são vendidas, geralmente em leilões. Dentro da opção gratuita, a alocação pode ser feita de duas formas: por *grandfathering* ou por *benchmarking*. Na primeira opção aloca-se gratuitamente as permissões necessárias com base nas emissões históricas de cada agente regulado, enquanto na segunda alocam-se porções das permissões de acordo com indicadores de desempenho de cada regulado, de forma a recompensar esforços já realizados no sentido de redução de emissões (GVces e FGV-EAESP, 2016). A venda de permissões, em geral por leilões, garante igualdade de oportunidade de compra de permissões pelos participantes e, ainda, gera recursos para o regulador, os quais podem ser empregados em outras medidas de mitigação de efeitos das mudanças climáticas.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), iniciado com o Protocolo de Quioto, é um exemplo de sistema do tipo *baseline and credit*, enquanto existem diversos sistemas de comércio de emissões em vigor atualmente, tanto em âmbito municipal quanto nacional e continental, como é o caso do sistema de comércio de emissões europeu, o EU ETS, que passou a incluir o setor aéreo em 2012 (visto em maiores detalhes no Capítulo 2). O CORSIA, conforme visto no Capítulo 2, funciona como um esquema de compensação de emissões, no qual existe um limite definido para as emissões do setor aéreo e as quantidades acima do limite deverão ser compensadas pelas empresas aéreas.

WORLD BANK GROUP e ECOFYS (2018) mostram que, até maio de 2018, 51 iniciativas de precificação de carbono já foram implementadas ou estão com a implementação programada no mundo. Tais iniciativas consistem em 25 sistemas de comércio de emissões, localizadas principalmente em jurisdições subnacionais, e 26 medidas de taxaço de carbono, predominantemente implementados em nível nacional. Essas iniciativas de precificação de carbono cobririam 11 Gt de CO₂ equivalente ou, aproximadamente, 20% das emissões de GEE globais. Em 2018, o valor total de sistemas de comércio de emissões e tributos de carbono é de US\$ 82 bilhões, o que representa

um aumento de 56% em relação ao valor de US\$ 52 bilhões de 2017. Os preços do carbono variam substancialmente, de menos de um dólar até o valor máximo de US\$ 139 por tonelada de CO₂e. Os governos arrecadaram, aproximadamente, US\$ 33 bilhões em receitas advindas da precificação de carbono, em 2017, que tiveram como fonte os leilões de permissões, pagamentos diretos para atender às obrigações e recebimentos dos tributos de carbono.

No Brasil, é aplicada uma tributação diferenciada entre o etanol hidratado e a gasolina, além da existência de uma contribuição que tem, entre outras finalidades, a de promover subsídios ao etanol. A contribuição para o Programa de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP) e a Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS) são contribuições sociais federais que incidem sobre todos os combustíveis, porém com alíquotas diferentes sobre a gasolina e o etanol hidratado. De acordo com FECOMBUSTÍVEIS (2018), em 2018, as alíquotas de PIS/COFINS para a gasolina estão em R\$ 0,7925/litro e, para o etanol hidratado, em R\$ 0,1309/litro para o produtor e R\$ 0,1109/litro para o distribuidor. A Contribuição de Intervenção do Domínio Econômico (Cide), de acordo com a Lei nº10.336/2001, tem caráter federal e incide sobre a importação e a comercialização de petróleo e seus derivados, gás natural e seus derivados, e álcool etílico combustível. Em 2018, segundo dados de FECOMBUSTÍVEIS (2018), a alíquota da Cide sobre a gasolina C ficou em R\$ 0,10/litro e está zerada para o etanol.

Ademais, seguindo as tendências internacionais de um uso maior de políticas de mercado, em lugar das medidas de comando e controle, está sendo implementada no Brasil uma política do tipo *cap and trade* para o setor de combustíveis líquidos, com o programa denominado “RenovaBio”.

Em 26 de dezembro de 2017, foi sancionada a Lei nº 13.576, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), voltada para a descarbonização do setor de transportes. A Lei determina que sejam criadas metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE para os combustíveis, para um período mínimo de dez anos. A meta compulsória anual será desdobrada, para cada ano corrente, em metas individuais,

aplicadas aos distribuidores de combustíveis, proporcionalmente à participação de mercado do distribuidor na comercialização de combustíveis fósseis no ano anterior. A comprovação de atendimento à meta individual por cada distribuidor de combustíveis será realizada a partir da quantidade de Créditos de Descarbonização em sua propriedade. Tais créditos serão emitidos pelos produtores ou importadores de biocombustíveis, os quais deverão certificar a produção ou importação. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabeleceu, no dia 5 de junho de 2018 (Resolução nº5), as metas compulsórias anuais de redução de emissões de GEE, de forma a alcançar uma redução de 10,1% na intensidade de carbono (definida em gramas de CO₂e/MJ) até 2028. Ficará a cargo da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a definição das metas individuais compulsórias de compra de Créditos de Descarbonização (CBIO) para distribuidoras de combustíveis. De acordo com a lei que instituiu o RenovaBio, as metas compulsórias anuais para o setor entrariam em vigor 180 dias após a sanção da lei, o que ocorreu com a publicação da Resolução nº5 do CNPE, e as metas individuais entram em vigor dezoito meses após a entrada em vigor das metas compulsórias, o que corresponde a dezembro de 2019. O funcionamento do programa será explicado e analisado em mais detalhes mais adiante no Capítulo 5.

Além disso, o país também já começou a discutir mecanismos de precificação de carbono. De acordo com MINISTÉRIO DA FAZENDA (2018), o Projeto PMR Brasil, aprovado em 2014, visa subsidiar o processo de tomada de decisão acerca do papel de instrumentos de precificação de carbono nas políticas de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), por meio do estudo e avaliação detalhada dos impactos de mecanismos de precificação de carbono sobre a economia, a sociedade e o meio ambiente. O objetivo do projeto é discutir a conveniência e oportunidade da inclusão da precificação de emissões (via imposto e/ou mercado de carbono) no pacote de instrumentos voltados à implementação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) no pós-2020. O PMR Brasil está sob coordenação do Ministério da Fazenda e a sua execução está sob responsabilidade do Banco Mundial.

4.3. Políticas de apoio à tecnologia

As políticas elaboradas para promover o desenvolvimento de novas tecnologias empregam medidas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento ou à adoção de tecnologias renováveis, como financiamentos públicos ou privados voltados para a pesquisa, investimentos em infraestrutura de apoio a novas tecnologias e compras públicas, entre outras.

Tais instrumentos têm como foco o aumento da oferta de tecnologias consideradas limpas, buscando torná-las mais disponíveis. Para DE SERRES, MURTIN e NICOLETTI (2010), as políticas de apoio a tecnologias agem diretamente na oferta, em vez de promover alterações na demanda.

As medidas de apoio à tecnologia podem ser usadas adicionalmente às políticas regulatórias e de mercado, para estimular o desenvolvimento de tecnologia local, melhorando os processos produtivos e permitindo o aumento da escala de produção, por exemplo. SCHLUMBERGER e WANG (2012) avaliam que, quando são necessários aumentos de escala de produção no longo prazo, políticas de precificação podem precisar ser complementadas por desenvolvimento de inovação e políticas industriais mais direcionadas.

Compras públicas também podem ter um papel importante em mercados caracterizados por externalidades de rede (por exemplo, infraestrutura para veículos elétricos/híbridos) ou onde os efeitos de demonstração (ou seja, externalidades de consumo) são importantes. Nesses casos, barreiras iniciais à criação de mercado são altas e podem ser superadas por meio de demanda pública (OCDE, 2003).

As compras públicas de biocombustíveis com o objetivo de estimular a sua produção são aplicadas há mais de 10 anos pelos setores militares nos Estados Unidos. Em relatório do Congresso americano, BLAKELEY (2012) afirma que o Departamento de Defesa dos Estados Unidos comprou, entre 2007 e 2012, aproximadamente 1,9 milhão de galões de combustíveis alternativos de diferentes tipos, em nome do Exército, Marinha e Força

Aérea. A compra desses combustíveis teve como objetivo testar o desempenho de motores e certificar os biocombustíveis para uso em frotas desses serviços militares.

4.4. Informação e abordagens voluntárias

Esse conjunto de medidas está relacionado com o aumento do nível de informação por parte das empresas e consumidores, contribuindo para que estes tenham uma maior percepção dos impactos ambientais dos produtos e processos produtivos e, com isso, possam fazer melhores escolhas.

Programas de classificação e etiquetagem de produtos, por exemplo, são uma forma de auxiliar tais escolhas. DE SERRES, MURTIN e NICOLETTI (2010) menciona que a etiquetagem pode ser aplicada tanto a produtos intermediários em um processo produtivo quanto a produtos finais. A etiquetagem em produtos intermediários incentiva as empresas a comprarem insumos ambientalmente responsáveis, enquanto as etiquetas em produtos finais permitem que os consumidores identifiquem os produtos que empregaram processos produtivos com menor impacto ao meio ambiente.

Os instrumentos de divulgação de informações, como a etiquetagem, mecanismos de premiação, a certificação e rotulagem e as campanhas de informação, por exemplo, promovem mudanças de comportamento da sociedade, o que pode causar impactos no padrão de eficiência energética dos produtos disponíveis no mercado, a partir do momento em que o consumidor mais bem informado passa a demandar produtos mais eficientes e a indústria precisa responder a essas exigências.

Os acordos voluntários são compromissos negociados entre autoridades públicas e uma ou mais empresas, que incluem metas e cronogramas de execução, com o objetivo de aumentar a eficiência energética ou reduzir as emissões de GEE, e definem benefícios e penalidades. De acordo com IEA (2017), os programas voluntários podem ser divididos em duas categorias: parcerias entre empresas e governos, e aqueles em que as

empresas agem por conta própria. Em geral, eles estabelecem metas específicas para as emissões ou tratam das emissões indiretamente por meio de metas de eficiência energética. Apesar de estes arranjos não terem força de lei, o seu caráter voluntário sustenta a colaboração entre governo e indústria em esforços de descarbonização.

Para IEA (2017), as empresas e governos podem adotar programas voluntários por diferentes razões. Ao fazer parte de programas patrocinados pelo governo, as empresas podem participar de forma mais ativa na determinação do escopo e da direção das suas ações de descarbonização. Os acordos de associações industriais podem ajudar a elevar o perfil das empresas líderes de um setor. Tais programas podem, ainda, adiar uma regulação governamental mandatória, fornecendo um caminho para as empresas participarem da elaboração de uma futura regulação. IEA (2017) cita que os governos devem enxergar tais parcerias como uma forma de atingir resultados rápidos, manter baixos custos administrativos e avançar com os seus objetivos, inclusive em situações em que mecanismos regulatórios ou de precificação não são viáveis; acordos desse tipo também podem ser uma maneira útil de coletar informações. Além disso, essas parcerias permitem criar capacidade regulatória e confiança, o que pode beneficiar tanto os governos quanto as empresas.

Um exemplo é a Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para Aviação (RBQAV), lançada em 2017. A RBQAV é uma iniciativa do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), das empresas ligadas ao setor oleoquímico e das universidades e institutos de pesquisa que atuam na pesquisa em bioquerosene e hidrocarbonetos renováveis (MCTIC, 2018). De acordo com a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO, 2017), a rede tem como objetivo a realização de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no setor, além de dar suporte à criação de políticas públicas e às ações viabilizadoras para a produção de bioquerosene e hidrocarbonetos renováveis, por meio de parcerias entre instituições de pesquisa, empresas privadas do setor produtivo e consumidor e instituições governamentais. Entre as empresas participantes estão a Embraer, GOL Linhas aéreas, Boeing, *Byogy Renewables*, Curcas Diesel Brasil, *Camelina Company* e Geoflorestas, segundo UBRABIO

(2017), sinalizando que o interesse vai desde empresas produtoras de matérias-primas a fabricantes de aeronaves e companhias aéreas.

Diante do cenário de metas de redução de emissões estabelecidas para a aviação internacional, conforme abordado no capítulo 2, do contexto atual da indústria de transporte aéreo no Brasil, discutido no capítulo 3, e dos instrumentos de política disponíveis e já aplicados na promoção de biocombustíveis no Brasil e no mundo, analisados no capítulo 4, o próximo capítulo compreende a apresentação e discussão de cinco propostas de instrumentos políticos, resultantes deste trabalho de pesquisa, passíveis de serem adotadas para a introdução do bioquerosene no transporte aéreo brasileiro, considerando os desafios e oportunidades representados pela implantação de uma nova indústria de biocombustível no país.

5. Propostas para a inserção do bioquerosene de aviação no transporte aéreo brasileiro

As tecnologias de produção de combustíveis alternativos de aviação já estão avançadas e disponíveis, com diversos exemplos de uso comercial e de iniciativas para o desenvolvimento destes produtos, conforme visto no Capítulo 2. Entretanto, ainda existem muitas barreiras a serem vencidas para que se alcance uma maior penetração deste combustível no mercado.

ICAO (2017) elenca as principais motivações e as maiores barreiras para a implantação de uma indústria de biocombustíveis de aviação (Tabela 11). As motivações para o desenvolvimento do bioquerosene estão relacionadas, sobretudo, com as preocupações ambientais, sendo relevante o fato de que o setor aéreo não dispõe de alternativas tecnológicas capazes de promover a redução das emissões de GEE aos níveis estabelecidos pela IATA, e a busca por segurança energética, que envolve a redução da dependência por petróleo e a busca por novas fontes de energia. Os desafios a serem superados vão desde o desenvolvimento da cadeia de suprimento das matérias-primas, infraestrutura e logística, até as barreiras financeiras e políticas de incentivo já estabelecidas tanto para os biocombustíveis em uso atualmente quanto para os combustíveis fósseis.

Tabela 11: Motivações e barreiras para o desenvolvimento da indústria de biocombustíveis de aviação

Motivações	Barreiras
Necessidade de redução de emissões	Disponibilidade de suprimento de matérias-primas
Flutuação de preços do petróleo e insegurança energética (combustível)	Altos custos e investimentos
Preço do carbono	Sustentabilidade
Ausência de alternativas tecnológicas	Políticas de incentivo a outros biocombustíveis e aos combustíveis fósseis
Crescimento do mercado para biocombustíveis	Uniformidade do combustível e infraestrutura
Preocupação ambiental por parte das empresas	Financiamento para divulgação

Fonte: Adaptado de ICAO (2017)

É importante conhecer os principais desafios desta indústria, para que seja possível desenhar propostas de soluções que busquem alocar os recursos de forma eficiente. Para tanto, o desenvolvimento da indústria de bioquerosene pode se espelhar em medidas adotadas mundialmente para o setor de biocombustíveis para transporte rodoviário. IRENA (2017) cita que medidas implementadas incluem subsídios, isenções fiscais, financiamentos a pesquisa e desenvolvimento, e créditos para a construção de plantas pioneiras. Tais políticas levaram ao desenvolvimento da atual indústria global de biocombustíveis, que produz mais de 120 bilhões de litros de etanol e biodiesel por ano.

A introdução do bioquerosene demanda, contudo, políticas que considerem as particularidades da indústria de aviação, uma indústria global com padrões de equipamentos e combustíveis rigidamente especificados, seguindo normas internacionais, e na qual as empresas possuem margens pequenas. Além disto os centros de distribuição e consumo dos combustíveis de aviação estão fortemente concentrados e localizados em grandes metrópoles, em áreas usualmente distantes da produção de biomassa. Mesmo reconhecendo as vantagens dos biocombustíveis de aviação, ICAO (2017) avalia que algumas medidas de apoio podem criar um custo adicional, que seria um ônus a ser compartilhado entre a sociedade e o setor de transporte aéreo.

