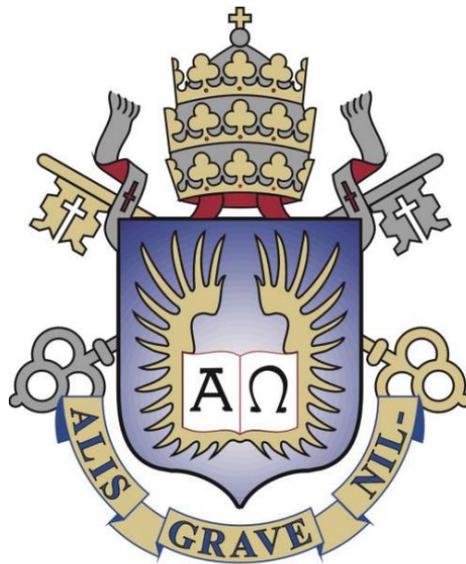


PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO



PUC
RIO

COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL DE AVIAÇÃO E SEU IMPACTO NA
ECONOMIA BRASILEIRA

Manuela Gouvea Vieira Figueiredo

1911950

Orientador: Sérgio Besserman

Junho de 2024

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL DE AVIAÇÃO E SEU IMPACTO NA
ECONOMIA BRASILEIRA

Manuela Gouvea Vieira Figueiredo
1911950

Orientador: Sérgio Besserman

Declaro que o presente trabalho é de minha autoria e que não recorri para realizá-lo, a nenhuma forma de ajuda externa, exceto quando autorizado pelo professor tutor.

Junho de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Isabel e Mariano, que me deram todo o suporte necessário ao longo desses anos e sempre priorizaram a minha educação. Vocês são os principais responsáveis pelo meu desenvolvimento pessoal e acadêmico e serei eternamente grata.

Aos meus avós, João Pedro e Isabel, que são meu porto seguro. À minha irmã e uma das pessoas que eu mais admiro, Tota, que sempre está ao meu lado e acredita em mim mesmo quando eu mesma tenho dúvidas. À Catarina que se fez presente em todos esses anos, nos altos e baixos, sua presença e amizade foram fundamentais. Ao Lucas, que transformava os meus dias com nossos encontros no Pilotis e sempre me fez rir nos momentos mais desanimadores.

À todos os meus colegas de trabalho na Ipiranga, que me ensinam todos os dias e foram essenciais para o meu desenvolvimento profissional desde o primeiro dia, especialmente o Pedro Manuel e o Leonardo. Eles despertaram o meu interesse para o mercado de combustíveis, o que desencadeou a minha curiosidade em como esse mercado vai se adaptar em um mundo onde a transição energética se faz necessária.

Ao Sergio Besserman, meu orientador, que me ajudou na elaboração desse trabalho. E, por fim, gostaria de agradecer aos meus irmãos, Thomaz e Joaquim, e às minhas amigas Beatriz, Catarina, Maria Esperanza e Julia, que sempre torcem por mim e são essenciais em todas as etapas da minha vida.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo mostrar a importância de uma transição energética e distanciamento da dependência do setor de transporte a queima dos combustíveis fósseis, ressaltando a importância que essa mudança teria para a economia brasileira. Como o setor de transporte tem uma abrangência muito grande, o foco será no transporte aéreo que possui um obstáculo ainda maior, que é a segurança. Dessa forma, parece mais factível pensar no uso de combustíveis renováveis, que além de poderem ser introduzidos no mercado de maneira gradual com crescente percentual de mistura com a gasolina de aviação, não requer grandes mudanças na mecânica dos aviões, o que representaria um custo alarmante para as empresas caso necessário. Sendo assim, o leitor será introduzido a crise climática, suas principais consequências e causas, incluindo exemplos atuais de como o planeta está se comportando devido ao aquecimento global. Além disso, o trabalho irá descrever quais são os principais setores que emitem gases do efeito estufa na atmosfera, como indústria, geração de energia, etc. a medida que procura mostrar os pequenos avanços que estão sendo desenvolvidos na direção de uma transição energética, que está apenas começando. Em seguida, haverá uma imersão um pouco mais profunda no setor de transportes, no qual a transição possui um caminho mais claro para determinadas modalidades, diferentemente do transporte aéreo e naval, nos quais muitas opções ainda estão sendo exploradas. Ademais, iremos retratar o cenário deste mercado no Brasil, como estão os incentivos governamentais em relação a uma mudança da matriz energética e como o país possui vantagens competitivas no mercado dos biocombustíveis. Por fim, iremos discutir que o uso dos biocombustíveis como insumo para a transição energética do setor de aviação representa uma oportunidade para o Brasil se destacar no mercado internacional, já que o país já possui uma infraestrutura, matéria prima e conhecimento avançado nesse mercado em relação a outros países.

Palavras chave:

Biocombustíveis; SAF; eletrificação; transição energética; crise climática.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Motivação	7
1.2 Metodologia.....	9
1.3 Fonte de dados	9
1.4 Resultados Pretendidos.....	9
2 CRISE CLIMÁTICA	10
2.1 A Crise Climática	10
2.2 A Urgência da Crise Climática.....	12
2.3 O Papel da Aviação na Crise Climática.....	13
3 PRINCIPAIS SETORES RESPONSÁVEIS POR EMISSÕES DE GEE.....	16
3.1 Setores que mais emitem CO2 na atmosfera.....	16
3.2 Setor de transporte	18
3.3 Transporte Naval	21
4 SETOR DE AVIAÇÃO	23
4.1 Setor de Aviação As Is	23
4.2 Inovações	24
4.3 Incentivos Governamentais	26
5 CONTEXTO BRASILEIRO	29
5.1 Cenário Brasil	29
5.2 Potencial Brasileiro Para Produção de SAF	31
5.3 O Brasil na transição energética da aviação atualmente.....	35
CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Temperatura média global relativa aos níveis pré industriais (1850-1900 média), 1850-2022 (graus Celsius)	11
Figura 2 - Média global do nível do mar, 1993 – 2022 (milímetros).....	12
Figura 3 - Emissões Setoriais em Trajetórias que limitam o aquecimento para 1,5°C	13
Figura 4 - Emissões totais de GEE por setor econômico dos Estados Unidos em 2022	18
Figura 5 - Emissões do setor de transporte por origem (dados dos EUA)	19
Figura 6 - Venda de carros elétricos, 2016- 2023	20
Figura 7 - Concepção gráfica de uma aeronave do projeto ZEROe da Airbus	25
Figura 8 - Crescimento da demanda por combustível em cinco anos (esquerda) e tipo de economia (direita)	30
Figura 9 - Produção de resíduos de cana de açúcar no Brasil	32
Figura 10 - Potencial de produção de SAF a partir de resíduos de cana de açúcar	33
Figura 11 - Produção potencial de SAF nos estados brasileiros de cada matéria prima (em bilhões de litros).....	33

1 INTRODUÇÃO

A Crise Climática é uma realidade no ano de 2024. Se não houver mudanças significativas nos padrões de emissões de gases do efeito estufa, a situação só vai se agravar. Chuvas cada vez mais fortes vão acontecer, derretimento dos polos, aumento do nível da água dos oceanos, queimadas serão mais frequentes e graves, secas mais recorrentes, desastres naturais serão mais recorrentes e imprevisíveis. Portanto, mudanças estruturais são extremamente necessárias para mitigar os efeitos da concentração atual dos GEE (Gases do Efeito Estufa) na atmosfera e controlar para que as emissões diminuam.

Nesse contexto, o presente trabalho se inicia evidenciando a gravidade das mudanças climáticas. A meta de não ultrapassar o aumento de 1,5°C da temperatura média global já não é factível e isso traz consequências sérias para o meio ambiente e a vida na terra. Ecossistemas estão sofrendo mudanças estruturais, o tempo está se tornando imprevisível. Em 2024, por exemplo, aconteceu uma tragédia no Rio Grande do Sul, o estado inundou devido a fortes chuvas causando milhares de mortes e danos estruturais irreparáveis nas cidades. Tais acontecimentos estão cada vez mais recorrentes e graves, outro exemplo são as queimadas no Canadá que estão piores a cada ano.

Ademais, serão apresentados os setores que são responsáveis pela maior parte das emissões de GEE na atmosfera, o de agricultura, geração de energia, industrial, residencial e comercial e o setor de transporte, que possui a maior parcela. Sendo assim, o presente trabalho aborda o setor de transporte de uma maneira mais ampla e como a transição energética deste está sendo planejada e, em parte, executada. No entanto, o único caminho que parece ser mais claro é o dos veículos leves, que seriam os carros, e a solução vista para esse meio de transporte, na maior parte dos países, é a eletrificação da frota. Por outro lado, o setor naval e o de aviação ainda estão sendo muito discutidos e estudados, já que eles possuem outras variáveis igualmente importantes, como a segurança dos passageiros. Diferentemente de um carro, a bateria de um avião não pode simplesmente parar no meio da viagem, visto que isso causaria uma enorme tragédia.

O setor naval, portanto, possui alguns estudos que serão citados ao longo do trabalho, além de incentivos governamentais, que se fazem fundamentais para que a transição energética de fato ocorra. Finalmente, o trabalho tem como principal foco

discorrer sobre os avanços do setor de aviação no sentido de zerar suas emissões de GEE. Sendo assim, alguns países regulamentaram que será necessária uma mistura mínima de combustível renovável de aviação com o combustível fóssil atual, e essa irá aumentar gradualmente ao longo dos anos. À medida que algumas empresas estão montando protótipos de aeronaves elétricas ou realizando voos a base de combustíveis 100% renováveis.

Tendo em vista um mercado internacional tendendo aos combustíveis renováveis, o Brasil também precisa se adaptar. Porém, é importante ressaltar que o consumo brasileiro no setor de transporte já é 20% de biocombustíveis. A gasolina vendida possui um percentual de mistura de etanol obrigatório, que atualmente está por volta de 27%, assim como o diesel, que possui uma mistura obrigatória de 14% de biodiesel. Sendo assim, o Brasil já possui um conhecimento e infraestrutura de extrema importância para a produção de biocombustíveis, além de matéria prima, que é com certeza um diferencial frente a muitos países.

Nesse contexto, como o SAF, combustível renovável de aviação, se apresenta como um potencial insumo para a transição energética do setor de aviação, e é produzido através de diversas matérias primas, entre elas o etanol, abundante em território brasileiro, além de outros, o Brasil está diante de uma oportunidade muito relevante para se tornar um dos principais fornecedores de biocombustível para o mundo.

