



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTÔNIO JOSÉ CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE FILHO

VICTOR ROCHA DE HOLANDA VASCONCELLOS

PREVISÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO AEROPORTO DO RECIFE

Recife

2022

ANTÔNIO JOSÉ CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE FILHO
VICTOR ROCHA DE HOLANDA VASCONCELLOS

PREVISÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO AEROPORTO DO RECIFE

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção
do grau em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Viviane Adriano Falcão.

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo
autor, através do programa de geração automática do
SIB/UFPE

Albuquerque Filho, Antônio José Cavalcanti de
Previsão de biocombustíveis no aeroporto do Recife / Antônio José
Cavalcanti de Albuquerque Filho, Victor Rocha de Holanda Vasconcellos,. -
Recife, 2022.
47 : il., tab.

Orientador(a): Viviane Adriano Falcão
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2022.

1. Biocombustíveis. 2. Aviação. 3. Óleo de Palma. 4. Emissões de CO2.
5. Emissões de GEE. I. Vasconcellos, Victor Rocha de Holanda. II. Falcão,
Viviane Adriano. (Orientadora). III. Previsão de biocombustíveis no
aeroporto do Recife

380 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

CANDIDATO(S): 1 – Antônio José Cavalcanti de Albuquerque Filho
2 – Victor Rocha de Holanda Vasconcellos

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Viviane Adriano Falcão

Examinador 1: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Examinador 2: Hélio da Silva Queiroz Júnior

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: PREVISÃO
DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO AEROPORTO DO RECIFE.

LOCAL: Recife

DATA: 07/10/2022 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 10h00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, os candidatos foram arguidos oralmente pelos membros da banca com NOTA: 8,4.

1) (x) aprovados (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito. As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, $3,0 \leq \text{nota} < 7,0$, será reapresentado, gerando-se uma nova ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelos candidatos.

Recife, 07 de Outubro de 2022

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE
CEP: 50740-530.
Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu pai Antônio José Cavalcanti de Albuquerque e igualmente a minha mãe Maria Augusta Bastos, que desde os primórdios da minha caminhada são os meus maiores incentivadores da educação e do conhecimento.

Em especial à minha orientadora Viviane, que ao longo do processo de elaboração desta monografia mostrou-se mais do que uma excelente profissional, uma amiga que incentivou-me a seguir diante de todas as dificuldades que apareceram durante esta fase, sempre presente auxiliando as etapas deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos por marcar de uma forma tão positiva o fim deste ciclo de graduação.

Aos meus amigos, os quais sempre me incentivaram, me apoiaram e torceram por mim, muitos destes que dividiram as salas de aula da universidade comigo, e momentos importantes onde compartilhamos do conhecimento. Obrigado pela parceria, vocês são peças importantes nessa graduação.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

Antônio J. Cavalcanti de Albuquerque Filho

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por todo o cuidado comigo durante todo o curso de graduação que não foi fácil e sem Ele nada disso teria sido possível.

À minha esposa, Marcela, que me incentivou, sofreu e vibrou até mais do que eu a cada vitória nessa reta final, não tenho palavras para definir o quanto você me sustentou nesse processo, meu eterno amor e gratidão pela sua vida.

Aos meus pais, Geison e Denise e aos meus irmãos, Raissa e David, por todo o apoio, puxões de orelha e por estarem sempre perto torcendo, mesmo que longe fisicamente, por todo o processo desde o início até o fim, esse trabalho deveria vir com os nomes de todos vocês assinados nele.

Por último, à minha orientadora Viviane que não desistiu de mim e foi parte fundamental na minha reta final da graduação, meus sinceros agradecimentos e esperança que o mundo acadêmico tenha a mesma empatia e vontade de impulsionar outras pessoas aos seus objetivos que eu encontrei na sua amizade.

A todos, minha gratidão e felicidade por encerrar mais um ciclo.

Victor Rocha de Holanda Vasconcellos

RESUMO

Metas globais sobre a mitigação das emissões de gases do efeito estufa vem sendo acordadas internacionalmente e com isso o setor de transporte aéreo procura soluções a fim de contribuir com a redução das emissões de CO₂. Em busca de medidas eficientes a curto, médio e longo prazo, a utilização de biocombustíveis é apontada como parte indispensável desta solução uma vez que o setor de transporte aéreo é historicamente dependente de combustíveis fósseis. Apesar de atualmente representar apenas uma pequena porcentagem das emissões antropogênicas, o crescimento deste modal é observado de forma acelerada. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo preditivo da demanda futura de biocombustíveis no Brasil para determinar a demanda de combustível de aviação até 2050, a fim de cumprir os acordos de redução de emissão de gases firmados e determinar a oferta necessária de biocombustíveis para atingir essas metas. Ao longo da pesquisa também vale destacar que reunimos e analisamos estudos relevantes sobre este tema, desenvolvendo uma revisão bibliográfica robusta a fim de refletir esses cenários de emissões, conhecer as metas internacionais e comentar sobre as potenciais vias de produção e utilização desses biocombustíveis no Brasil e no mundo. Esta monografia utiliza como metodologia uma combinação do método SARIMA de modelagem de séries temporais e regressão linear para estimar a quantidade futura de bioquerosene necessária para manter as demandas da aviação para o Aeroporto Internacional dos Guararapes – Recife/PE até 2050, encontra-se o valor de pelo menos 100 milhões de litros de biocombustível. Entende-se, com esse exemplo, a dimensão da necessidade da preparação de todo o mercado aéreo para incentivar e produzir esforços a fim de planejar-se para essa mudança energética do setor.

Palavras-chave: biocombustíveis; aviação; óleo de palma; emissões de CO₂; emissões de GEE

ABSTRACT

Global goals on the mitigation of greenhouse gas emissions have been internationally agreed and with this the air transport sector seeks solutions in order to contribute to the reduction of Co₂ emissions. In search of efficient measures in the short, medium and long term the use of biofuels is seen as an indispensable part of this solution since the air transport sector is historically dependent on fossil fuels and although this modal currently represents only a small percentage of anthropogenic emissions, its growth is observed in an accelerated way. Thus, this work aims to research, gather and analyze relevant studies on this topic, developing a systematic review in order to reflect these emissions scenarios, meet the international targets and comment on the potential production and use of these biofuels in Brazil and in the world. The primary studies that supported this review are found in a platform for accessing scientific journals, Sciencedirect. The systematic review methodology is a way of evaluating and interpreting these researches. At first, strategic ways to carry out the search for articles were defined, selecting those that deal with the subject of aviation biofuels as the main focus or with the appropriate necessary emphasis. After reviewing the literature, it is clear that the main difficulties in the production and use of biofuels in aviation are the environmental impacts, as well as the economic, social and political impacts arising from this production chain and the yield and costs of this new technology. Brazil has a wide range of potential biomass for biofuel production, in addition to large areas of arable land. It is therefore concluded that although there is no single enlightened and fully viable solution, studies already point to possible routes for the generation of this alternative fuel type. This monograph uses as a methodology a combination of the SARIMA method of time series modeling and linear regression to estimate the future amount of biokerosene needed to maintain the aviation demands for the Guararapes International Airport - Recife/PE until 2050, the value is found of at least 100 million liters of biofuel. With this example, one understands the dimension of the need to prepare the entire air market to encourage and produce efforts in order to plan for this energy change in the sector.

Keywords: biofuels; aviation biofuels; Palm oil; CO₂ emissions; GHG emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - 17 ODS separados por dimensões: econômicas, sociais e ambientais

Figura 2 - Projeção da demanda de passageiros até 2050

Figura 3 - Projeção da carga até 2050

Figura 4 - Projeção da demanda de combustível até 2050

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Rotas tecnológicas de biocombustíveis com certificação ASTM

Tabela 02 - Exemplo de parte do banco de dados da ANAC

Tabela 03 - Resultado da regressão linear com duas variáveis

Tabela 04 - Resultados previstos de passageiros, carga e combustível

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa do tema	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Estrutura da monografia	15
2	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS DECORRENTES DO TRANSPORTE AÉREO	16
2.1	Políticas e ações para redução das emissões de CO ₂ da aviação civil	17
3	UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL NA AVIAÇÃO	24
3.1	Potencial para a produção de biocombustíveis	26
3.2	Desafios na utilização do biocombustível para a aviação	29
4	METODOLOGIA	34
4.1	Banco de dados	34
4.2	Análise e previsão de demanda	35
4.3	Análise de regressão	36
4.4	Interpretação dos dados	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Análise e previsão de demanda de passageiros e carga	38
5.2	Análise de regressão	39
6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

A indústria da aviação está comprometida com a redução de seu impacto ambiental e estabeleceu metas ambiciosas de redução das emissões de CO₂ em 50% até 2050. A substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis para aviação é uma das principais estratégias para atingir as metas de emissão (ZANATTA *et al.* 2018).

Segundo Staples *et al.* (2018), a aviação civil contribui com apenas cerca de 2,6% da quantidade de emissões antropogênicas anuais de CO₂, porém observa-se que a atividade da aviação está crescendo rapidamente e o uso intensivo de combustíveis fósseis neste modal faz com que as tecnologias de combustível alternativo para aviação atraiam o interesse como um meio de alcançar grandes reduções de emissões de curto prazo e atingir as metas estabelecidas. Isso porque o desenvolvimento de combustíveis alternativos é uma iniciativa essencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. As cadeias produtivas de matérias-primas para a obtenção desses biocombustíveis podem estar atreladas a impactos ambientais, bem como impactos econômicos, sociais e políticos (CREMONEZ *et al.* 2015a).

