

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

VINICIUS MORAES PAIÃO

Desafios e oportunidades na implementação da transição energética na aviação

São João da Boa Vista

2024

Vinicius Moraes Paião

Desafios e oportunidades na implementação da transição energética na aviação

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Aeronáutica .

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Pereira Gouveia da Silva

São João da Boa Vista

2024

P142d Paião, Vinicius Moraes
Desafios e oportunidades na implementação da
transição energética na aviação / Vinicius Moraes Paião. --
São João da Boa Vista, 2024
67 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa
Vista
Orientador: Gabriel Pereira Gouveia da Silva

1. Engenharia. 2. Ciências ambientais. 3. Aviação. I.

Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados
fornecidos pelo autor(a).

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO DA TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA NA AVIAÇÃO**

Aluno: Vinicius Moraes Paião

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Pereira Gouveia da Silva

Banca Examinadora:

- Gabriel Pereira Gouveia da Silva (Orientador)
- José Augusto de Oliveira (Examinador)
- Lucas Daniel Del Rosso Calache (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 18 de novembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado e não mediram esforços para me apoiar em toda jornada da faculdade, Reginaldo B. Paião, Patrícia M. Paião, Vitória M. M. Paião, Juliana F. de Carvalho e Aurora F. P. Mollo.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Gabriel P. G. da Silva, pelo depósito de confiança e paciência.

Agradeço aos companheiros de curso e de vida de que com sua amizade somaram em minha jornada na UNESP, em especial Matheus M. Bellato, Luca Loreti, João Otávio Pardo, Gabriel C. Carrari, Nicole Borges, Jean Zanella, Daniel M. Moras, Fernando de O. C. Junior, Luiz C. F. Domingues Matheus B. Silva.

Agradeço a todos docentes, técnicos e colaboradores da unesp que passaram por minha formação acadêmica.

“A hora mais escura é justamente um pouco antes da aurora.”
(Napoleon Hill)

RESUMO

Este trabalho analisa os desafios e oportunidades da transição energética na aviação, com foco na implementação de combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) e tecnologias emergentes como a propulsão a hidrogênio e híbrida-elétrica, e estende a análise no contexto brasileiro. Para isso, foi realizado o estudo bibliométrico de publicações científicas sobre o tema, identificando a tendência de crescimento das pesquisas e os países e instituições de destaque, bem como os financiadores que impulsionam a inovação no setor e as áreas de estudo mais envolvidas. Para tal estudo foram utilizadas as bases de dados Scopus e Research Rabbit, resultando em um panorama do crescente interesse global pela descarbonização da aviação. Os resultados mostram que os SAFs, devido à possibilidade de uso imediato nas aeronaves e infraestrutura atuais, são a alternativa mais viável no curto prazo, embora seu custo elevado e a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura representem barreiras a ser transpostas. A análise reforça que o Brasil, com seu potencial agrícola, possui uma vantagem estratégica na produção de SAFs, o que pode favorecer a autossuficiência e posicionar o país como exportador desse combustível. A conclusão aponta para a importância de políticas de incentivo, precificação de carbono e investimentos em infraestrutura para viabilizar a produção de SAFs em escala, além da necessidade de continuar o desenvolvimento de tecnologias de longo prazo, como a propulsão a hidrogênio e híbrida-elétrica, para alcançar uma aviação neutra em carbono até 2050.

PALAVRAS-CHAVE: descarbonização da aviação; Transição energética; Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs).

ABSTRACT

This study analyzes the challenges and opportunities in aviation's energy transition, focusing on the implementation of sustainable aviation fuels (SAFs) and emerging technologies like hydrogen and hybrid-electric propulsion, with emphasis on the Brazilian context. The bibliometric analysis of scientific publications was made, identifying growth trends in research, notable countries and institutions, key funding sources driving sector innovation, and the main research areas involved. This study utilized the Scopus and Research Rabbit databases, providing an overview of the growing global interest in aviation decarbonization. Findings show that SAFs, given their potential for immediate use with current aircraft and infrastructure, represent the most feasible short-term alternative, though their high cost and the need for substantial infrastructure investments pose significant barriers. The analysis reinforces Brazil's strategic advantage in SAF production due to its agricultural potential, positioning the country for self-sufficiency and as a potential exporter of this fuel. The conclusion highlights the importance of incentive policies, carbon pricing, and infrastructure investments to enable large-scale SAF production, alongside the ongoing development of long-term technologies, such as hydrogen and hybrid-electric propulsion, to achieve carbon-neutral aviation by 2050.

KEYWORDS: Aviation decarbonization; Energy transition; Sustainable aviation fuels (SAFs).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	<i>International Energy Agency</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATAG	<i>Air Transport Action Group</i>
CAFe	Combustíveis Alternativos de Aviação
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
COVID-19	Doença causada pelo coronavírus SARS-CoV-2
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Água
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
KLM	<i>Koninklijke Luchtvaart Maatschappij</i> (Companhia Real de Aviação dos Países Baixos)

LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
MP	Material Particulado
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NSF	<i>National Science Foundation</i>
O ₃	Ozônio
RPK	<i>Revenue-Passenger-Kilometers</i>
RF	Forçamento Radiativo
SAFs	<i>Sustainable Aviation Fuels</i>
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>
SO _x	Óxidos de Enxofre
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
UNSP	Universidade Estadual Paulista
UHC	Hidrocarbonetos Não-Queimados
USP	Universidade de São Paulo
VPN	<i>Virtual Private Network</i>

SUMÁRIO

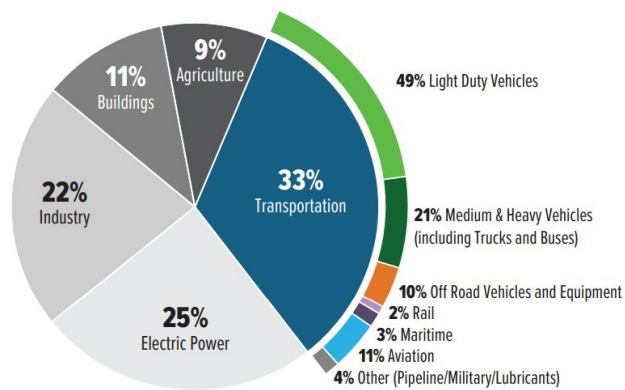
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
2	METODOLOGIA DE PESQUISA	15
2.1	Bases de dados utilizadas	16
2.2	Uso do Research Rabbit	16
2.3	Estratégias de busca e palavras-chave no scopus	17
2.4	Filtros	19
2.5	Extração e análise dos metadados	19
3	ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS DAS AERONAVES ATUAIS . . .	20
3.1	Emissões de gases de efeito estufa	20
3.2	Formação de <i>contrails</i> e cirrus induzidos pela aviação	21
3.3	Efeitos das emissões de NO _x e SO _x	21
3.4	Impacto do material particulado e fuligem	22
3.5	Alternativas e perspectivas para reduzir as emissões	22
3.6	Compensações e desafios na implementação de tecnologias limpas	22
4	SOLUÇÕES PARA DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO	24
4.1	Combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs)	24
4.2	Motorização híbrida-elétrica	26
4.3	Propulsão a hidrogênio	27
4.4	Viabilidade e Compensações	27
5	COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO (SAFS): A SOLUÇÃO MAIS VIÁVEL NO CURTO PRAZO	29
5.1	Fontes e processos de produção dos SAFs	29
5.2	Vantagens ambientais e impacto no ciclo de vida	30
5.3	Desafios na produção e escalabilidade dos SAFs	30
5.4	Potencial de adoção e impacto econômico dos SAFs	31
6	CUSTOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA AVIAÇÃO	33
6.1	Custos atuais e projeções para SAFs	33
6.2	Necessidade de investimento em infraestrutura	33
6.3	Potencial de criação de empregos e impacto econômico	34
6.4	Desafios e competição por recursos naturais	35
6.5	Dependência de eletricidade de baixo carbono e hidrogênio verde	35
7	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	36

7.1	Análise bibliométrica da busca 01	36
7.2	Análise bibliométrica da busca 02	38
7.3	Análise bibliométrica da busca 03	40
7.4	Análise bibliométrica da busca 04	42
7.5	Análise Bibliométrica da Busca 05	44
7.6	Análise Bibliométrica da Busca 06	46
7.7	Análise Bibliométrica da Busca 07	47
7.8	Análise bibliométrica da Busca 08	49
7.9	Análise bibliométrica da busca 09	51
7.10	Análise bibliométrica da busca 10	52
7.11	Análise Bibliométrica da Busca 11	54
7.12	Análise Bibliométrica da Busca 12	57
7.13	Análise Bibliométrica da Busca 13	58
7.14	Análise Bibliométrica da Busca 14	61
7.15	Síntese	63
8	CONCLUSÃO	65
8.1	Desafios e limitações	66
8.2	Recomendações para estudos futuros	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A indústria da aviação está em constante crescimento no setor de transporte e tem um impacto ambiental significativo, uma vez que o setor de transportes contribui com 31% das emissões de CO₂ (Figura 1), o que favorece o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) e afeta a qualidade do ar e o clima global. Apesar de representar uma pequena parcela das emissões globais (cerca de 3,1% das emissões de CO₂ de combustíveis fósseis em 2019), a aviação contribui também em efeitos adicionais de forçamento radiativo de outros poluentes, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e vapor d'água (FAROKHI, 2020; LEE et al., 2010; EPA, 2019). Esses efeitos além do CO₂, associados a nuvens cirrus artificiais geradas por esteiras de condensação (*contrails*), intensificam o impacto climático da aviação (FAROKHI, 2020).

Figura 1 – Fontes de emissões de CO₂ nos Estados Unidos em 2019.

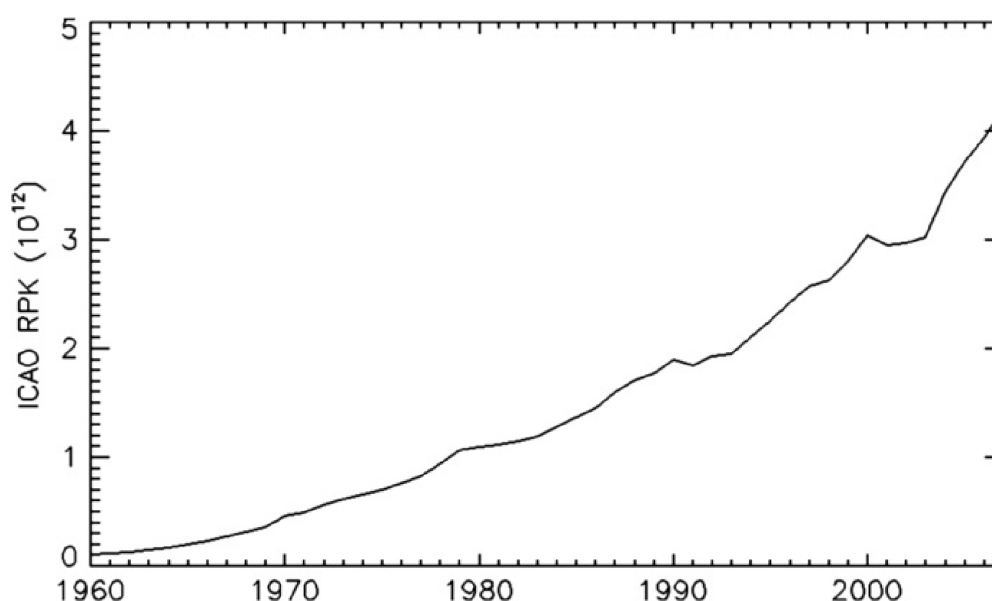


Fonte: EPA (2019)

Desde a década de 1960, o transporte aéreo civil tem crescido significativamente em termos da medida *Revenue-Passenger-Kilometers* (RPK), ou passageiros-quilômetro transportados pagos, impulsionado pela popularização e maior acessibilidade das viagens aéreas que foi proporcionada pelas frotas de aviões comerciais (Figura 2). Tal crescimento é um desafio para a sustentabilidade, uma vez que a demanda crescente por conectividade e mobilidade vem acompanhada de um aumento nas emissões (ICAO, 2022). Como representado no gráfico do tráfego aéreo regular de 1960 a 2007 (Figura 2), essa tendência deve continuar, tornando imprescindível mudanças para diminuir o impacto ambiental da aviação (FAROKHI, 2020; ICAO, 2022).

A busca por soluções de descarbonização se intensificou nos últimos anos, com metas globais ambiciosas. Em 2016, 192 países assinaram o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA), que visa alcançar um crescimento neutro em carbono na aviação pós-2020 (ICAO, 2019). Em 2021, a Associação Internacional de Transporte aéreo (IATA) comprometeu-se com a meta de emissões líquidas zero até 2050 (IATA, 2021). Essas metas incentivam a adoção de novas tecnologias, combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) e melhorias operacionais e de eficiência energética (ATAG, 2021).

Figura 2 – Desenvolvimento do tráfego aéreo civil regular de 1960 a 2007 em bilhões (10¹²) de passageiros-quilômetros pagos (RPK)



Fonte: Lee et al. (2010)

Diante dos desafios, algumas soluções têm ganhado destaque para reduzir as emissões no setor aéreo, dentre elas:

- Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs): os SAFs têm o potencial de reduzir as emissões ao substituir combustíveis fósseis tradicionais com alternativas mais sustentáveis, utilizando matérias-primas como biomassa e resíduos (FAROKHI, 2020)). Os SAFs são muito interessantes por exigirem pouca ou nenhuma adaptação tecnológica na motorização da frota atual, o que é interessante quando se há metas tão ambiciosas a cumprir.
- Propulsão a hidrogênio e eletrificação: embora ainda enfrentem desafios tecnológicos e econômicos, essas tecnologias prometem uma redução substancial de emissões, mas também um tempo de desenvolvimento maior ainda por vir (FAROKHI, 2020; IATA, 2021).
- Medidas operacionais e eficiência energética: melhorias na eficiência de combustível e operações de voo são abordagens complementares para reduzir as emissões (ATAG, 2021).