1.1 Motivação

Este tema é importante e deve ser ressaltado, visto que já estamos enfrentando consequências do aquecimento global nos dias de hoje. Estima-se que já tenha ocorrido um aumento de 1,5°C da temperatura do Planeta Terra, o que pode não parecer muito drástico na meteorologia, no entanto, quando se trata da temperatura média global é bastante grave. Esse aumento de temperatura eleva o índice de derretimento das calotas polares e, conseqüentemente, aumenta o nível do mar, impacta negativamente a biodiversidade, agrava a questão das queimadas e etc. Vale destacar, por exemplo, o caso do Hawaí em 2023, onde ocorreu uma queimada que deixou dezenas de mortos e se espalhou parte devido a uma seca que a ilha enfrentava a meses, o que é bastante atípico para a região. Além disso, outra situação preocupante foram as temperaturas atingidas no verão do hemisfério norte deste mesmo ano, os termômetros marcaram temperaturas

recordes e o ano se tornou o mais quente da história. Assim, é possível se ter uma vasta ideia das possíveis consequências do aquecimento global, que por sua vez é uma consequência do aumento das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis e são agravados pelo desmatamento das florestas.

Nesse contexto, o setor de transporte é um dos grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa, sendo responsável por um quarto das emissões globais. Sendo assim, para que as metas mundiais de atingir zero emissões de carbono até 2050 sejam alcançadas, será necessária uma redução de 25% das emissões do setor de transporte até 2030, mesmo com um aumento da demanda dessa modalidade no mundo pós pandemia. Sendo assim, o mercado tem sugerido em parte a eletrificação, como na Europa, o uso de hidrogênio verde e de biocombustíveis. Nesse cenário, pode-se observar diversas montadoras de veículos, como Toyota e BMW, lançando modelos elétricos, além da ascensão de empresas que produzem apenas veículos nutridos por eletricidade, como a Tesla.

No entanto, quando se trata do setor de aviação, uma variável de extrema importância é a segurança, o que deixa a transição energética mais complexa e, portanto, mais lenta e cuidadosa. Sendo assim, ainda é uma grande incógnita a forma como as emissões de carbono no transporte aéreo serão reduzidas. No entanto, alguns estudos estão em andamento a respeito de combustível renovável de aviação, como o SAF, e, caso ele venha a tomar espaço no mercado, a economia brasileira estará diante de uma grande oportunidade para se tornar um de seus principais exportadores, tendo em vista que o território brasileiro possui a matéria prima necessária para sua produção e poderia ser alvo de grandes investimentos neste mercado.

Fica evidente, portanto, que os combustíveis renováveis de aviação, além de reduzir em grande escala as emissões de gases do efeito estufa desse setor, que representou 2% das emissões de CO₂ em 2022, podem ser uma oportunidade para a economia brasileira a medida que ela seria atraente para novos investimentos e aumentaria a importância econômica e geopolítica mundial do Brasil.

1.2 Metodologia

Este projeto tem como objetivo o estudo das possíveis alternativas ao combustível fóssil para o setor de transporte aéreo e, caso a melhor opção seja o uso de combustível renovável, quais benefícios tal escolha teria para a economia brasileira. Sendo assim, para tanto, será necessária a leitura de uma extensa bibliografia a respeito dos avanços tecnológicos e legislativos nesse setor, considerando novas políticas voltadas para a redução das emissões de gases do efeito estufa e o posicionamento das empresas em relação a elas, paralelamente ao entendimento de como o Brasil se encaixaria nessa transição. Nesse sentido, esse trabalho terá um viés mais teórico do que empírico.

1.3 Fonte de dados

O trabalho será feito com base em uma revisão bibliográfica dos artigos e relatórios oficiais a respeito da crise climática e o papel o setor de aviação.

1.4 Resultados Pretendidos

O resultado pretendido desse trabalho é encontrar uma correlação positiva entre o aumento da produção de biocombustíveis no Brasil e a economia do país. Assim como evidenciar a importância e urgência da transição energética, com foco no setor de transporte aéreo.

2 CRISE CLIMÁTICA

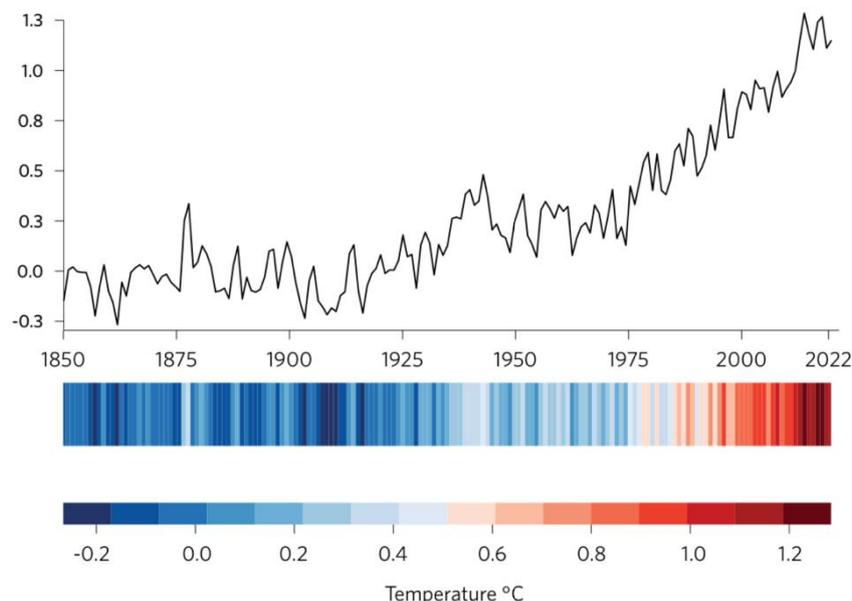
2.1 A Crise Climática

O ano de 2023 ficará marcado para sempre na história. O mundo está vivenciando uma aceleração do número, rapidez e escala dos recordes climáticos. Esses, por sua vez, são acompanhados por eventos extremos e devastadores, que serão apenas o início se não houver mudanças significativas em todos os setores. As emissões globais de GEE aumentaram 1,2% de 2021 para 2022, a maior parte dos setores voltou aos seus níveis de emissão pré pandemia do COVID-19 e já ultrapassaram os níveis de 2019. Exceto o setor de aviação, que permanece a 74% do seu pico de 2019, mas tende a continuar crescendo dado ao aumento do número de passageiros aéreos, que estão retornando aos níveis pré pandêmicos ao longo de 2023. Nesse cenário, as emissões de gás carbônico oriundas da queima de combustíveis fósseis e processos industriais são as principais responsáveis por esse aumento, correspondendo a, em média, dois terços das atuais emissões de GEE. (Emission Gap Report, 2023).

No Acordo de Paris, firmado em dezembro de 2015, os países envolvidos se comprometeram a adotar medidas para reduzir as emissões de dióxido de carbono com o objetivo de manter o aumento da temperatura média global “bem abaixo” dos 2°C em relação aos níveis pré industriais, limitando-o a 1,5°C. (Coordenação Geral do Clima) No entanto, pouca coisa mudou desde então e, segundo o secretário geral da ONU, Antonio Guterres, “esse relatório é uma ladainha de promessas climáticas quebradas”. Assim, se providências não forem tomadas com urgência em todos os setores, não haverá como limitar o aquecimento global em 1,5°C.

O mais recente relatório do IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, mostra que um século de queima de combustíveis fósseis, desmatamento, uso de fontes energéticas prejudiciais e um padrão de consumo desenfreado provocou um aumento da temperatura média global de 1,1°C acima dos níveis pré industriais (Figura 1). Isso se deve ao fato de que as emissões de GEE aumentaram com as atividades de queima de produtos derivados do petróleo à medida que o principal consumidor de CO₂ foi sendo eliminado, as florestas. Assim, caso as emissões não diminuam por volta de 50% em relação ao pico de 2019, a temperatura média de 1,5°C mais alta será realidade até 2035.

Figura 1 - Temperatura média global relativa aos níveis pré industriais (1850-1900 média), 1850-2022 (graus Celsius).



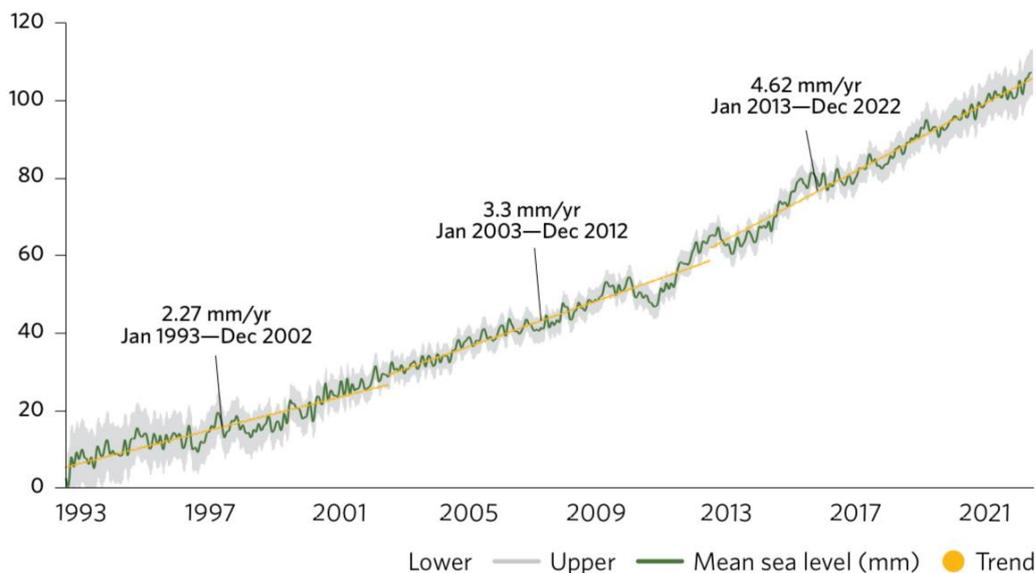
Fonte: Derivado do relatório de Estado do Clima Global de 2022 da Organização Meteorológica Mundial, que combina seis conjuntos de dados internacionais para temperatura: HadCRUT.5.0.1.0 (UK Met Office), NOAA GlobalTemp v5 (EUA), NASA GISTEMP v4 (EUA), Berkeley Earth (EUA), ERA5 (ECMWF), and JRA-55 (Japão).

A crise climática não é vista como uma prioridade e as consequências desse posicionamento estão começando a acontecer. Em 2023, de janeiro a setembro a temperatura média global está 1,40°C mais elevada do que os níveis pré industriais e os oceanos apresentaram temperatura histórica mais alta em agosto desse mesmo ano, o que é extremamente prejudicial a vida marinha. Ademais, o verão do hemisfério norte foi o mais quente da história, o mês de setembro registrou temperaturas 2,51°C mais quentes do que a média dos anos anteriores (Copernicus Climate Change Service C3S). Eventos climáticos extremos têm acontecido, como tempestades inesperadas, furacões, enchentes, secas, derretimento das calotas polares, entre outros. Todas essas mudanças são nocivas a biodiversidade e a vida a terra, tendo impactos na produção de alimento por exemplo. Muitas pessoas vão morrer e eventos inimagináveis vão se tornar realidade, caso o aquecimento global não seja limitado e as metas não forem atingidas.