Ainda há diversos desafios a serem enfrentados sobre a produção e utilização de biocombustíveis para a aviação, mas estudos recentes têm apoiado a visão de que há terras em muitos países que podem ser dedicadas à bioenergia sem comprometer outros usos (CORNELISSEN, 2012). Em contrapartida, encontram-se poucos estudos relacionados à produção e uso de biocombustíveis na aviação na literatura, e alguns deles são até contraditórios (CREMONEZ, 2015b).

Segundo Köhle *et al.* (2014), Alemanha e Brasil têm potencial para desenvolver um mercado líder em biocombustíveis para aviação. Sendo assim, faz-se necessário estudos que possam embasar decisões da classe política e de líderes no ramo da aviação no Brasil para liderarem uma mudança global do cenário das emissões do transporte aéreo.

1.1 Justificativa do tema

De forma a atingir metas internacionais, é necessário um planejamento estratégico a nível internacional, o que gera uma alta complexidade na gestão. Qualquer proposta factível a ser considerada deve ser bem embasada em argumentos científicos robustos, capazes de ser respeitados por ambientalistas, cientistas, políticos e gestores envolvidos na questão. Um levantamento holístico dos cenários de emissões, das metas internacionais, bem como das vias de produção e utilização desses biocombustíveis, desenvolvido nesse trabalho, demonstrou uma necessidade de estimar a real demanda futura como etapa crítica no entendimento dos ajustes que precisarão ser realizados para atingir a meta. Essa conclusão foi fortalecida ao se traçar paralelos entre as políticas brasileiras e as que ocorreram no mundo sobre as emissões e potencial produção e utilização de biocombustíveis.

Optou-se por este tema, pois a aviação tem apresentado metas ambientais ambiciosas e a viabilização da utilização de biocombustíveis para o cumprimento dos acordos passa por uma compreensão do cenário futuro estimado e da extensão das mudanças necessárias. As contribuições deste trabalho levam a um preenchimento da lacuna da literatura sobre o tema, que demonstra ser atual e crítico, e também podem auxiliar o poder público e as companhias aéreas na escolha de novas diretrizes sobre a matriz energética na aviação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta monografia é utilizar uma combinação do método SARIMA de modelagem de séries temporais e regressão linear para estimar a quantidade futura de bioquerosene necessária para manter as demandas da aviação para o Aeroporto Internacional dos Guararapes – Recife/PE até 2050, quando se finalizam os prazos acordados para adequação às metas de emissão de CO₂.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estabelecer o referencial teórico sobre os temas: Emissões atmosféricas decorrentes do transporte aéreo, políticas e ações para redução das emissões de CO₂ da aviação civil e utilização do biocombustível na aviação;
- Uso de regressão linear para entender a relação entre demanda de combustível e fatores influenciadores como carga e quantidade de passageiros transportados.
- Modelagem das séries temporais influenciadoras através do modelo SARIMA para prever o comportamento futuro da demanda de cargas e passageiros no aeroporto de Recife;
- Aplicar a relação linear obtida entre os fatores preditivos e a demanda de combustível para prever os valores de demanda anual até 2050;
- Entender o impacto do crescimento de demanda sobre o processo de ajuste aos acordos climáticos firmados.

1.3 Estrutura da monografia

O formato deste trabalho consiste em 6 capítulos além deste primeiro capítulo de Introdução. O segundo capítulo traz conceitos sobre as emissões atmosféricas provenientes da aviação, apresentando o problema ambiental que envolve a questão da utilização de biocombustíveis, bem como as metas e objetivos globais que foram acordados pelas partes envolvidas. O terceiro capítulo aborda conceitos e estudos sobre biocombustíveis na aviação, somando informações sobre estudos de matérias primas potenciais para produção desse combustível alternativo e variáveis que envolvem a cadeia de produção e utilização. O quarto capítulo informa sobre a metodologia e abordagens preditivas utilizadas neste trabalho. No quinto capítulo são apresentados os resultados dos modelos aplicados. No sexto e último capítulo, chega-se a conclusões sobre o futuro da utilização de biocombustíveis na aviação.

2 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DECORRENTES DO TRANSPORTE AÉREO

Observa-se que a atividade de aviação comercial está crescendo cerca de 5% ao ano (STAPLES, 2018). Segundo Wise (2017), o transporte aéreo é um modal de uso intensivo de combustíveis fósseis, e é possível mensurar todas as emissões relacionadas ao setor da aviação. Apenas este único setor é responsável por cerca de 2,6% de todas as emissões atmosféricas antropogênicas (STAPLES, 2018).

A utilização de combustíveis fósseis contribui para o aumento de concentração de CO₂ atmosférico, bem como o aumento da concentração de outros gases causadores do efeito estufa (GEE). Liu *et al.* (2020) afirmam que as emissões da aviação afetarão significativamente as mudanças climáticas com o crescimento contínuo do transporte aéreo e mostra que o crescimento da receita de transporte aéreo está associado ao aumento das emissões históricas de carbono.

A queima dos combustíveis fósseis proveniente do transporte aéreo gera emissões; emissões estas que segundo a ANAC (2019) classificam-se em 2 grupos: gases e partículas que potencialmente interferem na qualidade local do ar - CO (monóxido de carbono), COV (compostos orgânicos voláteis), NO_x (óxidos de nitrogênio), SO₂ (dióxido de enxofre) e MP (material particulado); e gases que influenciam diretamente o efeito estufa - CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso).

Todas as sociedades emitindo CO₂ para a atmosfera pagam danos à sua economia que são referidos como Custo Social do Carbono (CCS). Como a emissão de CO₂ leva ao aquecimento global e inundações, secas, derretimento de geleiras, estas são as consequências que prejudicam a economia de um país (SYED; ULLAH, 2021). A emissão de gases de efeito estufa antropogênica é observada como o fator mais significativo que tem afetado negativamente o clima e o meio ambiente. Matthews *et al.* (2009) estimam que há uma relação na alteração de temperatura global na faixa de 1,0 a 2,1 °C por trilhão de toneladas de carbono emitida.

Esse cenário representa desafios críticos para a indústria do setor aéreo em termos de redução de emissões de carbono, bem como a diminuição das

contribuições das mudanças climáticas globais. Zhou *et al.* (2016) apontam que, apesar de sua importância, uma análise das emissões de CO₂ com o desenvolvimento futuro desta indústria e os impactos causados é ausente na literatura. De fato, a crescente demanda no setor aéreo é inevitável e acarretará mudanças climáticas e poluição que influencia diretamente a qualidade de vida dos seres humanos.

Com isso, a indústria da aviação em todo o mundo está comprometida em reduzir as emissões de CO₂. O setor busca opções viáveis para reduzir as crescentes emissões de GEE. Para limitar o crescimento das emissões de CO₂ da aviação, o 'Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional' (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) (CORSIA) foi acordado em 2016 na Assembleia da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), segundo Schellhase (2020), o CORSIA é o primeiro esquema global com esse intuito.

2.1 Políticas e ações para redução das emissões de CO₂ da aviação civil

Em 1992, no Rio de Janeiro, aconteceu a 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, um marco para o controle dos GEE (gases do efeito estufa) emitidos pela aviação. Nesta ocasião, definiu-se novas diretrizes para as questões levantadas relacionadas ao meio ambiente. Representantes de 178 países se uniram para consolidar uma agenda global visando minimizar os problemas ambientais mundiais, comprometendo-se a elaborar uma estratégia global “para proteger o sistema climático para gerações presentes e futuras” (Bursztyn, 2012).

Posteriormente, firmou-se um acordo que a redução das emissões de GEE (gases do efeito estufa) da aviação civil internacional deveria estar a cargo de uma agência especializada das Nações Unidas, a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) ou ICAO (International Civil Aviation Organization). Ela estaria responsável por reduzir estas emissões e dar um tratamento global e único para a questão da aviação civil e meio ambiente (BRASIL, 2019a).

Durante a 37ª Assembleia, em 2010, a OACI definiu metas globais para o setor da aviação, entre essas metas a melhoria da eficiência energética em 2% ao ano e o crescimento neutro em carbono a partir de 2020. No mesmo ano, a organização estabeleceu medidas para que o setor conseguisse alcançar as metas, medidas estas como: melhorias operacionais, melhorias tecnológicas, investimentos em infraestrutura, combustíveis sustentáveis para aviação e medidas de mercado.(ICAO,2016)

Na 38ª Assembleia, em 2013, reconheceu-se que a única ação com potencial para estabilizar as emissões do setor a partir de 2020 seria o uso de combustíveis alternativos sustentáveis na aviação, esta medida de mercado global seria necessária para atingir o objetivo do crescimento neutro em carbono, tendo em vista que as demais medidas disponíveis não seriam suficientes a curto e médio prazo.(ICAO,2016)

Durante a 39ª Assembleia da ICAO, realizada em outubro de 2016, foi aprovada a resolução que deu origem ao “Esquema de Redução e Compensação de Emissões da Aviação Internacional” (em inglês, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA/ICAO). O CORSIA se configura como o primeiro mecanismo de mercado voltado à compensação de emissões setoriais, em nível global. Inicialmente o CORSIA irá vigorar entre os anos de 2021-2035. O objetivo central do CORSIA é limitar qualquer aumento das emissões totais de CO₂ acima dos níveis fixados no ano de 2020.(ICAO,2016)

Scheelhaase *et al.* (2020) investigam os benefícios ambientais da **CORSIA**, bem como as opções para melhorar o impacto ambiental do projeto. Com base nos resultados de modelagem de emissões para as programações das companhias aéreas globais, conclui-se que uma opção eficaz para melhorar o escopo do CORSIA seria ao invés do controle das emissões dos voos internacionais, houvesse uma inclusão voluntária das emissões de voos domésticos dos dez maiores mercados domésticos de aviação do mundo (EUA, China, Japão, Brasil, Índia, Indonésia, Rússia, Austrália e Canadá, além da UE). Voos domésticos são aqueles dentro de um país, incluindo territórios ultramarinos.