No Capítulo 2, é apresentada a metodologia de pesquisa utilizada para estruturar esta análise, incluindo as estratégias para a coleta e análise bibliométrica dos dados, que é apresentada no Capítulo 7. O Capítulo 3 discute o impacto ambiental das aeronaves atuais, evidenciando a contribuição da aviação para as emissões globais e os pontos críticos para redução de impacto. No Capítulo 5, são analisadas as tecnologias de combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs), propulsão à hidrogênio e motorização elétrica, apresentando suas viabilidades e limitações técnicas. O Capítulo 4 aborda soluções potenciais para o curto prazo, com foco nos SAFs como solução inicial para redução de emissões, enquanto o Capítulo 6 discute as questões econômicas e os desafios associados aos custos e à implementação da transição energética. Por fim, no Capítulo 8, é feita uma síntese das conclusões, destacando as

oportunidades e desafios identificados ao longo do trabalho e propondo caminhos para futuras pesquisas e desenvolvimento na busca por uma aviação mais sustentável.

1.1 OBJETIVOS

Para enfrentar o desafio global de descarbonização na aviação, torna-se essencial compreender o impacto ambiental das operações atuais e explorar possíveis soluções tecnológicas para mitigar esses efeitos a longo prazo. Este trabalho, com base no cenário atual e nas metas de descarbonização para 2050, tem como objetivos principais analisar as tendências de pesquisa e desenvolvimento voltadas para a transição energética na aviação, com foco no Brasil e nos SAFs como uma solução de curto prazo. Por meio de uma revisão da literatura e análise bibliométrica, busca-se verificar o potencial de implementação dos SAFs e outros combustíveis sustentáveis como parte da estratégia de descarbonização do setor até 2050.

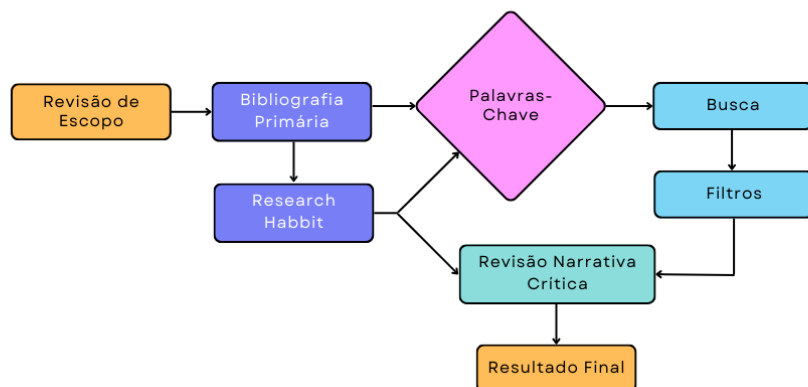
Além disso, esse trabalho possui, também, como objetivos específicos, revisar os impactos ambientais das aeronaves atuais e apresentar as soluções mais promissoras que visam solucionar tais impactos, aprofundar-se na solução potencialmente mais promissora para o cenário brasileiro, trazendo algumas das fontes e processos de produção de SAFs e os desafios relacionados ao desenvolvimento dessa solução, assim como revisar estimativas feitas de custos da transição energética e benefícios que virão como consequência da transição energética. Também é parte dos objetivos específicos, por meio da análise bibliométrica, verificar tendências nas publicações científicas relacionadas à transição energética na aviação escolhendo palavras-chave e, a partir das mesmas, destacando número de publicações entre os anos 2003 e 2023, os principais países, financiadores no mundo e no Brasil, instituições brasileiras e áreas de pesquisa predominantes.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para realizar a pesquisa bibliográfica, a análise bibliométrica e como as duas estratégias conversam entre si, com o objetivo de aprofundar o entendimento dos desafios e oportunidades da transição energética na aviação. A pesquisa foi realizada utilizando duas bases de dados principais: Research Rabbit e Scopus, sendo a primeira utilizada para a obtenção de mais referências para revisão, feita no Capítulo 3, Capítulo 4, Capítulo 5 e Capítulo 6, e a segunda voltada para a análise bibliométrica apresentada no Capítulo 7.

Dessa forma, a revisão e a análise foram realizadas de maneira conjunta, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Metodologia de pesquisa para desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor

- **Revisão de escopo:** a primeira etapa consistiu na revisão de escopo, cujo objetivo foi aprender os conceitos centrais relacionados à transição energética na aviação e mapear as palavras-chave relevantes. Essa etapa forneceu a base para a construção das estratégias de busca na base de dados Scopus e no Research Habbit, permitindo identificar tendências iniciais e delimitar o tema da pesquisa.
- **Obtenção de referências iniciais e ampliação com Research Rabbit:** paralelamente à revisão de escopo, foi utilizado o software Research Rabbit para explorar referências conectadas às publicações iniciais identificadas. Essa inteligência artificial possibilitou a identificação de novos

estudos e a criação de redes de conexões entre artigos. Isso garantiu boa base de dados para a revisão narrativa crítica.

- **Revisão narrativa crítica:** com as informações obtidas nas etapas anteriores, realizou-se uma revisão narrativa crítica, cujo foco foi integrar, comparar e analisar as informações coletadas. Essa etapa incluiu a busca pelas palavras-chave no Scopus, análise crítica dos dados e das tendências destacadas nas publicações, conectando as diferentes fontes para construir uma visão ampla e coerente sobre os desafios e oportunidades da transição energética na aviação.

2.1 BASES DE DADOS UTILIZADAS

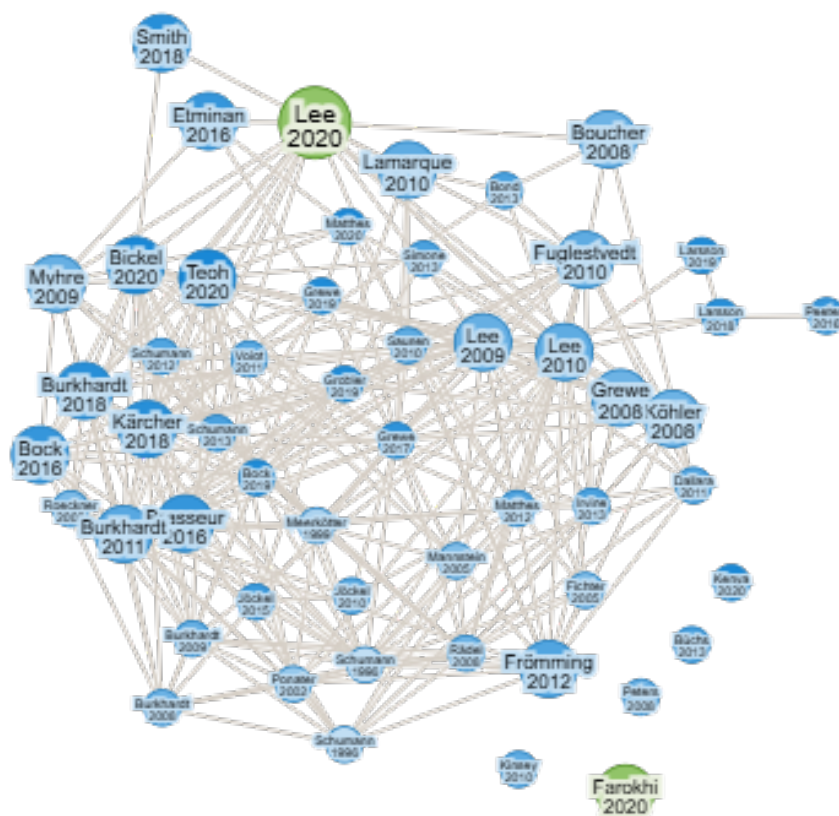
O Research Rabbit foi utilizado como uma ferramenta complementar para localizar estudos adicionais para a revisão bibliográfica descritiva. A plataforma permite explorar publicações científicas correlacionadas a partir de uma publicação inicial, ampliando a abrangência das referências de acordo com a intenção principal da pesquisa.

A base de dados Scopus foi acessada por meio do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando o CAFE (Comunidade Acadêmica Federada) e login com credencial da UNESP. Após o acesso ao acervo, a base Scopus (Elsevier) foi selecionada para busca de documentos relacionados ao tema do estudo. Esse foi o método realizado, o qual pode ser simplificado pelo acesso ao VPN da UNESP. Na plataforma Scopus, foram realizadas 14 buscas diferentes utilizando palavras-chave relacionadas ao tema que foram selecionadas na revisão de escopo. Cada uma focando em aspectos específicos da aviação sustentável com o objetivo de avaliar as tendências de desenvolvimento das diversas tecnologias.

2.2 USO DO RESEARCH RABBIT

No Research Rabbit foi usado como entrada da pesquisa o livro “*Future Propulsion Systems and Energy Sources in Sustainable Aviation*” (FAROKHI, 2020), gerando uma lista de 302 trabalhos relacionados. A partir dessa lista foi obtido e selecionado o documento “*The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*” (LEE et al., 2010). Com isso foi feita uma segunda busca usando como entrada apenas esse segundo documento, resultando em mais 1.198 documentos similares (Figura 4). O processo foi repetido com a inclusão dos trabalhos “*Aviation and global climate change in the 21st century*” e “*Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation*” de Lee et al. (2010) e novamente o livro “*Future Propulsion Systems and Energy Sources in Sustainable Aviation*”, resultado na segunda rede (Figura 5) e acumulando uma base sólida de referências para análise.

Figura 4 – Rede de documentos similares a “*The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*” de Lee et al. (2010) fornecida pelo Research Rabbit.



Fonte: gerado pelo autor através do Research Rabbit em 17/09/2024.

As conexões obtidas pelo uso do Research Rabbit serão utilizadas nos capítulos de revisão narrativa crítica para fornecer uma visão mais abrangente das tendências de pesquisa e desenvolvimento em combustíveis sustentáveis de aviação.

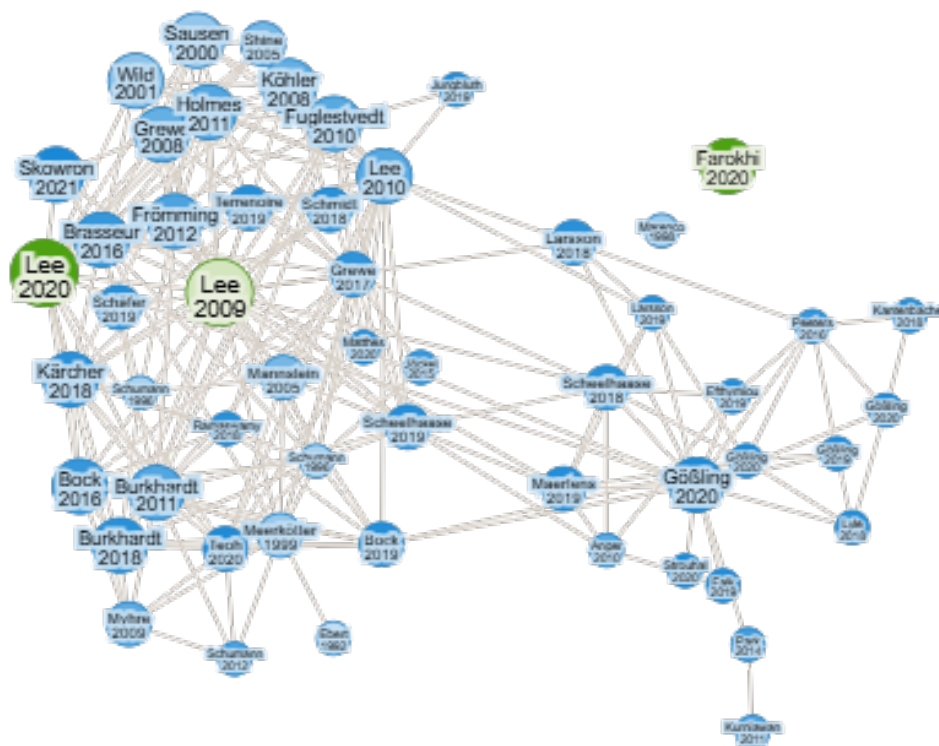
Utilizando a metodologia exposta nesse capítulo, espera-se que a análise bibliométrica e a revisão bibliográfica permitam identificar os países que estão à frente na produção científica relacionada a cada tecnologia, os financiadores que mais investem em cada setor, as principais instituições de pesquisa relacionadas, bem como as linhas de pesquisa que dominam o cenário de transição energética na aviação.

2.3 ESTRATÉGIAS DE BUSCA E PALAVRAS-CHAVE NO SCOPUS

As estratégias de busca foram definidas de acordo com as principais questões de pesquisa e subdivididas em 14 buscas específicas. Cada busca utilizou palavras-chave e delimitações geográficas (mundo ou Brasil), conforme listado abaixo:

- Busca 1 - Palavras: *Aviation emissions*; Região: Mundo.
- Busca 2 - Palavras: *Greenhouse gas emissions*; Região: Mundo.

Figura 5 – Rede de documentos similares à “*Aviation and global climate change in the 21st century*”, “*Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation*” de Lee et al. (2010) e “*Future Propulsion Systems and Energy Sources in Sustainable Aviation*” de Farokhi (2020), fornecida pelo Research Rabbit.



Fonte: gerado pelo autor através do Research Rabbit em 17/09/2024.

- Busca 3 - Palavras: *Greenhouse gas emissions*; Região: Brasil.
- Busca 4 - Palavras: *Sustainable Aviation Fuel*; Região: Mundo.
- Busca 5 - Palavras: *Sustainable Aviation Fuel*; Região: Brasil.
- Busca 6 - Palavras: *Biofuels*; Região: Mundo.
- Busca 7 - Palavras: *Alternative Jet Fuel*; Região: Mundo.
- Busca 8 - Palavras: *Alternative Jet Fuel*; Região: Brasil.
- Busca 9 - Palavras: *Biojet Fuel*; Região: Mundo.
- Busca 10 - Palavras: *Biojet Fuel*; Região: Brasil.
- Busca 11 - Palavras: *Hydrogen Storage*; Região: Mundo.
- Busca 12 - Palavras: *Hydrogen Storage*; Região: Brasil.
- Busca 13 - Palavras: *Hybrid Electric Aircraft*; Região: Mundo.

- Busca 14 - Palavras: *Hybrid Electric Aircraft*; Região: Brasil.