Os oceanos absorvem 90% do calor retido na atmosfera, o que faz com que haja o derretimento das calotas polares aumentando, consequentemente, o nível do mar (Figura 2). Nesse cenário, cidades serão perdidas, ilhas ficarão submersas, e os mais prejudicados serão os países subdesenvolvidos que não possuem recursos para se

defender dessas mudanças trágicas. Algumas localidades, como as ilhas Fiji, já estão precisando providenciar realocação de pessoas devido ao avanço do mar em seu território.

Figura 2 - Média global do nível do mar, 1993 – 2022 (milímetros).



Nota: Baseado em medidas de satélite.

Fonte: Laboratório de Estudos em Biofísica e Oceanografias Espaciais (LEGOS); dados provenientes da altimetria AVISO. Extraído do relatório do Estado do Clima Global de 2022 da Organização Meteorológica Mundial.

2.2 A Urgência da Crise Climática

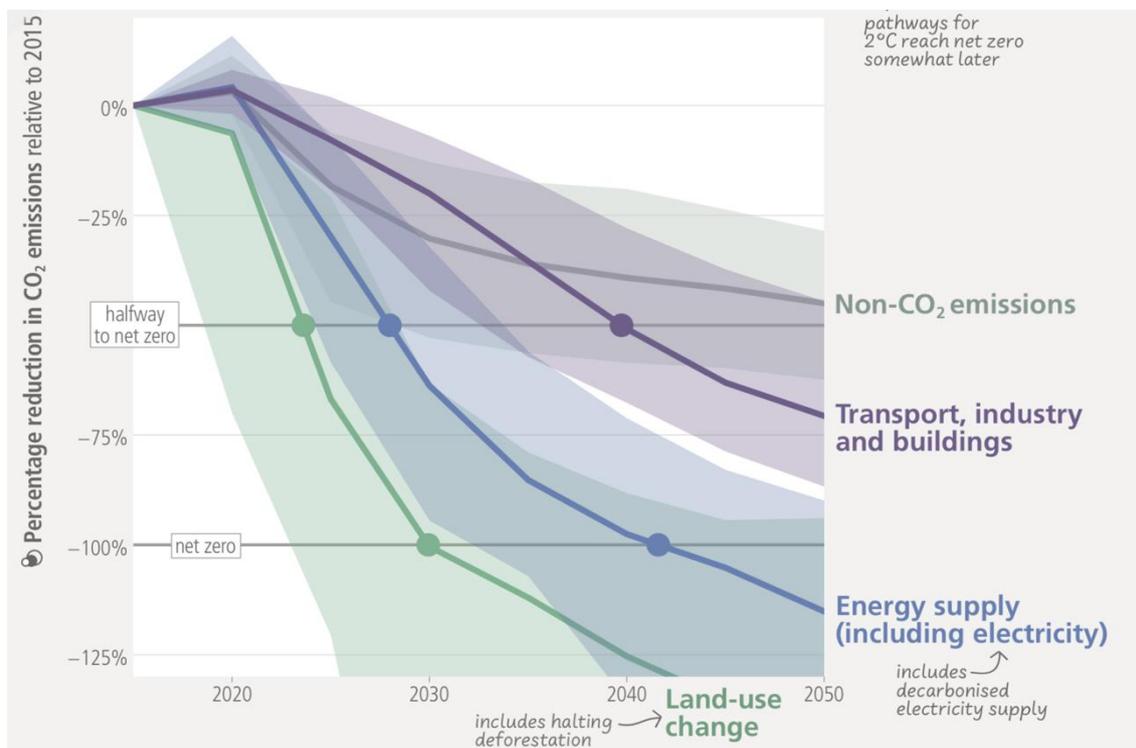
A magnitude das mudanças climáticas e dos riscos associados a ela vão depender de certas ações de mitigação e adaptação no médio prazo. É necessário que haja uma adaptação de todos os setores para que o aumento da temperatura média global não ultrapasse os 1,5°C. O aquecimento global, para ser mitigado, requer um trabalho em conjunto de todos os países, negócios e indústrias, é um problema que está na mão de todos ao mesmo tempo. Sem que haja um desenvolvimento efetivo e resiliente para diminuir a atual emissão de gases do efeito estufa, o marco de 1,5°C será ultrapassado e as consequências das mudanças climáticas vão, cada vez mais, ameaçar a saúde das pessoas, do meio ambiente e da biodiversidade, prejudicando não apenas as futuras gerações, mas as atuais (IPCC, 2023).

Sendo assim, para que a humanidade consiga limitar o aumento da temperatura média global, é preciso que determinadas metas sejam atendidas nos próximos anos. Segundo o relatório do IPCC de 2023, “em trajetórias que limitam o aquecimento global

a 1,5°C sem ou com pouco excesso, as emissões líquidas globais de GEE são projetadas para diminuir em 44% abaixo dos níveis de 2019 até 2030, 60% até 2035, 69% até 2040 e 84% até 2050”. No entanto, “investimentos contínuos em infraestrutura de emissões elevadas não reduzidas e desenvolvimento e implementação limitados de alternativas de baixas emissões antes de 2030, atuam como barreiras para essa aceleração e aumentariam os riscos” decorrentes as mudanças climáticas.

Nesse contexto, para atingir o Net-Zero, os diversos setores terão velocidades de transição distintas (Figura 3). Geralmente, os setores de eletricidade/ derivados do petróleo e de uso da terra atingem esse patamar de zero emissões de GEE mais rapidamente do que os demais. (Relatório IPCC, 2023).

Figura 3 - Emissões Setoriais em Trajetórias que limitam o aquecimento para 1,5°C.



Fonte: Relatório IPCC 2023.

2.3 O Papel da Aviação na Crise Climática

O Setor de Aviação representa 3,5% de todas as atividades humanas responsáveis pelo aquecimento global, sendo que um terço do seu impacto é atribuído a emissão de dióxido de carbono e dois terços aos demais gases. Vale ressaltar, que existem diversos

gases do efeito estufa além do CO₂, como metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre, além da família do hidrofluorcarboneto e perfluorcarbono.

A aviação global cresceu drasticamente nas últimas décadas com a globalização e avanço das tecnologias e segurança das aeronaves, atravessar o mundo se tornou mais rápido e fácil. Esse setor se desenvolveu e ganhou uma importância fundamental para diversas indústrias, negócios, governos e para a economia como um todo. Ela permite que pessoas, produtos, matérias primas, alimentos, entre outros diversos recursos, atrevessem o mundo e cheguem as localidades mais distantes em relação as suas origens. No entanto, a aviação é um dos meios de transporte mais intensivos em emissão de carbono, emitindo em uma hora até 100 vezes mais dióxido de carbono do que o trem, ônibus ou carro (Environmental Research Letters).

Porém, como uma variável de primeira importância no transporte aéreo é a segurança, além de demandar uma vasta autonomia de voo, sem que seja necessário recarregar uma bateria ou reabastecer, a transição energética, por mais necessária que seja, é mais desafiadora. Nesse cenário, diversos países acordaram em estabelecer certos objetivos a serem alcançados por esse setor para que ele se torne Net-Zero até 2050, através de políticas promotoras de novas tecnologias como as de combustíveis de baixo carbono e aviões sem emissão. O acordo feito com a Organização Internacional de Aviação Civil requer que os países entreguem Planos de Ação do Estado (SAP) detalhando medidas para reduzir as emissões de GEE que sejam consistentes com a meta do net-zero até julho de 2024.

Com o intuito de ressaltar a importância do setor de aviação para o aquecimento global e como a sua transição energética vai ser fundamental para mitigar a crise climática, o Briefing do ICCT (Towards Net Zero Aviation State Action Plans) faz a seguinte constatação:

No Waypoint 2050, o cenário mais agressivo da Air Transport Action Group (ATAG) estimou que os combustíveis sustentáveis para aviação fornecerão mais da metade (53%) das reduções acumulativas de CO₂ até 2050, seguidos por ZEPs (Zero Emission Pathways - Caminhos de Emissão Zero) com 24%, melhorias operacionais e infraestruturais com 17%, e medidas baseadas no mercado com 6%. A estratégia Destination 2050 da Airlines for Europe fez estimativas semelhantes. Em seu cenário, ZEPs e melhorias na eficiência técnica contribuem com 38% das reduções de emissões, SAFs com 34%, mudança na demanda induzida por SAF com 12%, medidas baseadas no mercado com 10%, e melhorias operacionais com 6%. O relatório LTAG do Comitê de Proteção Ambiental da Aviação da ICAO também determinou que 63% das reduções de emissões virão dos SAFs, 13% das melhorias na eficiência operacional (CCS) para

emissões residuais e 2% das tecnologias de aeronaves. O relatório *Vision 2050: Aligning Aviation with the Paris Agreement* do Conselho Internacional de Transporte Limpo, de 2022, estimou que o setor de aviação poderia, no cenário mais agressivo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de acordo com um cenário de aquecimento global de 1,75°C. Neste cenário, os SAFs contribuem com 62% da mitigação total até 2050, melhorias na eficiência operacional com 16%, melhorias na eficiência técnica com 13%, ZEPs com 5% e medidas fora do setor com 5%.

Fica evidente, portanto, o papel fundamental do setor de aviação no aquecimento global, assim como na economia de um mundo globalizado. Dessa forma, medidas urgentes no sentido de tornar esse meio de transporte desprovido de emissões de gases do efeito estufa são extremamente necessárias para que a vida na terra seja preservada. Esse cenário, à medida que representa um desafio tecnológico de escala, é uma oportunidade para novos negócios, tecnologias e descobertas que, não apenas serão benéficas a economia mundial, mas também fundamentais para o meio ambiente, preservação da biodiversidade e da saúde da espécie humana.

3 PRINCIPAIS SETORES RESPONSÁVEIS POR EMISSÕES DE GEE

3.1 Setores que mais emitem CO2 na atmosfera

Muito se fala a respeito das emissões de gases do efeito estufa de determinadas atividades humanas, como a combustão dos motores a combustível fóssil, mas pouca atenção é dada para outras atividades, como o desmatamento, que possuem soluções até mais fáceis e rápidas de serem executadas. O desmatamento, por definição, é a “limpeza” das florestas, a retirada do mato e da biodiversidade para uso humano. A FAO (United Nations Food and Agriculture Organization) estima que a média anual de desflorestamento global é de 1.3 milhões de metros quadrados por década. No Brasil, a Floresta Amazônica é o maior bloco de floresta tropical que ainda não foi desmatada no mundo. Ela é fundamental, não apenas por consumir CO2 da atmosfera, mas devido a sua biodiversidade e umidade, que mantém e impacta a umidificação dos estados do país. Sendo assim, a vida da floresta também é fundamental para que o agronegócio aconteça (Britannica, 2024).