Dessa forma, a longo prazo, um adicional de 50% de CO₂ poderia ser compensado, sem burocracia adicional significativa para a maioria das companhias aéreas, e o desempenho ambiental da CORSIA seria melhorado maciçamente. Esta abordagem poderia ser realizada com relativa facilidade, uma vez que a decisão sobre a inclusão voluntária da aviação doméstica na CORSIA é da soberania de cada estado.

O CORSIA será implementado a partir de 2021, de maneira faseada, para todos os operadores aéreos nacionais que emitam acima de 10 mil toneladas anuais de CO₂ tem obrigações de monitoramento, reporte e verificação (MRV) das emissões de CO₂ da aviação civil internacional (BRASIL, 2019a). O Brasil é um dos países sujeitos ao programa CORSIA em relação apenas ao MRV das emissões. No entanto, a partir de 2027, as emissões acima dos níveis de 2020 deverão ser compensadas com a compra de créditos de carbono.

O Brasil já regulamentou as primeiras obrigações relacionadas ao monitoramento, reporte e verificação (MRV) das emissões de operações internacionais, por meio da Resolução ANAC nº 496/2018 alterada pela nº 558/2020 e da Portaria nº 4.005/ASINT/2018. Com a entrada em vigor do CORSIA no Brasil, estima-se que mais de 9 milhões de toneladas de CO₂ serão compensados pelas empresas aéreas brasileiras até 2035 (BRASIL, 2019b).

A IATA (International Air Transport Association) representa cerca de 290 companhias aéreas, que compõem 82% do tráfego aéreo global. Na 66ª Assembleia Geral da IATA em 2010, as companhias aéreas membros da IATA adotaram uma resolução que tem como meta reduzir em até 50% as emissões líquidas comparadas aos níveis de 2005.

A 77ª Assembleia Geral Anual da IATA, realizada em 2021, adota a meta coletiva de atingir zero emissões líquidas de carbono até 2050 em apoio ao acordo de Paris e reafirma o total apoio das companhias aéreas ao Esquema de Compensação e Redução de Carbono da ICAO para Aviação Internacional (CORSIA).

Nesse mesmo contexto no ano de 2015, a Organizações das Nações Unidas (ONU) em conjunto com mais de 190 países estabelece 17 objetivos e 169 metas

que compõem uma agenda mundial para a construção e implementação de políticas públicas que visam guiar a humanidade até 2030 de forma mais sustentável e resiliente, que abordam diversos temas fundamentais para o desenvolvimento humano. Essas metas determinarão diretrizes globais de ação para acabar com a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar para todos, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas (ONU, 2020).

Essas metas determinarão diretrizes globais de ação para acabar com a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar para todos, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas. A agenda fornece um projeto compartilhado para paz e prosperidade para as pessoas e o planeta, definindo 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que garantem os direitos humanos de todas as pessoas sem negligenciar as questões ambientais e econômicas. Com relação ao setor de transporte, os avanços no transporte sustentável têm impacto na redução das emissões de gases de efeito estufa entre outros fatores importantes (MEIRA *et al.*, 2021).

Os 17 objetivos são Integrados, pois refletem de forma equilibrada, as três dimensões do desenvolvimento sustentável: social, econômica e ambiental e ao mesmo tempo indivisíveis. Como não será possível avançar apenas um dos ODS, será necessário trabalhar em prol de todos os 17 ODS para tornar o desenvolvimento sustentável uma realidade (UNPD, IPEA, 2020). Na Figura 01, visualiza-se esta separação das ODS por dimensões, citando cada uma delas por camadas, na dimensão ambiental(biosfera) temos as ODSs 6 (água potável e saneamento), 13 (ação contra mudança global do clima),14 (vida na água) e ODS 15 (vida terrestre); na dimensão social temos as ODSs 1 (erradicação da pobreza), 2 (fome zero e agricultura sustentável), 3 (saúde e bem-estar),4 (educação de qualidade),5 (igualdade de gênero),7 (energia limpa e acessível), 11 (cidades e comunidades sustentáveis), 16 (paz justa e instituições eficazes); e na econômica 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), 9(indústria inovação e infraestrutura),10(redução das desigualdades),12 (consumo e produção responsáveis), como objetivo global temos a ODS 17 (parcerias e meios de implementação).

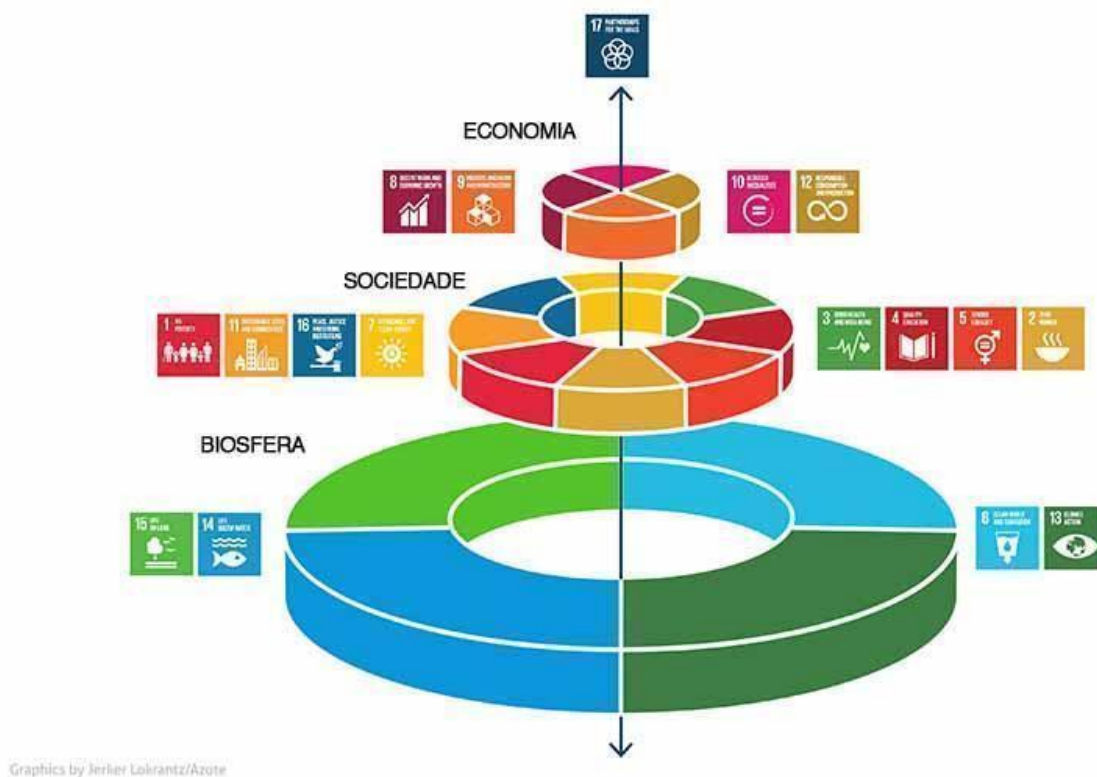


Figura 1 - 17 ODS separados por dimensões: econômicas, sociais e ambientais

Fonte: (AGENDA 2030) ONU,2020.

A matriz energética brasileira já contempla importante participação das energias renováveis, porém para alcançar as metas e acordos necessitará de uma

transição energética efetiva no setor de transportes, que substitua os combustíveis fósseis por combustíveis de baixo carbono ou carbono neutro, visando reduzir as emissões devido à queima dos combustíveis fósseis.

Nesse contexto, surge o RenovaBio, Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei 13.576 de 26 de dezembro de 2017 que “Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências” (BRASIL,2017). O RenovaBio é uma política que tem como objetivo desenvolver estratégia conjunta para reconhecer a importância de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para a redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (FOLEGATTI *et al.*, 2020).

O programa busca promover a expansão da produção de biocombustíveis em moldes sustentáveis, visando contribuir para o cumprimento de acordos internacionais, o RenovaBio inclui rotas de produção de etanol, biodiesel, biometano e bioquerosene de aviação e terá impacto direto sobre os ODS 7 (energia limpa e acessível) e 13 (ação contra a mudança global do clima); contribuirá significativamente para o ODS 15 (uso sustentável do ecossistema terrestre); e trará benefícios indiretos para os ODS 3 e 11 (relacionados à qualidade de vida nas cidades), ODS 12 (padrões de produção e de consumo sustentáveis) e ODS 8 (geração de emprego e renda). Será um importante promotor de sustentabilidade no uso da terra, na produção agrícola e na geração de energia no Brasil (FOLEGATTI *et al.*, 2020).

A segunda Conferência da OACI em Combustíveis Alternativos de Aviação, realizada em 2017, reforçou a Visão 2050 da OACI para combustíveis sustentáveis de aviação como uma diretriz que alcançará êxito e convida os Estados, indústria e outras partes interessadas, para que uma proporção significativa de combustíveis fósseis de aviação seja substituída por combustíveis de aviação sustentáveis até 2050, de forma que a aviação civil internacional reduza significativamente as emissões de carbono.