2.4 FILTROS

Para garantir a relevância dos resultados, foram aplicados filtros aos documentos recuperados. Todos os resultados foram restringidos pelos seguintes critérios:

- Data de publicação: documentos publicados entre 2003 e 2023 para verificar a tendência nos últimos vinte anos.
- Idioma: inglês, espanhol e português pois são os idiomas possíveis de estudo pelo autor.
- Áreas de estudo: energia, engenharia, ciências ambientais, engenharia química, química, ciências sociais, negócios, gestão e contabilidade, ciências da computação, ciências dos materiais, ciências agrárias e biológicas, economia, econometria e finanças, ciências da Terra e planetárias e ciências da decisão, pois são as áreas de interesse no tema

Os resultados de cada busca serão discutidos no Capítulo 7, onde as análises específicas dos metadados são apresentadas.

2.5 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS METADADOS

Nas buscas foram analisados os seguintes metadados:

- Número de publicações por ano: com o objetivo de identificar tendências temporais e o crescimento do interesse no tema ao longo dos anos.
- Número de publicações por país: para mapear a distribuição geográfica das pesquisas e observar a liderança e contribuição de diferentes países em cada tecnologia.
- Número de publicações por financiador: para identificar as principais fontes de financiamento e, portanto, os possíveis interesses e incentivos para pesquisas nessa área.
- Principais instituições de pesquisa: para analisar quais instituições e universidades estão na vanguarda das pesquisas na área de combustíveis sustentáveis para aviação e tecnologias de propulsão alternativa, com foco especial nas instituições brasileiras.
- Número de documentos por área de pesquisa: para verificar quais áreas têm colaborado mais para a pesquisa sobre transição energética na aviação.

Essas informações serão fundamentais para a análise bibliométrica apresentada no Capítulo 7, onde os padrões de publicação, distribuição geográfica, colaboração institucional e internacional serão detalhados.

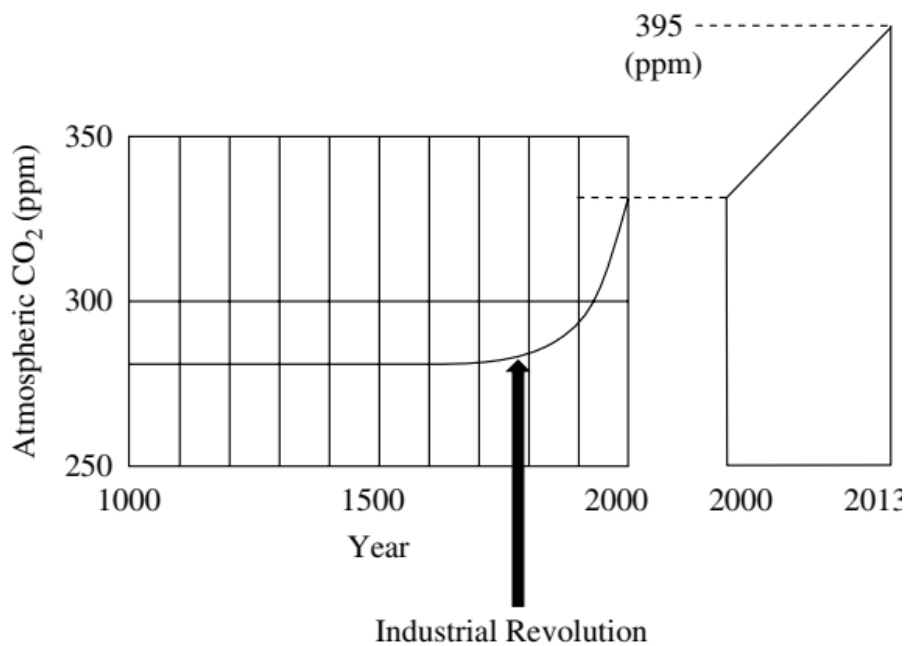
3 ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS DAS AERONAVES ATUAIS

A aviação tem um impacto significativo no meio ambiente, tanto no solo, perto e longe dos aeroportos, quanto nas camadas superiores da atmosfera, devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE), material particulado (MP) e outros poluentes. Esses impactos podem ser quantificados em termos de forçamento radiativo (RF), uma métrica que representa a mudança na energia do sistema climático, utilizada para estimar o efeito das emissões sobre o aquecimento global (LEE et al., 2010). O RF positivo, associado a gases como o dióxido de carbono (CO_2) e o vapor de água (H_2O), indica uma contribuição para o aquecimento global, enquanto o RF negativo representa um efeito de resfriamento, como observado em certos aerossóis de sulfato segundo Bergero et al. (2023).

3.1 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O principal combustível utilizado na aviação é o querosene de aviação, especialmente o Jet A-1, que tem uma estrutura molecular predominante de $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ e é amplamente utilizado em todo o mundo. Sua combustão completa resulta na formação de CO_2 e H_2O , ambos GEE que, uma vez emitidos, contribuem para o aquecimento global ao absorver e reemitir radiação infravermelha na atmosfera (FAROKHI, 2020). A Figura 6 a seguir mostra um aumento exponencial da concentração de CO_2 na atmosfera desde a Revolução Industrial, enfatizando a relação entre o consumo crescente de combustíveis fósseis e o aumento das concentrações desse gás.

Figura 6 – Concentração de dióxido de carbono na atmosfera desde 1000 com base em dados de formações de gelo e leituras diretas desde 1958.

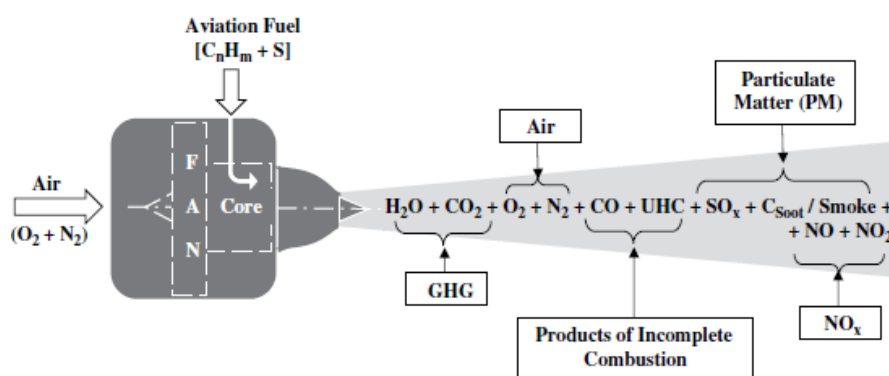


Fonte: Zumdahl e Zumdahl (2000)

Além do CO_2 , outros compostos como monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não-queimados (UHC) e outros produtos também são emitidos, como esquematizado na Figura 7. Espe-

cialmente nos casos de combustão incompleta, que ocorrem durante as fases de pouso e decolagem, aparecem com predominância o CO e UHC. Essas emissões são especialmente problemáticas em áreas próximas aos aeroportos, onde o acúmulo de poluentes afeta a qualidade do ar, gerando problemas de saúde pública. A exposição ao ozônio (O_3), que se forma a partir de reações atmosféricas envolvendo NO_x (óxidos de nitrogênio), pode agravar esses problemas respiratórios e está associada a aumentos nas taxas de hospitalização para doenças respiratórias (FAROKHI, 2020).

Figura 7 – Produtos da combustão de combustível fóssil em um motor turbofan de aeronave



Fonte: Farokhi (2020)

3.2 FORMAÇÃO DE CONTRAILS E CIRRUS INDUZIDOS PELA AVIAÇÃO

A formação dos rastros de condensação (“*contrails*”) e nuvens cirrus induzidas pela aviação são impactos significativos das operações aéreas na alta atmosfera. Essas formações ocorrem quando o vapor de água das turbinas se condensa em cristais de gelo (que podem ser nucleados por material particulado resultante da combustão), criando trilhas visíveis que podem se espalhar e evoluir para nuvens semelhantes às cirrus naturais. Essas nuvens, conhecidas como *contrail-cirrus*, têm um efeito de RF positivo, contribuindo para o aquecimento global, embora existam variações regionais e sazonais na intensidade desse efeito (LEE et al., 2010).

A formação de *contrails* é particularmente intensa em altitudes de cruzeiro, onde as condições atmosféricas favorecem a sua formação. A camada de ozônio, situada na estratosfera entre 15 e 35 km de altitude, também é afetada pelas emissões de NO_x , que podem catalisar a destruição do O_3 . Essa perda do ozônio na alta atmosfera reduz a capacidade de bloqueio da radiação ultravioleta, intensificando o aquecimento global e aumentando os riscos para a saúde humana e ecossistemas sensíveis à radiação UV (FAROKHI, 2020).

3.3 EFEITOS DAS EMISSÕES DE NO_x E SO_x

As emissões de NO_x na aviação representam uma preocupação ambiental significativa. Além de contribuir para a formação de O_3 na troposfera, o NO_x pode levar à destruição do metano (CH_4), um potente GEE, causando um efeito de RF negativo (resfriamento). No entanto, o balanço global dessas interações químicas é complexo, pois o O_3 formado pelo NO_x também atua como um gás de efeito estufa, gerando um RF positivo na troposfera (LEE et al., 2010).

Além do NO_x , as emissões de compostos de enxofre (SO_x) provenientes do querosene de aviação resultam na formação de partículas de sulfato, que têm um RF negativo, pois refletem a radiação solar de volta ao espaço. Contudo, essas partículas também contribuem para problemas de saúde respiratória e poluição do ar, especialmente nas áreas urbanas próximas aos aeroportos que já foram citadas por apresentar problemas de saúde pública. A Agência de proteção ambiental (EPA) define padrões rigorosos para os níveis de concentração de ozônio, especialmente em áreas de pouso e decolagem, devido aos riscos à saúde humana, como aumento da incidência de asma e outras condições respiratórias (FAROKHI, 2020).

3.4 IMPACTO DO MATERIAL PARTICULADO E FULIGEM

Outro subproduto significativo da combustão de querosene é o material particulado, especialmente a fuligem. A fuligem, ou partículas de carbono, é conhecida por seu impacto direto no RF positivo. Essas partículas também atuam como núcleos de condensação de gelo na alta atmosfera, o que pode intensificar a formação de *contrails* e cirrus. Além disso, a fuligem depositada na superfície das calotas de gelo aumenta a absorção de radiação solar, acelerando o derretimento do gelo e o aquecimento global (FAROKHI, 2020).

3.5 ALTERNATIVAS E PERSPECTIVAS PARA REDUZIR AS EMISSÕES

Diante dos impactos ambientais das emissões da aviação, alternativas como os (SAFs) têm sido estudadas para reduzir a intensidade de carbono do setor. Bergero et al. (2023) aponta que, até 2050, o cenário de $1,5^\circ\text{C}$ da *International Renewable Energy Agency* (IRENA) prevê que cerca de 70% da demanda de energia da aviação será atendida por SAFs, enquanto 14% virá de eletricidade e hidrogênio. Entretanto, segundo o mesmo, para isso a produção de SAFs em larga escala enfrentará desafios significativos, incluindo a necessidade de expandir a produção de biomassa, que pode exigir até 300 milhões de hectares de terras agrícolas.

Os SAFs apresentam vantagens potenciais ao reduzir a emissão líquida de CO_2 , especialmente quando produzidos a partir de matérias-primas renováveis. No entanto, o impacto ambiental desses combustíveis deve ser analisado considerando todo o ciclo de vida, desde a produção e transporte até a combustão. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) avalia as emissões de ciclo de vida (core LCA) e as emissões associadas à mudança de uso da terra (ILUC), que serão detalhadas no Capítulo 5, para assegurar que os SAFs ofereçam uma vantagem ambiental real sobre os combustíveis fósseis convencionais (ANAC, 2024).

3.6 COMPENSAÇÕES E DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS LIMPAS

A implementação de estratégias para reduzir as emissões da aviação apresenta desafios técnicos e compensações. Por exemplo, a redução das emissões de NO_x pode exigir um aumento no consumo de combustível, o que eleva as emissões de CO_2 . Além disso, novos procedimentos operacionais, como evitar áreas de supersaturação de gelo para reduzir a formação de *contrails*, podem aumentar o tempo de voo e o consumo de combustível (LEE et al., 2010). Essas compensações são inerentes

à física atmosférica e comuns à engenharia aeronáutica e devem ser cuidadosamente consideradas na formulação de políticas e tecnologias para a aviação sustentável na busca de um compromisso sustentável.

Nota-se, portanto, que os impactos ambientais da aviação são amplos e complexos, abrangendo desde a emissão de GEE e poluentes atmosféricos até a formação de nuvens artificiais. A análise dos efeitos de cada componente, como CO₂, NO_x, SO_x e material particulado, demonstra a importância de reduzir a contribuição da aviação para o aquecimento global e o forçamento radiativo. O uso de SAFs e outras tecnologias representa um passo importante, mas a transição para uma aviação mais sustentável exigirá um esforço global coordenado para equilibrar as demandas operacionais com a proteção ambiental, visando um compromisso sustentável para todos os envolvidos. Para isso, conforme será observado no Capítulo 7, o crescente interesse científico em abordagens sustentáveis é fundamental, evidenciando o papel das instituições e financiadores no avanço das tecnologias de baixo carbono. Tendo isso em vista, mostra-se essencial explorar os SAFs como solução potencial de curto prazo, bem como desenvolver tecnologias alternativas, como a propulsão à hidrogênio e a eletrificação, que serão aprofundadas nos próximos capítulos. Esses elementos serão fundamentais para construir uma aviação sustentável, capaz de atender às metas de descarbonização de forma eficiente e ambientalmente responsável.

4 SOLUÇÕES PARA DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO

Considerando os desafios ambientais destacados anteriormente, torna-se essencial investigar as tecnologias emergentes que buscam reduzir o uso de combustíveis fósseis, com alternativas que vão desde Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) até a motorização híbrida-elétrica e a propulsão a hidrogênio. A busca por soluções de descarbonização na aviação tem gerado muita pesquisa e desenvolvimento, especialmente para a indústria da aviação, que representa uma parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Esses três caminhos principais representam os pilares de uma transição para uma aviação mais sustentável e de baixo carbono. Cada uma dessas tecnologias apresenta oportunidades e desafios específicos em termos de implementação, potenciais de redução de emissões, vantagens e limitações, os quais serão explorados ao longo deste capítulo.