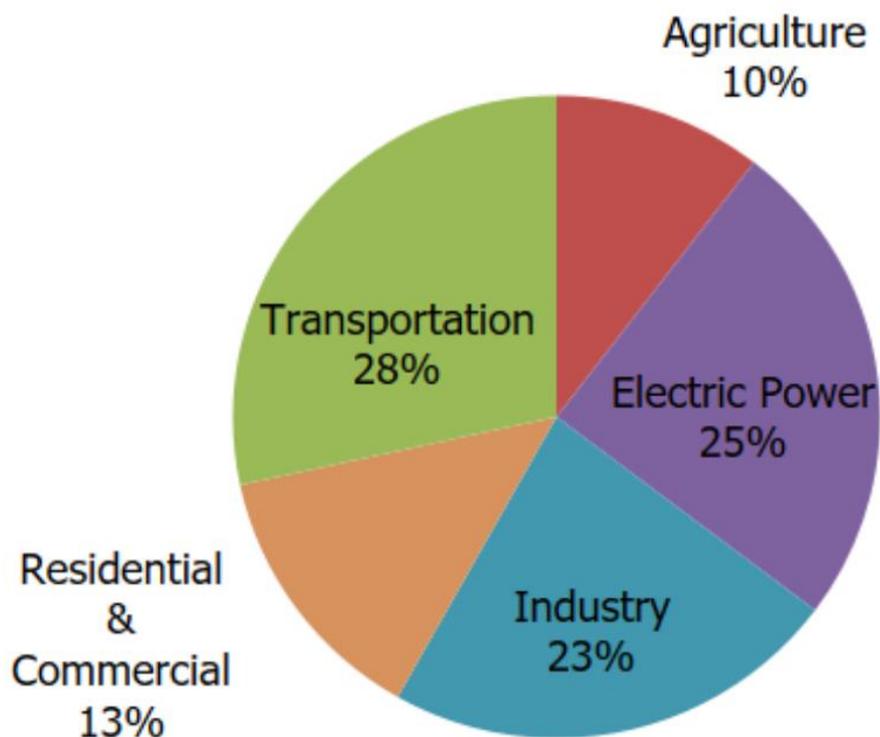
Ainda sobre a atividade de desmatar as florestas ao redor do mundo, as queimadas realizadas, além de eliminar as árvores que seriam fundamentais para a captação de gás carbônico da atmosfera, faz com que uma quantidade extremamente alarmante deste gás seja emitida, o que impacta fortemente a crise climática na qual o mundo se encontra atualmente. Sendo assim, já existem algumas iniciativas de reflorestamento que são apoiadas pelas Nações Unidas, mas ainda há um longo caminho a ser percorrido pela frente. Vale ressaltar que várias iniciativas pequenas formam uma grande, no sentido de que instalar painéis verticais com florestas, tetos verdes, plantar árvores pelas cidades, todas essas atividades parecem insignificantes, mas se todos os países adotarem podem fazer a diferença.

Além do desmatamento, diversos setores são responsáveis por emissões significativas de gás carbônico na atmosfera, entre elas a queima de combustível fóssil para geração de eletricidade, que nesse sentido o Brasil está muito avançado tendo uma matriz energética mais limpa do que diversos países, para aquecimento e transporte. Nos Estados Unidos, por exemplo, o setor da economia que mais emitiu gases do efeito estufa foi o setor de transporte (Figura 4).

O setor de transporte emite muitos GEE pela combustão de combustíveis fósseis, como diesel e gasolina, para carros, caminhões, navios e aviões. A produção de energia elétrica inclui o uso dessa energia pela indústria, em 2022, 60% da eletricidade foi originada pela queima de combustíveis fósseis, principalmente carvão e gás natural. Já o setor industrial, além de emitir gases do efeito estufa para gerar energia no seu processo produtivo, também emite em determinadas reações químicas necessárias para produzir objetos a partir da matéria prima. Sendo assim, o setor industrial é o terceiro maior emissor direto de GEE. Ademais, o setor da agricultura emite através dos seus ativos vivos, produção de arroz e óleos, além das emissões indiretas da produção de eletricidade (EPA).

Antes de entrar no setor de transporte, vale ressaltar as emissões do setor industrial. Essas podem ser divididas em duas categorias, emissões diretas e indiretas. A primeira é produzida através da queima de combustíveis fósseis para aquecimento ou geração de energia, além dos vazamentos que ocorrem nos processos industriais. Já a segunda, se refere a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia para consumo da maquinaria ou de prédios industriais. As oportunidades de redução das emissões desse setor estão relacionadas a maior eficiência energética, associadas a tecnologias industriais mais avançadas que emitem menos GEE, a troca dos combustíveis usados, utilizar combustíveis que gerem a mesma quantidade de energia com menos emissões, reciclagem, produção industrial a partir de materiais reciclados e não da matéria prima crua. Por fim, um passo simples e de extrema importância para esse setor é o treinamento das companhias e conscientização dos trabalhadores para prevenir os vazamentos (EPA).

Figura 4 - Emissões totais de GEE por setor econômico dos Estados Unidos em 2022.

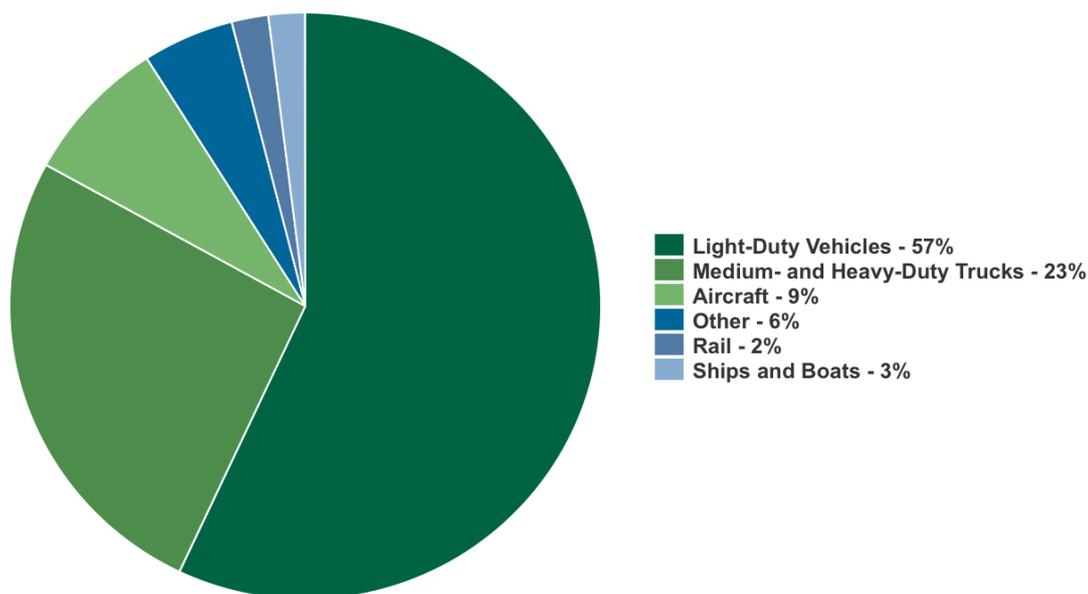


Fonte: Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA).

3.2 Setor de transporte

O setor de transporte é o maior emissor de gases do efeito estufa na atmosfera, sendo assim, há diversos subsetores dentro desse que são de fato os responsáveis pelas emissões (Figura 5). Dessa forma, é possível observar que os carros mais leves, ou seja, aqueles utilizados pela população no dia a dia para transporte de passageiros, são os principais agressores. Esses veículos são os responsáveis no Brasil pela demanda do Ciclo Otto, composto pelo Etanol e pela Gasolina.

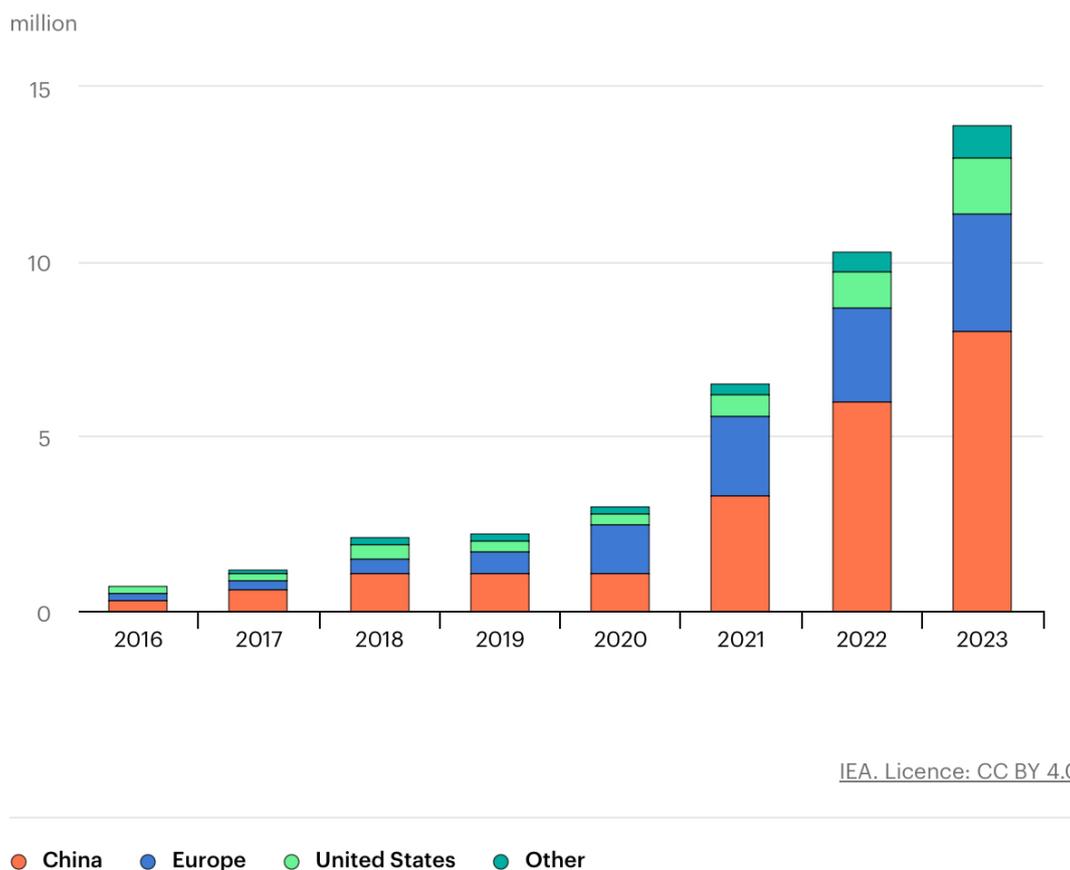
Figura 5 - Emissões do setor de transporte por origem (dados dos EUA).



Fonte: Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA).

Devido ao seu agravante papel nas emissões de gases do efeito estufa, os veículos leves precisam passar por uma transição energética. Nesse cenário, diferente de outros meios de transporte, como o naval e aéreo, a solução parece ser mais clara. Existem os carros híbridos, que são movidos tanto a partir da combustão de combustível fóssil quanto a eletricidade, uma vez que além de um motor, possuem uma bateria. Esse modelo é fundamental para a transição energética do setor em diversos países, e também no Brasil, porque a presença do motor a combustão faz com que o carro tenha maior autonomia e possa percorrer distâncias mais longas sem que seja necessário parar para abastecer. Além disso, também existem os carros 100% elétricos, que estão cada vez mais difundidos.