O Brasil apoia a Visão 2050 da OACI e entende que a implantação de uma nova matriz energética é estratégica para o setor aéreo, tendo em vista se tratar da

única medida com potencial para neutralizar as emissões na fonte (BRASIL, 2019b). Estudos apontam para a tecnologia de combustíveis como parte da solução para essas emissões, o interesse por combustíveis alternativos vem crescendo e o biocombustível cada vez mais ganha importância comparado ao combustível fóssil.

3 UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL NA AVIAÇÃO

Segundo Wang *et al.* (2019), o consumo total mundial de combustível de aviação pelas companhias aéreas comerciais aumentou e tem perspectivas dessa demanda continuar crescendo. Soluções foram promovidas ou programadas para reduzir as emissões provenientes desse consumo de combustível fóssil de aviação. Entre essas soluções, o desenvolvimento de recursos energéticos renováveis, como os biocombustíveis.

A indústria da aviação está comprometida com a redução de seu impacto ambiental e a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis é uma das principais estratégias para atingir as metas de emissão (ZANATTA *et al.*, 2018). A substituição dos combustíveis fósseis por esse tipo de bioenergia está ganhando cada vez mais atenção como uma alternativa que visa diminuir as concentrações de CO₂. Segundo Wise (2017), o setor aéreo é um modal de uso intensivo de combustível fóssil, portanto os biocombustíveis estão ganhando atenção como uma alternativa mais limpa e promissora.

Percebe-se que o desenvolvimento e a utilização de biocombustíveis vêm sendo apontados como parte da solução para as emissões atmosféricas decorrentes do transporte aéreo. Desde 2011 até o início de 2020, estima-se que mais de 250.000 voos haviam decolado usando alguma porcentagem de biocombustíveis. Ainda em 2020, foram consolidados acordos de compra de bioQAV somando cerca de 6 bilhões de litros. Atualmente, o bioQAV representa apenas 0,1% do uso global de combustível de aviação, mas espera-se que atinja até 2% até 2025 com o apoio político adequado (RSB, 2021).

Madsen (2021) relata que no ano de 2010 a empresa aérea TAM, hoje LATAM, fez um primeiro teste utilizando combustíveis sustentáveis. Em 2014, de maneira mais sistemática, a empresa Gol Linhas Aéreas Inteligentes realizou um voo da Flórida para São Paulo usando uma mistura de combustível comum com 10% de bioquerosene produzidos com algas, convertendo açúcares em óleos. A Azul também realizou, no mesmo ano, teste com bioquerosene que utiliza a cana-de-açúcar.

No Brasil, para aprovação de um novo querosene de aviação alternativo, é necessário primeiramente de aprovação pela ASTM International, devendo ter propriedades que o caracterize como “drop-in”. Isto é, deve ser completamente intercambiável com o querosene fóssil, de modo que não sejam necessárias adaptações nos motores das aeronaves atuais. Atualmente, cinco querosenes de aviação alternativos são aprovados pela ASTM, e consequentemente pelo Brasil: o querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (FT-SPK) e o Fischer-Tropsch com aromáticos (FT-SPK/A), o querosene parafínico sintetizado de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA), além das iso-parafinas sintetizadas (SIP) e o álcool para combustíveis de aviação (ATJ-SPK) como mostra a Tabela 01 (MENDES, 2019).

Tabela 01 - Rotas tecnológicas de biocombustíveis com certificação ASTM

Nome da Rota	Matéria-Prima	Principal produto	Mistura Máxima	Empresas Produtoras
HEFA	gorduras, óleos e graxas	Iso- e Nparafinas	50%	UOP, Neste e Syntroleum
FT-SPK	resíduos agrícolas e florestais, madeira, e resíduos sólidos	Iso- e Nparafinas	50%;	SASOL, Shell e Syntroleum
FT-SPK/A	resíduos agrícolas e florestais, madeira, e resíduos sólidos	Iso- , Nparafinas e aromáticos	50%;	SASOL, Shell e Syntroleum,
ATJ-SPK	matérias-primas renováveis (cana-de-	Iso- e Nparafinas	50%	GEVO, Cobalt e Lanzatech

	açúcar, milho ou resíduos florestais)			
SIP	açúcares	Parafinas	10%	Amyris

Fonte: ASTM (2018).

O FT-SPK, FT-SKA, ATJ e HEFA podem ser misturados ao querosene de aviação fóssil até o teor de 50% em volume. Já o SIP pode ser misturado ao querosene de aviação fóssil até o teor de 10% (MENDES, 2019).

Liu *et al.* (2020) concluíram que, mesmo sob a maioria dos avanços tecnológicos e operacionais utilizados, os ganhos de eficiência podem não compensar os aumentos de emissão de CO₂ esperados, resultantes do crescimento futuro do tráfego aéreo. O uso de combustível alternativo para a aviação civil deve ser considerado explorado como estratégia essencial para reduzir as emissões de carbono no futuro próximo.

3.1 Potencial para a produção de biocombustíveis

A cadeia produtiva de um biocombustível está amplamente relacionada com a biomassa que será utilizada para sua produção. Segundo Cantarella *et al.* (2015), existe uma ampla gama de biomassas disponíveis para produção de biocombustível no Brasil e aponta que já há cadeias de produção de matéria prima já existentes. Alerta para a disponibilidade de área no Brasil para essa produção sem comprometer outros setores como o alimentício, e também se leva em conta a utilização de grandes áreas para a pastagem no nosso país.

Pode-se notar que estudos têm apoiado a visão de que há terras em muitos países que podem ser dedicadas à bioenergia sem comprometer outros usos. Weidema (2003 *apud* CAPAZ, 2021) indica que há 29,7 Mha de terra disponíveis para a expansão da cultura da palma, potencial matéria prima para produção de biocombustíveis, na Amazônia em terras que já foram desmatadas.

Zanatta *et al.* (2018) fornecem em seus estudos um levantamento detalhado sobre a disponibilidade de terras e localização para plantações de cana-de-açúcar, considerando as restrições legais, edafoclimáticas e econômicas, uma das opções

de matéria-prima mais promissoras para produção de biocombustíveis para aviação no Brasil. Esta análise foi focada no Estado brasileiro de São Paulo, que detém 51% da produção nacional dos biocombustíveis, além das principais infraestruturas e recursos tecnológicos do país.

O resultado dessa pesquisa mostrou que aproximadamente 2,8 milhões de hectares têm alto potencial econômico, pois estão localizadas em uma distância menor ou igual a 25 km das unidades de processamento. Uma vez devidamente incluído no setor, as terras mapeadas podem aumentar significativamente a produção de cana-de-açúcar e a produção de biocombustíveis e ajudar a aliviar a dependência dos combustíveis fósseis na aviação (ZANATTA *et al.*, 2018).

Cremonez *et al.* (2015c) apresentam as principais matérias primas encontradas no Brasil para a produção do biocombustível a partir de avaliações do histórico de produção, e discute suas perspectivas de utilização no país. O autor conclui que o biodiesel é, para a economia brasileira, uma alternativa renovável e eficaz que visa complementar a matriz energética nacional e garantir segurança ao país, o que reduz o impacto causado pelas oscilações nos preços das exportações de petróleo. Tais aspectos favorecem uma ampla gama de oleaginosas que podem suprir a demanda de matéria-prima para a produção de combustível, o que possibilita um melhor aproveitamento do desenvolvimento da agricultura e geração de renda por meio do agronegócio e da geração de novos empregos.

O Brasil é um país que tem uma vasta experiência em produzir e exportar commodities agrícolas além da sua ampla área territorial. Köhler *et al.* (2014) acreditam que os biocombustíveis são a primeira opção viável para a redução das emissões de GEE na aviação.

Posada *et al.* (2019) avaliam os principais efeitos da produção de biocombustíveis para a aviação sobre o emprego, o PIB e a balança comercial. Uma análise baseada em cenários foi usada para avaliar esses efeitos socioeconômicos, tomando a produção brasileira de biocombustíveis de aviação até 2050. Três combinações potenciais de tecnologias e matérias-primas para a produção de biocombustível para aviação foram avaliadas: cana-de-açúcar via álcool,

macaúba(palma) via HEFA (ésteres e ácidos graxos hidroprocessados) e eucalipto via Fischer-Tropsch (FT).

A produção de biocombustíveis para aviação mostrou grandes efeitos socioeconômicos líquidos positivos sobre o emprego e o PIB, embora alguns dos setores fossem afetados negativamente. Globalmente, o autor também conclui que a cadeia envolvendo ésteres e ácidos graxos hidroprocessados parece ser o cenário mais favorável entre todos estudados, apesar do nível relativamente elevado de incerteza a ela associado.

Cantarella *et al.* (2015) complementam a análise de matérias primas e caminhos de produção de biocombustíveis nacionais, neste artigo enfatiza à biomassa de origem agrícola, dados os recursos terrestres brasileiros e suas tradições agrícolas e florestais e conclui que embora a cana-de-açúcar e o eucalipto apresentem condições favoráveis para iniciar uma indústria de biocombustível para aviação no Brasil, até o momento as rotas de processamento de combustíveis a partir de óleos e gorduras como o hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA) estão à frente das demais e provavelmente serão as primeiras a chegar ao mercado de produção , mais de 1500 voos comerciais foram realizados usando misturas de combustível com até 50% de biocombustíveis HEFA.