ICAO (2017) menciona que uma abordagem balanceada é possível, com a adoção de regimes tributários diferenciados para os combustíveis convencionais e os biocombustíveis, por exemplo. Um mandato de mistura ou metas de consumo de biocombustíveis também poderiam ser implementados, porém tais medidas podem impactar diretamente o custo das companhias aéreas e, conseqüentemente, os seus consumidores.

Nesse sentido, as abordagens convencionais, como a diferenciação tributária e os mandatos de mistura, que foram utilizados amplamente para o desenvolvimento de biocombustíveis automotivos, estão sendo substituídos por medidas mais flexíveis, como sistemas de comércio de emissões, por exemplo, e indicam ser uma solução a ser adotada no setor aéreo. Segundo IRENA (2017), em 2016, após muitos anos de debates

e planejamento, a ICAO chegou a um acordo sobre a criação de um mecanismo global baseado em mercado, com o objetivo de implementar tais medidas em 2020. Esse mecanismo promoveria as bases para a precificação das emissões, a qual é considerada o principal meio para a redução de emissões em níveis nacionais e regionais. Os mecanismos globais baseados em mercado têm sido propostos como uma forma de acelerar o processo de mitigação dos impactos climáticos, ao limitar as emissões de GEE enquanto os biocombustíveis aeronáuticos e outras tecnologias são desenvolvidos.

Diante do exposto, verifica-se que o desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene demanda esforços de políticas públicas que promovam o aumento da escala de produção e, como consequência, a redução dos custos de investimento e operacionais. Neste trabalho, portanto, foram elaboradas propostas de políticas públicas capazes de promover o desenvolvimento desta indústria no Brasil, passíveis de serem adotadas no país, levando em consideração os principais desafios a serem superados, os instrumentos regulatórios necessários e a capacidade de adaptação tanto da indústria de aviação que opera no Brasil quanto do governo e da sociedade em absorvê-las.

5.1. Proposta 1: Aplicação de um fator de multiplicação ao bioquerosene no âmbito do RenovaBio

A primeira proposta analisada refere-se à participação do setor aéreo brasileiro no programa RenovaBio, que tem como foco principal a descarbonização dos combustíveis de transporte rodoviário. De forma a incentivar a participação do setor aéreo no programa e contribuir para o desenvolvimento da produção de bioquerosene no país, sugere-se a aplicação de um fator de multiplicação para a quantidade de Créditos de Descarbonização a ser emitida pelo produtor de bioquerosene.

Conforme mencionado anteriormente, o RenovaBio estabeleceu metas de redução da intensidade de carbono dos combustíveis, parâmetro que representa a quantidade de emissões de GEE, em gramas de CO₂ equivalente (CO₂e) por unidade de energia (em MJ) dos combustíveis, e calculado segundo a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida

(ACV)⁷. No âmbito do programa, foi desenvolvida uma ferramenta (chamada de RenovaCalc) na qual serão feitos os cálculos da intensidade de carbono dos biocombustíveis, levando em conta alguns parâmetros que serão inseridos pelos próprios produtores, como, por exemplo, o consumo de água e fertilizantes. Uma nota (denominada Nota de Eficiência Energético-Ambiental) será atribuída ao biocombustível produzido, em função da diferença entre a sua intensidade de carbono, calculada pela ferramenta RenovaCalc, e a intensidade de carbono de seu combustível fóssil substituto, determinada pelo MME a partir de valores obtidos da literatura. De acordo com a Lei 13.576, a definição da quantidade de créditos (chamados de Créditos de Descarbonização) a serem emitidos pelo produtor de biocombustíveis considerará o volume de biocombustível produzido e a respectiva Nota de Eficiência Energético-Ambiental. Desse modo, quanto menor for a intensidade de carbono do biocombustível, maior será a sua nota e, conseqüentemente, o produtor poderá emitir mais créditos a serem comercializados.

Em junho de 2018, o CNPE estabeleceu a meta de redução de 10,1% da intensidade energética da matriz de combustíveis, até 2028. Segundo as estimativas de MME (2018), sem o programa, as emissões de CO₂e do setor de transportes aumentariam de 289 milhões de toneladas, em 2018, para 425 milhões de toneladas, em 2028; mas, com as metas RenovaBio, as emissões alcançariam o valor de 335 milhões de toneladas, o que representa uma redução de 21% das emissões, em 2028.

De acordo com MME (2018), no modelo proposto para a determinação das metas de redução da intensidade de carbono da matriz de transportes, foram consideradas diversas premissas, entre elas: a demanda, a capacidade de produção e a oferta dos combustíveis e biocombustíveis; a intensidade de carbono dos combustíveis e biocombustíveis; e o preço do crédito de carbono. Em relação aos combustíveis de aviação, especificamente, foram consideradas as seguintes premissas:

i) Crescimento da demanda por QAV em 2,8% ao ano, entre 2018 e 2028;

⁷ A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ABNT, 2001).

ii) Potencial de participação de bioquerosene de aviação no mercado de combustíveis em 3,40% em 2027 e 3,77% em 2028.

No cenário proposto por MME (2018), com a redução de 10,1% da intensidade de carbono dos combustíveis em dez anos, em 2028 a demanda por QAV seria de 9,5 bilhões de litros e a de bioquerosene seria de 360 milhões de litros (o equivalente a aproximadamente 3,8% do QAV).

É importante mencionar que os produtores de biocombustíveis não são partes obrigadas e devem aderir ao programa de forma voluntária, sendo necessário, para tanto, que a sua produção seja certificada. A certificação da produção representa um custo ao produtor, o que pode ser considerado um ponto crítico do programa, uma vez que este está estruturado em função dos créditos que serão comercializados, além das quantidades físicas de biocombustíveis. MME (2018) projeta que apenas 28% da capacidade de produção de biocombustíveis esteja certificada em 2019, mas estima que a proporção atinja 98% em 2025.

Já a participação dos distribuidores de combustíveis fósseis no RenovaBio é obrigatória e estes terão metas individuais anuais. Conforme consta na Lei 13.576, as metas de redução da intensidade de carbono da matriz de transportes serão desdobradas em metas individuais para cada ano corrente, aplicadas a todos os distribuidores de combustíveis, proporcionalmente à respectiva participação de mercado na comercialização de combustíveis fósseis no ano anterior, devendo cumpri-las por meio dos Créditos de Descarbonização. Tais créditos serão negociados em mercados organizados, não estando vinculados à venda física do biocombustível. O mecanismo de funcionamento é explicado a seguir.

As metas individuais das distribuidoras consideram a participação de mercado apenas na comercialização de combustíveis fósseis, o que significa que as distribuidoras que não comercializam este tipo de combustíveis não terão metas, e aquelas que comercializam tanto combustíveis fósseis como biocombustíveis terão metas que incidem apenas sobre o volume dos primeiros. Desse modo, aquelas que comercializaram proporções

maiores de biocombustíveis no ano anterior, precisarão adquirir menores quantidades de créditos no ano corrente, e isso estimulará as distribuidoras a aumentarem a proporção de biocombustíveis na sua comercialização no próximo ano.

Para exemplificar, supõe-se que as participações das distribuidoras A, B e C nas vendas de combustíveis fósseis tenham sido, respectivamente, 25%, 20% e 15%, em 2020. Considerando os valores propostos por MME (2018), em 2021, a intensidade de carbono da matriz de combustíveis deve alcançar 72,55 gCO₂e/MJ, o que envolve uma meta de aquisição de 41 milhões de Créditos de Descarbonização. Desse modo, as distribuidoras A, B e C teriam como meta a aquisição de, aproximadamente, 10, 8 e 6 milhões de créditos, respectivamente, em 2021.

Até setembro de 2018, a regulamentação a respeito da negociação e dos demais aspectos relacionados aos Créditos de Descarbonização ainda não havia sido publicada, mas, de acordo com MME (2018), deve-se estabelecer que o crédito tenha como unidade padrão uma tonelada de CO₂e.

Uma vez que os créditos serão comercializados em ambiente regulado, eles poderão advir de qualquer biocombustível certificado no âmbito do programa. MME (2018) menciona que as metas de redução de emissões do RenovaBio não têm por objetivo definir demandas volumétricas para os combustíveis, de forma que as distribuidoras terão liberdade para cumprir as suas metas de intensidade de carbono com os diferentes biocombustíveis disponíveis (cumprindo apenas os mandatos de mistura previstos em legislação específica para o etanol anidro e o biodiesel).

Contudo, ainda que o bioquerosene possa gerar a emissão de créditos, proporcionando uma fonte de renda adicional para o produtor, é possível que esse incentivo não seja suficiente para estimular a sua produção, principalmente pelos motivos expostos a seguir.

i) Na análise de eficiência ambiental apresentada por MME (2018), a intensidade de carbono estimada do bioquerosene obtido pela rota HEFA (hidroprocessamento de

ésteres e ácidos graxos) é de, aproximadamente, 35 gCO₂e/MJ, enquanto a do biodiesel é de, aproximadamente, 27 gCO₂e/MJ (a partir de soja). Dado que os valores das intensidades de carbono dos combustíveis fósseis diesel e QAV, adotados por MME (2018), são muito próximos, situando-se entre os valores de 86,5 e 87,5 gCO₂e/MJ, a diferença entre a intensidade de carbono do combustível fóssil e do biocombustível é menor no caso do bioquerosene, o que significa que o produtor de bioquerosene poderá emitir menos créditos do que o produtor de biodiesel, gerando uma receita menor. Além disso, como a rota HEFA pode utilizar como matérias-primas os mesmos óleos vegetais utilizados na produção do biodiesel, como, por exemplo, a soja, e que o custo de produção de bioquerosene é bem mais alto do que o do biodiesel (conforme visto no capítulo X), verifica-se que o resultado total, dado pelas receitas menos os custos, é desfavorável ao bioquerosene, quando comparado ao biodiesel.

ii) A venda de créditos de carbono gerados pela produção de bioquerosene no âmbito do programa também compete com os demais biocombustíveis, como etanol de cana-de-açúcar, etanol de milho e biometano, por exemplo. As emissões associadas ao bioquerosene pela rota HEFA são inferiores apenas às do etanol de milho importado, que apresenta intensidade de carbono de, aproximadamente, 40 gCO₂e/MJ, de acordo com MME (2018). Desse modo, os biocombustíveis que já possuem uma cadeia produtiva estruturada no país apresentam vantagens importantes em relação ao bioquerosene e terão uma certa prioridade no programa.

iii) A rota de produção de bioquerosene a partir de álcoois (ATJ) competiria diretamente com o etanol, não apenas pela matéria-prima, mas pela própria emissão de créditos, uma vez o etanol empregado na produção do bioquerosene já pode gerar a emissão de créditos, além de possuir um mercado estruturado e uma cadeia produtiva bem estabelecida no país.

iv) A rota de produção de bioquerosene a partir de resíduos de madeira (pelo processo de Fischer-Tropsch) possui intensidade de carbono da ordem de 4 gCO₂e/MJ, segundo DE CARVALHO (2017), logo esta poderia se beneficiar mais dos créditos do RenovaBio

do que a rota HEFA. Ainda assim, esta rota envolve custos de capital consideravelmente mais altos do que a rota HEFA, de acordo com DE CARVALHO (2017).

v) Outro fator é o preço do Crédito de Descarbonização, o qual será determinado pelo mercado e, portanto, dependerá da oferta e da demanda. Nesse sentido, caso a oferta supere a demanda, os preços podem cair para valores que não tragam ganhos representativos a ponto de incentivar a produção de bioquerosene.

Ao se verificar a baixa probabilidade de que o bioquerosene consiga competir com biocombustíveis que já possuem cadeias de produção estruturadas, este estudo propõe a aplicação de um fator de multiplicação de, no mínimo, 1,5 para a quantidade de Créditos de Descarbonização emitida pelo produtor de bioquerosene.

O fator de multiplicação proposto considerou a diferença entre os preços de biodiesel e bioquerosene. Os preços de bioquerosene foram retirados de DE CARVALHO (2017), que estimou os custos de produção de bioquerosene a partir de óleo de soja (rota HEFA) e resíduos florestais (rota FT) em plantas no Brasil, chegando aos preços de *break-even* de US\$ 2,22 (R\$ 8,88 utilizando a taxa de câmbio de R\$/US\$ 4,00) e US\$ 0,89 (R\$ 3,56 utilizando a mesma taxa), respectivamente. O preço adotado para o biodiesel foi o valor negociado no 62º Leilão de Biodiesel da ANP, realizado em agosto de 2018, com preço médio de R\$2,44. Desse modo, a relação entre os preços do bioquerosene e do biodiesel fica em 3,6, no caso da rota HEFA e 1,5 no caso da rota FT. Ao avaliar a rota de produção de bioquerosene a partir de etanol de cana de açúcar, ICAO (2017) menciona o que preço mínimo de venda deste biocombustível é de US\$ 1,56 por litro, ou R\$ 6,24 (utilizando a conversão de R\$/US\$ 4,00), enquanto o preço do etanol hidratado foi de R\$ 1,62 em junho de 2018 (preço médio ao produtor, sem a incidência de tributos), segundo dados de Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2018). A diferença entre os preços dos biocombustíveis, neste caso, chega a 3,85. Propõe-se, portanto, um fator de multiplicação mínimo de 1,5, podendo ser diferenciado em função da rota utilizada para a produção do bioquerosene, para promover a viabilização do biocombustível de aviação produzido a partir de diferentes matérias-primas.

A introdução do prêmio poderia ser feita desde o início da vigência do RenovaBio, uma vez que não acarreta alterações significativas ao programa e não traz novos impactos financeiros às distribuidoras. Contudo, deverá ser feito um acompanhamento dos seus resultados, avaliando-se a efetividade da ação e a possível necessidade de alteração do fator de multiplicação.

Aliás, medida semelhante já é adotada em programas como o RED (*Renewable Energy Directive*), da Comissão Europeia, o qual estabelece metas de participação de biocombustíveis nos combustíveis de transporte. Em sua proposta de reformulação do RED, de 2016, a Comissão Europeia propõe que combustíveis alternativos avançados para uso na aviação sejam contados considerando um fator de multiplicação de 1,2, de forma a promover um incentivo adicional ao desenvolvimento e adoção de biocombustíveis pelo setor aéreo, segundo BITNERE (2017).

Do mesmo modo, o programa RFS (*Renewable Fuel Standard*) americano define volumes obrigatórios crescentes de biocombustíveis a serem adquiridos por refinadores ou importadores de combustíveis, os quais devem comprovar o cumprimento dos volumes por meio dos créditos denominados RINs (*Renewable Identification Numbers*), segundo EPA (2018). KHARINA e PAVLENKO (2017) mencionam que, enquanto o uso de biocombustíveis de transporte rodoviário é obrigatório no âmbito do RFS, os biocombustíveis de aviação são considerados opcionais, podendo gerar créditos (RINs) a serem vendidos para as partes obrigadas.

O programa americano estabelece quatro categorias de combustíveis renováveis, segundo EPA (2018):

- i) convencionais, que utilizam matérias-primas como o amido de milho, por exemplo, e devem reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 20%;
- ii) avançados, produzidos a partir da cana-de-açúcar, biobutanol ou bionafta, por exemplo, e precisam reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 50%;
- iii) celulósicos, produzidos a partir de materiais como palha de milho ou bagaço de cana, entre outros, e devem reduzir as emissões de GEE em, no mínimo, 60%;

iv) diesel a partir de biomassa, que utiliza como matérias-primas óleos vegetais, gorduras animais e outros, e precisam reduzir as emissões de GEE em, no mínimo, 50%.