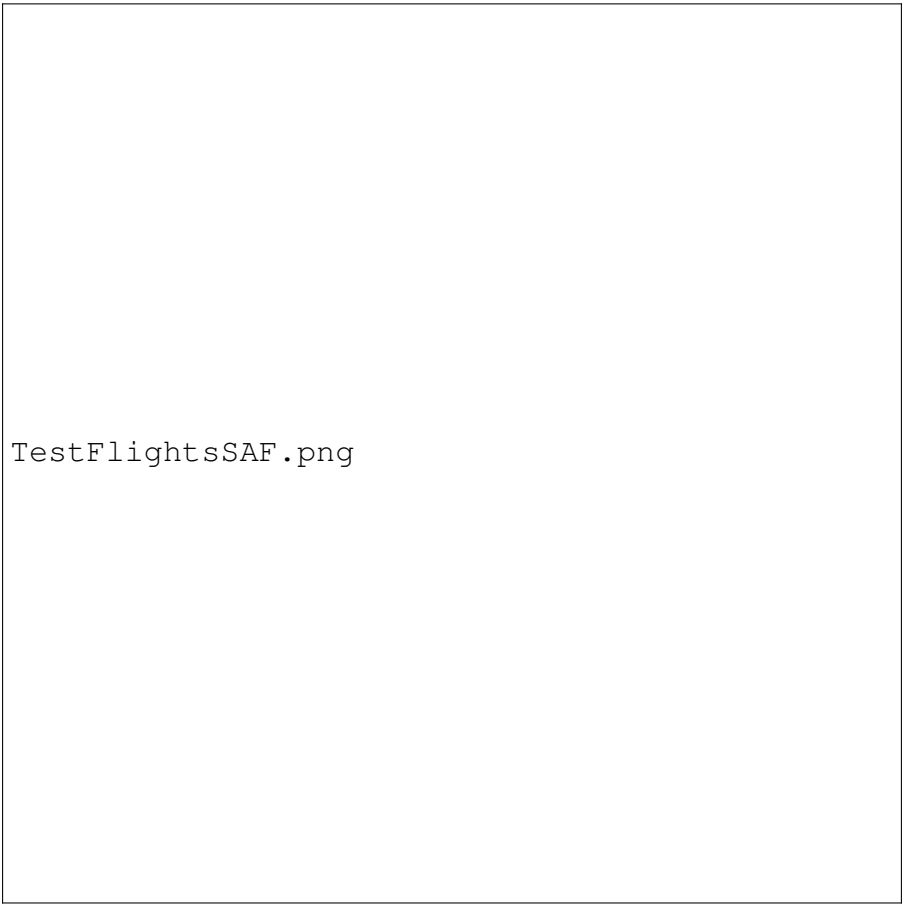
4.1 COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO (SAFS)

Os SAFs são considerados uma das alternativas mais promissoras para substituir o combustível fóssil na aviação comercial, pois podem ser usados em aeronaves e infraestrutura de abastecimento já existentes, sem grandes modificações (“*drop-in*”). Nos SAFs estão inclusos biocombustíveis e combustíveis sintéticos, ambos projetados para reduzir as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida, atendendo aos critérios de sustentabilidade definidos pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO). Segundo Bergero et al. (2023), os SAFs devem proporcionar uma redução mínima de 10% nas emissões líquidas de carbono em comparação com o querosene de aviação, muitos respeitando a biodiversidade e promovendo o desenvolvimento econômico e social local.

Os SAFs já demonstraram sua viabilidade em voos comerciais e militares. Desde 2011, como se vê na Figura 8, companhias aéreas como United, Lufthansa, KLM e Qatar Airways já havia realizado mais de 1.700 voos utilizando misturas de SAF, com até 50% de combustível renovável combinado ao querosene tradicional (FAROKHI, 2020). No setor militar, o caça Saab Gripen, por exemplo, foi testado com 100% de biocombustível à base de óleo de colza, sem necessidade de alterações no motor, evidenciando a compatibilidade desse tipo de combustível com aeronaves existentes.

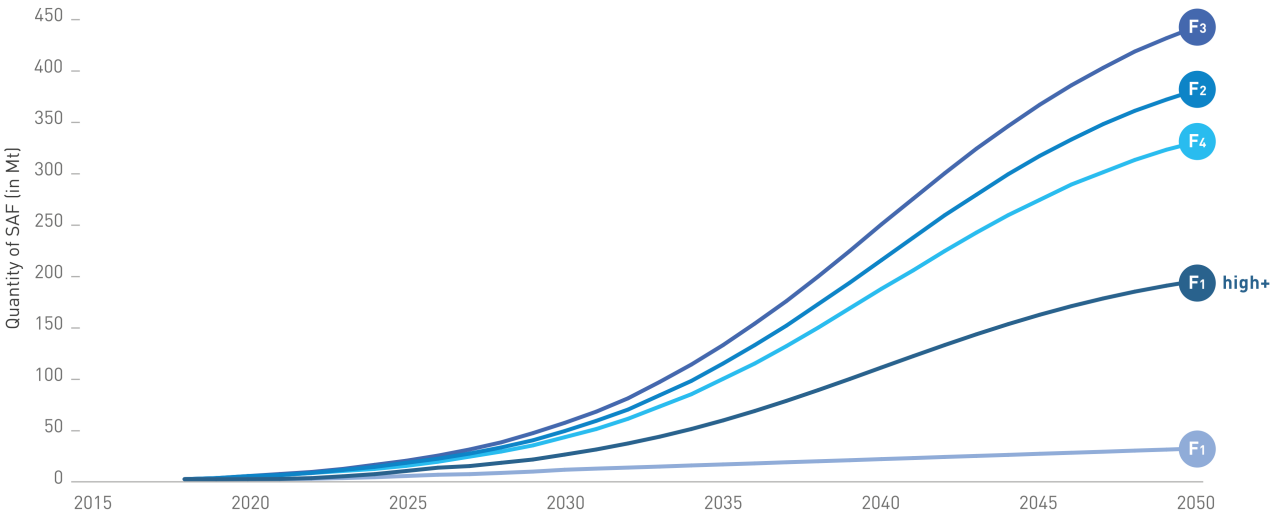
Para atender às metas de neutralidade de carbono da indústria, o crescimento da produção de SAFs precisa ser acelerado. O *Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century*, publicado pelo Air Transport Action Group (2023) projeta cenários que variam de um crescimento linear na produção de SAFs até 2050 a um aumento exponencial, alcançando volumes que poderiam suprir até 90% do consumo de combustível da aviação. Esses cenários, mostrados na Figura 9, indicam a necessidade de investimentos muito maiores do que os atuais, na ordem de trilhões de dólares, e da construção de milhares de instalações de produção para que os SAFs possam substituir efetivamente o querosene até meados do século.

Figura 8 – Voos de teste (2008–2013) utilizando combustíveis sustentáveis de aviação.



Fonte: INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (2015).

Figura 9 – Análise do aumento de produção necessário para diversos cenários e volumes esperados de SAF necessários em 2050, assumindo um fator de redução de emissões de 100% em 2050.

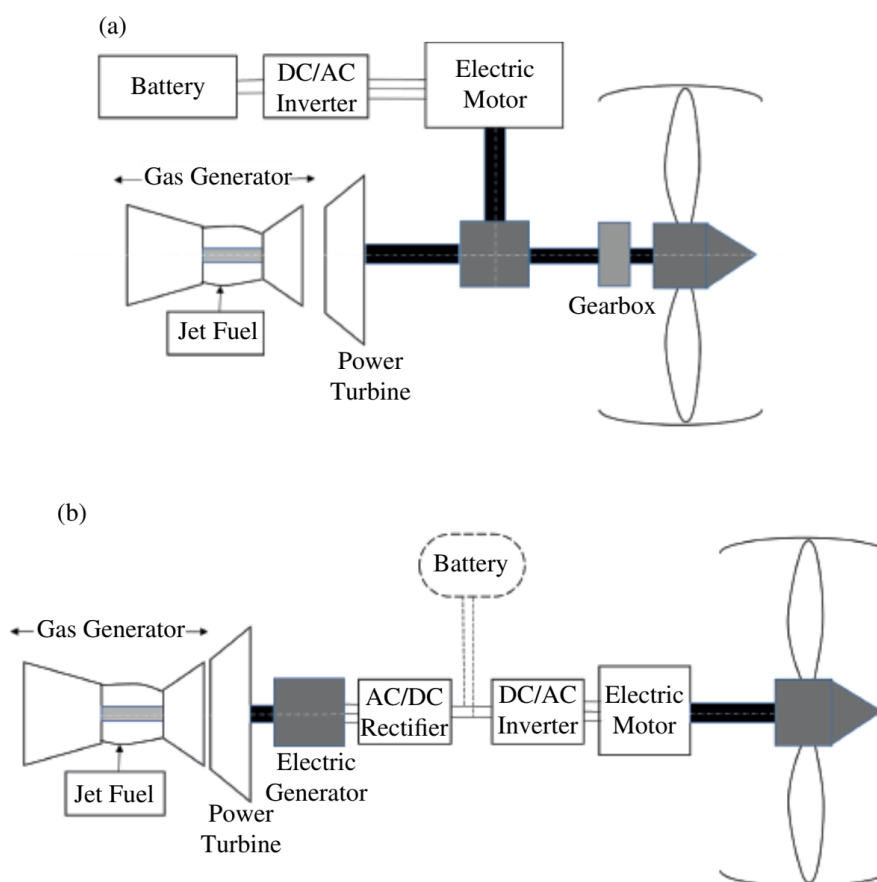


Fonte: ATAG (2021)

4.2 MOTORIZAÇÃO HÍBRIDA-ELÉTRICA

A motorização híbrida-elétrica é uma alternativa promissora para reduzir as emissões da aviação. Em um sistema híbrido, uma combinação de turbinas a gás e motores elétricos é usada para gerar a propulsão da aeronave. Essa tecnologia pode ser dividida em configurações paralelas e seriais, ambas representadas na Figura 10. Na configuração paralela, tanto a turbina a gás quanto o motor elétrico contribuem para o empuxo; já na configuração serial, a turbina a gás aciona um gerador elétrico, que alimenta o motor elétrico responsável pela propulsão (FAROKHI, 2020).

Figura 10 – Desenho esquemático de sistemas de propulsão híbrida-elétrica: (a) conceito de propulsão híbrida-elétrica paralela; (b) conceito de propulsão híbrida-elétrica em série.



Fonte: Farokhi (2020)

Embora os sistemas híbridos apresentem potencial para reduzir o consumo de combustível, eles enfrentam desafios tecnológicos, especialmente relacionados ao peso e à densidade de energia das baterias. A Boeing, por exemplo, já utiliza baterias em aeronaves como o 787 Dreamliner para fornecer energia a sistemas auxiliares (FAROKHI, 2020), mas ainda não há uma aplicação prática para a propulsão principal. A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que até 2050 apenas uma pequena parcela dos voos, especificamente aqueles de curta distância, poderá ser operada com sistemas híbridos ou elétricos devido à baixa densidade de energia dessas alternativas.

Para avaliar a maturidade dessas tecnologias e seu potencial para aplicação comercial, é utilizada a

escala de nível de prontidão tecnológica (*Technology Readiness Level* - TRL), criada pela NASA. Essa escala, que varia de 1 a 9 (NASA, 2017), mede o grau de desenvolvimento de uma tecnologia, desde o estágio inicial de pesquisa básica até a validação em condições reais. A motorização híbrida-elétrica, por exemplo, ainda está nos níveis intermediários da escala TRL (4 a 6), o que indica a necessidade de mais pesquisas e desenvolvimento para atingir uma aplicação prática em larga escala.

4.3 PROPULSÃO A HIDROGÊNIO

A propulsão a hidrogênio é considerada uma das soluções mais promissoras para a aviação a longo prazo, especialmente pela ausência de carbono na sua composição e, consequentemente, de emissões de CO₂. Quando queimado, o hidrogênio emite apenas vapor de água, o que o torna altamente atraente para uma aviação livre de carbono. No entanto, essa tecnologia ainda enfrenta grandes desafios relacionados à produção, armazenamento (seção 7.11) e distribuição do hidrogênio.

A produção sustentável de hidrogênio depende de processos como a eletrólise da água usando energia renovável, uma opção ainda cara e que demanda muita energia. Atualmente, o método mais comum de produção de hidrogênio, *Steam Methane Reforming* (SMR), embora tecnologicamente maduro, gera emissões de GEE. Além disso, o hidrogênio possui uma densidade energética volumétrica baixa, o que requer armazenamento em tanques criogênicos a -253 °C altamente pressurizados, aumentando a complexidade e o peso dos sistemas de armazenamento. Outro desafio é que o hidrogênio não é *drop-in*, exigindo o desenvolvimento de motores e cadeia logística específicos para essa tecnologia (FAROKHI, 2020).

Segundo Bergero et al. (2023), o hidrogênio pode ser viável para voos de curta distância, mas para rotas de longa distância ainda enfrenta limitações devido ao armazenamento e à infraestrutura necessária. O alcance das aeronaves movidas a hidrogênio seria significativamente menor do que o das aeronaves convencionais, limitando sua aplicação inicial a voos regionais e rotas de curta duração. Atualmente, a propulsão a hidrogênio se encontra nos níveis mais baixos da escala TRL (3 a 4), ainda nos estágios iniciais de desenvolvimento experimental e prototipagem.

4.4 VIABILIDADE E COMPENSAÇÕES

Embora cada uma das tecnologias apresentadas ofereça benefícios para a descarbonização da aviação, elas também apresentam desafios e compensações. O uso de SAFs, por exemplo, demanda uma produção grande de biocombustíveis e combustíveis sintéticos, o que pode aumentar a competição por terras agrícolas e recursos hídricos. Além disso, o impacto ambiental desses combustíveis precisa ser avaliado considerando todo o ciclo de vida, desde a produção até a combustão, para garantir que realmente representem uma vantagem em relação ao querosene convencional. Como citado no seção 3.5, a ANAC, por exemplo, utiliza metodologias como o LCA e ILUC para avaliar a sustentabilidade dos SAFs (ANAC, 2024).