Capaz (2021) analisa vias baseadas na cultura alimentar (ou vias 1G de primeira geração), e vias baseadas em resíduos (ou vias 2G de segunda geração) contribui e conclui que resíduos de madeira e bagaço de cana foram apontados como matérias-primas estratégicas devido à sua aparente disponibilidade e nenhuma competição direta com o setor de alimentos. As matérias-primas à base de óleo conhecidas no Brasil apresentam baixo risco, mas com potencial variável. A Soja é aparentemente a opção mais viável a curto prazo. Porém, considerando aspectos como o teor de óleo e a produtividade agrícola, o dendê (fruto da palmeira) tem um maior potencial do que o óleo de soja, apesar que atualmente o Brasil é responsável por menos de 1% da produção global de Palma, estudos indicam que 29,7 milhões de hectares de terra estão disponíveis para a expansão da cultura na Amazônia em terras que já foram desmatadas.

No entanto, o custo da matéria-prima de óleo é geralmente maior do que o da cana-de-açúcar, materiais lignocelulósicos e materiais residuais, enquanto os esforços técnicos são maiores para refinar a matéria prima mais barata (CANTARELLA *et al.*, 2015).

A Alemanha e o Brasil têm potencial para desenvolver um mercado líder em biocombustíveis para aviação. O Brasil em 2010 ocupou o segundo lugar na produção mundial de biodiesel, atrás apenas da Alemanha. O país possui características como sua extensão continental e um clima favorável que potencializa o cultivo de uma ampla gama de matéria-prima necessária para a obtenção do biocombustível. O Brasil pode se tornar uma referência para a produção de biocombustíveis, como bioquerosene e biocombustível de aviação (CREMONEZ *et al.*, 2015).

3.2 Desafios na utilização do biocombustível para a aviação

A falta de um posicionamento mais concreto e homogêneo sobre a utilização de biocombustíveis na aviação civil mostra que existe uma lacuna na literatura possível a ser explorada. As cadeias produtivas de matérias-primas para a obtenção desses biocombustíveis podem estar atreladas a impactos ambientais, bem como impactos econômicos, sociais e políticos. Após ser feita uma revisão de literatura, aponta-se algumas das dificuldades e incertezas ainda encontradas para a produção e utilização dos biocombustíveis de aviação bem como medidas para que a indústria se desenvolva a fim de alcançar objetivos de mitigação mundialmente acordados.

Ainda se enfrentam dificuldades em toda a cadeia logística da produção e utilização de biocombustíveis na aviação. Babin *et al.* (2021) realizaram uma revisão com objetivo de destacar os principais desafios enfrentados pela implementação em larga escala do BECCS (bioenergia com captura e armazenamento de carbono) do ponto de vista ambiental, técnico, econômico e político. O BECCS está ganhando cada vez mais atenção e interesse como fonte de energia negativa para o carbono. Desafios notáveis enfrentados pelo BECCS incluem o uso da terra que faz esta bioenergia competir com o crescimento de alimentos, consumo de água, as

limitações do potencial de emissão negativa devido a emissões colaterais, bem como a eficiência energética que é relativamente baixa em comparação com os combustíveis fósseis desafios estes recorrentes no tema de utilização de biocombustíveis.

Existe um grande potencial dos biocombustíveis para reduzir significativamente a intensidade de carbono da aviação e esse potencial é especialmente verdadeiro quando o BECCS é usado no processo de conversão de matéria-prima de biomassa em combustíveis líquidos para a aviação. Sugere-se que pesquisas futuras sobre BECCS não devem se concentrar apenas na redução de seu impacto ambiental e custos, mas também em caminhos para o apoio público e de políticas além de estudos que tragam relatos técnicos sobre o uso de biocombustíveis em motores de aeronaves, pois o tema apresenta-se escasso na literatura (CREMONEZ *et al.*, 2015b).

Zanatta *et al.* (2018) também afirmam que novos estudos sobre a capacidade de processamento e adaptação das usinas, bem como a viabilidade logística entre unidades de processamento e centros de consumo devem ser avaliados, uma vez que altos custos podem limitar a competitividade dos biocombustíveis para aviação em relação aos convencionais. Políticas públicas e mecanismos de apoio ainda são necessários para reduzir as incertezas e aumentar a produção de matéria-prima, bem como, implementar medidas financeiras e regulatórias capazes de promover a bio-produção e o uso desse tipo de combustível.

O biodiesel ainda está passando por muitos desafios para se tornar um combustível de aviação em potencial devido ao seu baixo poder calorífico e alto ponto de congelamento. Além disso, as características e propriedades dos ésteres variam consideravelmente de acordo com a matéria-prima utilizada em sua obtenção e algumas impurezas podem ser prejudiciais aos motores (CREMONEZ *et al.*, 2015b). No caso dos biocombustíveis, devem ser levadas em consideração as emissões não biogênicas que decorrem do cultivo, da colheita e do transporte da matéria-prima, bem como de sua conversão em biocombustível (O'CONNELL *et al.*, 2019).

Wang *et al.* (2019) trazem que o rendimento das matérias-primas alvo e, conseqüentemente, o custo dos processos podem ser melhorados através do desenvolvimento de novos catalisadores e estratégias sob um conceito de gestão molecular. Os autores afirmam que é possível a produção de biocombustível em larga escala, porém é necessária a contribuição conjunta da cadeia industrial aérea (fabricante de aviões, produtor e fornecedor de combustível de aviação, companhias aéreas e instalações).

Há atrasos na ideologia de que a estrutura de um mercado o líder é um desenvolvimento em um único país. A indústria da aviação é global, com a maioria das grandes companhias aéreas tendo redes de rotas internacionais. A indústria de abastecimento de combustível (fóssil) também é globalizada. Portanto, a indústria da aviação tem um histórico de cooperação internacional. O Brasil deu alta prioridade ao desenvolvimento de biocombustíveis e é um país líder no desenvolvimento de biocombustíveis de 2ª geração. Como líder mundial na produção de matéria-prima, portanto, o Brasil também tem potencial para se tornar um líder no mercado (KÖHLE *et al.*, 2014).

Budd (2014) desenvolveu uma pesquisa com os principais interessados no tema, envolvendo fabricantes de aeronaves, companhias aéreas, consultores ambientais e empresas de biocombustíveis e combustíveis no geral, objetivando identificar e examinar os fatores percebidos que estão afetando o desenvolvimento do mercado de biocombustíveis. No entanto, a comercialização está sendo restringida por altos custos de produção, disponibilidade limitada de matérias-primas adequadas, incerteza em torno da definição dos critérios de sustentabilidade e uma percepção da falta de apoio político e políticas internacionais para biocombustíveis de aviação.

Cornelissen (2012) analisa detalhadamente o potencial de fornecimento e uso de biomassa no contexto de uma transição para um sistema de energia global totalmente renovável até 2050. Investigou-se o potencial de bioenergia dentro de uma estrutura de escolhas tecnológicas e critérios de sustentabilidade, incluindo critérios de uso da terra e segurança alimentar, insumos agrícolas e de processamento, resíduos e rejeitos. Como esperado, o potencial das áreas

disponíveis para cultivo de bioenergia é sensível à evolução da demanda e oferta de alimentos e ao equilíbrio entre eles. Porém países como o Brasil por sua extensa área territorial e pela vasta experiência em produzir e exportar *commodities* agrícolas tem potencial para desenvolver uma cadeia de produção e abastecimento desse novo tipo de solução em combustíveis.

Outras dificuldades reafirmadas são a necessidade de melhoria e otimização das rotas de produção que é fundamental para reduzir os custos de produção desses biocombustíveis, pois cadeias de abastecimento de matérias-primas para a obtenção desses combustíveis têm impactos ambientais, incluindo, uso extensivo de terras agrícolas, perda de fauna e uso intensivo de água, bem como impactos econômicos, políticos e sociais, especialmente quando se leva em consideração a monocultura para produção extensiva e exportação (CREMONEZ *et al.*, 2015a).

Staples *et al.* (2018) afirmam que além das limitações na disponibilidade de matéria-prima, a existência de infraestrutura de bio-refinarias insuficientes para a produção de biocombustíveis também poderia ser uma restrição vinculativa às reduções de emissões. Esse resultado também é uma indicação de que o sistema de aviação é mais caro para descarbonizar na ausência de alternativas ao combustível fóssil.

O'Connell *et al.* (2019) contribuíram com conhecimentos e percepções sobre biocombustíveis para aviação e suas emissões de GEE associadas e, principalmente, seus balanços de energia. A atenção é chamada para o fato de que as matérias-primas são convertidas por meio de diferentes processos e práticas que podem melhorar drasticamente, seus perfis de desempenho, em especial o óleo de palma. Conclui-se que combustíveis lignocelulósicos, aqueles oriundos de matérias primas compostas principalmente por celulose e lignina, como resíduos do processamento da palma (dendê), bagaço de cana, palha de milho, parecem exigir maiores insumos de energia em sua produção do que óleos vegetais. Biocombustíveis de 2ª geração (provenientes de biomassa lignocelulósica) são promissores do ponto de vista de redução de emissões de GEE, mas seu desempenho na eficiência energética é relativamente baixo para algumas das vias analisadas.