O biodiesel, o diesel renovável e o bioquerosene produzidos a partir de óleos vegetais e gorduras animais, utilizando processos como transesterificação e hidrotratamento, podem ser classificados tanto na categoria “diesel a partir de biomassa” quanto “avançados”. O diesel renovável e o bioquerosene produzidos a partir de materiais celulósicos, como resíduos de madeira, enquadram-se na categoria de combustíveis renováveis celulósicos. Em dezembro de 2017, os preços médios dos créditos (RINs), em US\$/RIN foram de: 0,95 para o diesel a partir de biomassa, 0,94 para os combustíveis avançados e 2,94 para os celulósicos, segundo dados de IHS MARKIT (2017). A geração de RINs pode ser um incentivo interessante, uma vez que essa receita adicional permite reduzir a diferença de preços entre o biocombustível e o QAV. No entanto, o bioquerosene acaba competindo com o diesel renovável, e até com o biodiesel, pelos mesmos incentivos em termos de RINs.

KHARINA e PAVLENKO (2017) analisam o caso da *AltAir Fuels*, única empresa produtora de biocombustível de aviação (e diesel renovável) em escala comercial em operação nos Estados Unidos. Segundo as autoras, a empresa obtém receitas com créditos emitidos nos programas RFS, dos Estados Unidos, e LCFS (*Low Carbon Fuel Standard*), da Califórnia, tanto para o biocombustível de aviação quanto para o diesel renovável, o que ajuda a compensar os seus custos de produção. No longo prazo, tais créditos podem reduzir os custos de produção dos biocombustíveis de aviação e ajudar a desenvolver a indústria, o que levará à redução de custos para as linhas aéreas. Neste momento, entretanto, a estrutura de incentivos para os combustíveis rodoviários é muito melhor, tornando o diesel renovável produzido pela *AltAir Fuels* mais rentável do que os biocombustíveis aeronáuticos. A produção de bioquerosene pela empresa *AltAir Fuels* decorre de um contrato de compra garantida com a companhia aérea *United Airlines*. Em 2013, as empresas assinaram o contrato, com duração de três anos, no qual a *United Airlines* se comprometeu a adquirir cinco milhões de galões de biocombustível de aviação da *AltAir Fuels* por ano, a partir de 2016 (KHARINA e PAVLENKO, 2017).

Note-se ainda que um dos processos que pode ser favorecido com a implementação do ajuste aqui proposto ao programa RenovaBio é o de produção de óleos vegetais hidrotratados, os quais podem dar origem a combustíveis renováveis, como o diesel renovável e o bioquerosene, que hoje ainda não são precificados pelo mercado. CORTEZ *et al.* (2014) citam que a Petrobras desenvolveu o processo denominado HBIO, que poderá ser aplicado em unidades de hidrotratamento de diesel já existentes para processar uma mistura de até 10% de óleo vegetal na matéria-prima e que aguarda oportunidade econômica para se tornar operacional em unidades de HDT (hidrotratamento) de instáveis da empresa. Assim, a possibilidade de emissão de créditos e de multiplicação por um fator adicional proposto para o bioquerosene de aviação pode estimular a produção do biocombustível pela Petrobras.

Contudo, a incorporação do HBIO ao RenovaBio precisa passar pelo cálculo da intensidade de carbono desse combustível, considerando os parâmetros da Avaliação de Ciclo de Vida, de forma semelhante ao realizado para as demais rotas participantes do RenovaBio. De acordo com TAPANES *et al.* (2013), em termos ambientais, apesar da utilização de fontes renováveis, o diesel obtido pelo processo HBIO não é capaz de reduzir as emissões de monóxido de carbono e material particulado. Os mesmos autores mencionam que o processo H-BIO só é viável para grandes refinarias de petróleo que possuem unidades de HDT com capacidade ociosa e que processem óleos e gorduras mais baratas que o petróleo. Conforme SZKLO, ULLER e BONFÁ (2012), de maneira geral, o *pool* de diesel final no Brasil é composto por uma mistura de correntes oriundas de destilação direta, craqueamento catalítico, coqueamento retardado e craqueamento térmico brando, sendo que as correntes de destilação podem ou não passar por hidrotratamento, enquanto as demais correntes devem passar necessariamente por um HDT para que possam ser incorporadas à mistura final. Os autores expõem que, como as refinarias brasileiras foram construídas diante de um mercado demandante por gasolina, quase todas as refinarias contam com unidades de craqueamento catalítico, o que acaba resultando na incorporação de nafta pesada craqueada e óleo leve de reciclo ao diesel. Em 2017, de acordo com dados da ANP (2018a), foram importados quase 13 bilhões de litros de óleo diesel, o que mostra que a capacidade nacional de produção deste derivado já está saturada, sendo inviável, até o momento, a ocupação de parte

relevante da capacidade de hidrotratamento de instáveis para o processamento de óleos vegetais visando a produção de bioquerosene. A utilização desta rota, portanto, não depende apenas de políticas voltadas para a produção de bioquerosene, uma vez que afetaria a produção de um combustível com tendência de aumento da dependência externa, em função da estagnação da capacidade produtiva nacional, e que tem um grande impacto na economia do país, visto que está associado ao transporte de carga, altamente dependente do modal rodoviário.

5.2. Proposta 2: Mandato de mistura de bioquerosene no QAV

A inclusão dos biocombustíveis de aviação em um programa amplo para combustíveis de transporte, como o RenovaBio, pode não ser suficiente para aumentar a penetração destes biocombustíveis devido às vantagens em termos de custos e logística dos biocombustíveis de transporte rodoviário. A criação de obrigações relacionadas especificamente ao bioquerosene de aviação pode trazer resultados mais eficientes no que diz respeito ao desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene no Brasil. Desse modo, propõe-se a criação de um programa nacional de bioquerosene, semelhante ao que já foi realizado para o etanol e o biodiesel, no qual será definido um cronograma de aumentos graduais dos percentuais de mistura de bioquerosene no QAV, respeitando os limites de adição de cada rota.

A criação de mandatos para biocombustíveis é uma medida amplamente utilizada no mundo. CORTEZ *et al.* (2014) avaliam que, ao criar uma demanda garantida, a mistura obrigatória de biocombustíveis e combustíveis convencionais é, certamente, uma medida poderosa para promover a sua adoção e produção. Por outro lado, os autores acreditam que as condições particulares da indústria de aviação, em que as frotas domésticas e internacionais dividem a mesma infraestrutura de distribuição de combustíveis, criam dificuldades que precisam ser previamente consideradas, discutidas e resolvidas antes de qualquer ação no sentido da obrigatoriedade de uso de biocombustíveis. Além disso, ICAO (2017) menciona que este tipo de medida pode impactar diretamente os custos operacionais das companhias aéreas e, conforme visto

no capítulo 3, o resultado da indústria de aviação brasileira ficou negativo de 2011 a 2016, com um acúmulo de mais de R\$ 16 bilhões de reais em prejuízos.

Nesse sentido, cumpre analisar o caso da introdução do mandato de mistura do biodiesel no Brasil e como essa indústria pode afetar o desenvolvimento do bioquerosene. Segundo DELGADO, ROITMAN E SOUSA (2017), a Lei 11.097/2005 definiu o percentual mínimo obrigatório de 5% de adição em volume (B5) de biodiesel ao diesel, com prazo de até oito anos para a sua implantação, definindo ainda a utilização de uma mistura intermediária de 2% (B2) para os três primeiros anos. Esta obrigatoriedade inicial entrou em vigor em janeiro de 2008, conforme definido pela Resolução CNPE Nº 05 de 03/10/2007. O percentual de mistura foi sendo ampliado gradualmente por decisões do CNPE até 5% e pela Lei 13.033, de 24/09/2014, para 6 e 7%. A Lei 13.263/2016 determinou um cronograma de aumento do teor de biodiesel no diesel a partir para 2017 (B8), 2018 (B9) e 2019 (B10). Em março de 2018, no entanto, a mistura passou diretamente de 8% para 10%, de acordo com ANP (2018c).

O aumento gradual do teor de mistura de biodiesel ao diesel mineral foi permitindo o crescimento da indústria do biocombustível. Em 2017, a capacidade instalada alcançou 8 bilhões de litros e a produção chegou a 4,3 bilhões de litros, conforme mostra a Figura 34. Em 2018, em decorrência do aumento do teor de mistura para 10%, a produção deve superar 5 bilhões de litros, segundo estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2018). A principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel é o óleo de soja, seguido da gordura bovina, os quais responderam por, respectivamente, 71% e 12% da produção de julho de 2018, segundo dados da ANP (2018a).

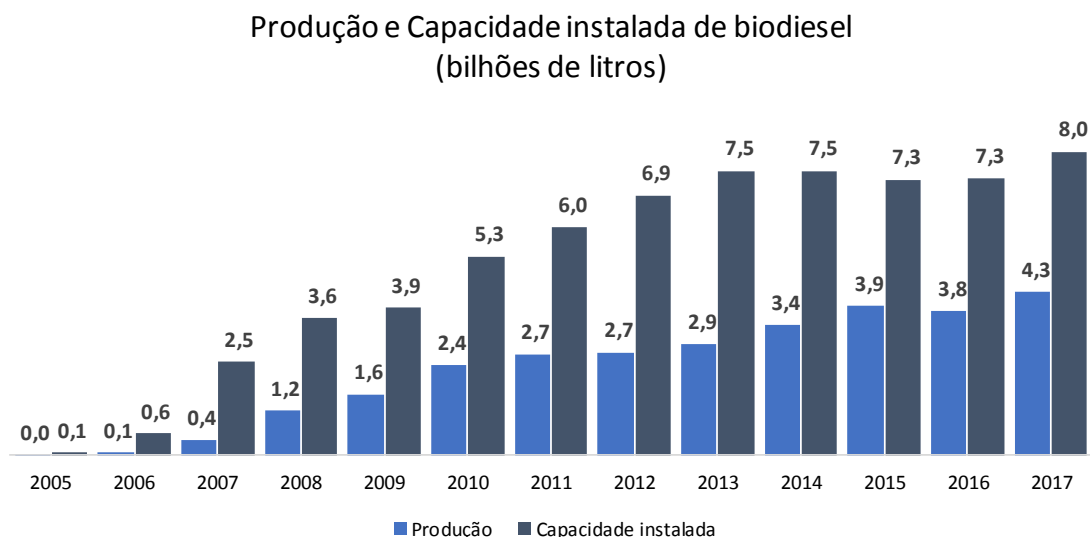


Figura 34: Produção e Capacidade instalada de biodiesel, de 2005 a 2017

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de MME (2017), ANP (2018a) e EPE (2018)

O estabelecimento de um mandato de adição obrigatória de bioquerosene no QAV deve envolver estudos prévios a respeito da matéria-prima a ser utilizada para a produção do biocombustível, levando em consideração não apenas a disponibilidade de material e os custos de produção envolvidos, mas também fatores como os impactos ao meio ambiente (em especial os relacionados ao uso do solo), a competição com a produção de alimentos, a existência de indústrias já estabelecidas para a produção de biocombustíveis rodoviários (como etanol e biodiesel), a existência de infraestrutura de escoamento, e a proximidade das regiões consumidoras. ICAO (2017) menciona que, para desenvolver um programa nacional de biocombustível de aviação, pode-se realizar um zoneamento agroecológico para identificar as terras disponíveis para as culturas identificadas como mais promissoras, considerando as possíveis restrições em relação ao uso do solo.

Para CANTARELLA *et al.* (2015), entre as culturas oleaginosas, a soja, apesar do baixo rendimento em óleo, deve permanecer como a opção mais viável de matéria-prima para a produção de bioquerosene no Brasil, no curto prazo. É preciso considerar, contudo, que, além da competição direta pela matéria-prima já utilizada na produção de biodiesel, existem limitações relacionadas às características da cadeia da soja no Brasil e de sustentabilidade de uso da terra. Em 2017, foram consumidos 54 bilhões litros de

óleo diesel B (contendo biodiesel) e, aproximadamente, 4 bilhões de litros de biodiesel, segundo dados da ANP (2018). De acordo com as projeções da EPE (2017), o consumo de óleo diesel deve aumentar 1,6% ao ano, até 2026, levando a uma demanda de 63 bilhões de litros no mesmo ano. Considerando um teor de mistura de 10% de biodiesel, a demanda por biodiesel chegaria a 6,3 bilhões de litros; e, se o percentual aumentasse para 15% ou 20%, a demanda alcançaria valores de 9,5 ou 12,6 bilhões de litros, respectivamente, o que corresponderia a mais do que dobrar ou triplicar a produção atual. Em 2017, foram produzidas 8,4 milhões de toneladas de óleo de soja, dos quais 2,9 milhões foram direcionados à produção de biodiesel (EPE, 2018). Conforme mostra a Figura 35, apenas 37% da soja foi processada no país, apesar de uma capacidade existente de 63 milhões de toneladas anuais (EPE, 2018). De acordo com dados da ABIOVE (2018b), aproximadamente 20% da soja processada é destinada à produção de óleo de soja. Se toda a capacidade for utilizada, a quantidade máxima de óleo produzido seria de 12,6 bilhões de toneladas ou 11,6 bilhões de litros (considerando a densidade do óleo de soja igual a 0,92 kg/L, utilizado por EPE, 2018). Esse volume não seria suficiente, por exemplo, para garantir a utilização de 20% de biodiesel no diesel, uma vez que parte deste volume se destina ao consumo interno. Desse modo, verifica-se que a própria expansão da produção de biodiesel já exigiria esforços de expansão da cadeia produtiva da soja, tornando pouco viável a utilização da mesma matéria-prima para a utilização do bioquerosene.

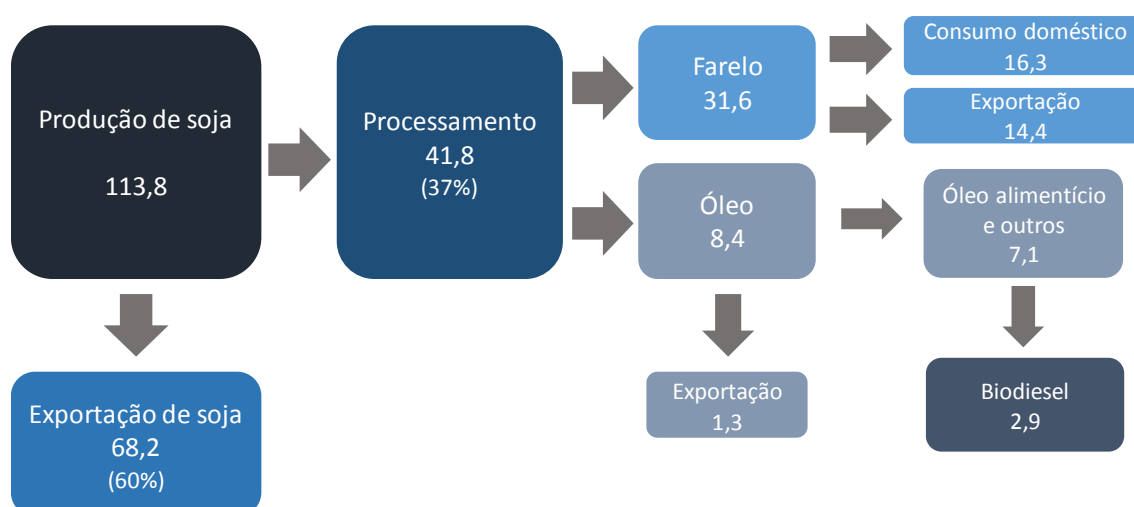


Figura 35: Complexo da soja (valores de 2017)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ABIOVE (2018b) e EPE (2018)

Em relação à preocupação com o aumento de preço do combustível final que a introdução de um mandato de adição de bioquerosene pode causar, cabe analisar o ocorrido no caso do biodiesel. De acordo com dados da ANP, o preço do biodiesel representou 6,7% do preço final do diesel S500⁸ e 6,6% do preço final do diesel S10⁹ em junho de 2018, quando o teor de mistura do biocombustível no diesel era de 10%, como mostra a Tabela 12. Analisando-se o preço do óleo diesel que sai da refinaria, incluindo os tributos federais e estaduais, a representatividade do biodiesel sobe para 8,8%, no diesel S500, e 8,7%, no S10. A comparação serve apenas como uma referência, visto que o custo de produção do bioquerosene é, pelo menos, 1,5 vezes superior ao do biodiesel. Deve-se levar conta, no entanto, que nas fases iniciais de implantação do mandato, que poderá começar com a adição de 1% de bioquerosene, o impacto no preço final do QAV será pouco sentido, assim como ocorreu com o biodiesel. Com o avançar dos anos, espera-se que os custos de produção do bioquerosene diminuam, de forma que seja possível o aumento gradual do percentual de mistura sem aumentos correspondentes em termos de preços.