Para a motorização híbrida-elétrica e a propulsão a hidrogênio, os desafios estão mais relacionados à infraestrutura e à tecnologia. A implementação dessas soluções exigirá investimentos em novas instalações de abastecimento, grandes mudanças nos projetos de aeronaves e até desenvolvimento de

materiais, como pode ser conferido nas Figura 63 e Figura 67 a forte presença na áreas de pesquisa relacionadas a ciências dos materiais e química. Essas tecnologias ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento (TRL baixo) e precisam superar obstáculos significativos antes de se tornarem viáveis para uso em larga escala.

Portanto, as alternativas para a descarbonização da aviação discutidas neste capítulo representam diferentes horizontes temporais e TRL. Os SAFs, por serem substitutos diretos do querosene e utilizarem a infraestrutura e motorização existentes, têm o potencial de impactar a aviação no curto a médio prazo. A motorização híbrida-elétrica oferece uma solução de médio prazo, sendo ideal para voos regionais e de curta duração, enquanto a propulsão a hidrogênio aparece como uma solução de longo prazo, tempo para que os desafios de produção e armazenamento sejam superados.

O presente capítulo complementa a análise bibliométrica discutida no Capítulo 3, que destacou o interesse científico em tecnologias de baixo carbono e a importância do apoio institucional e financeiro governamental para a inovação nesse setor. Nos próximos capítulos, serão explorados os SAFs, os custos e desafios envolvidos na transição para essas tecnologias, além das políticas e regulamentações que podem incentivar e viabilizar a adoção de combustíveis e sistemas de propulsão mais sustentáveis.

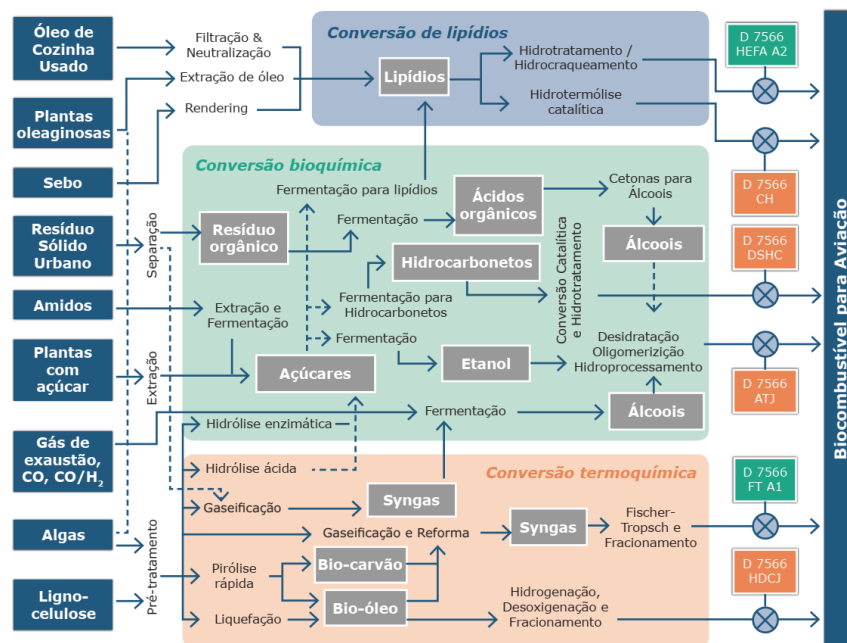
5 COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO (SAFs): A SOLUÇÃO MAIS VIÁVEL NO CURTO PRAZO

Diante da necessidade de reduzir o forçamento radiativo causado pelo setor da aviação e dos desafios associados às tecnologias emergentes de propulsão, como a motorização híbrida-elétrica e a propulsão a hidrogênio discutidas no Capítulo 4, os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) destacam-se como uma solução viável para o curto prazo. Ao contrário das tecnologias que requerem mudanças estruturais em aeronaves e infraestrutura, os SAFs podem ser utilizados com pouca ou nenhuma adaptação nos equipamentos e sistemas de abastecimento existentes, o que possibilita uma implementação mais imediata. Assim, este capítulo explora em maior profundidade os SAFs como um caminho prático e acessível para descarbonizar a aviação, destacando suas fontes, processos de produção, vantagens e desafios, e demonstrando como eles contribuem para as metas climáticas de forma mais rápida e eficiente em comparação com outras alternativas.

5.1 FONTES E PROCESSOS DE PRODUÇÃO DOS SAFS

Os SAFs podem ser produzidos a partir de uma variedade de matérias-primas, incluindo óleos vegetais, resíduos agrícolas, biomassa lenhosa e resíduos sólidos urbanos, cada um apresentando diferentes perfis de sustentabilidade e custos de produção (BOEING et al., 2013; FAROKHI, 2020). As principais rotas de produção incluem processos de hidrotratamento, síntese de Fischer-Tropsch, fermentação e gasificação, conforme ilustrado na Figura 11.

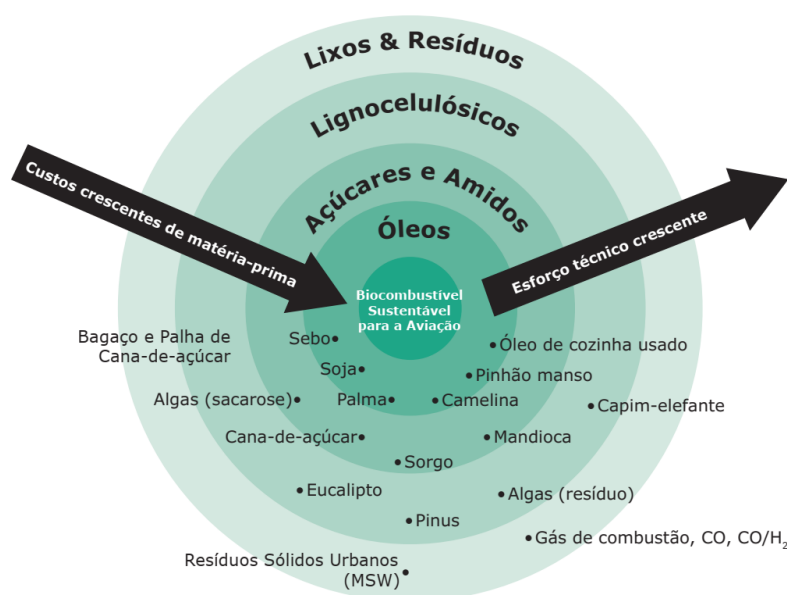
Figura 11 – Caminhos para a produção de SAFs a partir de diferentes matérias-primas.



Fonte: Boeing et al. (2013).

Essas rotas variam quanto à eficiência, complexidade e ao impacto ambiental. Cada processo de produção é adaptado ao tipo de matéria-prima utilizada, exigindo infraestrutura especializada e avanços

Figura 12 – Matérias-primas e sua classificação de acordo com os custos e o esforço técnico necessários para serem convertidas em SAFs



Fonte: Boeing et al. (2013)

tecnológicos para alcançar a viabilidade econômica em larga escala, assim como seu desenvolvimento depende de questões regionais. De maneira geral, existe um *trade-off* entre o custo da matéria prima e o esforço técnico necessário para a transformação em SAF (Figura 12).

5.2 VANTAGENS AMBIENTAIS E IMPACTO NO CICLO DE VIDA

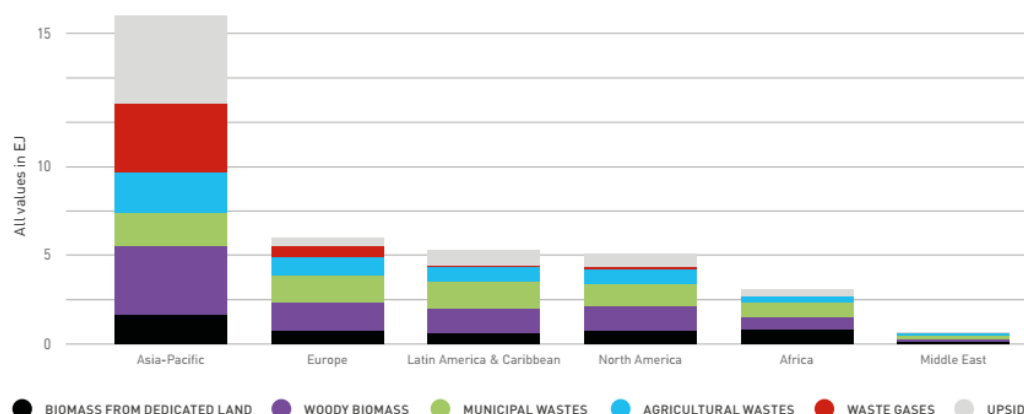
Uma das principais vantagens dos SAFs é a possibilidade de ter um ciclo de carbono “fechado”, uma vez que as matérias-primas vegetais ou resíduos que os compõem absorvem CO₂ da atmosfera durante seu crescimento. Diferente dos combustíveis fósseis, cuja queima adiciona carbono novo à atmosfera, os SAFs emitem CO₂ que foi previamente capturado, reduzindo o impacto líquido no efeito estufa (ATAG, 2021). Em algumas rotas de produção, como o processo *Fischer-Tropsch* a partir de biomassa, as emissões de SO₂ e de partículas são drasticamente reduzidas, o que também contribui para a qualidade do ar.

5.3 DESAFIOS NA PRODUÇÃO E ESCALABILIDADE DOS SAFS

Apesar de suas vantagens ambientais, a produção de SAFs em larga escala ainda enfrenta desafios significativos. A disponibilidade de matérias-primas, como resíduos agrícolas e biomassa lenhosa, é limitada e é insuficiente para atender a toda a demanda projetada. A Figura 13 mostra a distribuição global das fontes potenciais de biomassa, com a Ásia-Pacífico apresentando o maior potencial. Entretanto, a exploração dessas fontes depende de investimentos e de políticas de incentivo à produção sustentável.

Além disso, o custo de produção dos SAFs ainda é elevado quando comparado ao querosene convencional, devido aos processos complexos e à infraestrutura necessária. Na Figura 14, observa-se

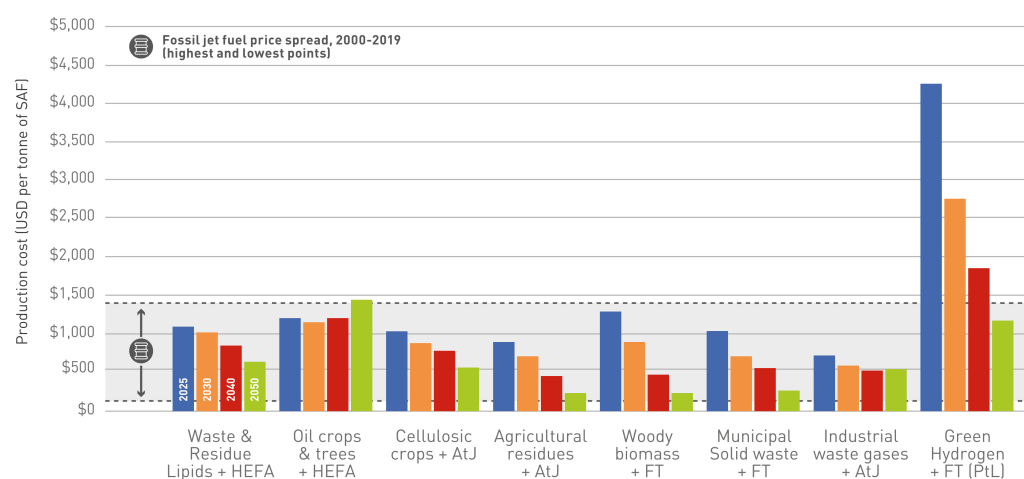
Figura 13 – Distribuição global de matérias-primas potenciais para SAFs.



Fonte: ATAG (2021)

que o custo de produção dos SAFs varia muito, com o hidrogênio verde apresentando um dos custos mais altos, enquanto os combustíveis produzidos a partir de resíduos têm potencial para serem mais competitivos (ATAG, 2021). Esse custo, porém, pode ser reduzido à medida que a tecnologia avance e políticas de subsídios e precificação de carbono sejam implementadas.

Figura 14 – Custos de produção de SAFs a partir de diferentes matérias-primas.



Fonte: ATAG (2021)

5.4 POTENCIAL DE ADOÇÃO E IMPACTO ECONÔMICO DOS SAFS

A adoção em larga escala dos SAFs não apenas contribuiria para a descarbonização da aviação, mas também poderia impulsionar a criação de uma nova indústria global de energia sustentável. Projetos como o cultivo de tabaco sem nicotina na África do Sul, com um fator de redução de emissões de até 70%, exemplificam como os SAFs podem fomentar empregos locais e diversificar economias agrícolas (FAROKHI, 2020). Além disso, as políticas de incentivo, como as aplicadas ao etanol e biodiesel no Brasil no programa Próalcool e nos Estados Unidos, respectivamente, mostram que o apoio governamental é fundamental para tornar os SAFs competitivos e acessíveis no mercado global. Esses exemplos de políticas de apoio mostram que o desenvolvimento de uma indústria de SAFs depende

fortemente de ações governamentais que incentivem a pesquisa, o desenvolvimento e a produção em larga escala.

Como mostra a ATAG (2021), com um crescimento anual médio esperado de 22% na produção de SAFs entre 2025 e 2035, segundo projeções de um cenário intermediário, a expansão desse setor pode contribuir para a criação de uma cadeia de valor global, incluindo o desenvolvimento de infraestrutura de produção e distribuição. Além disso, o aumento da produção de SAFs pode reduzir gradualmente o custo desses combustíveis, tornando-os uma alternativa mais acessível no médio e longo prazo.