Em síntese, os principais desafios estão relacionados a: incertezas em toda a cadeia de processo logístico do biocombustível, o que acarreta em altos custos de produção, bem como desafios do uso da terra para obtenção da matéria prima de forma sustentável, sem competir com outros setores inclusive o alimentar, das incertezas sobre as eficiências dessas biomassas e todas as emissões não biogênicas decorrentes dos transportes secundários de insumos para produção do biocombustível para a aviação, além da capacidade limitada de produção com a atual estrutura de biorrefinarias que existem. Há atrasos ideológicos que não permitem que a indústria global do biocombustível se desenvolva mais rapidamente desafios são enfrentados com a ausência de políticas públicas bem como medidas regulatórias que poderiam vir a contribuir com o setor.

Conclui-se que o aumento da demanda por biocombustíveis na aviação deve ser pensado de forma que o crescimento da produção da matéria-prima em geral ocorra de forma sustentável. A possibilidade de redução das emissões de GEE, geração de empregos, promoção do desenvolvimento rural e novos mercados para produtos agrícolas justificam os incentivos necessários para desenvolver pesquisas sobre o tema (CANTARELLA *et al.*, 2015). O primeiro passo para um maior entendimento dos futuros desafios para a produção de biocombustíveis é analisar a demanda futura necessária para permitir o cumprimento dos acordos globais firmados pelo país. O presente trabalho contribui para a literatura, portanto, ao realizar essa estimativa de demanda futura para os voos para o Aeroporto Internacional dos Guararapes – Recife/PE até 2050. A metodologia aplicada pode ser expandida para análises a nível nacional, permitindo a realização de um planejamento estratégico por parte dos agentes envolvidos.

4 METODOLOGIA

Com base em uma análise robusta da literatura, das metas internacionais e dos desafios nacionais para adaptação aos compromissos do setor da aviação com práticas sustentáveis, foi proposto um estudo preditivo das demandas por biocombustíveis até o final do prazo de 2050. Utilizando o software Jupyter Notebook para modelar as séries temporais utilizando a linguagem Python. Utilizamos valores de todos os vôos de origem Recife.

4.1 Banco de dados

De acordo com o Corsia da ICAO, em 2050 o uso de biocombustíveis deverá resultar em uma redução de 50% do total de emissão de CO₂ pela queima dos combustíveis utilizados na indústria aérea em relação ao ano de 2005. Para estimar de quanto será a demanda por esse tipo de combustível, realizou-se uma análise preditiva do total de combustível necessário na aviação em 2050 a partir da base de metadados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2022). A base utilizada foi a de Dados Estatísticos de Transporte Aéreo, disponível na seção de Voos e Operações Aéreas no portal de Dados Abertos da ANAC em formato .csv. A planilha extraída contém 20 atributos de todos os voos saídos do Aeroporto Internacional do Recife entre janeiro de 2000 e maio de 2022. Desses atributos, serão utilizados: mês, ano, número de passageiros pagos, número de passageiros grátis, peso da carga paga (em kg), peso da carga grátis, e litros de combustível utilizados.

Das 26.606 observações de voo encontradas na planilha, 8665 foram removidas por informação faltante. As informações de número de passageiros pagos e números de passageiros grátis foram consolidadas em uma única coluna “passageiros”, assim como peso da carga paga e peso da carga grátis em uma coluna “carga”. A Tabela 02 contém as primeiras linhas das 17.941 entradas como exemplo do restante da base de dados.

Tabela 02 - Exemplo de parte do banco de dados da ANAC

	ANO	MES	passageiros	carga	COMBUSTIVEL_LITROS
0	2000	1	2466.0	3701.0	234078.0
1	2000	1	924.0	0.0	50707.0
2	2000	1	96.0	0.0	8128.0
3	2000	1	68.0	0.0	16761.0
4	2000	1	42.0	0.0	8584.0

4.2 Análise e previsão de demanda

Analizando a correlação entre os fatores observados, obteve-se uma alta correlação entre a variável de interesse, o combustível, e os valores de passageiros (0,916) e cargas (0,664). Entendendo que o crescimento da necessidade de combustível está associado ao aumento da demanda de passageiros e cargas, vamos analisar a evolução dessas demandas até 2050. Para isso, utilizamos a técnica de análise e previsão de séries temporais, tendo como objetivo projetar valores futuros de uma determinada série de valores indexada no tempo a partir das ocorrências passadas da mesma série.

Um dos métodos mais consagrados para tal é o modelo de média móvel integrada autorregressiva (ARIMA) (BOX *et al.*, 2015). É uma combinação dos modelos autoregressivo (AR) e de média móvel (MA) para séries temporais estacionárias, com um fator adicional que considera um possível comportamento estacionário da série após um certo número de diferenciações. O modelo de média móvel integrada autorregressiva sazonal (SARIMA) é uma modificação do ARIMA, que leva em consideração a variação sazonal da série para fazer uma melhor previsão. O modelo SARIMA possui 7 parâmetros que descrevem comportamentos da série, como tendência e a influência de valores anteriores da série sobre um instante de tempo futuro, são eles: i) p: ordem de autorregressão de tendência, ii) d: ordem de diferença de tendência, iii) q: ordem de média móvel de tendência, iv) P: ordem autorregressiva sazonal, v) D: ordem de diferença sazonal, vi) Q:

ordem de média móvel sazonal, v) m : o número de passos de tempo para um único período sazonal. Casos especiais deste modelo, como a média móvel autorregressiva (ARMA) e os modelos AR e MA simples originais, podem ser alcançados definindo certos parâmetros para um ou zero. Neste trabalho, o SARIMA será utilizado como modelo para fazer a análise preditiva por ser um método bastante eficiente de previsão de séries temporais quando não se existem variáveis preditoras. A implementação é feita em Python, utilizando o pacote pmdarima.

Antes da implementação, o histórico de transações é transformado em série temporal agregando os valores por mês/ano.

4.3 Análise de regressão

Uma vez obtido o valor de demanda de passageiros e cargas para 2050, será calculada a necessidade de combustível. Para encontrar a relação entre as variáveis e o combustível necessário, realizou-se uma regressão linear (JAMES *et al.*, 2013) multivariada para encontrarmos uma equação do tipo $f(x_1, x_2) = A.x_1 + B.x_2 + C$ em que x_1 e x_2 são os fatores passageiros e carga como variáveis independentes e combustível como variável dependente, além dos coeficientes explicitados. Visto que os dados iniciam no ano de 2000, é também possível que tenha havido ganho na eficiência do uso de combustível, o que resulte em um efeito negativo do avanço do tempo no volume de combustível necessário, para um mesmo volume de demanda de carga e passageiro. Portanto, será testada também uma versão em que o fator ano é incluído na previsão. O modelo será implementado em Python através da biblioteca statsmodel.

4.4 Interpretação dos dados

Após encontrado o valor previsto para a demanda total de combustível para o ano de 2050, calculou-se a demanda de biocombustível necessária para cumprir as metas de redução de emissão de gases estabelecida junto ao Corsia da ICAO. Esse valor servirá como referência no planejamento da cadeia de suprimento das autoridades responsáveis pelo cumprimento das metas de redução, afim de que

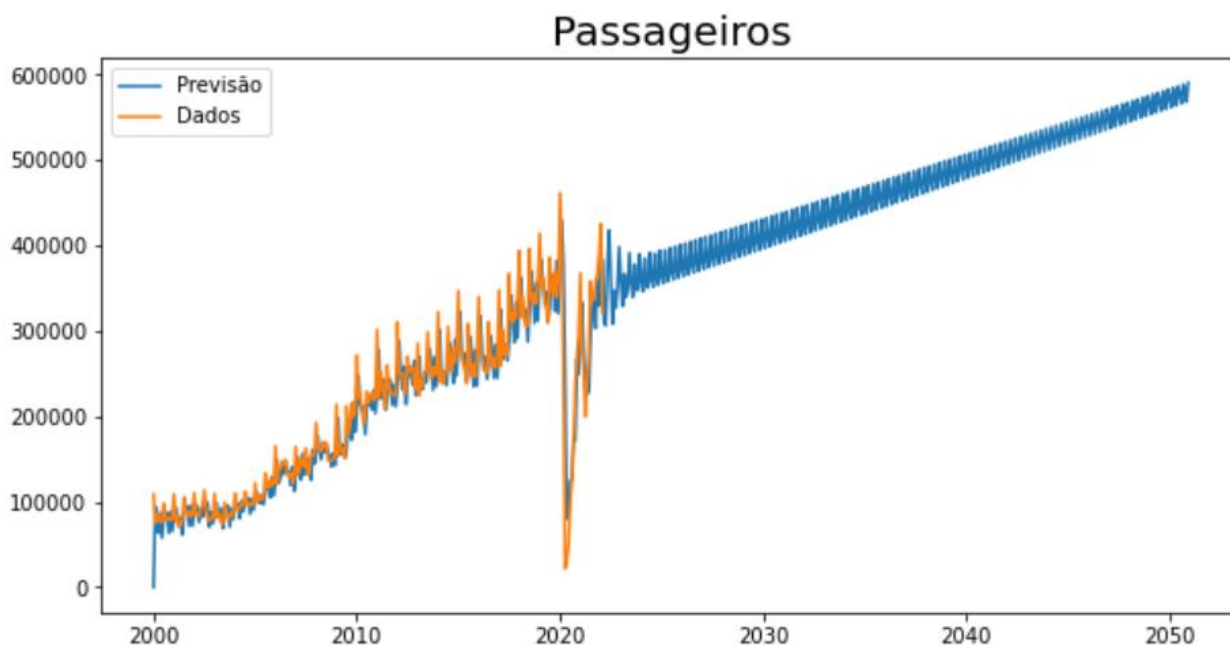
não faltem insumos para o andamento do plano de mudança da matriz energética do setor aeroportuário.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise e previsão de demanda de passageiros e carga