Tabela 12: composição dos custos do óleo diesel (S500 e S10) em junho/2018 (média de preços no Brasil)

	Diesel S500		Diesel S10	
	Valor (R\$/litro)	Participação	Valor (R\$/litro)	Participação
Preço Produtor Diesel A	1,79	52,9%	1,83	52,7%
Preço do biodiesel c/ Frete e Tributos	0,23	6,7%	0,23	6,6%
Tributos Federais do Diesel A ¹	0,33	9,8%	0,33	9,6%
Tributos Estaduais do Diesel A ²	0,48	14,1%	0,49	14,2%
Margem Bruta de Distribuição ³ + Custos Transporte	0,23	6,7%	0,24	7,0%
Margem Bruta de Revenda ³	0,34	9,9%	0,35	10,0%
Preço ao Consumidor de Diesel B Comum	3,39	-	3,47	-

(1) Pis/Pasep, Cofins e Cide

(2) ICMS

(3) Margens brutas incluem demais custos não identificados nesta tabela e margem líquida de lucro

Fonte: ANP (2018d)

É interessante notar, ainda, que a representatividade do biodiesel no preço final do diesel é menor do que os impactos causados pela tributação dos combustíveis, uma vez

⁸ O óleo diesel S500 contém 500 ppm (partículas por milhão) de enxofre.

⁹ O óleo diesel S10 contém 10 ppm de enxofre.

que os tributos federais representam quase 10% e os estaduais representam aproximadamente 14% do preço final. Nesse sentido, cumpre analisar a possibilidade de redução de algum tributo para compensar os custos da introdução de um mandato. Aliás, este tema ainda será discutido nesta dissertação, na proposta que sugere a isenção fiscal como uma medida de inserção do bioquerosene no Brasil.

De forma ilustrativa, assumindo-se que, entre 2020 e 2026, fossem adicionados 1%, 5% e 10% de bioquerosene em todo o QAV consumido no país (incluindo a aviação nacional e a internacional), foram estimados os custos envolvidos, considerando as estimativas de crescimento anual da demanda por QAV de 2,6% entre 2017 e 2026, proposta por EPE (2017), os custos do bioquerosene estimados em DE CARVALHO (2017), US\$ 0,89 por litro de bioquerosene da rota FT e US\$ 2,22 por litro da rota HEFA, e o valor médio do preço do QAV, entre janeiro e agosto de 2018 (preço ao produtor de US\$ FOB 0,53 por litro, de acordo com dados da IEA, 2018). A adição de 1%, 5% e 10% de bioquerosene no QAV, entre 2017 e 2026, representam demandas, em volume, de, respectivamente, 550 milhões, 2,74 bilhões e 5,47 bilhões de litros do biocombustível. Em termos de custos, essas proporções de mistura representam, respectivamente, US\$ 197 MM, US\$ 985 MM e US\$ 1,97 Bi, no caso do bioquerosene a partir da rota FT, e US\$ 925 MM, US\$ 4,63 Bi e US\$ 9,25 Bi, ao utilizar a rota HEFA.

Dado que o consumo de QAV, entre 2020 e 2026, seria de 54,7 bilhões de litros, utilizando as mesmas estimativas da EPE (2017), a aquisição do combustível teria um custo total de US\$ 29,0 Bi, considerando o valor de US\$ 0,53 para o litro do QAV. Nesse sentido, os custos de adição do bioquerosene produzido pela rota FT, em 1%, 5% e 10%, representam 0,7%, 3,4% e 6,8%, respectivamente, dos custos com combustível, no mesmo período. No caso da rota HEFA, os impactos são maiores (3,2%, 15,9% e 31,9%, respectivamente).

Adicionalmente, a produção do bioquerosene também poderia ser incentivada por meio de financiamentos públicos que permitissem a venda do biocombustível pelo mesmo preço do QAV. Conforme foi mostrado, seriam necessários recursos da ordem de US\$ 28 milhões anuais (US\$ 197 MM, de 2020 a 2026) para a equiparação dos preços de

bioquerosene da rota FT e do QAV, no caso de um mandato de 1% de mistura de biocombustível no derivado fóssil. Uma vez que os mandatos de mistura estariam definidos, e, portanto, a demanda pelo bioquerosene ficaria garantida, o incentivo proposto seria um incentivo a mais aos produtores de bioquerosene para investirem na construção de plantas, além de não representar maiores impactos financeiros às empresas aéreas. Essa medida também poderia estar associada à criação de um tributo sobre carbono aplicado à indústria de aviação, conforme sugerido na proposta de número 5 deste trabalho.

Diferentes países já estabeleceram o uso de mandatos para o bioquerosene, dos quais alguns foram abandonados ou postergados, e outros determinaram prazos longos, com a criação de obrigações daqui a mais de 30 anos. Na Tabela 13, encontram-se as metas de adição de bioquerosene ao QAV, propostas por alguns países e regiões, até 2018.

Tabela 13: Metas volumétricas de adição de bioquerosene ao QAV no mundo

País/Região	Meta
Indonésia	2% em 2018
	3% em 2020
	5% em 2025
União Europeia	2,5 bilhões de litros em 2020
	40% em 2050
Alemanha	10% em 2025
Israel	20% em 2025
Austrália	50% em 2050

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de ICAO (2017) e IRENA (2017)

No caso da Indonésia, país com metas definidas para 2018 e 2025, há dúvidas quanto à capacidade real de cumprimento das mesmas. Segundo ICAO (2017), o decreto original do Ministro de Energia e Recursos Minerais do país estabeleceu um mandato para o bioquerosene, em nível nacional, de 2% de mistura em 2016, 3% em 2020 e 5% em 2025, mas, em função de circunstâncias nacionais, a força tarefa concluiu que a meta de 2016 não seria alcançada. A regulação foi, então, alterada, em 2015, prevendo a utilização de 2% de combustíveis alternativos em 2018, e não mais em 2016, enquanto os demais percentuais e anos de início foram mantidos.

IRENA (2017) avalia que, apesar de a Indonésia ter proposto a implementação de um mandato de bioquerosene tecnicamente viável, baseado na rota de produção a partir do hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (rota HEFA), isso pode ser prematuro e arriscado sem a certeza de que a oferta poderá suprir a demanda projetada. IRENA (2017) considera que o maior desafio para a Indonésia é que, mesmo com o uso de matéria-prima local, o custo de produção do bioquerosene é mais do que o dobro em relação ao combustível fóssil, portanto, qualquer mandato de bioquerosene terá que envolver uma combinação com outras políticas que criem incentivos e subsídios.

É importante verificar que as mesmas questões levantadas sobre a Indonésia podem ser consideradas no Brasil. Apesar da ampla experiência do país na produção de biocombustíveis e da disponibilidade de matérias-primas, assim como é o caso da Indonésia, é preciso avaliar os desafios envolvidos em uma política de estabelecimento de mandatos de mistura obrigatória. Uma medida deste tipo deve envolver a seleção de matérias-primas que envolvam baixos riscos de impactos ambientais, como os causados pelas mudanças de uso do solo, e que não causem competição com as cadeias de biocombustíveis já estabelecidas, além de demandar esforços de articulação com as empresas aéreas, as quais seriam as maiores impactadas por tal política.

5.3. Proposta 3: Incentivo fiscal para as empresas aéreas que utilizarem bioquerosene

Em função da alta carga tributária já incidente sobre os combustíveis e da pequena margem das empresas aéreas para suportar aumentos de custos que uma nova tributação ou aumento da já existente traria, propõe-se a redução do tributo estadual ICMS para as empresas aéreas que adicionarem o bioquerosene ao combustível fóssil.

Os tributos incidentes sobre o QAV são: PIS, COFINS e ICMS. Os tributos federais possuem alíquotas de 5% e 23,2%, respectivamente, conforme consta na Lei nº10.560/2002. O ICMS, conforme visto no Capítulo 3, varia de 12% a 25%. Em 2015, o Decreto nº 8.395 zerou a alíquota da Cide.

Em diversos estados do país, há exemplos de acordos entre governos estaduais e empresas aéreas para a redução do ICMS sobre combustíveis aeronáuticos mediante algumas contrapartidas das companhias aéreas, como a ampliação do número de voos no estado e a criação de novos trechos. Isto ocorre, por exemplo, na Bahia (CASA CIVIL DO ESTADO DA BAHIA, 2017), no Espírito Santo (ESBRASIL, 2018) e em Goiás (PORTAL CONTÁBEIS, 2011).

A redução do ICMS sobre os combustíveis estimula o crescimento do turismo e a geração de emprego e renda (ABEAR, 2017b), além de aumentar o próprio consumo de combustível de aviação, em virtude do aumento do número de voos. Desse modo, a menor arrecadação com o ICMS dos combustíveis é compensada com o aumento de arrecadação em outras áreas.

O incentivo fiscal para o uso de bioquerosene poderia estar relacionado aos tributos federais ou ao estadual, mas na elaboração da proposta optou-se pela redução do ICMS em função da possibilidade de negociação entre os governos estaduais e empresas aéreas, conforme os exemplos citados. Vislumbra-se, ainda, a possibilidade de definição de reduções progressivas do ICMS a cada aumento de 1% em volume de bioquerosene adicionado ao QAV.

A aplicação de uma redução de ICMS para empresas aéreas que utilizarem bioquerosene poderia ser particularmente interessante em estados potencialmente produtores de bioquerosene. De acordo com DE CARVALHO (2017), em função da disponibilidade de matérias-primas, as regiões com maior potencial para a produção de bioquerosene no Brasil são o Sul, Sudeste e Centro-oeste. Além de possuírem maior potencial de produção, são as regiões que consomem combustível de aviação, portanto a produção estaria localizada próxima do mercado.

Conforme já mencionado, a iniciativa Plataforma de Bioquerosene de Juiz de Fora pretende desenvolver uma cadeia integrada para a produção de diesel verde e bioquerosene, a partir de lixo urbano e óleos vegetais como o da macaúba. O projeto

está voltado para o estímulo à oferta, com incentivos à pesquisa e ao desenvolvimento da produção do bioquerosene. A conjunção com uma medida de redução de ICMS para este produto, no estado de Minas Gerais, pode criar mais incentivos ao projeto, pois estimularia a sua demanda.

IRENA (2017) menciona que a iniciativa de múltiplos agentes para disponibilizar o bioquerosene no aeroporto de Oslo é um exemplo de sucesso no apoio ao biocombustível por meio de políticas. O governo da Noruega ofereceu aos usuários de bioquerosene uma redução de 25% nas taxas de aterrisagem, a isenção da taxa de carbono aplicada a voos domésticos e a isenção ou abatimento no âmbito do sistema de comércio de emissões da União Europeia, o EU ETS, referente à quantidade de biocombustível utilizado.

5.4. Proposta 4: Uso de bioquerosene na aviação militar brasileira

A utilização do bioquerosene na aviação militar seria uma forma de criar demanda pelo biocombustível, possibilitando o desenvolvimento da tecnologia, para que a produção alcance escala comercial. Esta proposta tem como objetivo promover o uso do bioquerosene no abastecimento de frotas militares brasileiras, com o foco no desenvolvimento da produção do biocombustível em regiões onde não há a produção de QAV, contribuindo para reduzir a dependência pelo combustível fóssil de origem externa.

A criação de um nicho de mercado para biocombustíveis em fase de desenvolvimento tecnológico é uma política de apoio à tecnologia, conforme já mencionado, tendo sido bastante explorada no caso de biocombustíveis rodoviários, em especial pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. YUDKEN (2012) conduziu um estudo para avaliar os impactos dos investimentos e criação de demanda de biocombustíveis promovidos pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos no crescimento da produção doméstica de combustíveis limpos e os potenciais benefícios econômicos para

a economia do país, concluindo que os impactos da estratégia militar para os biocombustíveis transcende o mercado da defesa nacional, uma vez que atrai capital privado para o desenvolvimento da tecnologia e a construção de biorefinarias, acelerando o desenvolvimento e o aumento de escala dos biocombustíveis.

Poucos são os exemplos de iniciativas relacionadas ao uso de biocombustíveis no âmbito da aviação militar. Segundo BIOFUELS DIGEST (2014), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos concedeu US\$ 210 milhões para a construção de três biorefinarias voltadas para a produção de biocombustíveis militares, das empresas *Emerald Biofuels*, *Fulcrum BioEnergy* e *Red Rock Bio*. ADVANCED BIOFUELS USA (2017) menciona que os projetos das empresas *Fulcrum BioEnergy* e *Red Rock Bio* estão no caminho de concretizar a implementação, após cumprirem os requisitos necessários para receber os financiamentos, porém há incertezas envolvendo o projeto da empresa *Emerald*. Na Holanda, o Ministério da Defesa e a Força Aérea anunciaram que pretendem estimular a demanda por bioquerosene e o desenvolvimento desta indústria utilizando uma mistura de 5% de biocombustível em suas aeronaves (SkyNRG, 2018).

Conforme visto no Capítulo 3, a produção de QAV, no Brasil, está concentrada na região Sudeste. A Tabela 14 apresenta a diferença entre oferta e demanda de QAV nas regiões do país, mostrando que apenas o Sul e Sudeste produzem mais do que consomem. As regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste são deficitárias neste combustível, de forma que poderiam se beneficiar de uma produção de biocombustível, permitindo maior autonomia nestas localidades.

Tabela 14: Diferença entre oferta e demanda de QAV nas regiões brasileiras, em 2017 (milhões de litros)

Região	Oferta (refino nacional)	Demanda	Diferença (Oferta - Demanda)
Sudeste	5.001	4.258	743
Nordeste	514	1.023	-509
Centro-Oeste	0	614	-614
Sul	506	490	16
Norte	147	310	-163
Total	6.169	6.694	-526

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2018a)

De fato, o estudo de DE CARVALHO (2017) revelou que a implantação de biorefinarias em localidades isoladas é uma possibilidade interessante para o país, sendo um exemplo a região Centro-Oeste, que concentra o maior potencial de bioenergia a partir de resíduos de soja e milho e depende de suprimento externo de QAV. A região Centro-Oeste, portanto, apesar de não possuir produção de QAV, tem um alto potencial de produção de biocombustível para suprir parte do seu consumo, que é superior ao das regiões Norte e Sul.

A Força Aérea Brasileira (FAB) possui três unidades operacionais na região Centro-Oeste, conforme mostra a Figura 36. Tais bases poderiam ser beneficiadas pela produção local de bioquerosene, por resolver uma dificuldade logística relacionada ao escoamento de combustível de outro estado até o local, mas, além disso, poderiam estimular o desenvolvimento da região, com a geração de empregos, renda e geração de tecnologia.