Com esse nível de crescimento, o setor de SAFs exige o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta, que inclui refinarias, logística para transporte e sistemas de abastecimento nos aeroportos. O objetivo torna-se estabelecer uma cadeia de valor que conecte fornecedores de matérias-primas, produtores de SAFs e consumidores finais (companhias aéreas), criando uma estrutura que permita a produção e a distribuição eficientes em escala global. Este cenário prevê que à medida que a produção de SAFs aumenta e a tecnologia se torna mais madura, o custo por unidade de combustível tende a cair. Essa redução de custo se deve principalmente à economia de escala e à maior eficiência dos processos de produção, assim como a incentivos governamentais e precificação de carbono. Em cenários em que a produção de SAFs é fortemente incentivada, espera-se que o preço se torne cada vez mais competitivo em comparação ao querosene de aviação (ATAG, 2021).

Deste modo, nota-se que os combustíveis sustentáveis de aviação representam uma solução prática e de curto prazo para a descarbonização da aviação, oferecendo uma alternativa viável ao querosene de aviação com menores emissões de GEE e impacto ambiental. Considerando que as aeronaves atualmente produzidas têm uma vida útil operacional de aproximadamente 20 anos, os SAFs apresentam-se como uma solução essencial para descarbonizar o setor enquanto a tecnologia propulsiva existente ainda está em uso. No entanto, a plena implementação dos SAFs dependerá de investimentos substanciais em infraestrutura, políticas de incentivo e avanços tecnológicos. À medida que o mundo se move em direção a uma economia de baixo carbono, os SAFs desempenham um papel importante, atendendo à necessidade imediata de reduzir as emissões do setor da aviação e preparando o terreno para uma transição gradual para tecnologias emergentes de propulsão, discutidas no Capítulo 4.

6 CUSTOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA AVIAÇÃO

Diante da urgência climática, a aviação enfrenta o grande desafio de descarbonizar suas operações em um setor que ainda depende majoritariamente de combustíveis fósseis. A transição para alternativas mais sustentáveis exige investimentos significativos e este capítulo analisa alguns dos custos dessa transição, destacando os desafios financeiros, infraestruturais e de mercado que precisam ser superados para que o setor possa alcançar as metas de emissões líquidas zero até 2050 (ATAG, 2021).

6.1 CUSTOS ATUAIS E PROJEÇÕES PARA SAFS

Os SAFs são uma das alternativas mais promissoras para substituir o combustível fóssil no curto prazo, mas o custo é uma barreira significativa à sua adoção. Atualmente, o custo dos SAFs varia entre 2 a 4 vezes o preço do querosene de aviação, devido aos altos custos das matérias-primas e dos processos de conversão (BERGERO et al., 2023). Por exemplo, o custo de produção de combustíveis sintéticos para aviação, considerando hidrogênio eletrolítico e carbono capturado, gira em torno de US\$ 2,60 a US\$ 3,20 por litro, o que excede consideravelmente o custo do querosene fóssil (BERGERO et al., 2023).

Essa diferença de custo torna-se ainda mais crítica para regiões em desenvolvimento, onde a demanda por aviação está crescendo rapidamente. Porém é provável que com economia de escala e avanços tecnológicos, o custo dos SAFs poderá ser reduzido gradualmente, tornando-os uma alternativa mais acessível no médio e longo prazo.

6.2 NECESSIDADE DE INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA

A transição para SAFs e outras tecnologias sustentáveis na aviação requer além de mudanças nos custos de produção, também um investimento alto em infraestrutura. De acordo com o relatório Waypoint 2050, entre 5.000 e 7.000 instalações de produção de SAFs seriam necessárias até 2050 para suprir a demanda global e atender às metas de descarbonização do setor (ATAG, 2021). O custo estimado para construir essa infraestrutura, como mostrado na Figura 15, varia entre 1 e 1,45 trilhões de dólares, com investimentos concentrados na construção de instalações de produção e sistemas de logística e abastecimento.

Essas novas instalações funcionarão ainda melhor se estiverem distribuídas por diversas regiões do mundo, aproveitando as matérias-primas locais e aumentando a segurança energética. Como mostra a Figura 16, as necessidades de infraestrutura variam por região, com a Ásia-Pacífico exigindo o maior número de instalações, seguida pela Europa e América do Norte. Esse investimento, embora elevado, representa apenas cerca de 6% das despesas anuais globais de capital em petróleo e gás, indicando que o investimento necessário, apesar de significativo, é factível se for apoiado por políticas públicas e incentivos governamentais.

Figura 15 – Investimento total em infraestrutura necessário (bilhões de USD) no mundo e por continente

Scenario		Global	Africa	Asia - Pacific	Europe	Latin America & Caribbean	Middle East	North America
1	Pushing technology and operations	\$1,250	\$90	\$481	\$259	\$161	\$44	\$212
2	Aggressive SAF deployment	\$1,450	\$101	\$554	\$306	\$183	\$55	\$252
3	Aspirational and aggressive technology perspectives	\$1,100	\$80	\$421	\$219	\$142	\$36	\$180

Fonte: ATAG (2021).

Figura 16 – Número necessário de instalações, globalmente e por continente

Scenario		Global	Africa	Asia - Pacific	Europe	Latin America & Caribbean	Middle East	North America
1	Pushing technology and operations	5,904	410	2,270	1,256	726	217	1,025
2	Aggressive SAF deployment	7,026	464	2,661	1,525	843	279	1,254
3	Aspirational and aggressive technology perspectives	4,964	355	1,940	1,027	623	172	847

Fonte: ATAG (2021)

6.3 POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS E IMPACTO ECONÔMICO

Além de contribuir para a descarbonização, a transição para SAFs apresenta um grande potencial de criação de empregos e desenvolvimento econômico. Estima-se que a produção de SAFs poderá gerar cerca de 13 a 14 milhões de novos postos de trabalho em todo o mundo Figura 17 , dependendo do cenário de implementação seguido (ATAG, 2021). Esse impacto é especialmente relevante em regiões que dependem fortemente de setores de baixa tecnologia ou de economias agrícolas, como a África e a América Latina, onde a produção de biocombustíveis pode fomentar o desenvolvimento econômico local, fortalecendo assim os pilares social e econômico que também compõem o conceito de sustentabilidade em conjunto com o pilar ambiental.

Figura 17 – Potenciais indicativos de criação de empregos para a produção de SAF em todo o mundo e por continente.

Scenario		Global	Africa	Asia - Pacific	Europe	Latin America & Caribbean	Middle East	North America
1	Pushing technology and operations	13.5 m	1.2 m	5.6 m	2.4 m	1.9 m	0.4 m	2.0 m
2	Aggressive SAF deployment	14.1 m	1.2 m	5.9 m	2.5 m	2.0 m	0.4 m	2.1 m
3	Aspirational and aggressive technology perspectives	13.0 m	1.2 m	5.4 m	2.3 m	1.9 m	0.3 m	1.9 m

Fonte: ATAG (2021).

A criação de uma cadeia de valor global para SAFs, incluindo desde a produção de matérias-primas até a distribuição do combustível, promove a independência energética de diversas nações. A estruturação dessa indústria exigirá a integração de setores como aviação, energia e agricultura, além de universidades e centros de pesquisa para desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis e, é claro, dos governos.

6.4 DESAFIOS E COMPETIÇÃO POR RECURSOS NATURAIS

Apesar dos benefícios econômicos e ambientais dos SAFs, a produção em larga escala desses combustíveis traz desafios complexos. Um dos principais obstáculos é a disponibilidade de terras agrícolas e recursos hídricos para o cultivo de matérias-primas, como soja, colza e biomassa lenhosa (LEE et al., 2010). Em regiões como os Estados Unidos, estima-se que a produção de uma mistura de 15% de querosene com biocombustível requereria uma área equivalente ao estado da Flórida. Esse alto consumo de terras para a produção de SAFs competiria diretamente com a produção de alimentos e com outros usos agrícolas, criando um dilema em termos de sustentabilidade e segurança alimentar.

Além disso, há o risco de emissões adicionais de óxidos de nitrogênio (N_2O) e mudanças no uso da terra que poderiam anular as reduções de emissões de CO_2 associadas aos biocombustíveis. Estudos indicam que o uso de terras para culturas de biocombustíveis pode aumentar as emissões de gases de efeito estufa, particularmente em regiões onde há conversão de florestas e savanas em áreas agrícolas (LEE et al., 2010). Para diminuir esses impactos, é importante que a indústria priorize matérias-primas provenientes de resíduos e tecnologias que minimizem o impacto ambiental, como biocombustíveis de segunda e terceira geração.

6.5 DEPENDÊNCIA DE ELETRICIDADE DE BAIXO CARBONO E HIDROGÊNIO VERDE

O desenvolvimento de SAFs, especialmente os sintéticos, também dependerá do acesso a grandes quantidades de eletricidade de baixo carbono e hidrogênio verde. Segundo o relatório da ATAG (2021), a produção de SAFs via processos como o *Power-to-Liquid* (PtL) poderia consumir entre 8% e 18% da eletricidade de baixo carbono global planejada para 2050, além de 23% a 56% do hidrogênio verde disponível (ATAG, 2021). Esses números destacam a necessidade de uma expansão significativa na capacidade de geração de energia renovável, especialmente em regiões com alta demanda por aviação.

Essa dependência representa um desafio adicional, pois a infraestrutura de energia renovável também é essencial para outros setores em transição para uma economia de baixo carbono. Portanto, a produção de SAFs competirá por esses recursos com a geração de eletricidade e com a descarbonização de outros setores, o que pode limitar sua viabilidade econômica e operacional no longo prazo, quando se prevê que outras tecnologias possivelmente já estarão com maior TRL.

7 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica apresentada neste capítulo reflete a abordagem metodológica proposta, onde a revisão de escopo inicial permitiu mapear palavras-chave e tópicos relevantes, servindo como base para a construção de estratégias de busca no Scopus. Essa revisão foi essencial para identificar padrões globais e regionais na produção científica sobre transição energética na aviação, que foram posteriormente ampliados e aprofundados. A integração entre os dados qualitativos (revisão narrativa crítica) e quantitativos (análise bibliométrica) possibilitou uma visão mais abrangente dos desafios e oportunidades relacionados à descarbonização da aviação.

A partir das 14 buscas realizadas no Scopus mencionadas no Capítulo 2, foram extraídos os gráficos de maior interesse para análise dos metadados de maneira integrativa, por exemplo:

- **SAFs:** o crescimento acelerado de publicações sobre SAFs, observado na análise bibliométrica, foi explorado na revisão narrativa para destacar os avanços e desafios da produção em larga escala, como apresentado no Capítulo 5.
- **Armazenamento de hidrogênio:** a forte presença da China no tema reflete sua liderança no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, alinhando-se às barreiras e oportunidades analisadas, especialmente no que se refere à infraestrutura e aos custos associados, como visto no Capítulo 4.
- **Motorização híbrida-elétrica:** a predominância da engenharia na análise bibliométrica enfatiza os desafios técnicos e a maturidade tecnológica (TRL) dessa alternativa, como igualmente visto no Capítulo 4.

Estes resultados e discussões são detalhados a seguir para cada uma das buscas realizadas.

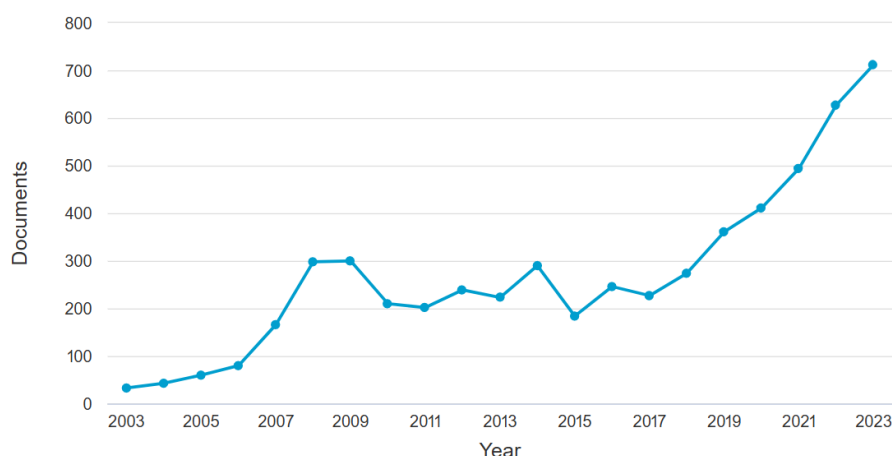
7.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 01

No intuito de entender melhor os impactos ambientais por parte da aviação, as primeiras buscas giraram em torno disso, com as palavras-chave (*Aviation Emissions*) escolhidas para verificar as publicações em âmbito global, que tratam da redução das emissões de gases de efeito estufa pela aviação.

- **Distribuição temporal**

Observa-se na Figura 18 um aumento constante nas publicações desde o início dos anos 2000, certa oscilação entre 2000 e 2017 e um crescimento mais acentuado a partir de 2018.

Figura 18 – Número de publicações por ano no mundo para *Aviation Emissions*

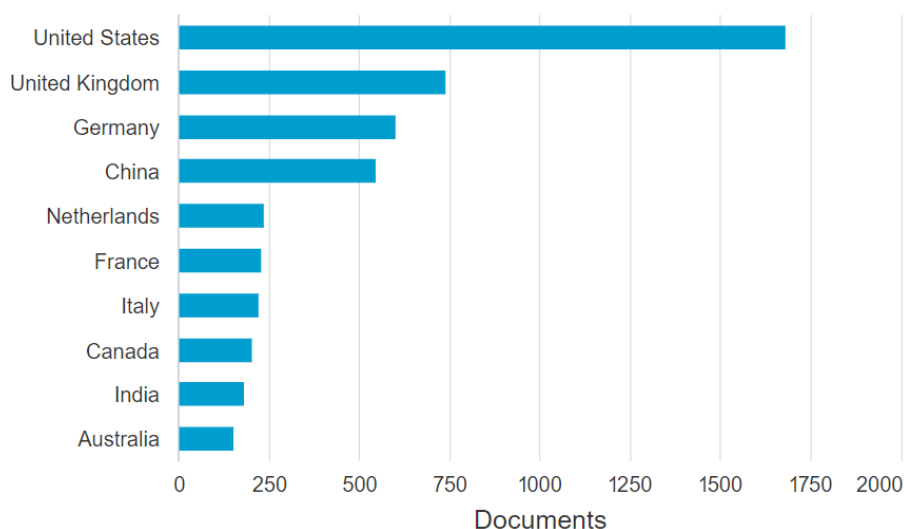


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Distribuição geográfica

Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha e China são os países que mais publicam no tema (Figura 19), destacando a responsabilidade das maiores economias nas pesquisas para mitigar o impacto ambiental da aviação.