A venda de carros elétricos está crescendo exponencialmente, passando de 10 milhões em 2022. Sua participação na venda de veículos foi de 4% em 2020 para 14% em 2022, principalmente na China, alguns países da Europa e nos Estados Unidos (figura 6). Nesse sentido, políticas nacionais e incentivos vão ajudar a alavancar as vendas dos veículos elétricos nos próximos anos (IEA, 2023).

Figura 6 - Venda de carros elétricos, 2016- 2023.

Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA). Electric Vehicles.

Partindo do pressuposto de que a eletrificação é a tecnologia chave para descarbonizar os veículos leves, alguns países estão progredindo notavelmente nesse sentido. A Noruega lidera com a maior participação dos EVs na venda total de veículos (88% em 2022). A China também está bem posicionada, e foi responsável por 60% dos novos carros elétricos no mercado global de 2022. A União Europeia adotou novas metas de descarbonização que vai exigir uma redução das emissões dos carros e vans entre 55% e 50% em relação aos níveis de 2021, caminhando para uma redução de 100% em 2035. Nos Estados Unidos, políticas públicas do governo Biden também estão incentivando o mercado de carros elétricos (IEA, 2023).

Um problema da eletrificação é a disponibilidade de matéria prima para a produção das baterias, a volatilidade do preço dos minerais e problemas na cadeia de suprimentos dessa indústria são obstáculos a serem enfrentados. Atualmente, as baterias de lítio dominam praticamente todo o mercado de baterias para carros elétricos. Nesse

contexto, cadeias de suprimento para o íon de sódio estão sendo estabelecidas como alternativa, ainda de forma preliminar (IEA, 2023).

Além das iniciativas dos governos, os setores privados também estão aumentando os seus targets voluntários em relação aos veículos elétricos. A Mitsubishi tem como objetivo ter 50% de suas vendas dedicadas aos EVs até 2030 e 100% até 2035. A Jaguar pretende ser totalmente elétrica até 2025, enquanto a BYD só produz carros elétricos desde março de 2022 (IEA, 2023).

No entanto, é importante ressaltar que é importante que haja uma transição energética também das fontes de energia utilizadas para carregar essas baterias e para produzi-las.

3.3 Transporte Naval

Diferente dos veículos leves, alguns meios de transporte ainda não possuem um caminho mais estabelecido na direção de uma transição energética, por várias razões, entre elas a maior necessidade de autonomia, como no transporte aéreo e naval, uma vez que não é possível ficar parando aeronaves para abastecer no meio de suas rotas, assim como navios. E também um fator importante que é a segurança, porque diferentemente de um carro enguiçado, não tem como um navio enguiçar, muito menos um avião.

Historicamente, o transporte naval é suprido 99% por combustíveis fósseis e ele foi responsável por 2% das emissões de GEE em 2022, fazendo com que outras alternativas como os biocombustíveis, hidrogênio, amônia e eletrificação desse meio sejam necessárias (IEA, 2023). Nesse contexto, alguns países tiveram avanços nas regulações e tecnologias para descarbonizar o transporte naval. Entre eles, os Estados Unidos estão contribuindo para a construção de uma cadeia de suprimentos de amônia verde através de incentivos tributários.

Diante das incertezas a frente desse setor, as empresas estão investindo em embarcações que comportam diversos tipos de combustíveis, para que seja mais fácil transitar entre os diferentes tipos de fonte de energia. Nesse sentido, até maio de 2023, foram identificados diversos projetos pilotos focados em tecnologias de navios com emissões zero, com as seguintes tecnologias: propulsão por amônia, baterias e células de

combustível de hidrogênio. Esses esforços são essenciais para a transição do setor marítimo para um futuro de baixas emissões e sustentável.

No Brasil, o uso dos biocombustíveis marítimos é a principal opção para a descarbonização do transporte naval. Eles podem garantir um volume em maior escala devido a maturidade tecnológica do país, da cadeia de produção e disponibilidade de infraestrutura. No entanto, ainda tem muitos desafios como a modificação do motor das embarcações. Sendo assim, existem diversas opções como o uso do Biodiesel, Diesel Verde, Etanol, Gás Natural Liquefeito e Biometano (FGV Energia, Transição Energética no Setor Marítimo).

Na China, a estratégia adotada está sendo o uso do metanol como combustível alternativo. A produção de metanol é segmentada em diferentes rotas: metanol cinza (feito a partir do carvão), metanol azul (baseado em captura de carbono) e metanol verde (feito a partir de hidrogênio verde/ biomassa). Sendo assim, o metanol verde pode ser responsável pela redução de 95% das emissões de carbono e, por isso, há projetos como o da Maersk, empresa dinamarquesa que possui projetos para estabelecimento de corredores marítimos de metanol verde e uma frota marítima de baixo carbono (FGV Energia, Transição Energética no Setor Marítimo).

Portanto, no cenário internacional não existe um único caminho para a descarbonização do transporte marítimo e ainda há um desafio grande para substituir o combustível fóssil por um correspondente renovável.

4 SETOR DE AVIAÇÃO

4.1 Setor de Aviação As Is

Em 2022, segundo o IEA (IEA, 2023), o setor de aviação atingiu 80% do pico das suas emissões pré pandêmicas de 2019, principalmente pela retomada dos voos internacionais. A reabertura das fronteiras após a vacinação populacional fez com que as pessoas voltassem a viajar, aumentando a demanda do transporte aéreo. Após o período da pandemia, a população passou a valorizar mais as experiências do que apenas bens materiais, sendo assim, tal mudança de mentalidade valorizou ainda mais o turismo, que está intimamente relacionado ao setor de aviação. Além disso, as emissões de aviões privados também são bastante representativas e tem aumentado. Sendo assim, o crescimento das emissões de gases do efeito estufa do setor de aviação tende a ser bastante rápido e ultrapassar o nível de 2019 em, por volta de, 2025. Portanto, diversas medidas se fazem necessárias para incentivar o surgimento de novas tecnologias e combustíveis renováveis de aviação que estejam em linha com um futuro canário sem emissões de GEE.

No cenário atual, o querosene de aviação domina a demanda por combustível de aviação, enquanto o SAF representa menos de 0,1%, segundo o IEA. Tendo em vista a necessidade de uma transição energética, empresas estão testando voos abastecidos apenas por SAF, que pode ser depositado na infraestrutura existente, já que ele é um combustível *drop-in*, ou seja, não seria necessária nenhuma grande adaptação dos motores das aeronaves atuais para o seu uso. No entanto, a capacidade de produção desse produto é suficiente para suprir apenas 1-2% da demanda de combustível de aviação prevista até 2027. Assim, um aumento do uso do SAF em 10% até 2030, que está previsto nas metas do cenário Net Zero, vai demandar um aumento exponencial dos investimentos e políticas que incentivam o setor. Fica evidente, portanto, que engenharias revolucionárias se fazem bastante necessárias nesse momento, incluindo também elétricas e de hidrogênio.

4.2 Inovações

Uma diversidade de testes e protótipos estão em andamento e envolvem o uso do hidrogênio, que pode servir tanto para a combustão direta de motores a jato, para gerar eletricidade para motores elétricos ou como uma combinação dos dois métodos. Mas, o uso dessa substância apresenta diversos desafios, como armazenagem e entrega de combustível, fazendo com que inovações sejam necessárias, além de uma reestruturação das aeronaves, o que representaria um custo ainda maior para as empresas. Assim, a expectativa, segundo os estudos da IEA (2022), é de que as aeronaves movidas a hidrogênio tenham um alcance inferior a 3.500km em 2040, que representaria metade de toda demanda de combustível de aviação comercial atual.

Ademais, a propulsão elétrica por bateria na contemporaneidade está limitada a aeronaves de pequeno porte e curto alcance. Essas não possuem emissões diretas, mas é importante destacar a importância de fontes de energia limpas para o seu abastecimento, visto que não faria sentido fazer toda uma troca de tipo de motor, mas continuar emitindo GEE no processo. Além disso, o peso das baterias limita o alcance dos voos e o tamanho da aeronave, evidenciando que o sucesso da implementação de aviões elétricos dependerá fortemente da evolução tecnológica das baterias.

Um exemplo de teste em andamento, segundo a IEA, é “o programa ZEROe da Airbus que produziu um protótipo de tanque criogênico de hidrogênio que permite transportar o hidrogênio em sua forma líquida a temperaturas extremamente baixas” e está alinhado com a meta de colocar no céu uma aeronave movida a hidrogênio até 2035 (Airbus, 2024). Nesse contexto, a empresa reforçou a sua presença na Alemanha, com a inauguração de um Centro de Desenvolvimento ZEROe para tecnologias de hidrogênio. Tal iniciativa evidencia a relevância da transição energética do setor de aviação internacional, assim como serve de modelo para outras empresas.

Figura 7 - Concepção gráfica de uma aeronave do projeto ZEROe da Airbus.



Fonte: AEROIN.

Visando a transição energética, portanto, o setor privado está tomando determinadas iniciativas, entre elas, as companhias aéreas estão procurando fazer acordos com empresas supridoras de SAF. Segundo a IEA:

O aumento dos anúncios de acordos de compra de SAF entre fornecedores de combustíveis e companhias aéreas marcou um aumento significativo no volume contratado, passando de 9 bilhões de litros em 2021 para 22 bilhões de litros em 2022. O maior volume de compra anual até então foi acordado entre a Gevo e a OneWorld Alliance, sendo obtido a partir de etanol de produtos de milho não comestíveis. Muitos dos volumes contratados têm entrega planejada após 2025, pois novas plantas de SAF levam cerca de três anos para serem construídas após uma decisão de investimento final (IEA, 2023).

Nesse contexto, a Airbus estabeleceu uma parceria com a TotalEnergies para fornecimento de SAF e pesquisa/ desenvolvimento de combustíveis 100% renováveis para aeronaves. As duas empresas estão alinhadas na sua estratégia de descarbonização a longo prazo, à medida que a TotalEnergies visa produzir 1,5 milhões de toneladas de SAF por ano até 2030 e a Airbus planeja ser carbono neutra até 2050 (Airport Technology, 2024). Além disso, em novembro de 2023, a Emirates realizou seu primeiro voo utilizando 100% SAF em um dos motores, provando que o uso do combustível renovável é possível nas aeronaves já existentes. Assim, a fabricante Airbus está trabalhando em direção ao seu objetivo de que todas as suas aeronaves sejam capazes de utilizar 100% SAF até 2030. Conforme a Julie Kitcher, vice presidente da Airbus:

Esses combustíveis são a maneira mais eficaz de lidar com as emissões de CO₂ na indústria e aviação hoje e são cada vez mais apoiados pelas principais companhias aéreas do mundo. O SAF é vital para atingir a meta de emissões líquidas zero do setor até 2050, mas precisa do apoio de toda a indústria (Airport Technology, 2023).