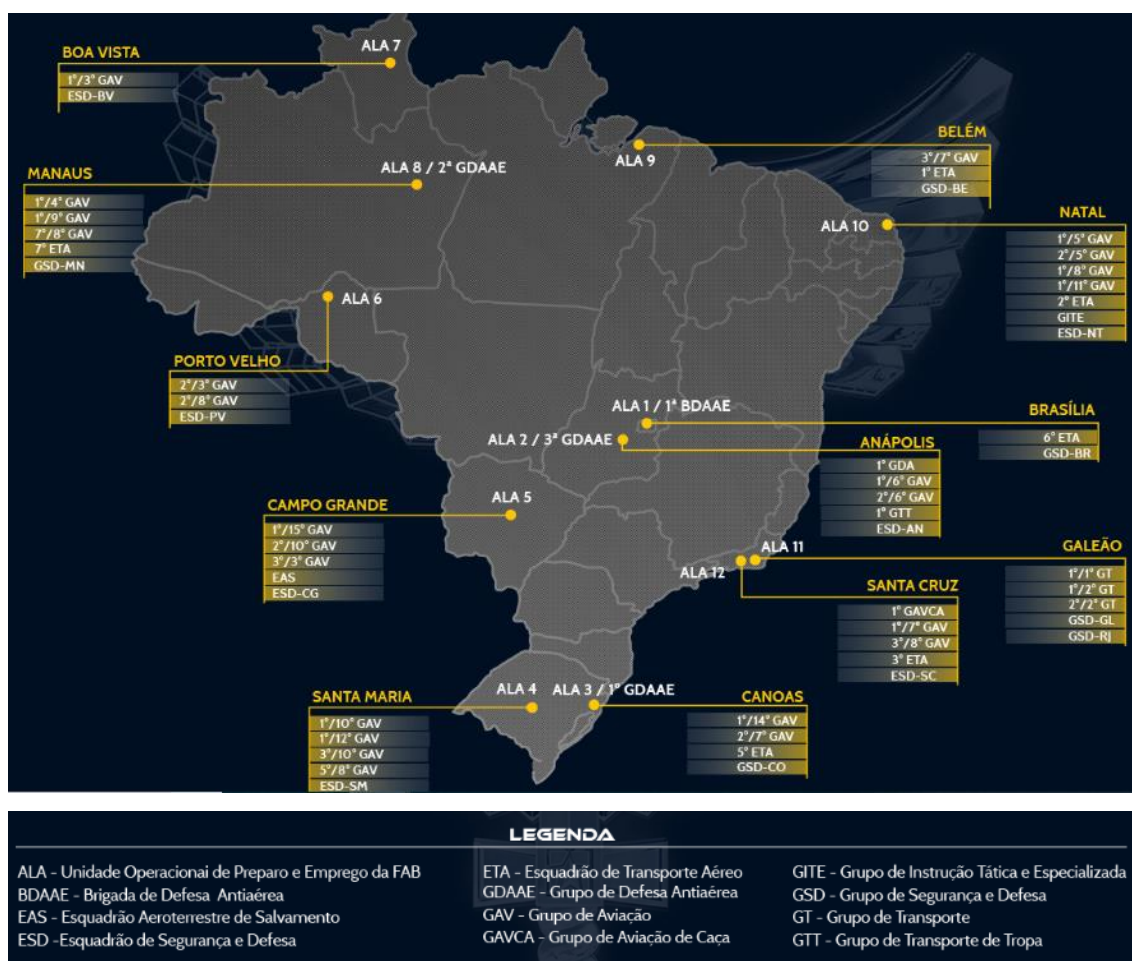


Figura 36: Unidades operacionais da Força Aérea Brasileira

Fonte: FAB (2018)

5.5. Proposta 5: Criação de uma tributação sobre carbono com a reciclagem dos recursos

A quinta e última proposta tem como foco a criação de uma tributação sobre o consumo de combustível de voos domésticos de transporte de passageiros, em conjunto com uma forma de reciclagem dos recursos arrecadados. Os voos internacionais, por estarem contemplados pelo CORSIA, não foram incluídos nesta proposta.

Para que o aumento da carga tributária não represente um impacto muito significativo nos custos operacionais das companhias aéreas, propõe-se que a incidência do tributo ocorra para valores acima do mesmo limite de emissões de GEE (“cap”) proposto no

âmbito do programa CORSIA, que é o valor médio das emissões de 2019 e 2020. A partir de 2021, as emissões que superarem o valor médio sofrerão incidência de tributação.

A reciclagem dos recursos poderia ser feita de diferentes formas, e três delas serão aqui discutidas, considerando as perspectivas de desenvolvimento da indústria de bioquerosene. As formas de reciclagem analisadas são: i) os recursos arrecadados voltam para as empresas aéreas que se mantém abaixo do limite de emissões estabelecido, como um prêmio pelo cumprimento da meta; ii) os recursos arrecadados são destinados ao financiamento de plantas de bioquerosene em escala piloto e comerciais; e iii) uma forma híbrida entre as duas anteriores.

Ao se propor a adoção de um tributo para financiar a implementação de uma indústria de bioquerosene no Brasil, faz-se necessária uma breve discussão a respeito das espécies tributárias no país. De acordo com a Lei nº 5.712/1966, que dispõe sobre o Sistema Tributário Nacional, os tributos são impostos, taxas e contribuições de melhoria.

Imposto é o tributo cuja obrigação tem por fato gerador uma situação independente de qualquer atividade estatal específica, caracterizado por não ter a sua arrecadação com destino específico, sendo destinado a atender às necessidades gerais da administração e sem assegurar ao contribuinte qualquer proveito direto em contraprestação à parcela que pagou (CAVALCANTI, 2011).

Para a cobrança de uma taxa, o Estado deve exercer o poder de polícia ou realizar um serviço público ao contribuinte. Conforme dispõe a Lei nº 5.712/1966, as taxas têm como fato gerador o exercício regular do poder de polícia, ou a utilização, efetiva ou potencial, de serviço público específico e divisível, prestado ao contribuinte ou posto à sua disposição.

A Lei nº 5.712/1966 define a contribuição de melhoria como um tributo instituído para fazer face ao custo de obras públicas de que decorra valorização imobiliária, tendo como limite total a despesa realizada e como limite individual o acréscimo de valor que da obra resultar para cada imóvel beneficiado.

Em relação à competência para a criação dos tributos, CAVALCANTI (2011) menciona que a União, os estados, os municípios e o Distrito Federal têm competência para instituir taxas e contribuições de melhoria, enquanto os mesmos entes somente podem arrecadar os impostos que lhes foram atribuídos.

Além destas três espécies de tributos, há ainda as contribuições parafiscais, que se dividem em contribuições sociais, de intervenção no domínio econômico e de interesse das categorias profissionais ou econômicas, de competência exclusiva da União, conforme dispõe a Constituição Federal de 1988. Tais tributos se caracterizam por possuir destinação específica. Segundo CAVALCANTI (2011), a essência da contribuição parafiscal é a utilização das receitas para atender a finalidades determinadas, não tendo sentido que o produto de sua arrecadação tenha destinação diversa da norma (lei ou decreto). Mais especificamente, a contribuição de intervenção no domínio econômico (CIDE) caracteriza-se por instrumentar a intervenção, realizada pelo poder público, para corrigir distorções em setores da atividade econômica, de forma que os recursos auferidos com esta espécie tributária devem ser destinados integralmente para o financiamento da intervenção que fundamentou a sua instituição (ANDRADE, 2004).

A título de exemplo, têm-se no mercado de combustíveis a chamada CIDE-combustíveis, instituída pela Lei nº10.336 sobre a importação e a comercialização de petróleo e seus derivados, gás natural e seus derivados, e álcool etílico combustível, a qual estabelece que o produto da sua arrecadação deve ser destinada ao: i) pagamento de subsídios a preços ou transporte de álcool combustível, de gás natural e seus derivados e de derivados de petróleo; ii) financiamento de projetos ambientais relacionados com a indústria do petróleo e do gás; e iii) financiamento de programas de infraestrutura de transportes.

Nesse sentido, uma tributação de carbono sobre o QAV, proposta neste item, teria o caráter de uma CIDE, uma vez que os recursos arrecadados teriam um destino específico, seja a reciclagem para as empresas aéreas ou para os produtores de bioquerosene.

A Figura 37 apresenta as emissões de GEE (CO₂e) e o consumo de QAV de voos domésticos, de 2000 a 2017¹⁰, e as projeções de 2018 a 2035, considerando estimativas de aumento da demanda por QAV da EPE (2017), que prevê um crescimento anual de 2,6% entre 2017 e 2026. Conforme proposto, o limite de emissões a ser adotado é o valor médio dos anos 2019 e 2020, o que corresponde a 11,3 kt de CO₂e.

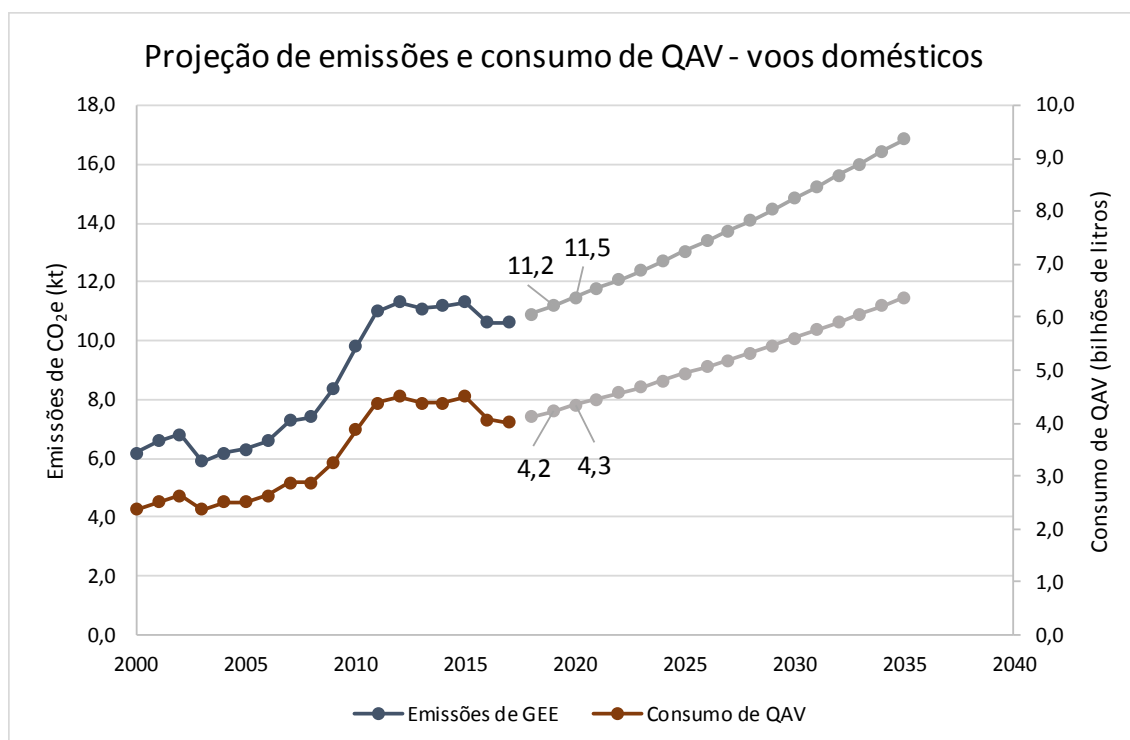


Figura 37: Projeções de emissões e consumo de QAV em voos domésticos

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de ANAC (2016), ANP (2018a), EPE (2017)

Assumindo-se, conservadoramente, que as emissões estão associadas apenas ao consumo de combustível, o limite de emissões determinado (11,3 kt de CO₂e) equivaleria a um limite de consumo de QAV em 4,3 bilhões de litros, a partir de 2021. Supondo que todo o abatimento viria da substituição do QAV pelo bioquerosene, entre 2021 e 2035, seria necessária a utilização de 16,1 bilhões de litros de bioquerosene na aviação nacional (volume acima do “cap”). A aquisição de biocombustível, no lugar do combustível fóssil, representaria um custo extra (diferença entre o custo do bioquerosene e do QAV) de US\$ 5,8 Bi, ao utilizar o biocombustível obtido pela rota FT,

¹⁰ Os últimos dados de emissões, retirados de ANAC (2016), são do ano de 2015. Os valores de 2016 e 2017 foram estimados a partir dos dados de consumo de QAV nos mesmos anos.

ou US\$ 27,3 Bi, pela rota HEFA, considerando os custos estimados em DE CARVALHO (2017), US\$ 0,89 por litro de bioquerosene da rota FT e US\$ 2,22 por litro da rota HEFA, e o valor médio do preço do QAV na refinaria, entre janeiro e agosto de 2018 (US\$ FOB 0,53 por litro, de acordo com dados da IEA, 2018).

De forma simplificada, o tributo aplicado ao QAV para se alcançar os recursos necessários para arcar com os custos envolvidos na substituição do combustível fóssil pelo bioquerosene podem ser calculados pela divisão entre os US\$ 5,8 Bi (custo extra do biocombustível obtido pela rota FT) e o custo de aquisição dos 16,1 bilhões de litros de QAV consumidos acima do limite de emissões (US\$ 8,53 Bi), chegando-se a um tributo de 68% sobre o preço do QAV, o que não é factível. No caso da rota HEFA, o tributo seria superior ao preço do combustível fóssil.

Em caráter ilustrativo, analisa-se a hipótese de adoção de uma alíquota de 20% para tributo proposto, tomando por base que os tributos federais (PIS e COFINS) incidentes sobre o QAV somam 28%, de acordo com a Lei 10.560/2002. Assume-se a mesma premissa conservadora de que o limite de emissões seria equivalente a um limite de consumo de QAV e supõe-se que não haja redução das emissões, seja com bioquerosene ou com outra medida. Desse modo, todo o volume acima da meta deve ser tributado, logo o tributo incidiria sobre os mesmos 16,1 bilhões de litros. Nessa perspectiva, o montante de recursos arrecadados seria equivalente a US\$ 1,7 Bi, considerando o preço de US\$ 0,53 por litro de QAV.

A Tabela 15 mostra os efeitos da introdução de um tributo de 20% sobre os combustíveis de aviação no resultado líquido e na margem líquida das empresas aéreas. Os cálculos utilizaram como base os dados de 2017 das demonstrações contábeis das empresas aéreas (ANAC, 2018b), e refletem apenas uma alteração no custo de combustíveis, sem alterar os demais valores das demonstrações. É possível identificar a relevância do choque de custo no resultado das empresas. As empresas LATAM, Azul e Avianca, que apresentaram resultados positivos em 2017, teriam resultados significativamente negativos considerando a introdução do tributo. Nesse cenário, as empresas seriam

obrigadas a reduzir outros custos, o que pode se refletir na redução de rotas aéreas e aumento de preços das passagens, conforme já foi discutido no Capítulo 3.