Figura 19 – Número de publicações por país no mundo para *Aviation Emissions*

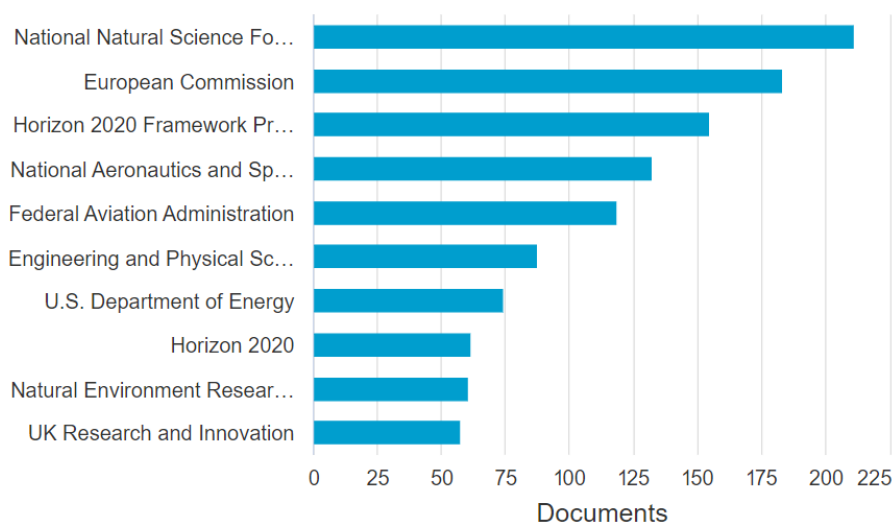


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Financiadores

A fundação nacional de ciências naturais da China e a comissão europeia são destaques entre os financiadores (Figura 20), mostrando interesse governamental em inovação e pesquisa aplicada na aviação.

Figura 20 – Número de publicações por financiador no mundo para *Aviation Emissions*

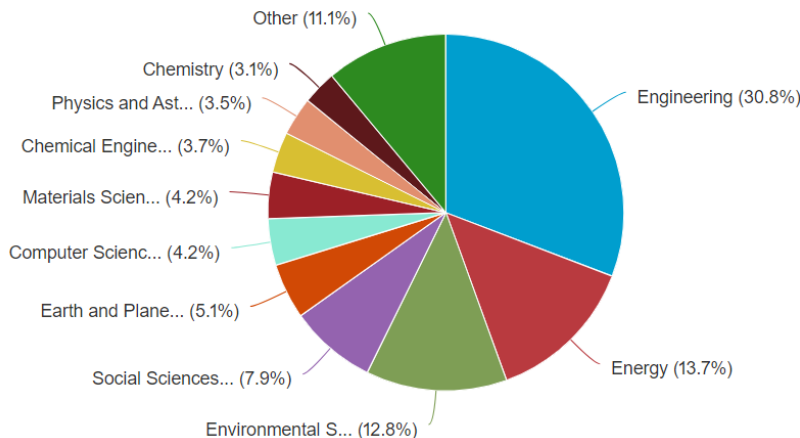


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Áreas de pesquisa

Conforme a Figura 21, as áreas de engenharia e ciências ambientais são as que mais publicam quando se fala em emissões da aviação. Isso reflete a ênfase na pesquisa para soluções tecnológicas de redução de emissões.

Figura 21 – Número de publicações por área de pesquisa no mundo para *Aviation Emissions*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

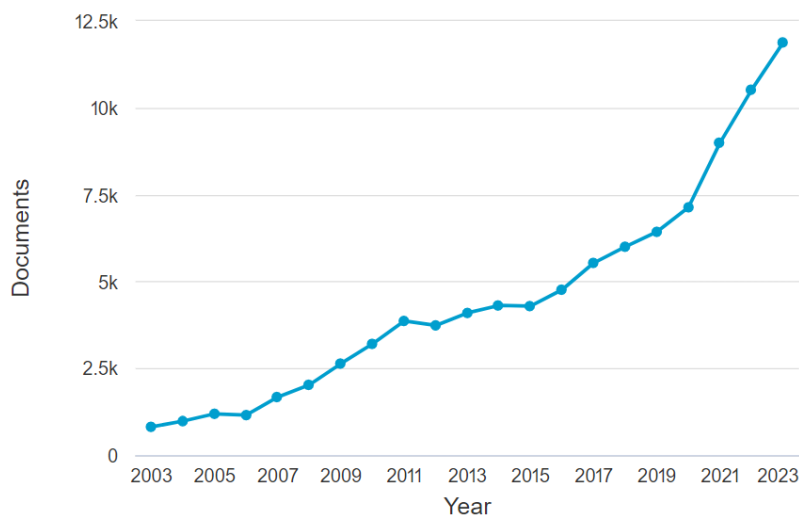
7.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 02

Esta busca analisa o panorama global das publicações sobre emissões de gases de efeito estufa.

• Distribuição temporal

As publicações mostram um aumento considerável desde 2003 e, como se vê na Figura 22 um aumento significativo na taxa de crescimento a partir de 2015, o que corresponde aos compromissos globais com o Acordo de Paris e a agenda de descarbonização da aviação até 2050.

Figura 22 – Número de publicações por ano no mundo para *Greenhouse Gas Emissions*

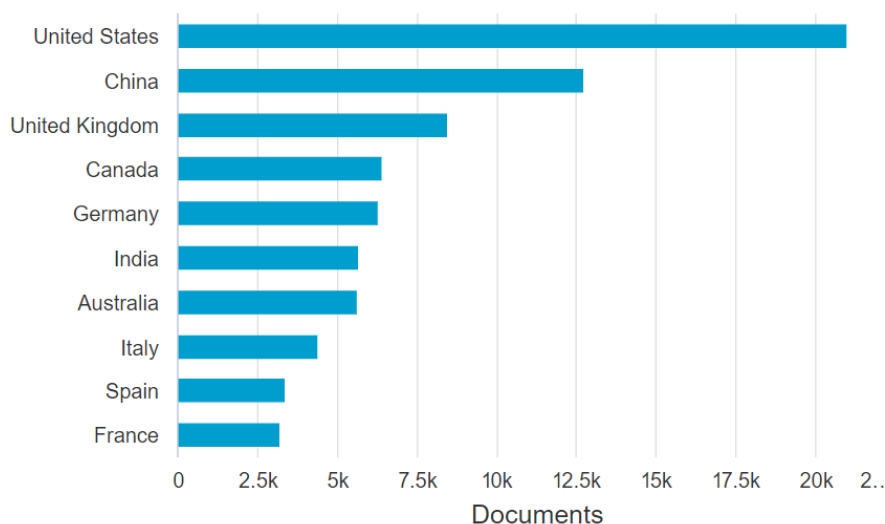


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Distribuição geográfica

A Figura 23 mostra o número de publicações científicas a respeito da emissão de gases de efeito estufa. Os EUA, China e Reino Unido são os líderes, sendo que nesse indicador a China começa a se aproximar dos EUA. Esses dados mostram a participação ativa das grandes economias asiáticas e norte-americanas nas metas de descarbonização.

Figura 23 – Número de publicações por país no mundo para *Greenhouse Gas Emissions*

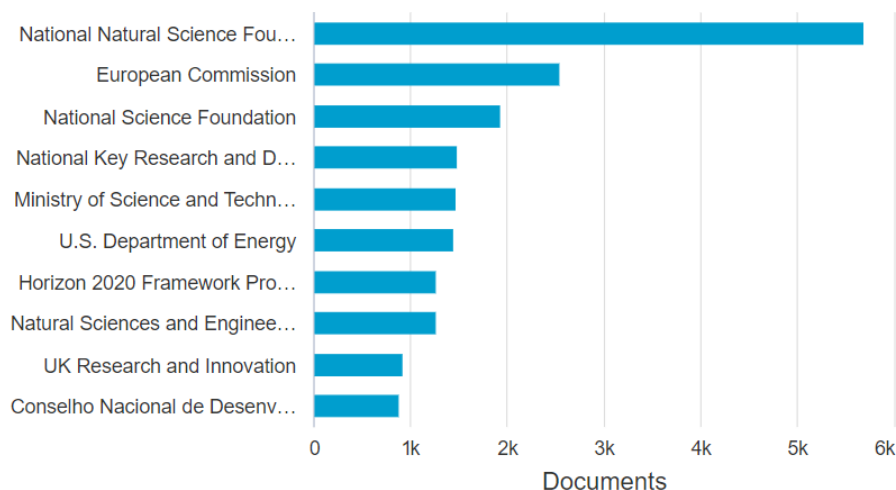


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Financiadores

National Natural Science Foundation of China e *European Commission* são destaques, o que evidencia o esforço governamental de regiões como a Ásia e a Europa na mitigação de emissões. Em seguida, em terceiro no número de publicações está a *National Science Foundation*, dos EUA, demonstrando participação ativa.

Figura 24 – Número de publicações por financiador no mundo para *Greenhouse Gas Emissions*

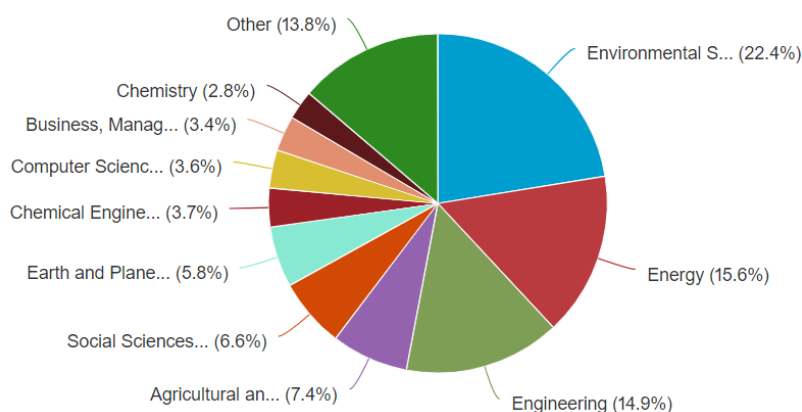


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Áreas de pesquisa

Nas áreas de pesquisa, segundo a Figura 25, ciências ambientais e energia dominam, sugerindo que a preocupação com o impacto ambiental e o desenvolvimento de fontes energéticas alternativas.

Figura 25 – Número de publicações por área de pesquisa no mundo para *Greenhouse Gas Emissions*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

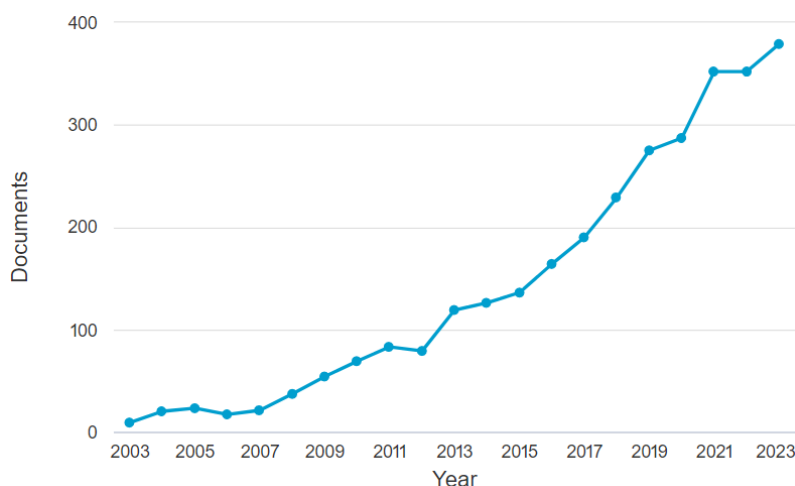
7.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 03

Esta busca faz a análise do panorama brasileiro em relação às publicações sobre emissões de gases de efeito estufa.

• Distribuição temporal

As publicações brasileiras sobre emissões de gases de efeito estufa vem crescendo em ritmo quase constante desde 2003, ano em que praticamente não eram feitas publicações científicas sobre o tema, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Número de publicações por ano no Brasil para *Greenhouse Gas Emissions*

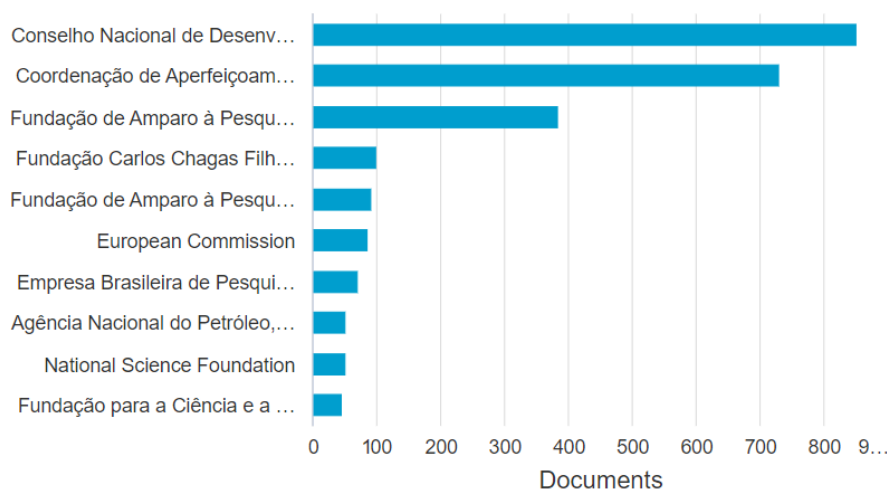


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Financiadores

Como demonstra a Figura 27, no Brasil o CAPES, CNPq e a FAPESP são os principais financiadores, mostrando o apoio governamental, sobretudo federal, na pesquisa ambiental em relação a apoios privados. Deve ser salientado, também, que o Brasil não aparece entre os países que mais publicam no tema, o que mostra que apesar de existir apoio governamental, o mesmo ainda é baixo em relação a outros países.