Ademais, em novembro de 2023, a Virgin Atlantic conduziu o primeiro voo transatlântico comercial suprido 100% de SAF, que aconteceu de Londres, na Inglaterra, para Nova Iorque, nos Estados Unidos. A realização dessa viagem aérea demonstrou a capacidade dos combustíveis de baixo carbono, que podem promover uma redução de até 70% das emissões de CO₂ em relação aos combustíveis fósseis, e teve o apoio do governo da Inglaterra. No entanto, muitos empecilhos ainda precisam ser superados para que esse produto seja consumido em larga escala, como a disponibilidade de subsídios para a sua produção (Airport Technology, 2023).

Em países da Ásia, o SAF também vem ganhando maior visibilidade e empresas estão colaborando para difundi-lo no mercado. O “Malaysian Aviation Group”, em parceria com a Petronas, está planejando produzir combustível sustentável para uso comercial. Na Índia, há um projeto de uma infraestrutura para produção de SAF até 2026, além de a partir de 2025 ser implementado um mandato de 1% de SAF nos voos do país (Reuters, 2024).

Na Austrália, o Grupo Qantas e a Airbus SE vão investir 1,34 milhões de dólares em uma refinaria de biocombustível em Queensland na Austrália, que vai converter os subprodutos da agricultura em SAF. O plano é que a construção comece em 2025 e que o estabelecimento tenha capacidade produtiva de 100 milhões de litros do biocombustível por ano. Esse vai ser o primeiro investimento de um fundo criado pela Qantas e Airbus de 200 milhões de dólares para originar a indústria de SAF na Austrália. O plano é que a companhia aérea consiga suprir 10% do uso de combustível com SAF até 2030 e 60% até 2050 (Reuters, 2024). Por fim, está sendo elaborado o “*Aviation White Paper*” australiano, que tem como um dos seus objetivos, maximizar a contribuição do setor de aviação em direção ao *Net Zero* (Australian Government Department).

4.3 Incentivos Governamentais

Na Europa, um pacote legislativo chamado “*Fit for 55*” foi publicado e ficou estabelecido o Refuel EU, uma iniciativa para a transição energética no setor de transporte

aéreo, que vai aumentar a demanda, o investimento e a infraestrutura disponível para a produção e consumo de SAF e, por consequência, diminuir as emissões de carbono desse setor. Nesse contexto, a partir de 2025, será mandatório que os combustíveis de aviação vendidos na União Europeia contendam 2% de SAF em sua mistura. Esse percentual sofrerá aumentos gradativos ao longo dos anos, atingindo 20% em 2035 e, eventualmente, 70% até 2050 (Internacional Trade Administration, 2024).

O Refuel EU considera o SAF um combustível “drop-in”, que pode ser utilizado nas aeronaves já existentes, sem mudança de infraestrutura, substituindo os combustíveis fósseis. Sendo assim, é esperado que tal incentivo regulatório faça com que os investimentos na produção do SAF cresçam exponencialmente, devido a um aumento de demanda no longo prazo (ITA, 2024). Ademais, vale ressaltar que haverá colhimento de dados e monitoramento dos fornecedores e dos operadores das aeronaves, garantindo o efeito dessa regulação na União Europeia (Concelho Europeu, 2023).

Além disso, companhias aéreas europeias vão receber, aproximadamente, 2 bilhões de euros em financiamentos do mercado de carbono europeu para incentivar a transição. No entanto, no curto prazo essa questão ainda é uma preocupação para as empresas, visto que o custo do SAF ainda é muito superior ao combustível fóssil, o que encarece as suas operações (ITA, 2024).

Ademais, o Refuel EU também se posiciona contra o “*tankering*”, que é uma prática na qual as aeronaves transportam um estoque de combustível para que não precisem pagar um preço mais caro no seu local de destino. Sendo assim, elas acabam aumentando as emissões de carbono nas suas viagens e potencializando seu impacto na Crise Climática. Portanto, a fim de evitar essa prática, os aviões só poderão embarcar a quantidade de combustível necessária para a sua viagem de ida (ITA, 2024).

Por outro lado, nos Estados Unidos, também existem algumas políticas, como a CA-LCFS (*California Low Carbon Fuel Standard*), que foi pensada para reduzir a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera e é utilizada para estabelecer um valor a redução de emissões de GEE geradas por combustíveis renováveis. Em 2021, a CA-LCFS foi atualizada para incluir o SAF como candidato a gerador de créditos. Nesse sentido, a geração de créditos será calculada a partir da diferença de emissão de GEE quando comparada ao uso do combustível fóssil convencional (IATA, 2021).

Nesse sentido, o congresso americano introduziu o *Sustainable Skies Act* em 2021, com o intuito de incentivar o uso do SAF, que será gerador de créditos, além de incluir 1 bilhão de dólares em 5 anos para aumentar o número de estruturas produtoras de SAF nos Estados Unidos. Por fim, foi estabelecida uma meta para que a produção anual do biocombustível seja de 3 bilhões de galões por ano até 2023 (IATA, 2021).

5 CONTEXTO BRASILEIRO

5.1 Cenário Brasil

No Brasil, atualmente, cerca de 20% do consumo do setor de transportes é de biocombustíveis (Governo Federal, 2021). Isso se dá, principalmente, porque, diferente de muitos países, a regulação brasileira impõe um percentual de mistura mínima de bicombustível no combustível fóssil. Em 2024, a gasolina C é comercializada com uma mistura de 27% de etanol anidro para 73% de gasolina A, enquanto o Diesel B é composto 14% por biodiesel e 86% de Diesel A. Sendo assim, o Brasil já é muito avançado em relação a muitos países que não possuem leis dessa natureza e já é mais inclinado a aumentar a participação dos biocombustíveis em sua matriz energética do que incentivar uma eletrificação em larga escala, visto que o setor do agronegócio brasileiro é bastante forte e bem desenvolvido.

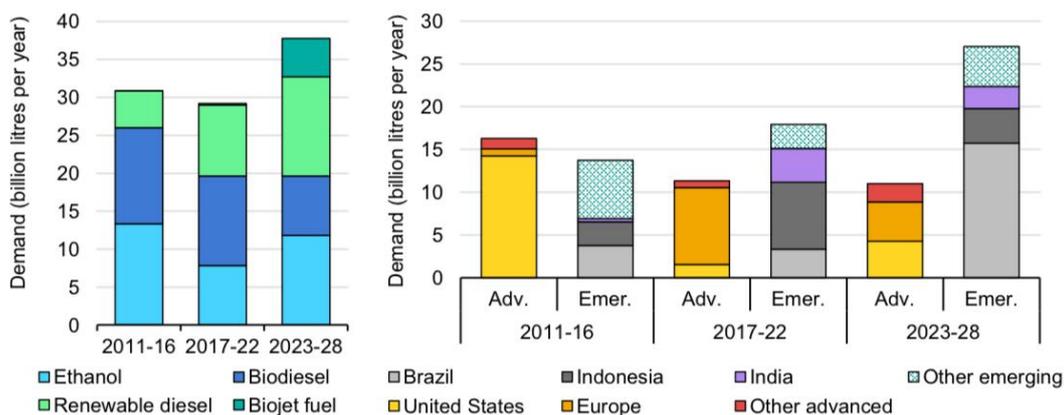
Um dos principais biocombustíveis no Brasil é o etanol, que é majoritariamente produzido através da cana de açúcar, mas também pode ser oriundo do milho, que vem ganhando mais espaço no mercado. Ademais, em 2020, o Brasil se tornou o segundo maior produtor de Biodiesel do mundo, com um aumento de 8,7% da sua produção. (Governo Federal, 2021) Além disso, a matriz energética do país é, por volta de 50%, limpa e renovável, o que inclui energia solar e hidrelétrica, e também coloca o Brasil em uma posição de destaque em direção a transição energética. Nesse sentido, o ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, destacou que:

A renovabilidade das matrizes brasileiras são destaque no mundo e representam uma grande oportunidade para construção de uma transição energética justa e inclusiva, gerando energias limpas, emprego e renda para a nossa população. O comprometimento do país em liderar esse processo segue firme, guiando outros países em direção a um futuro mais justo e inclusivo (Ministério de Minas e Energia, 2024).

A Agência Internacional de Energia (IEA) constatou que as economias emergentes, lideradas pelo Brasil, irão dominar a expansão dos biocombustíveis, que possuem um potencial de crescimento 30% maior do que o que foi visto nos últimos cinco anos. Esse comportamento vai ser uma consequência de políticas robustas para o aumento do uso de biocombustíveis, aumento da demanda de combustíveis para transporte, com o avanço das economias, e matéria prima disponível. Fatores que vão tornar os países

emergentes responsáveis por 70% do crescimento da demanda global de biocombustíveis, sendo o Brasil responsável por 40% da expansão dos biocombustíveis até 2028 (IEA, Renewables 2023).

Figura 8 - Crescimento da demanda por combustível em cinco anos (esquerda) e tipo de economia (direita).



IEA. CC BY 4.0.

Notes: Adv. = advanced economies. Emer. = emerging economies.

Fonte: IEA, Renewables 2023.

O avanço da demanda de biocombustíveis não se resume, portanto, apenas ao setor automobilístico. O setor de aviação também está em pauta, dado que ele é responsável por 2-3% das emissões globais de gases do efeito estufa na atmosfera. Sendo assim, discussões estão em andamento inclusive no Brasil que vão alavancar a demanda por biocombustíveis de aviação. Nesse sentido, em 2024, foi aprovado na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei do Combustível do Futuro, que inclui a criação do Programa Nacional de Bioquerosene de Aviação (ProBioQAV), além de metas para descarbonização através do uso do combustível sustentável. Ainda nesse contexto:

Da forma como está redigido, o PL possibilita a concentração do combustível em hubs – aeroportos principais, como Guarulhos – perto dos locais de produção. Isso também minimiza as emissões decorrentes do transporte do líquido.

Segundo especialistas (Revista Pesquisa Fapesp, 2024).

No Brasil, via de regra, as companhias aéreas vão precisar reduzir suas emissões de GEE em 1% a partir de 2027 e atingir, gradativamente, 10% em 2037. Isso vai

acontecer através do uso do SAF, um combustível renovável de aviação que pode ser misturado ao combustível fóssil e utilizado nos motores existentes. O SAF pode ser obtido através de diversas matérias primas, sendo algumas delas o óleo vegetal, gordura animal, etanol e outros resíduo. Assim, segundo o ministro de Minas e Energia:

No Brasil, há fartura de matérias primas e um mercado de biocombustíveis que há décadas é muito bem consolidado. Nós já somos líderes globais em etanol e biodiesel. Logo, também estaremos na liderança global da produção e uso de SAF, ajudando o setor aéreo a descarbonizar (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Portanto, a experiência brasileira na produção de biocombustíveis vai ser um diferencial nesse momento em que todos os países estão buscando soluções para atingir o Net-Zero.