Tabela 15: Efeito da aplicação de um tributo de 20% sobre os custos de combustíveis (dados de 2017)

Companhia	Resultado líquido		Margem líquida	
	sem tributo	com tributo	sem tributo	com tributo
Latam	120,5	-585,2	0,8%	-4,0%
Gol	-28,8	-606,3	-0,3%	-6,3%
Azul	278,6	-89,6	3,6%	-1,2%
Avianca	41,6	-178,0	1,2%	-5,1%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANAC (2018b)

Nesse sentido, cabe discutir a primeira forma de reciclagem proposta, ou seja, quando os recursos arrecadados voltam para as empresas aéreas que se mantêm abaixo do limite de emissões estabelecido, como um prêmio pelo cumprimento da meta. Propõe-se que tal prêmio seja uma redução do imposto de renda, de forma que parte do aumento de custos que as empresas enfrentarão como resultado da imposição de um limite de emissões, retornará àquelas que conseguirem se manter dentro da meta. A combinação das medidas de determinação de um limite para as emissões e de tributação sobre carbono, com a reciclagem dos recursos para a redução de outros tributos, estimula que as empresas invistam em medidas de redução das suas emissões, para evitarem o pagamento do tributo sobre o combustível.

Os mecanismos de reciclagem dos recursos obtidos por meio de uma taxa de carbono têm sido estudados por diversos autores, que mostram que é possível reduzir os impactos do aumento de uma tributação deste tipo sobre o crescimento econômico de um setor ou país. WILLS (2013) utiliza um modelo de equilíbrio geral computável, denominado IMACLIM-S BR, para analisar os efeitos macroeconômicos no médio e longo prazo, de políticas climáticas, sejam elas uma taxa de carbono ou um mercado de cotas de emissões de GEE, aliadas a diferentes estratégias do governo de reciclagem das receitas de carbono. O estudo investiga o impacto de uma taxa de carbono sobre o comportamento do PIB e das emissões de dióxido de carbono quando aplicadas taxas

de carbono entre 0 e 200 reais por tonelada de CO₂, e consegue provar que dependendo da política climática implementada e de como o governo utiliza as receitas de carbono, é possível encontrar uma faixa de taxas de carbono em que é possível observar-se uma redução das emissões de CO₂ e ao mesmo tempo aquecer a economia do país.

O INSTITUTO ESCOLHAS (2016) publicou um estudo sobre os impactos econômicos e sociais da tributação de carbono no Brasil. O estudo analisa a alternativa de adoção de uma taxa de carbono de US\$36/tCO₂e sobre os combustíveis fósseis no Brasil, considerando a simplificação do recolhimento dos impostos PIS e COFINS, de forma que o aumento da arrecadação (proveniente do novo tributo) neutralizasse a queda de receita decorrente da simplificação do PIS/COFINS. O estudo concluiu que o valor de US\$ 36/tCO₂e produziria impactos positivos para a economia, com crescimento de 0,5 % do PIB, criação de 556 mil postos de trabalho e emissões evitadas de 4,2 milhões de toneladas de CO₂e. O documento sinaliza que é possível identificar oportunidades para a adoção de uma taxa de carbono com efeitos neutros sobre a carga tributária do país.

SANTOS *et al.* (2018) discutem sobre os impactos da precificação de carbono na indústria brasileira, verificando que a implementação de um instrumento de precificação de carbono, seja uma taxa de carbono ou um sistema de comércio de emissões, poderia empregar diferentes formas de reciclagem das receitas obtidas, como a redução de outros tributos, a alocação direta para a renda das famílias, o apoio à indústria, o investimento em fundos climáticos, ou o direcionamento para o orçamento central do governo. SANTOS *et al.* (2018) avaliam que a adoção de algumas alternativas de reciclagem dos recursos pode contribuir para a redução de impactos na competitividade de alguns setores.

A segunda forma de reciclagem proposta envolve a destinação dos recursos arrecadados ao financiamento de plantas de bioquerosene em escala piloto e comerciais. Ainda que a reciclagem dos recursos para as empresas aéreas, na forma de um prêmio, estimule o investimento em medidas de redução das emissões, como forma de evitar o pagamento do tributo sobre o combustível, tal medida não garante que o investimento será direcionado para o desenvolvimento da produção de bioquerosene. Conforme já

discutido no capítulo 2, existem outras medidas disponíveis para a redução das emissões do setor aéreo, das quais a compra de créditos de carbono, por exemplo, envolve custos menores. DEANE e PYE (2016) avaliam que, no caso do sistema de comércio de emissões europeu, o EU ETS, o preço do carbono é insuficiente para incentivar o uso de bioquerosene para a redução das emissões do setor aéreo. Para estabelecer uma paridade de preços entre o biocombustível e o QAV, seria necessário que a tonelada de CO₂e custasse mais de EUR 200,00.

A aplicação dos recursos arrecadados em financiamentos de plantas comerciais garantiria que o incentivo seja direcionado para a indústria de bioquerosene, e não para outras medidas de mitigação, tendo como objetivo final alcançar uma produção de biocombustível com custos menores, possibilitando a sua maior adoção por parte das companhias aéreas.

DE CARVALHO (2017) avaliou os custos de investimento, operação e manutenção de plantas de bioquerosene no Brasil, com diferentes capacidades instaladas. A menor planta de bioquerosene a partir da rota HEFA avaliada tem capacidade de produção de 2.000 barris por dia e envolve custos de US\$ 313 milhões. No caso da rota FT, a menor planta avaliada pode produzir 800 barris por dia e envolve custos de US\$ 165 milhões. Com o valor estimado da arrecadação do tributo de 20%, equivalente a US\$ 1,7 Bi, adotando as condições conservadoras mencionadas anteriormente, seria possível construir e operar até dez plantas da rota FT, ou cinco plantas da rota HEFA, conforme mostra a Tabela 16. A Tabela mostra, ainda, o volume que poderia ser produzido entre 2021 e 2035 nas plantas analisadas. Com apenas duas plantas da rota FT, com capacidade de produção de 10.000 barris/dia, seria possível suprir a necessidade de biocombustível para esses anos, visto que o volume de combustível a ser substituído por bioquerosene, para que as emissões se mantenham dentro do limite, foi calculado em 16,1 bilhões de litros. Os recursos, no entanto, podem ser direcionados para a construção de plantas de diferentes capacidades de ambas as rotas, de forma que a combinação pode alcançar o volume necessário.

Tabela 16: Quantidade de plantas de bioquerosene construídas com recursos arrecadados e capacidade de produção de bioquerosene entre 2021 e 2035

	Plantas da rota HEFA			Plantas da rota FT			
Capacidade (barris/dia)	2000	4000	6000	800	1000	2500	10000
CAPEX + OPEX (US\$ MM/ano)	313	566	801	165	192	359	938
Nº de plantas construídas com os recursos da tributação	5	3	2	10	9	5	2
Capacidade de produção de 2021 a 2035 (bilhões de litros)	9	11	11	7	8	11	17

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de DE CARVALHO (2017)

Os recursos arrecadados, portanto, seriam suficientes para promover a construção de plantas de bioquerosene, o que garantiria a produção de volumes significativos do biocombustível. Os cálculos são conservadores e se baseiam em estimativas de custos que consideram uma tecnologia madura e bem estabelecida, disponível em escala comercial, tendendo a subestimar os custos de capital e superestimar o desempenho da planta, de acordo com DE CARVALHO (2017).

Contudo, as análises também não incorporam os efeitos de aprendizagem e outras medidas que poderiam promover a redução de custos de produção como aumento da maturidade da indústria. DE JONG *et al.* (2015) avaliam a viabilidade econômica da adoção de estratégias de coprodução de bioquerosene, em comparação à produção em plantas completamente novas (*“greenfield”*). As estratégias de coprodução são: a chamada co-localização (*co-locating*), que envolve a instalação de uma unidade de bioquerosene adjacente a uma planta já existente, de forma a compartilhar a infraestrutura de matérias-primas ou utilidades; a readaptação (*“retrofitting”*), na qual a linha de produção de uma unidade já existente é alterada, de forma que subprodutos ou componentes não utilizados das matérias-primas podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis; e o repropósito (*“repurposing”*), em que uma instalação existente e não utilizada é transformada em uma planta para a produção de biocombustível. O estudo mostrou que tais estratégias, comparadas a uma planta *greenfield*, permitem a redução de 5 a 8% no preço de venda do bioquerosene produzido em plantas pioneiras e de 4 a 8% em plantas com escala comercial e tecnologia já estabelecida. Segundo os autores, as plantas pioneiras, em geral, são mais

intensivas em capital, apresentando custos mais altos, sendo difícil avaliar como os efeitos de aprendizagem e rupturas tecnológicas podem influenciar a escala de desenvolvimento de uma tecnologia ao longo do tempo.

A terceira forma de reciclagem proposta neste estudo trata de uma combinação entre o direcionamento dos recursos para as empresas aéreas e para o financiamento de plantas de bioquerosene. No primeiro caso, a aplicação dos recursos como um prêmio para as empresas que se mantêm abaixo do limite de emissões promove os incentivos necessários para que estas invistam em medidas de redução de emissões, reduzindo os impactos no resultado financeiro das empresas em função do aumento de custos associados a tais medidas. Por outro lado, não há garantias de que os investimentos serão destinados ao desenvolvimento do setor de bioquerosene. No segundo caso, foi mostrado que, quando aplicados no financiamento de plantas de bioquerosene, os recursos seriam suficientes para promover o desenvolvimento desta indústria, garantindo o aumento da oferta do biocombustível. Porém, até que fosse alcançado um estágio de maturidade da indústria que permitisse a redução de custos de produção do biocombustível, as empresas aéreas seriam fortemente impactadas. Conforme apresentado, um tributo de 20% sobre o preço do QAV afeta significativamente o resultado financeiro das companhias aéreas.

A proposta híbrida, portanto, direcionaria parte dos recursos para as empresas aéreas, premiando aquelas que se mantivessem dentro do limite de emissões, e parte para a construção de plantas de bioquerosene, possibilitando o aumento da oferta de biocombustível e permitindo que se alcance ganhos de escala e de aprendizagem que sejam capazes de se traduzirem em redução de custos de produção, o que aumentará a viabilidade do seu uso por parte do setor aéreo.

5.6. Resumo das propostas

As ideias principais de cada uma das cinco propostas desenvolvidas neste trabalho, bem como as oportunidades e desafios mais representativos das mesmas estão resumidas a seguir e são apresentadas na Tabela 17.

A primeira proposta apresentada refere-se à aplicação de um fator de multiplicação de, no mínimo, 1,5 aos créditos gerados pelo bioquerosene, no âmbito do programa RenovaBio. Propõe-se, ainda, a aplicação de fatores diferenciados para cada rota de produção, em função das particularidades que levam a custos operacionais distintos. Entende-se que o fator de multiplicação é necessário para incentivar a produção do biocombustível, uma vez que a emissão de créditos pelo bioquerosene acaba competindo com os biocombustíveis rodoviários, os quais já contam com cadeias de produção, logística e mercados bem definidos no país, envolvem custos de produção menores e, ainda, possuem menor intensidade de carbono. A proposta apresenta baixo impacto em termos de custos aos distribuidores, não criando obrigações a estas além das já estabelecidas pela lei que criou o RenovaBio, porém o principal desafio relacionado à inclusão dos biocombustíveis de aviação em um programa voltado para o setor de transportes, com foco nos combustíveis rodoviários, é que, ainda que seja aplicado o fator de multiplicação, este não seja suficiente para aumentar a penetração dos biocombustíveis de aviação devido às vantagens comparativas, já discutidas, a respeito dos biocombustíveis de transporte rodoviário.

A segunda proposta prevê a criação de um mandato de mistura de bioquerosene ao QAV. Desse modo, propõe-se o estabelecimento de um programa nacional de bioquerosene, semelhante ao que já foi realizado para o etanol e o biodiesel, com a definição de um cronograma de aumentos graduais dos percentuais de mistura de bioquerosene no QAV, respeitando os limites de adição de cada rota. A mistura obrigatória de biocombustíveis a combustíveis convencionais cria a demanda pelo biocombustível, sendo uma medida poderosa para a promover a sua adoção e produção. O Brasil tem experiência neste tipo de política, sendo uma vantagem desta proposta. Por outro lado, existem desafios associados, principalmente, ao

desenvolvimento de cadeia de matérias-primas e aos impactos nos custos operacionais das empresas aéreas. O preço do bioquerosene é mais alto do que o do QAV, conforme já mostrado no Capítulo 2, portanto, independentemente da proposta elaborada neste trabalho, a adição do biocombustível implica em aumento de custos às companhias que fizerem uso do mesmo. No entanto, esta proposta é a única que determina obrigações de adição de volumes de bioquerosene, de forma que pode encontrar resistência por parte das empresas. Uma possível solução nesse sentido seria a associação desta medida a uma redução tributária, com o objetivo de reduzir os impactos financeiros sofridos pelas empresas aéreas.

A proposta de número 3 envolve a redução do tributo estadual ICMS para as empresas aéreas que adicionarem o bioquerosene ao combustível fóssil. Os exemplos de acordos entre governos estaduais e empresas aéreas para a redução do ICMS de combustíveis aeronáuticos mediante algumas contrapartidas das companhias aéreas, como a ampliação do número de voos no estado e a criação de novos trechos confirmam que existe flexibilidade por parte dos governos estaduais para a adoção de medida semelhante relacionada ao uso do bioquerosene. Esta medida seria particularmente interessante para estimular o uso do biocombustível em estados potencialmente produtores de bioquerosene. Por ter um caráter regional, o desafio desta proposta está centrado na possibilidade de baixa adesão por parte dos governos estaduais, o que implicaria em um pequeno estímulo à produção de bioquerosene no país. Desse modo, entende-se que a medida deve estar associada a outros instrumentos com foco na produção do biocombustível.

A quarta proposta tem como objetivo promover o uso do bioquerosene no abastecimento de frotas militares brasileiras, com o foco no desenvolvimento da produção do biocombustível em regiões onde não há a produção de QAV. A medida é uma forma de criar demanda, em nichos de mercado, visando iniciar o desenvolvimento de uma indústria nacional. Entre os principais desafios está dificuldade relacionada ao aumento de escala desta produção.

A quinta e última proposta tem como foco a criação de uma tributação sobre o consumo de combustível de voos domésticos de transporte de passageiros, em conjunto com uma forma de reciclagem dos recursos arrecadados. A proposta tem como vantagem envolver formas consideradas mais eficientes e econômicas de alocação dos recursos. A combinação das medidas de determinação de um limite para as emissões e de tributação sobre carbono, com a reciclagem dos recursos, estimula que as empresas invistam em medidas de redução das suas emissões, para evitarem o pagamento do tributo sobre o combustível. Por outro lado, existe um desafio importante relacionado à definição do valor do novo tributo.

Tabela 17: Resumo das propostas para a inserção do bioquerosene no transporte aéreo brasileiro

	Proposta	Tipo de Medida	Oportunidades	Desafios
1	Aplicação de um fator de multiplicação ao bioquerosene no âmbito do RenovaBio	Instrumento baseado em preço	A proposta não exige novos esforços políticos, dado que não cria obrigações além das já estabelecidas pela lei que criou o RenovaBio.	O programa engloba outros biocombustíveis, com cadeias de produção já estruturadas, logo o fator de multiplicação pode não ser suficiente para estimular a produção de bioquerosene.
2	Mandato de mistura de bioquerosene no QAV	Comando e Controle	Política já adotada antes no país, com reconhecida eficiência no desenvolvimento de uma indústria de biocombustíveis.	Envolve a necessidade de desenvolvimento de uma cadeia de matérias-primas e pode enfrentar resistência por parte das empresas aéreas.
3	Incentivo fiscal para as empresas aéreas que utilizarem bioquerosene	Instrumento baseado em preço	Medida com potencial para estimular o uso de bioquerosene em estados potencialmente produtores de bioquerosene.	Pode não ter adesão suficiente por parte dos governos estaduais. A medida deve estar associada a outros instrumentos com foco na produção de bioquerosene.
4	Uso de bioquerosene na aviação militar brasileira	Política de apoio à tecnologia	Forma de criação de demanda para iniciar o desenvolvimento de uma indústria nacional.	A produção de bioquerosene, neste caso, se restringe a um nicho de mercado e o aumento de escala envolve complexidades.
5	Criação de uma tributação de carbono com a reciclagem dos recursos	Instrumento baseado em preço	A proposta envolve formas mais eficientes e econômicas de alocação dos recursos.	Política de formulação mais complexa, por envolver a definição de um novo tributo.