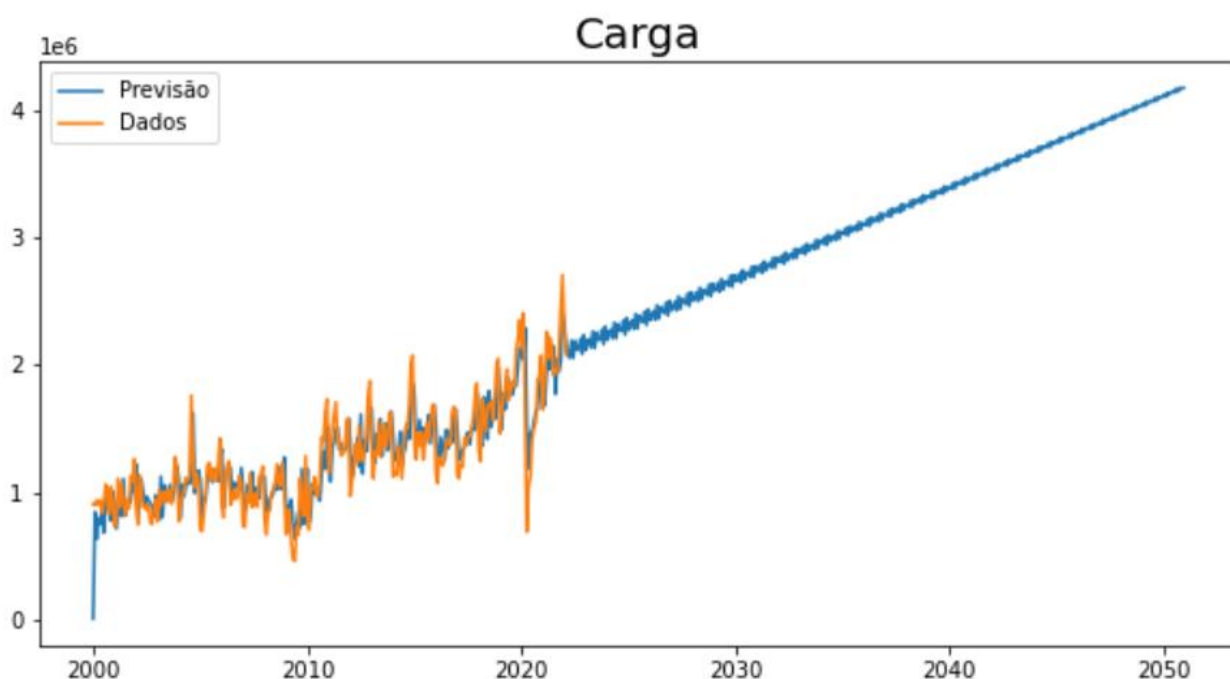
Aplicando o model SARIMA inicialmente à série histórica de passageiros e testando automaticamente diversos parâmetros através do uso da função `auto_arima`, obte-se como resultado um passeio aleatório. Isso ocorre quando a série não encontra padrões claros e modela somente aleatoriedade. No entanto, ao observar a série, percebemos uma grande queda no comportamento durante a pandemia da COVID-19. O valor, no entanto, já se recuperou e retomou praticamente ao valor que estava em março de 2020. Portanto, para reduzir o ruído de informação compartilhada com o modelo, rodamos novamente a análise excluindo os valores da pandemia. O resultado foi a possibilidade de identificação de padrão na série de um modelo ARIMA(3,1,2). Projetando, então, os valores até 2050, foi obtida a previsão exposta na Figura 2. O valor total de passageiros estimado para o ano de 2050 foi de 6.888.811 de passageiros.

Figura 2 - Projeção da demanda de passageiros até 2050



Para a série temporal de valores de cargas, o modelo obtido foi um ARIMA(3,1,3). Como o próprio modelo foi capaz de achar o padrão apesar do padrão extraordinário durante a pandemia, a série foi modelada usualmente utilizando todos os pontos. O comportamento resultante e projetado até 2050 encontra-se na Figura 3. O valor total de carga estimado para o ano de 2050 foi de 58.150.057 kg.

Figura 3 - Projeção da carga até 2050



5.2 Análise de regressão

A análise de regressão foi realizada inicialmente apenas com as variáveis passageiros e cargas. Os testes estatísticos de significância dessas variáveis para a previsão resultaram em p-valor de aproximadamente zero, o que corrobora fortemente para a hipótese inicial de que ambos os fatores seriam relevantes na previsão de demanda de combustível. O R quadrado obtido foi de 0,855, o que revela que uma altíssima parte da variabilidade no comportamento da demanda de combustíveis pode ser explicado pela regressão obtida. A reta obtida está descrita

na Equação (1) e o resumo de resultados da análise pode ser encontrado na Tabela 03 .

$$\text{Combustível (L)} = 6,18 * 10^6 + 31,3196 * \text{passageiros} + 0,5441 * \text{carga (kg)}$$

(1)

Tabela 03 - Resultado da regressão linear com duas variáveis

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	COMBUSTIVEL_LITROS	R-squared:	0.855			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.854			
Method:	Least Squares	F-statistic:	630.2			
Date:	Thu, 22 Sep 2022	Prob (F-statistic):	3.49e-90			
Time:	19:47:41	Log-Likelihood:	-3303.4			
No. Observations:	216	AIC:	6613.			
Df Residuals:	213	BIC:	6623.			
Df Model:	2					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

const	6.18e+06	2.94e+05	21.025	0.000	5.6e+06	6.76e+06
passageiros	31.3196	1.160	26.997	0.000	29.033	33.606
carga	0.5441	0.312	1.742	0.083	-0.072	1.160
=====						
Omnibus:	12.594	Durbin-Watson:	0.631			
Prob(Omnibus):	0.002	Jarque-Bera (JB):	5.690			
Skew:	0.134	Prob(JB):	0.0581			
Kurtosis:	2.251	Cond. No.	4.87e+06			

A partir desse modelo, pode-se realizar a previsão da quantidade de combustível utilizada pelos parâmetros gerados. A Figura 4 mostra a projeção do consumo mensal de combustível até 2050, com base na previsão obtida levando em consideração os fatores de passageiros e carga. A partir do gráfico é possível comparar também o volume previsto com a utilização real entre os anos 2000-2022.

A tabela 6 mostra os valores anuais de passageiros, carga, combustível utilizado e combustível previsto pelo modelo proposto. Nela é possível observar o valor previsto de utilização de combustível de $3,2156 \times 10^8$ litros para o ano de 2050.

Nela é possível também fazer um comparativo com os primeiros anos da série histórica analisada.

Conforme descrito anteriormente, o Corsia estabeleceu que 50% de todas as emissões que superarem o patamar de emissão de 2005 precisam ser compensadas. Levanta-se como estratégia do trabalho a substituição de 50% do crescimento da demanda de combustível em 2050, tendo como valor base o ano de 2005, por biocombustíveis, considerando que a taxa de emissão de gases se manterá constante. Isso significa que, com base nas previsões realizadas, apenas para o aeroporto de Recife, será necessário o suprimento de pelo menos $1,0154 \times 10^8$ litros de biocombustível de aviação.

Figura 4 - Projeção da demanda de combustível até 2050

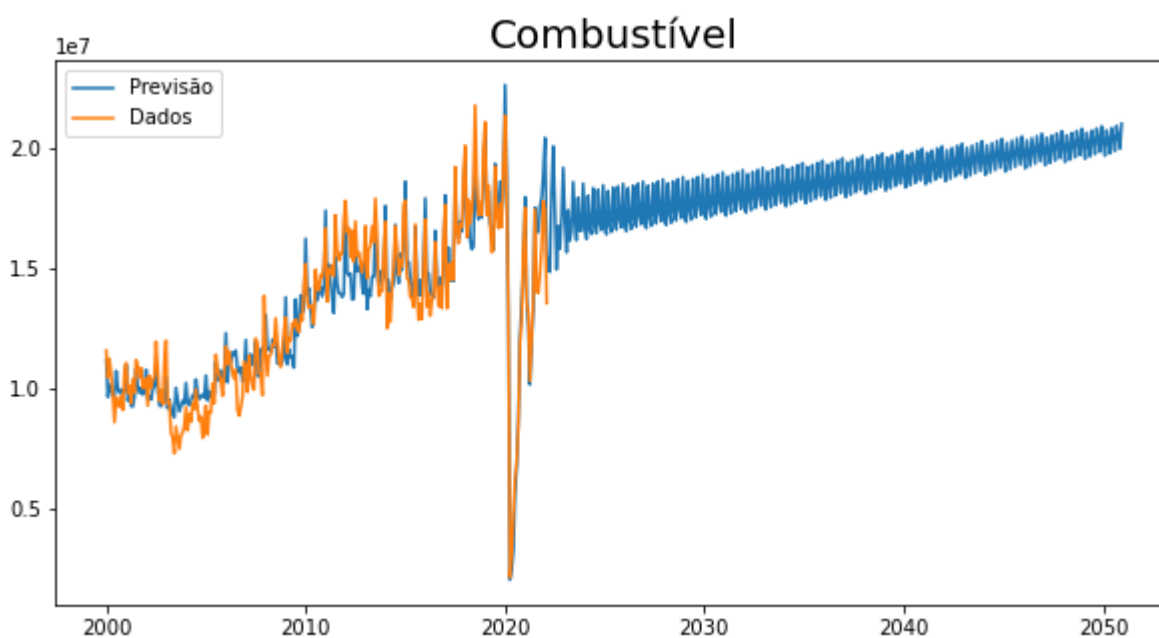


Tabela 4 - Resultados previstos de passageiros, carga e combustível

	passageiros	carga	COMBUSTIVEL_LITROS
year			
2005	1.374231e+06	1.280343e+07	1.184698e+08
2050	6.888811e+06	5.815006e+07	3.215599e+08

Esse valor de pelo menos 100 milhões de litros escancara a necessidade urgente de uma preparação do poder público, visto que o setor de distribuição de combustível é todo regulado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), no sentido de estabelecer de onde virá o fornecimento de tamanha quantidade de bioquerosene de aviação ou de qualquer outro combustível alternativo, afim de se atingir o cumprimento do pacto firmado para redução de emissão de gases pelo nosso sistema aéreo de transporte.