5.2 Potencial Brasileiro Para Produção de SAF

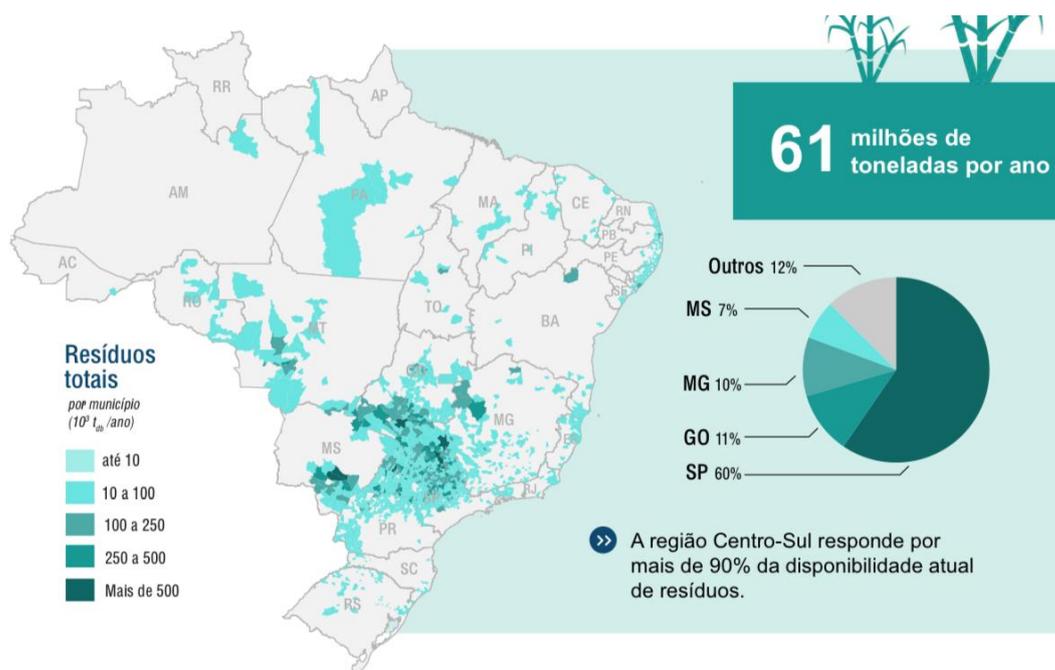
Segundo a Agência Internacional de Energia, num cenário acelerado, vai haver um aumento adicional da demanda de biocombustíveis. E, para acompanhá-la, também se faz necessário um aumento da oferta desse produto. Nesse contexto, o Brasil é visto no cenário esperado como um forte potencial produtor, focado principalmente no biocombustível derivado de óleo de soja, matéria prima abundante no agronegócio brasileiro (IEA, Renewables 2023).

Sob essa ótica, o Brasil, e a América Latina, possuem as maiores florestas do planeta, com abundância de recursos para um desenvolvimento de soluções com baixa emissão de carbono. Há, também, diversas iniciativas de economia circular e monetização do carbono, que acabam influenciando a tão necessária transição energética e diminuição da liberação de gases do efeito estufa na atmosfera (Valor Econômico).

A Boeing realizou um estudo a respeito da disponibilidade de matéria prima para o combustível de aviação no Brasil, um relatório de 2021, mapeando a disponibilidade e potencial de resíduos de base biológica para a produção de SAF no país. O cenário global é de uma produção de 390 bilhões de litros de querosene para aviação, sendo que apenas 14 milhões de litros são SAF. De acordo com esse estudo, o consumo médio de querosene de aviação no Brasil em 2018 foi de 123,5 mil barris por dia, sendo que o Sudeste do país, onde estão as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, é responsável pelo consumo de 58%

do combustível de aviação. Tendo isso em vista, foram combinadas cinco matérias primas residuais a sete meios diferentes para a produção de SAF. Assim, foram avaliadas quais seriam as melhores formas de produção desse biocombustível. Em relação aos resíduos de cana de açúcar, os mais abundantes são o bagaço e a palha, e o Brasil produz 61 milhões de toneladas por ano, espalhadas por todo o país (figura 9) (Boeing Brasil, Relatório 2021).

Figura 9 - Produção de resíduos de cana de açúcar no Brasil.



Fonte: Boeing Brasil, Relatório 2021.

Dessa forma, possíveis locais para a produção de SAF foram mapeados, sendo o estado de São Paulo uma boa localização devido a boa disponibilidade de matéria prima, refinarias bem localizadas e alta demanda pelo combustível. Ademais, a região centro sul também é bem adequada devido a disponibilidade de matéria prima e alta demanda por combustível de aviação. Nesse sentido, a figura 10 mostra o potencial de produção de SAF a partir de etanol e a conclusão do estudo é de que:

O excedente de bagaço e palha poderiam suprir 90% da demanda total do Jet A produzido por uma das vias, enquanto, uma outra via, os resíduos de cana poderiam suprir cerca de 30% da demanda total. Ambas as vias têm apresentado resultados excelentes que podem ser bastante representativos no mercado brasileiro (Boeing Brasil, Relatório 2021).

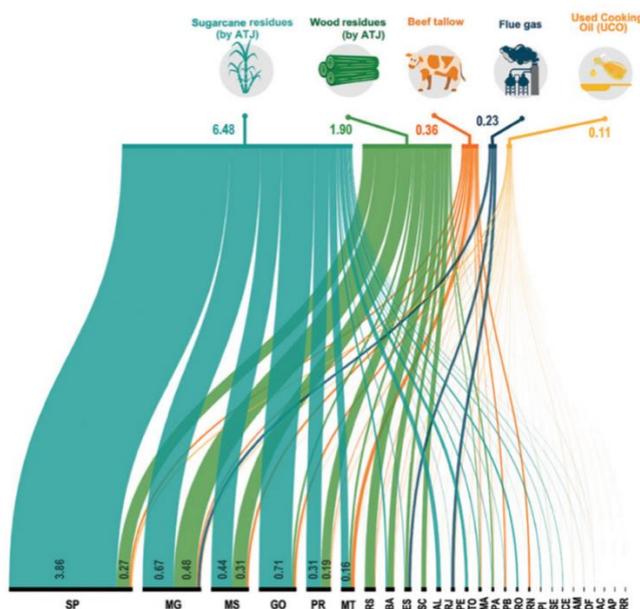
Figura 10 - Potencial de produção de SAF a partir de resíduos de cana de açúcar.



Fonte: Boeing Brasil, Relatório 2021.

Ademais, outra possível matéria prima são os resíduos de madeira, que poderiam suprir o consumo de querosene fóssil dos estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, ou fornecer volumes de combustíveis para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, por exemplo (Boeing Brasil, Relatório 2021). Nesse sentido, fica evidente, portanto que o Brasil, de fato, possui um enorme potencial para a fabricação de combustível renovável de aviação, podendo ser um importante player internacional para a transição energética nesse setor. Na figura 11 é possível ver o potencial de produção de matéria prima que pode ser utilizada para fabricar SAF de cada estado brasileiro.

Figura 11 -Produção potencial de SAF nos estados brasileiros de cada matéria prima (em bilhões de litros).



Fonte: Roundtable on Sustainable Biomaterials.

Em abril de 2024, a Vibra, a maior empresa distribuidora de combustíveis do Brasil, a Suzano, fabricante de celulose, e a Petrogal, empresa de refino se uniram em uma discussão relacionada a investimentos no negócio de combustível de aviação sustentável no Brasil. Esse potencial grupo ainda deve receber o apoio de mais uma grande empresa, mas o foco será a cooperação na elaboração de estratégias sobre o tema, viabilizando soluções para o SAF. Nesse sentido, “O Brasil tem um potencial enorme para não ser apenas um exportador de matéria prima para SAF. Temos muita biomassa e um custo de fabricação de combustíveis renováveis muito competitivo, disse Marcelo Bragança, diretor de Operações da Vibra Energia” (Exame, 2024). Além disso, a engenheira de Desenvolvimento de Projetos da Petrogal Brasil enxerga maior geração de valor na produção de SAF a partir do etanol, metanol e do processo que transforma óleos vegetais em diesel verde ou SAF. Já a diretora de Novos Negócios da Suzano apoiou a rota de produção por meio de biomassa, que nesse caso, seria majoritariamente de resíduo de madeira. Fica evidente, portanto, que o Brasil possui grande potencial para a produção do biocombustível de aviação, não apenas pelo interesse de grandes empresas, mas devido a disponibilidade de matéria prima.

Ainda nesse sentido, para o vice presidente da Raízen, Paulo Neves, a produção de SAF a partir do etanol é uma grande oportunidade para a industrialização brasileira, já que o combustível de aviação vai acabar agregando valor ao etanol. Segundo ele:

É uma oportunidade muito importante para esse desenvolvimento e industrialização brasileira (...) Temos todo o interesse, como brasileiros de agregar mais valor a partir do nosso país, de gerar mais benefícios socioeconômicos ao redor do nosso ambiente e de melhorar também a nossa balança comercial (Biocombustível, Transição Energética, Epr, 2024).

A bioquímica Glaucia Mendes Souza, do instituto de Química da USP e membro da coordenação de Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (Bioen), acredita que em uma indústria global que ainda engatinha, o Brasil tem a oportunidade de atuar como o ator central, seja pela sua experiência com a produção de biocombustíveis, seja pela quantidade de biomassa disponível para a produção do SAF. Para ela, “se há um lugar no-mundo em que a produção em larga escala do SAF vai dar certo, é no Brasil” (Nexo Jornal, 2024).

Nesse contexto, especialistas acreditam que os investimentos na produção de SAF deverão aumentar com a aprovação do Projeto de Lei do Combustível do Futuro, que

inclui a criação do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), que terá como principal objetivo estimular a indústria do SAF no Brasil. “Da forma como está redigido, o PL possibilita a concentração do combustível em hubs, aeroportos principais como Guarulhos, perto de locais e produção. Isso também minimiza as emissões decorrentes do transporte do líquido” (Nexo Jornal, 2024).

5.3 O Brasil na transição energética da aviação atualmente

Ainda não há produção de SAF em larga escala no Brasil, já que a rota de conversão do etanol para o combustível de aviação não é economicamente competitiva. No entanto, vários projetos já começaram a ganhar corpo. Em Natal, por exemplo, no Rio Grande do Norte, o Instituto Senai de Inovação em Energias Renováveis inaugurou, em 2023, uma planta piloto para produzir SAF. Sendo assim, o objetivo é aumentar a produção, mesmo que ainda em escala laboratorial, mas para otimizar o processo para que ele se torne o mais produtivo possível (Nexo Jornal, 2024). Além desse Instituto, outras empresas já anunciaram planos de produção de combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil, como a Acelen na Bahia, a Petrobras em Cubatão, entre outras.

A Acelen Renováveis, “empresa que nasceu para participar ativamente da transição energética mundial”, vai investir na produção de combustíveis renováveis utilizando a planta nativa brasileira, a Macaúba (Acelen renováveis). Sendo assim, a empresa realizou em 2024 o plantio experimental de mais de 1,3 mil mudas de macaúba, cujo óleo está sendo estudado como matéria prima para produção de SAF e Diesel Verde. Além disso, a Acelen Renováveis pretende plantar 200 mil hectares desta planta nos estados da Bahia e Minas Gerais, utilizando apenas terras degradadas (Epbr, 2024).