Fonte: Elaboração própria

6. Considerações finais e recomendações

Este trabalho teve como objetivo apresentar propostas de políticas públicas voltadas para a introdução do bioquerosene no transporte aéreo de passageiros no Brasil, com foco no desenvolvimento de uma indústria deste biocombustível no país. Para tanto, foram analisados os contextos de compromissos internacionais de redução de emissões da aviação e a situação atual da indústria aérea brasileira, de forma a estabelecer as bases para a elaboração das propostas mencionadas.

No contexto da indústria de aviação internacional, apesar de esta não estar contemplada no âmbito do Acordo de Paris, entidades internacionais, como a IATA e a ICAO se comprometeram com metas ambiciosas de reduções de emissões de GEE. Nesse sentido, foi estabelecida uma estratégia baseada em quatro pilares: i) tecnologia para fuselagem e motores, incluindo o uso de biocombustíveis; ii) eficiência em operações de voos; iii) melhorias do espaço aéreo e da infraestrutura aeroportuária; e iv) uso de instrumentos econômicos.

Cada uma das estratégias envolve desafios relacionados à implementação e limitações acerca da capacidade em promover a descarbonização do setor aéreo, contudo os biocombustíveis de aviação são considerados por muitos autores como a principal estratégia para a redução das emissões da aviação nas próximas décadas.

A implantação de uma indústria de bioquerosene no país demanda esforços de políticas públicas, uma vez que a indústria aérea brasileira não tem capacidade financeira para, apenas com a demanda, estimular o seu desenvolvimento. Considerando os instrumentos políticos voltados para a mitigação de emissões de GEE disponíveis, foram propostas cinco opções a serem adotadas no sentido de desenvolver uma indústria de bioquerosene no país.

A primeira proposta faz uso de uma medida do tipo *cap and trade* já aprovada para entrar em vigor, em 2020, no país. O programa denominado RenovaBio tem como

objetivo a descarbonização do setor de transportes e o seu foco principal são os combustíveis rodoviários, porém os biocombustíveis de aviação também estão aptos a gerar créditos de carbono. De forma a incentivar a participação do setor aéreo no programa e contribuir para o desenvolvimento da produção de bioquerosene no país, foi sugerida a aplicação de um fator de multiplicação mínimo de 1,5 para a quantidade de Créditos de Descarbonização a ser emitida pelo produtor de bioquerosene. O fator de multiplicação é necessário para incentivar a sua produção, uma vez que a emissão de créditos pelo bioquerosene acaba competindo com os biocombustíveis rodoviários, os quais já contam com cadeias de produção, logística e mercados bem definidos no país, envolvem custos de produção menores e, ainda, possuem menor intensidade de carbono do que este novo biocombustível. A proposta apresenta baixos impactos regulatórios, uma vez que a regulação do programa já está definida, portanto não envolve a criação de obrigações além das já estabelecidas pela lei que criou o RenovaBio.

A segunda proposta refere-se à criação de um mandato de mistura de bioquerosene no QAV, na forma de uma política específica para este biocombustível, incluindo a definição de um cronograma de aumentos graduais dos percentuais de mistura de bioquerosene no combustível fóssil. Além de ser uma medida amplamente utilizada no mundo para o desenvolvimento de indústrias de biocombustíveis, o Brasil tem dois exemplos bem-sucedidos deste tipo de política, com o etanol e o biodiesel. No caso do bioquerosene, no entanto, é preciso considerar o impacto nas margens do setor aéreo, além de ser necessário um estudo detalhado das matérias-primas disponíveis, para que não haja competição com alimentos ou com os materiais já utilizados na produção de biocombustíveis rodoviários. Foi sugerida, ainda, a associação desta medida com uma redução de tributos ou com o incentivos financeiros aplicados ao preço de venda do bioquerosene.

A terceira proposta sugere a utilização de incentivos fiscais às empresas aéreas que fizerem uso de bioquerosene. Na proposta, considerou-se a redução do ICMS, mostrando-se que esta medida ajuda a reduzir o impacto da adição do biocombustível nos custos operacionais das companhias aéreas e pode ser particularmente interessante em estados potencialmente produtores de bioquerosene.

A quarta proposta teve como objetivo promover o uso do bioquerosene no abastecimento de frotas militares brasileiras, com o foco no desenvolvimento da produção do biocombustível em regiões onde não há a produção de QAV, contribuindo para reduzir a dependência pelo combustível fóssil produzido em outras regiões. A utilização do bioquerosene na aviação militar é uma forma de criar demanda pelo biocombustível, possibilitando o desenvolvimento da tecnologia, até que a produção alcance escala comercial.

A quinta e última proposta teve como foco a criação de uma tributação sobre o consumo de combustível de voos domésticos de transporte de passageiros, em conjunto com uma forma de reciclagem dos recursos arrecadados. A proposta avaliou a incidência do tributo para valores de emissões de GEE acima de um determinado limite (“cap”), e três formas de reciclagem dos recursos: i) os recursos arrecadados voltam para as empresas aéreas que se mantêm abaixo do limite de emissões estabelecido, como um prêmio pelo cumprimento da meta; ii) os recursos arrecadados são destinados ao financiamento de plantas de bioquerosene em escala piloto e comerciais; e iii) uma forma híbrida entre as duas anteriores. No primeiro caso, a aplicação dos recursos como um prêmio para as empresas que se mantêm abaixo do limite de emissões, promove os incentivos necessários para que estas invistam em medidas de redução de emissões, porém não garante que os investimentos serão destinados ao desenvolvimento do setor de bioquerosene. No segundo caso, foi mostrado que os recursos arrecadados seriam suficientes para promover a construção de plantas de bioquerosene, garantindo a produção de volumes de biocombustível capazes de atingir as metas de redução de emissões propostas. No entanto, seria necessário um longo período de tempo até atingir um estágio de maturidade e de aumento de capacidade que permitisse a redução de custos de produção, e, durante esse período, as empresas aéreas seriam fortemente impactadas. A proposta híbrida, portanto, seria uma solução mais interessante, pois direcionaria parte dos recursos para as empresas aéreas, premiando aquelas que se mantivessem dentro do limite de emissões, e parte para a construção de plantas de bioquerosene, possibilitando o aumento da oferta de biocombustível e permitindo que se alcance ganhos de escala capazes de promover redução de custos de produção.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se os seguintes aprofundamentos:

- i) Avaliação das rotas de produção de bioquerosene em relação a parâmetros de sustentabilidade da produção, como, por exemplo, o consumo de água, as mudanças diretas e indiretas de uso do solo, e outros impactos ambientais relacionadas à produção de biomassa para fins energéticos;
- ii) Realização de avaliações detalhadas de cada uma das medidas propostas neste trabalho, em termos impactos e ganhos econômicos, regulatórios, ambientais e sociais;
- iii) Criação de indicadores capazes de permitir a comparação entre as propostas, com o objetivo de obter a política ou conjunto de medidas mais viáveis para o desenvolvimento de uma indústria de bioquerosene no país;
- iv) Incluir, na avaliação econômica, a possibilidade de emissão de créditos de carbono, pelos projetos de produção de bioquerosene;
- v) Elaboração de novas propostas de instrumentos de política pública, em especial a integração de mais de uma medida;
- vi) Avaliação da utilização do bioquerosene em nichos de mercado e;
- vii) Avaliação da viabilidade de utilização do bioquerosene em rotas com menor elasticidade de demanda (rotas de negócio).

Referências

ABEAR. (2017a). *Aviação Comercial - Perspectivas de Mercado para Bioquerosene de Aviação*. Workshop Estratégico CTBE. Disponível em: <<http://pages.cnpem.br/wectbe/programacao/>>. Acesso em 20 de agosto de 2017.

ABEAR. (2017b). *Redução do ICMS de combustível da aviação é benéfica para Estados*. Disponível em: <<http://www.agenciaabear.com.br/setor-aereo/reducao-do-icms-de-combustivel-da-aviacao-e-benefica-para-estados/>>. Acesso em 18 de setembro de 2017.

ABEAR. (2016). *Preço do querosene de aviação em diversos aeroportos do mundo (2016)*. Disponível em: <<http://panorama.abear.com.br/dados-e-estatisticas/custos-das-empresas/#c>>. Acesso em 10 de junho de 2017.

ABEAR. (2015). *Redução das tarifas aéreas chega a 43% em 12 anos*. Disponível em: <<http://www.agenciaabear.com.br/setor-aereo/reducao-das-tarifas-aereas-domesticas-chega-a-43-em-12-anos/>>. Acesso em 10 de junho de 2017.

ABIOVE. (2018a). *B10 entra em vigor hoje e indústria atenderá demanda por biodiesel de 5,5 bilhões de litros*. Disponível em: <http://www.abiove.org.br/site/_FILES/Portugues/01032018-104859-01_03_2018_-_nota_b10.pdf>. Acesso em 8 de setembro de 2018.

ABIOVE. (2018b). *Estatística*. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em 10 de setembro de 2018.

ADVANCED BIOFUELS USA. (2017). *Defense Production Act (DPA) Title III Advanced Drop-In Biofuels Production Project (ADBPP) Biofuels 2 Solicitation Number: FOA-RQKM-2017-0006*. Disponível em: <<https://advancedbiofuelsusa.info/defense-production-act-dpa-title-iii-advanced-drop-in-biofuels-production-project-adbpps-biofuels-2-solicitation-number-foa-rqkm-2017-0006/>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

ANAC. (2018a). *Demanda e Oferta do Transporte Aéreo*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/demanda-e-oferta-do-transporte-aereo>>. Acesso em 20 de abril de 2018.

ANAC. (2018b). *Demonstrações Contábeis de Empresas Aéreas - 2017*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/demonstracoes-contabeis/demonstracoes-contabeis-de-empresas-aereas-2017>>. Acesso em 20 de abril de 2018.

ANAC. (2017). *Anuário do Transporte Aéreo 2016*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em 10 de abril de 2018.

ANAC. (2016). *2ª Edição do Plano de Ação para redução de CO₂ no transporte aéreo*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/plano-de-acao-para-reducao-de-co2-no-transporte-aereo>>. Acesso em 22 de setembro de 2018.

ANAC. (2014). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil*. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil-2014>>. Acesso em 18 de abril de 2018.

ANDRADE, Danilo Ferreira. (2004). *Contribuições de intervenção no domínio econômico*. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/5412/contribuicoes-de-intervencao-no-dominio-economico>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

ANP. (2018a). *Dados estatísticos*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

ANP. (2018b). *Biodiesel*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/bicombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 27 de agosto de 2018.

ANP. (2018c). *Percentual obrigatório de biodiesel passa para 10%*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/bicombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 7 de setembro de 2018.

ANP. (2018d). *Composição e estruturas de formação dos preços*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/composicao-e-estruturas-de-formacao-dos-precos>>. Acesso em: 11 de setembro de 2018.

ARVANITAKIS, A., e DRANSFELD, B. (2017). *Design of an Offset System as Global MBM Scheme for international Aviation in the Light of the Paris Agreement*. Disponível em: <<https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/EN/project-mechanisms/GMBM-abschlussbericht.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2018.

ATAG. (2018a). *Facts & Figures*. Disponível em: <<https://www.atag.org/facts-figures.html>>. Acesso em 12 de abril de 2018.

ATAG. (2018b). *Aviation Benefits Beyond Borders*. Disponível em: <<https://www.atag.org/our-publications/latest-publications.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ATAG. (2017). *Domestic air transport action and the NDCs*. Disponível em: <<https://www.atag.org/our-publications/latest-publications.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ATAG. (2015). *Aviation Climate Solutions*. Disponível em: <<https://www.atag.org/our-publications/latest-publications.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

ATAG. (2010). *Beginner's Guide to Aviation Efficiency*. Disponível em: <<https://www.atag.org/our-publications/latest-publications.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. (2018). Sistema de Expectativas de Mercado. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br>>. Acesso em: 18 de junho de 2018.

BAILIS, Rob; BROEKHOFF, Derik; LEE, Carrie M. (2016). Supply and sustainability of carbon offsets and alternative fuels for international aviation. *Stockholm Environmental Institute*, working paper, v. 3.

BECKEN, Susanne e MACKEY, Brendan. (2017). What role for offsetting aviation greenhouse gas emissions in a deep-cut carbon world?. *Journal of Air Transport Management*, v. 63, p. 71-83.

BITNERE, Kristine. (2017). *The European Commission's renewable energy proposal for 2030*. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/european-commissions-renewable-energy-proposal-2030>>. Acesso em: 4 de setembro de 2018.

BIOFUELS DIGEST. (2014). Ground Delay: Where are the Sustainable Aviation Fuels?. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/02/20/ground-delay-where-are-the-sustainable-aviation-fuels/>>. Acesso em: 20 de setembro de 2018.

BLAKELEY, K. (2012). *DOD Alternative Fuels: Policy, Initiatives and Legislative Activity*. Congressional Research Service.

CAAFI. (2018). *Approved Fuels*. Disponível em: <http://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html#approved>. Acesso em: 15 de abril de 2018.

CALLAN, Scott J.; THOMAS, Janet M. (2013). *Environmental economics and management: Theory, policy, and applications*. 6 ed. Mason, Cengage Learning.

CAMES, Martin. *Availability of offsets for a global market-based mechanism for international aviation*. Öko-Institut. Disponível em: <<https://www.oeko.de/en/publications/p-details/availability-of-offsets-for-a-global-market-based-mechanism-for-international-aviation/>>. Acesso em: 15 de abril de 2018.

CAMES, M. et al. (2015). *Emission reduction targets for international aviation and shipping*. European Parliament.

CANTARELLA, Heitor *et al.* (2015). Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. *Environmental Development*, v. 15, p. 52-63.

CASA CIVIL DO ESTADO DA BAHIA. (2017). *Decreto Nº 17.596 de 10 de maio de 2017*. Disponível em: <<http://www.legislabahia.ba.gov.br/index.php/documentos/decreto-no-17596-de-10-de-maio-de-2017>>. Acesso em: 17 de setembro de 2018.

CAVALCANTI, Marcelo C. B. (2011). *Tributação Relativa etanol-gasolina no Brasil: competitividade dos combustíveis, arrecadação do estado e internalização de custos de carbono*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CEPEA. (2018). *Etanol*. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>>. Acesso em 04 de setembro de 2018.

CLIMATE POLICY INFO HUB. (2018). *Non-Market-Based Climate Policy Instruments*. Disponível em: <<https://climatepolicyinfohub.eu/non-market-based-climate-policy-instruments>>. Acesso em: 23 de agosto de 2018.

CNT. (2015). *Estudo Transporte e Economia – Transporte Aéreo de Passageiros*. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/estudo-transporte-economia-transporte-aereo-passageiros-cnt>>. Acesso em 18 de junho de 2018.

COMISSÃO EUROPEIA. (2018). *Reducing emissions from aviation*. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en>. Acesso em 12 de abril de 2018.

COMISSÃO EUROPEIA. (2016). *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf>. Acesso em 12 de abril de 2018.

CORTEZ, L. A. B. *et al.* (2014). *Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil — A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil*. Editora Edgard Blücher.

DEANE, Paul. e PYE, Steve. (2016). Biofuels for Aviation: Review and analysis of options for market development. *Policy Report*, v. 4.