6 CONCLUSÕES

O intuito do presente trabalho foi contribuir para a área de pesquisa sobre biocombustíveis na aviação. Para isso, primeiramente foram construídos os referenciais teóricos de forma a compreender e expor alguns conceitos importantes e atuais sobre o tema como: as perspectivas de sustentabilidade para o setor aéreo a nível internacional, os acordos globais de mitigação de gases do efeito estufa, conceitos de biocombustíveis na aviação e políticas de incentivo ao uso do biocombustível na aviação. Ao estabelecer os referenciais teóricos, conclui-se que o assunto é atual e de relevante importância para o setor da aviação, onde o biocombustível tem um papel fundamental para o cumprimento de metas e acordos preestabelecidos.

Encontramos através de da regressão linear que os fatores com maior R^2 de correlação com a variável combustível são os fatores passageiros e cargas, por isso o modelo levou em relação apenas esses dois fatores.

Geramos os gráficos de comportamento ao longo dos meses a demanda de passageiros e carga para o aeroporto do Recife, a fim de estimar a demanda ao longo do ano de 2050 que é o ano do compromisso de adequação pela 66ª assembleia do clima.

Após encontramos o comportamento de passageiros e cargas em 2050, conseguimos traçar a curva do comportamento da demanda de combustível e, enfim, chegamos ao tamanho do desafio a ser enfrentado.

Como exposto, o resultado do modelo SARIMA para a análise preditiva estabeleceu uma quantidade da ordem de 100 Milhões de biocombustível para o aeroporto do Recife. Entende-se, com esse exemplo, a dimensão da necessidade da preparação de todo o mercado aéreo para incentivar e produzir esforços a fim de planejar-se para essa mudança energética do setor. Como o assunto da viabilidade ambiental do setor de transportes aéreos ainda é recente, existem lacunas sobre a questão da utilização de biocombustíveis como: a previsão de demanda que influenciará a produção e meios de produção desse insumo.

Este trabalho visou preencher esta lacuna com previsões realistas com base em dados da demanda futura de biocombustível necessária para atingir as metas estabelecidas. Dessa forma, esse estudo contribui para a compreensão da importância dos biocombustíveis para o setor da aviação, bem como os iminentes desafios para cumprimento dos pactos assumidos pelas autoridades na redução de gases provenientes da queima de querosene de aviação. Por isso precisam ser feitos mais testes e pesquisas que apontem para a viabilidade dessa transição energética no setor aéreo. Pesquisas futuras podem ser desenvolvidas em diversas condições operacionais e com uma maior amostragem.

REFERÊNCIAS

ANAC (2019). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2019, volume único, 1ª edição**. Agência Nacional de Aviação Civil

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2022). **Dados Estatísticos**.

ASTM. (2018). **Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons**. ASTM D7566 – 18. American Standard Testing Materials.

Babin et al. (2021). **Potential and challenges of bioenergy with carbon capture and storage as a carbon-negative energy source: A review**. Biomass and Bioenergy Volume 146, March 2021.

Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C. (2015). **Time series analysis: forecasting and control**. 4 ed. John Wiley & Sons, 2015.

BRASIL (2017). **Lei Federal Nº 13.576 De 26 de dezembro de 2017 Secretaria-Geral Subchefia para Assuntos Jurídicos**.

BRASIL (2019a). **Guia de orientação : CORSIA (monitoramento, reporte e verificação das emissões de CO2 da aviação internacional)**. Ministério da Infraestrutura ,Brasília 2019.

BRASIL (2019b). **Plano de Ação para a Redução das Emissões de CO2 da Aviação Civil Brasileira 3ª Edição**. Ministério da Infraestrutura, Brasília 2019.

Brereton et al. (2007). **Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain**. Journal of Systems and Software Volume 80, Issue 4, April 2007, Pages 571-583.

Budd (2014). **The market development of aviation biofuel: Drivers and constraints**. Journal of Air Transport Management Volume 39, July 2014, Pages 34-40.

Bursztyn,B. (2012). **Fundamentos de política e gestão ambiental : os caminhos do desenvolvimento sustentável** – Rio de Janeiro : Garamond, 2012

Cantarella et al. (2015). **Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil**. Environmental Development Volume 15, July 2015, Pages 52-63.

Capaz (2021). **Alternative aviation fuels in Brazil : environmental performance and economic feasibility**. Unicamp ,Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Cornelissen (2012). **The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system**. Biomass and Bioenergy Volume 41, June 2012, Pages 21-33

Cremonez et al. (2015a). **Environmental, economic and social impact of aviation biofuel production in Brazil** .New Biotechnology Volume 32, Issue 2, 25 March 2015, Pages 263-271

Cremonez et al. (2015b). **Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects**.Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 43, March 2015, Pages 1063-1072.

Cremonez et al. (2015c). **Biodiesel production in Brazil: Current scenario and perspectives**.Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 42, February 2015, Pages 415-428.

Folegatti et al. (2020). Anais do VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida .**Impactos da Política Nacional de Biocombustíveis nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Gramado ,UFRGS , 2020.

International Civil Aviation Organization (ICAO,2016). **On board a sustainable future: 2016 environmental report.**

James, G.; Witten, D.; Hastie, T.; Tibshirani, R. (2013). **An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R.** 1a Ed. Springer, 2013.

Köhler et al. (2014). **Lead markets in 2nd generation biofuels for aviation: A comparison of Germany, Brazil and the USA.** Environmental Innovation and Societal Transitions Volume 10, March 2014, Pages 59-76.

Liu et al. (2020). **Flying into the future: A scenario-based analysis of carbon emissions from China's civil aviation.** Journal of Air Transport Management Volume 85, June 2020.

Madsen, R., & Henkes, J. A. (2021). **A AVIAÇÃO CIVIL E A INSERÇÃO DO BIOQUEROSENE NO BRASIL.** Revista Brasileira De Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas.

Matthews et al (2009). **A proporcionalidade do aquecimento global às emissões cumulativas de carbono.** *Natureza* 459, 829-832.

Meira et al. (2021). **Measuring the Impact of Brazilian Transport Systems on the 2030 Agenda Goals.** Journal of Sustainable Development; Vol. 14, No. 2; 2021.

Mendes de Souza, Lorena. **O mercado brasileiro de bioquerosene de aviação: mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA** / Lorena Mendes de Souza. -Rio de Janeiro, 2019. 208f

O'Connell et al. (2019). **Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways.** Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 101, March 2019, Pages 504-515.

ONU, 2020. Brasil. **17 Objetivos para transformar nosso mundo.**

PNU e IPEA, (2020). **Plataforma Agenda 2030.**

Posada et al. (2019). **Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis** .Journal of Cleaner Production Volume 230, 1 September 2019, Pages 1036-1050.

RSB (2021) – ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS. **Decarbonising aviation: the sustainable way forward**. Geneva: RSB, 2021. Acesso em: 22 de maio 2021.

Sampaio, Mancini (2006). **Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica**.Rev. bras. fisioter. vol.11 no.1 São Carlos Jan./Feb. 2007.

Scheelhaase et al. (2020). **How to improve the global ‘Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation’ (CORSIA)?**Transportation Research Procedia Volume 51, 2020, Pages 108-117.

Staples et al. (2018). **Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels**.Energy Policy Volume 114, March 2018, Pages 342-354.

Syed ,Ullah (2021). **Estimation of economic benefits associated with the reduction in the CO2 emission due to COVID-19**.Environmental Challenges Volume 3, April 2021.

Wang et al. (2019). **Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective**.Progress in Energy and Combustion Science Volume 74, September 2019, Pages 31-49.

Wanke, P. F.; R. V. Silveira e F. G. Barros. (2009) **Introdução ao planejamento da infraestrutura e operações portuárias: aplicações de pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas.

WANKE, P.F. (2012). **Efficiency of Brazil’s airports: Evidences from bootstrapped DEA and FDH estimates**. Journal of Air Transport Management 23.

Wise, Muratori (2017). **Biojet fuels and emissions mitigation in aviation: An integrated assessment modeling analysis**.Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 52, Part A, May 2017, Pages 244-253.

Zanatta et al. (2018). **Land availability for sugarcane derived jet-biofuels in São Paulo—Brazil**. Land Use Policy Volume 70, January 2018, Pages 256-262. [.](#)

Zhou et al. (2016). **Scenario analysis of CO2 emissions from China's civil aviation industry through 2030**. Applied Energy Volume 175, 1 August 2016, Pages 100-108