A Raízen, distribuidora de combustíveis associada a marca Shell no Brasil, é um dos maiores produtores de etanol de cana de açúcar do mundo e está investindo no mercado de SAF. Em 2022, a empresa assinou uma carta de intenções com uma fabricante de aeronaves com o intuito de estimular o ecossistema de produção de SAF. Esse acordo facilita a troca de conhecimento em tecnologia referente ao SAF. Além disso, a Raízen ganhou o selo ISCC Corsia Plus, que permite que seu etanol de primeira geração pode ser utilizado como insumo para a produção de SAF. Nesse sentido, a empresa está se preparando para atender uma potencial demanda global de etanol para a fabricação de SAF (Combustível Sustentável de Aviação, Raízen, 2023). O vice presidente da

companhia, Paulo Neves, constatou que “as outras soluções não são suficientes para descarbonizar a indústria de aviação. Temos trabalhado muito para fomentar essa solução e mostrar que o Brasil retém condições de ser um supridor seguro e consistente para os próximos 10, 20, 30 anos” (Epbr, 2024).

A Embraer tem projetos relacionados a estudos sobre o impacto do uso do solo no Brasil, ao mapeamento de oportunidades e desafios da cadeia de produção do SAF em território brasileiro e na Europa. A empresa faz parte da iniciativa BioValue, que é coordenada pelo Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR), do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). Sendo assim, “apoiado pela FAPESP, o BioValue é uma parceria de 20 instituições científicas e tecnológicas brasileiras e empresas que trabalham com pesquisadores europeus no desenvolvimento de biocombustíveis, em especial aviação” (Nexo Jornal, 2024).

Por fim, a Petrobras também anunciou que as unidades reservadas a produção de combustíveis renováveis serão dedicadas a produção de SAF, devido ao maior valor agregado a esse produto em relação aos demais. Dessa forma, há duas unidades dedicadas a produção de BioQAV, uma em Cubatão (SP), na Refinaria Presidente Bernardes, e outra no Polo Gaslub no RJ. Segundo Mauricio Tolmasquim, diretor de Transição Energética e Sustentabilidade da Petrobras, “um dos principais focos da petroleira em biocombustíveis de última geração tem a ver com as metas futuras de descarbonização obrigatórias nos mercados de aviação e navegação, para o qual a Petrobras pretende fornecer metanol verde”.

CONCLUSÃO

Tendo em vista o status introdutório que o atual estudo apresenta em relação a este tema, seu objetivo não é apresentar uma resposta correta de qual será o melhor caminho a seguir na transição energética do setor de transporte de aviação. Pelo contrário, seu principal intuito é provocar uma reflexão sobre o tema, expondo os principais ônus e bônus de algumas possíveis escolhas a serem tomadas, que possuem como objetivo reduzir as emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, impedindo, portanto, que cheguemos a um aquecimento global superior a 2°C até o final do século XXI. Paralelamente a isso, ressaltando as possíveis consequências da adesão a essas medidas sustentáveis a economia brasileira. Nesse sentido, caso o combustível sustentável de aviação seja o escolhido pelo mercado, a economia brasileira estará diante de uma grande oportunidade para se tornar produtora e exportadora desse produto, ou da matéria prima para a sua fabricação, que será fundamental para o transporte aéreo, tendo em vista que o mercado de biocombustíveis no Brasil já é mais desenvolvido do que em diversos países. Dessa forma, a economia brasileira teria uma posição de protagonismo no mercado internacional, não apenas para o transporte aéreo, mas como um dos principais países incentivadores da transição energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACELEN faz plantio experimental de macaúba para combustível sustentável de aviação. **EPBR**, 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/acelen-faz-plantio-experimental-de-macauba-para-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

AUSTRALIA. Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications. **Aviation White Paper**. Disponível em: <https://www.infrastructure.gov.au/infrastructure-transport-vehicles/aviation/aviation-white-paper>. Acesso em: 30 maio 2024.

AVIATION. **International Energy Agency**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>. Acesso em: 11 nov. 2023.

BASSETO, Murilo. Airbus inaugura novo centro para criar tecnologias em compósitos para voos a hidrogênio no programa ZEROe. **Aero In**, 2024. Disponível em: <https://aero.in.net/airbus-inaugura-novo-centro-para-criar-tecnologias-em-compositos-para-voos-a-hidrogenio-no-programa-zeroe/>. Acesso em: 10 abr. 2024.

BOVENIZER, Noah. Airbus signs SAF partnership with TotalEnergies. **Airport Technology**, 2024. Disponível em: <https://www.airport-technology.com/news/airbus-signs-saf-partnership-with-totalenergies/>. Acesso em: 30 maio 2024.

BOVENIZER, Noah. Emirates completes first SAF flight of A380. **Airport Technology**, 2023. Disponível em: <https://www.airport-technology.com/news/emirates-first-saf-flight-of-a380/>. Acesso em: 8 maio 2024.

BOVENIZER, Noah. Virgin Atlantic completes first commercial transatlantic SAF flight. **Airport Technology**, 2023. Disponível em: <https://www.airport-technology.com/news/virgin-atlantic-first-commercial-transatlantic-saf/>. Acesso em: 8 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis#:~:text=Um%20dos%20principais%20biocombust%20C3%ADv eis%20do,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20de%20etanol>. Acesso em: 30 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Dia da Energia Limpa**: Brasil é referência em energia renovável e sustentável na América Latina. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/dia-da-energia-limpa-brasil-e-referencia-em-energia-renovavel-e-sustentavel-na-america-latina>. Acesso em: 30 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Senado Federal avaliará projeto que institui o Programa Nacional do Bioquerosene de Aviação**. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/senado-federal-avaliara-projeto-que-institui-o-programa-nacional-do-bioquerosene-de-aviacao>. Acesso em: 4 jun. 2024.

CHEW, Carman; YAP, Trixie Sher Li. Asia's sustainable aviation fuel projects and agreements. **Reuters**, 2024. Disponível em:

<https://www.reuters.com/sustainability/asias-sustainable-aviation-fuel-projects-agreements-2023-05-26/>. Acesso em: 8 maio 2024.

DEFORESTATION. **Encyclopaedia Britannica**, 2024. Disponível em:

<https://www.britannica.com/science/deforestation>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ELECTRIC Vehicles. **International Energy Agency**, [s.d.]. Disponível em:

<https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. Acesso em: 30 maio 2024.

EUROPEAN Union Aerospace and Defense: Sustainable Aviation Fuel Regulation. **Trade.gov**, 2024. Disponível em: <https://www.trade.gov/market-intelligence/european-union-aerospace-and-defense-sustainable-aviation-fuel-regulation>. Acesso em: 28 abr. 2024.

Fact Sheet - US and EU SAF Policies. **International Air Transport Association**, [s.d.]. Disponível em:

<https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact-sheet---us-and-eu-saf-policies.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2023.

FAST FACTS on Transportation Greenhouse Gas Emissions. **Environmental Protection Agency**, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 30 maio 2024.

FIRST ZEROe engine fuel cell successfully powers on. **Airbus**, 2024. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-01-first-zeroe-engine-fuel-cell-successfully-powers-on>. Acesso em: 10 abr. 2024.

FRANCO, H. M. **Eficácia do uso de biocombustíveis na redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2020. Tese (Doutorado em Economia) - Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2020. Disponível em:

<https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/631151f4-752a-4ce8-ad88-7f944549773c/content>. Acesso em: 30 maio 2024.

HOME. **Acelen Renováveis**. Disponível em: <https://acelenrenovaveis.com.br/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

INTERNATIONAL Shipping. **International Energy Agency**, [s.d.]. Disponível em:

<https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping>. Acesso em: 29 maio 2024.

JONES, Frances. Brasil se prepara para produzir combustível sustentável de aviação. **Nexo Jornal**, 2024. Disponível em:

<https://www.nexojornal.com.br/externo/2024/02/28/brasil-se-prepara-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao>. Acesso em: 15 jun. 2024.

JONES, Frances. Brasil se prepara para produzir combustível sustentável de aviação. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2024. Disponível em:

<https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-se-prepara-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acesso em: 4 jun. 2024.

KLEIN, Spencer A. et al.. Towards a net-zero aviation system: The need for systemic transformation. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 12, p. 124001, 2021.

Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac286e#fnref-erlac286ebib4>. Acesso em: 15 abr. 2024.

MITHAL, Shraeya; RUTHERFORD, Dan. Net-zero aviation state action plans: Briefing. **International Council on Clean Transportation**, 2023. Disponível em:

<https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Net-zero-aviation-state-action-plans-briefing-A4-20025-v4-1.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.

PETROBRAS reservará duas unidades dedicadas para produção de SAF: Cubatão (SP) e Itaboraí (RJ) por maior valor agregado. **Aib-El**, 2024. Disponível em: <https://aib-el.com.br/petrobras-reservara-duas-unidades-dedicadas-para-producao-de-saf-cubatao-sp-e-itaborai-rj-por-maior-valor-agregado-em-25-02-24/>. Acesso em: 7 jun. 2024.

RAÍZEN vê SAF de etanol como produto de exportação. **EPBR**, 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/raizen-ve-saf-de-etanol-como-produto-de-exportacao/>. Acesso em: 2 jun. 2024.

REFUELEU Aviation: Council adopts new law to decarbonise the aviation sector. **Consilium Europa**, 2023. Disponível em:

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>. Acesso em: 18 nov. 2023.

RENEWABLES 2023. **International Energy Agency**, 2023. Disponível em:

https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

RSB Jet Fuel SAF Factsheets (Portuguese). Relatório 2021. **Boeing**, 2021. Disponível em:

https://www.boeing.com.br/content/dam/boeing/po_br/sustentabilidade/combustiveis/RSB-jetfuel-saf-factsheets_portuguese.pdf. Acesso em: 2 jun. 2024.

RÜBENS, Manfredo. Green Powerhouse: A América do Sul como uma potência verde e a sua importância para geração de novos negócios. **Valor Econômico**, 2023. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/esg/artigo/green-powerhouse-a-america-do-sul-como->

uma-potencia-verde-e-a-sua-importancia-para-geracao-de-novos-negocios.ghtml.
Acesso em: 2 jun. 2024.

SAF: Combustível Sustentável de Aviação. **Raízen**, 2023. Disponível em:
<https://www.raizen.com.br/blog/saf-combustivel>. Acesso em: 7 jun. 2024.

SOURCES of Greenhouse Gas Emissions. **Environmental Protection Agency**, 2024.
Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.
Acesso em: 30 maio 2024.

VIBRA, Suzano e Petrogal se unem em torno do combustível de aviação sustentável.
Exame, 2024. Disponível em: <https://exame.com/esg/vibra-suzano-e-petrogal-se-unem-em-torno-do-combustivel-de-aviacao-sustentavel/>. Acesso em: 2 jun. 2024.