DE CARVALHO, F. M. (2017). *Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels Through Consolidated Routes*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DE JONG, S. A. *et al.* (2017). *Renewable Jet Fuel in the European Union: Scenarios and Preconditions for Renewable Jet Fuel Deployment towards 2030*. Copernicus Institute, Department IMEW, Energy & Resources.

DE JONG, Sierk *et al.* (2015). The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 9, n. 6, p. 778-800.

DELGADO, Fernanda; SOUSA, Milas Evangelista de; ROITMAN, Tamar. (2017). *Caderno de Biocombustíveis*. Disponível em: <<https://fgvenergia.fgv.br/publicacoes/cadernos-fgv-energia>>. Acesso em: 5 de setembro de 2018.

DE SERRES, Alain; MURTIN, Fabrice; NICOLETTI, Giuseppe. (2010). A framework for assessing green growth policies. *OECD Economics Department Working Papers*. Paris, OECD Publishing.

DIÁRIO DO NORDESTE. (2017). *Senado rejeita a redução de ICMS no querosene da aviação*. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/senado-rejeita-a-reducao-de-icms-no-querosene-da-aviacao-1.1858270>>. Acesso em 23 de junho de 2018.

EASA, EEA e EUROCONTROL. (2016). *European Aviation Environmental Report 2016*. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/eaer/>>. Acesso em 30 de maio de 2018.

EEA. (2018). Trends and projections in the EU ETS in 2018. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-the>>. Acesso em 9 de abril de 2018.

EEA. (2017). Trends and projections in the EU ETS in 2017. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-EU-ETS-2017>>. Acesso em 8 de abril de 2018.

EEA. (2016). Trends and projections in the EU ETS in 2016. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-EU-ETS-2016>>. Acesso em 8 de abril de 2018.

EL TAKRITI, Sammy; PAVLENKO, Nikita; SEARLE, Stephanie. (2017). Mitigating international aviation emissions: Risks and opportunities for alternative jet fuels. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/mitigating-international-aviation-emissions-risks-and-opportunities-alternative-jet>>. Acesso em 16 de abril de 2018.

EPA. (2018). *Overview for Renewable Fuel Standard*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard>>. Acesso em: 5 de setembro de 2018.

EPA. (2010). *Guidelines for Preparing Economic Analyses*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/environmental-economics/guidelines-preparing-economic-analyses>>. Acesso em 22 de agosto de 2018.

EPE. (2018). *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis - Ano 2017*. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-boletins-periodicos>>. Acesso em: 25 de agosto de 2018.

EPE. (2017). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Acesso em: 25 de maio de 2018.

ESBRASIL. (2018). *Redução de ICMS do querosene para aumentar voos no Espírito Santo*. Disponível em: <<http://esbrasil.com.br/icms-do-querosene-voos-es/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2018.

FAA. (2018). *Fact Sheet - Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program*. Disponível em: <https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=22534>. Acesso em: 30 de maio de 2018.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. (2018). *ALA*. Disponível em: <<http://www.fab.mil.br/reestruturacao/>>. Acesso em: 30 de setembro de 2018.

FECOMBUSTÍVEIS. (2018). *Tributação*. Disponível em: <<http://www.fecombustiveis.org.br/revendedor/tributacao/>>. Acesso em: 28 de agosto de 2018.

FIEMG. (2018). *FIEMG apoia lançamento de plataforma de Bioquerosene e Renováveis na Zona Mata*. Disponível em: <<https://www7.fiemg.com.br/regionais/zona-da-mata/noticias/detalhe/fiemg-apoia-lancamento-de-plataforma-de-bioquerosene-e-renovaveis-na-zona-mata>>. Acesso em: 10 de setembro de 2018.

GAO. (2017). *Air Traffic Control Modernization: Progress and Challenges in Implementing NextGen*. Disponível em: <<https://www.gao.gov/products/GAO-17-450>>. Acesso em: 30 de maio de 2018.

GARBIN, Rafael Borne; HENKES, Jairo Afonso. (2018). A sustentabilidade na produção de biocombustíveis de aviação no Brasil. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 67-104.

GEGG, Per; BUDD, Lucy; ISON, Stephen. (2014). The market development of aviation biofuel: Drivers and constraints. *Journal of Air Transport Management*, v. 39, p. 34-40.

GVces e FGV-EAESP. (2016). *Aprendizados da Simulação de Sistema de Comércio de Emissões: Propostas a partir da Experiência Empresarial*. Disponível em: <<http://www.gvces.com.br/aprendizados-da-simulacao-do-sistema-de-comercio-de-emissoes-propostas-a-partir-da-experiencia-empresarial/?locale=pt-br>>. Acesso em: 27 de agosto de 2018.

HATTORI, Takashi. (2012). *Climate Change Policy*. Disponível em: <https://www.iea.org/media/training/presentations/etw2014/Day_2_Session_1a_Climate_Change_Policy.pdf>. Acesso em: 23 de agosto de 2018.

IATA. (2018a). *Fact Sheets*. Disponível em: <https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Pages/index.aspx>. Acesso em 30 de setembro de 2018.

IATA. (2018b). *IATA Members*. Disponível em: <<https://www.iata.org/about/members/Pages/index.aspx>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

IATA. (2018c). *Fact Sheets – Climate Change*. Disponível em: <<https://www.iata.org/policy/environment/Pages/climate-change.aspx>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

IATA. (2017a). *Air Transport Generates 1.1M Jobs in Brazil, \$32.9B in GDP*. Disponível em: <<https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-03-30-01.aspx>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.

IATA. (2017b). *2036 Forecast Reveals Air Passengers Will Nearly Double to 7.8 Billion*. Disponível em: <<https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx>>. Acesso em 30 de setembro de 2018.

IATA. (2017c). *Economic performance of the airline industry*. Disponível em: <<https://www.iata.org/publications/economics/Pages/index.aspx?menu=Outlook&cat=Industry%20Economic%20Performance>>. Acesso em 30 de maio de 2018.

IATA. (2015). *IATA 2015 Report on Alternative Fuels*. Disponível em: <<https://www.iata.org/publications/Pages/alternative-fuels.aspx>>. Acesso em 30 de maio de 2018.

ICAO. (2018a). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

ICAO. (2018b). *Annual Reports of the Council*. Disponível em: <<https://www.icao.int/publications/Pages/annual-reports.aspx>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

ICAO. (2017). *Sustainable Aviation Fuels Guide*. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/environment-publications.aspx>>. Acesso em: 12 de agosto de 2018.

ICAO. (2016). *On Board: A Sustainable Future - 2016 Environmental Report*. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx>>. Acesso em: 20 de abril de 2018.

ICAO. (2015). *An introduction to market-based measures (MBMs)*. Disponível em: <https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/6_1_An-introduction-to-market-based-measures-MBMs.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2018.

ICAP. (2018). *Allocation*. Disponível em: <<https://icapcarbonaction.com/en/about-emissions-trading/allocation>>. Acesso em: 28 de agosto de 2018.

IEA. (2018). U.S. Gulf Coast Kerosene-Type Jet Fuel Spot Price FOB. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pets&s=eer_epjk_pf4_rgc_dp&f=m>. Acesso em: 15 de setembro de 2018.

IEA. (2017). *Real-world policy packages for sustainable energy transitions*. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/real-world-policy-packages-for-sustainable-energy-transitions.html>>. Acesso em: 20 de agosto de 2018.

IHS Markit. (2017). *Ethanol & Biodiesel Information Service*. Disponível em: <<https://www.opisnet.com/wp-content/uploads/2017/12/EBISnewsletter-sample.pdf>>. Acesso em 10 de abril de 2018.

INSTITUTO ESCOLHAS. (2016). *Impactos Econômicos e Sociais da Tributação do Carbono no Brasil*. Disponível em: <<http://escolhas.org/impactos-economicos-e-sociais-da-tributacao-do-carbono-no-brasil/>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.

IPEADATA. (2018). *Taxa de câmbio nominal*. Disponível em: <<http://ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=38389>>. Acesso em 17 de junho de 2018.

IRENA. (2017). *Biofuels for Aviation: Technology Brief*. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2017/Feb/Biofuels-for-aviation-Technology-brief>>. Acesso em 10 de maio de 2018.

KHARINA, Anastasia; PAVLENKO, Nikita. (2017). *Alternative jet fuels: Case study of commercial-scale deployment*. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/alternative-jet-fuels-case-study>>. Acesso em 5 de setembro de 2018.

KHARINA, Anastasia e RUTHERFORD, Daniel. (2015). *Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014*. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/fuel-efficiency-trends-new-commercial-jet-aircraft-1960-2014>>. Acesso em: 30 de maio de 2018.

LEE, D. S., LIM, L. L., E OWEN, B. (2013). *Bridging the aviation CO2 emissions gap: why emissions trading is needed*. Manchester, UK: Centre for Aviation Transport and the Environment, Manchester Metropolitan University.

LEE, Joosung J., LUKACHKO, Stephen P. e WAITZ, Ian A. (2004). Aircraft and energy use. *Encyclopedia of Energy*, v.1.

MAVRIS, D. N., TAI, J. C. M., e PERULLO, C. A. (2016). *Environmental Design Space Assessment of Continuous Lower Energy Emissions and Noise (CLEEN) Technologies*. Disponível em: <<http://partner.mit.edu/projects/eds-capability-demonstration-assessing-cleen-program>>. Acesso em 10 de abril de 2018.

MAWHOOD, Rebecca *et al.* (2016). Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 10, n. 4, p. 462-484.

MAWHOOD, Rebecca *et al.* (2015). Technological and commercial maturity of aviation biofuels: Emerging options to produce jet from lignocellulosic biomass. *14th International Conference on Sustainable Engineering Technologies*, Nottingham, Reino Unido.

MCTIC. 2018. *Biocombustíveis*. Disponível em: <<https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologiasSetoriais/biocombustiveis/biocombustiveis/Biocombustiveis.html>>. Acesso em: 02 de setembro de 2018.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. (2018). *Projeto PMR Brasil*. Disponível em: <<http://fazenda.gov.br/orgaos/spe/pmr-brasil>>. Acesso em: 29 de agosto de 2018.

MME. (2018). *Proposta de Metas Compulsórias Anuais de Redução de Emissões na Comercialização de Combustíveis*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_p_id=consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_consultad=46&_consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_mvcPath=%2Fhtml%2Fpublico%2FdadosConsultaPublica.jsp>. Acesso em: 03 de setembro de 2018.

MME. (2017). *Boletim Mensal dos Biocombustíveis*. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/publicacoes/boletim-mensal-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 08 de setembro de 2018.

MORAES, M. A. F. D. *et al.* (2014). Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 716–726.

MOTTA, Ronaldo Seroa da; RUITENBEEK, Jack; HUBER, Richard. (1996). *Uso de instrumentos econômicos na gestão ambiental da América Latina e Caribe: lições e recomendações*. Rio de Janeiro, IPEA.

NAVA, Consuelo R. *et al.* (2018). The impact of the EU-ETS on the aviation sector: Competitive effects of abatement efforts by airlines. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 113, p. 20-34.

OCDE. (2003). *The Environmental Performance of Public Procurement: Issues of Policy Coherence*. Paris, OECD Publishing.

PARLAMENTO EUROPEU. (2018). *EU Legislation in Progress*. Disponível em: <<https://epthinktank.eu/eu-legislation-in-progress/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018.

PERMAN, Roger *et al.* (2003). *Natural resource and environmental economics*. 3 ed. Londres, Pearson Education Limited.

PORTAL CONTÁBEIS. (2011). *Regulamentada a redução da base de cálculo do ICMS nas operações com querosene de aviação*. Disponível em: <<https://www.contabeis.com.br/legislacao/86268/decreto-go-7249-2011>>. Acesso em: 17 de setembro de 2018.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. (2018). *“Plataforma de Bioquerosene e Renováveis” tem lançamento nesta terça-feira*. Disponível em: <<https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=60843>>. Acesso em 10 de setembro de 2018.

RANGANATHAN, Janet *et al.* (2004). *The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard (revised edition)*. Washington, DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

RUTHERFORD, Daniel, e ZEINALI, Mazyar. (2009). *Efficiency trends for new commercial jet aircraft 1960-2008*. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/efficiency-trends-new-commercial-jet-aircraft-1960-2008>>. Acesso em: 30 de maio de 2018.

SANTOS, Luan *et al.* (2018). Impacts of Carbon Pricing on Brazilian Industry: Domestic Vulnerability and International Trade Exposure. *Sustainability* (2071-1050), v. 10, n. 7.

SESAR JOINT UNDERTAKING. (2018). *Discover SESAR*. Disponível em: <<https://www.sesarju.eu/index.php/discover-sesar>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

SCHLUMBERGER, C. E., e WANG, D. (2012). Air Transport and Energy Efficiency. *The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Transport*, TP-38.

SMYTH, Mark; PEARCE, Brian. (2008). Air Travel Demand: IATA Economics Briefing No. 9. *International Air Transport Association*.

SKYNRG. (2018). *Royal Netherlands Air Force first to operate F-16 Fighting Falcon on sustainable aviation fuel, supplied by SkyNRG*. Disponível em: <http://skynrg.com/wp-content/uploads/2018/07/20180702_Royal-Netherlands-Air-Force-F-16-Fighting-Falcon-flies-on-sustainable-aviation-fuel-supplied-by-SkyNRG.pdf>. Acesso em: 18 de setembro de 2018.

SZKLO, A.; ULLER, V. C.; BONFÁ, H. P. (2012). *Fundamentos do Refino de Petróleo – Tecnologia e Economia*. Rio de Janeiro, Interciência.

TAPANES, N. C. *et al.* (2013). Biodiesel no Brasil: matérias primas e tecnologias de produção. *Acta Sci Tech*, v. 1, n. 1, p. 119-125.

TECOLOTE RESEARCH. (2015). *Final Report Aviation Fuel Efficiency Technology Assessment (AFETA) Study*. Disponível em: <<https://www.theicct.org/publications/aviation-fuel-efficiency-technology-assessment-afeta>>. Acesso em: 30 de maio de 2018.

THE WORLD BANK. (2018). *Air transport, passengers carried*. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR?year_high_desc=true>. Acesso em 10 de junho de 2018.

UBRABIO. (2017). *Bioquerosene no Brasil*. Disponível em: <<https://www.ubrabio.com.br/wp-content/uploads/2018/03/BioquerosenenoBrasil.pdf>>. Acesso em: 02 de setembro de 2018.

UNFCCC. (2018). *The Paris Agreement*. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 30 de setembro de 2018.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION. (2018). *Kerosene-type Jet Fuel*. Disponível em: <<http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3AJF>>. Acesso em 10 de junho de 2018.

WILLS, William. (2013). Modelagem dos Efeitos de Longo Prazo de Políticas de Mitigação de Emissão de Gases de Efeito Estufa na Economia do Brasil. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

WISE, Marshall; MURATORI, Matteo; KYLE, Page. (2017). Biojet fuels and emissions mitigation in aviation: An integrated assessment modeling analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 52, p. 244-253.

WORLD BANK GROUP e ECOFYS. (2018). *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. Disponível em: <<https://www.ecofys.com/en/publications/state-and-trends-of-carbon-pricing-2018/>>. Acesso em: 30 de agosto de 2018.

WRI & WBCSD. (2010). *The GHG Protocol for Project Accounting*. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/standards/project-protocol>>. Acesso em 12 de abril de 2018.

YUDKEN, Joel S. (2012). *The economic benefits of military biofuels*. Disponível em: <<https://www.highroadstrategies.com/project-details/the-economic-benefits-of-military-biofuels/>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.