Figura 27 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Greenhouse Gas Emissions*

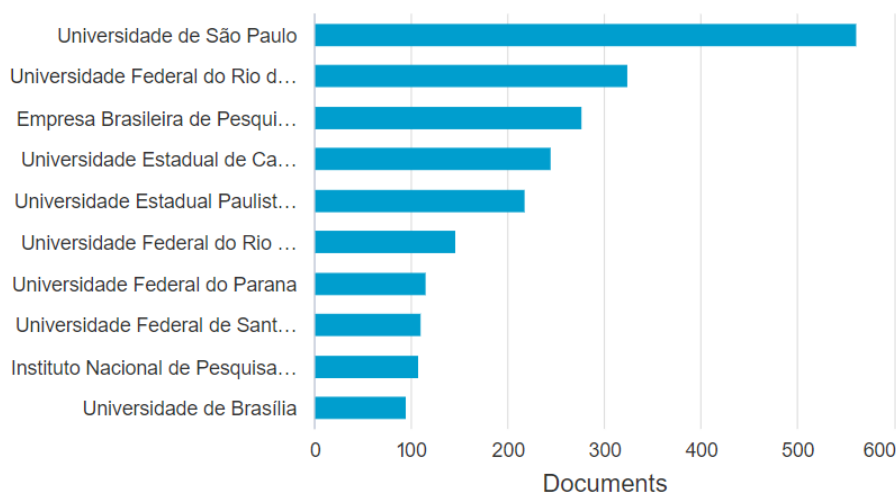


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Instituições

A Universidade de São Paulo (USP) lidera o número de publicações científicas sobre emissão de gases de efeito estufa, como mostra a Figura 28 e das dez instituições brasileiras que mais publicam, oito são universidades públicas, demonstrando o papel das universidades públicas brasileiras na inovação em combustíveis, pesquisas no estado da arte e em providências ambientais.

Figura 28 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Greenhouse Gas Emissions*

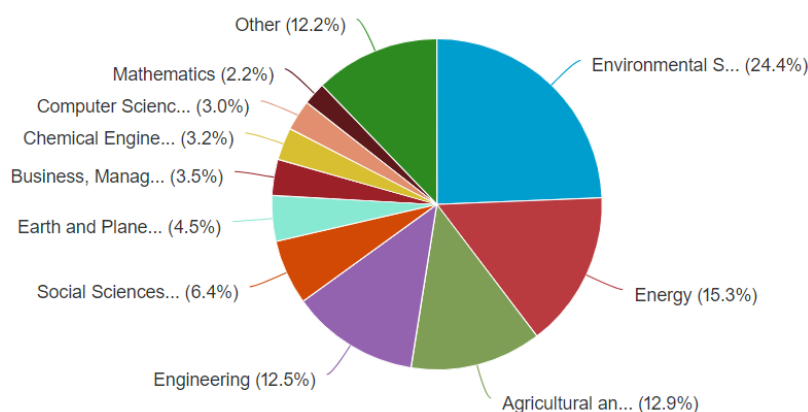


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Áreas de pesquisa

Das áreas de pesquisa que mais publicam, como pode ser observado na Figura 29, assim como no mundo, no Brasil aparecem ciências ambientais e energia, respectivamente.

Figura 29 – Número de publicações por área de pesquisa no Brasil para *Greenhouse Gas Emissions*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

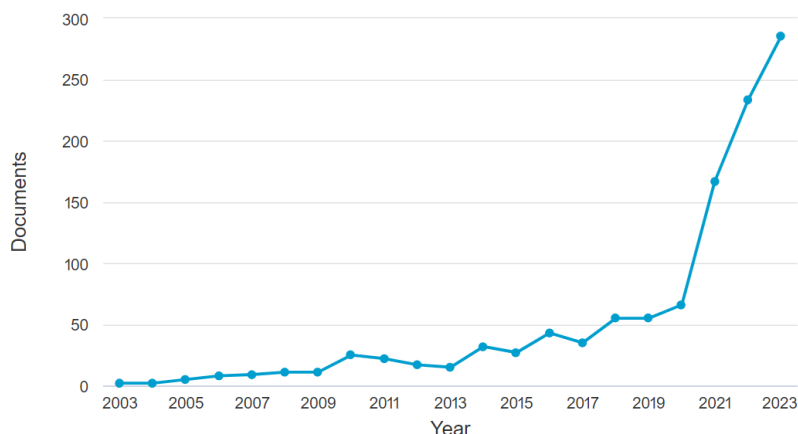
7.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 04

Essa busca abrangeu publicações globais relacionadas ao uso de SAFs. Como esse tipo de tecnologia é o foco principal de pesquisa nesse trabalho, considera-se importante entender o panorama mundial de pesquisa sobre este combustível alternativo.

• Distribuição temporal

O gráfico de documentos por ano na Figura 30 mostra um crescimento quase constante desde 2003 até 2009, um crescimento significativo nas publicações de 2015 a 2020 e um crescimento bastante acentuado de 2020 em diante. Esse aumento reflete o crescente interesse da comunidade científica e das indústrias em alternativas de combustível com menor impacto ambiental.

Figura 30 – Número de publicações por ano no mundo para *Sustainable Aviation Fuel*

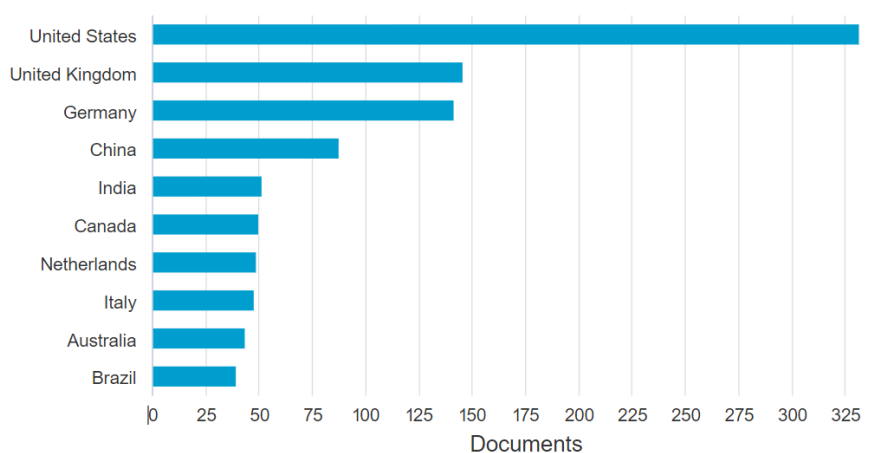


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Distribuição geográfica

A Figura 31 mostra que os Estados Unidos lideram as publicações, seguidos pelo Reino Unido e Alemanha, o que destaca o foco de países desenvolvidos na transição energética da aviação. Nota-se também que o Brasil aparece entre os 10 países que mais publicam nesse assunto, posição que merece destaque.

Figura 31 – Número de publicações por país no mundo para *Sustainable Aviation Fuel*

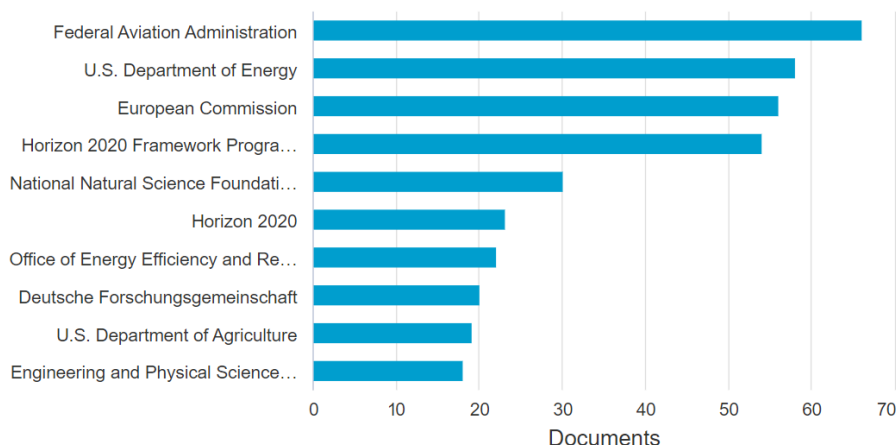


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Financiadores

A presença de financiadores como a Federal Aviation Administration (FAA) e o Departamento de Energia dos EUA, como visto na Figura 32, como os dois que mais financiam pesquisas na área, mostram que os EUA investem um alto capital para fomentar pesquisas sobre SAF.

Figura 32 – Número de publicações por financiador no mundo para *Sustainable Aviation Fuel*

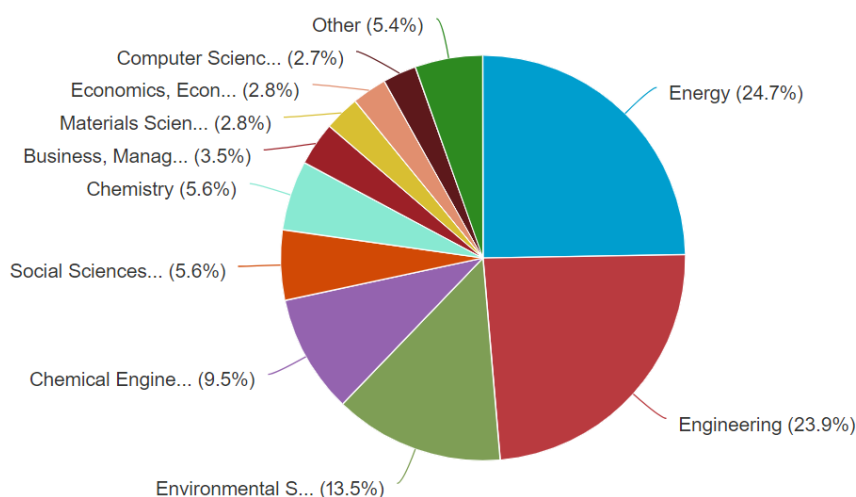


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Áreas de pesquisa

Como visto na Figura 33, as áreas que mais pesquisam são Energia, Engenharia e Ciências Ambientais, o que mostra um enfoque técnico-científico na busca por soluções de combustíveis sustentáveis.

Figura 33 – Número de publicações por área de pesquisa no mundo para *Sustainable Aviation Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

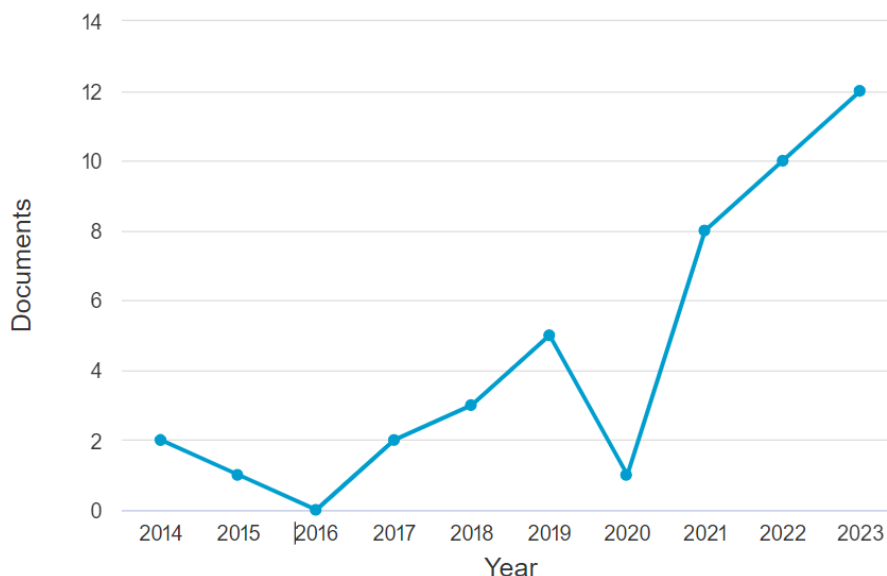
7.5 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 05

Esta busca específica para o Brasil teve o objetivo de entender a produção científica nacional sobre SAFs. O Brasil é um país de destaque no setor de biocombustíveis, e essa busca ajuda a compreender como o país se posiciona na pesquisa sobre combustíveis alternativos para aviação.

• Distribuição temporal

As publicações no Brasil começaram a ganhar impulso a partir de 2018, como pode ser visto na Figura 34, com um aumento gradual nos últimos anos e uma queda em 2020, provavelmente devido à pandemia de COVID-19, com a mesma tendência de crescimento anterior retomada após esse ano.

Figura 34 – Número de publicações por ano no Brasil para *Sustainable Aviation Fuel*



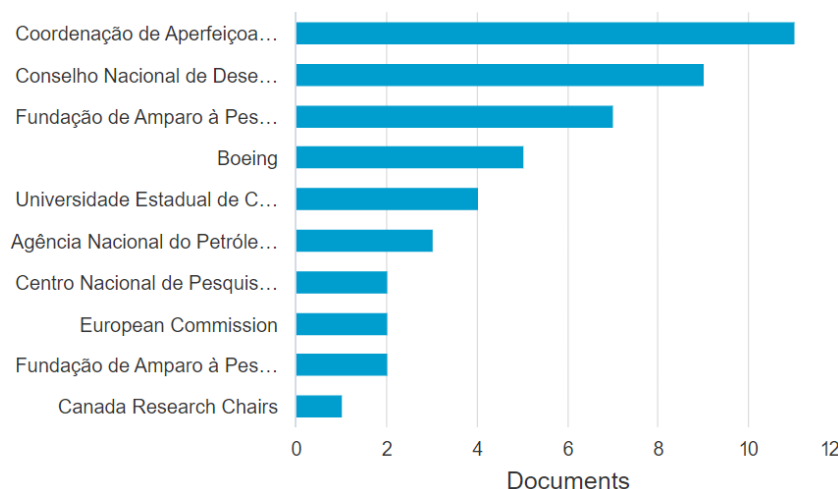
Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

Um fato importante a ser notado é que as primeiras publicações foram feitas no ano de 2014, enquanto no mundo já era publicado desde meados dos anos 2000. Em contrapartida, o crescimento atual na pesquisa é impulsionado pelo interesse nacional em combustíveis de origem renovável, o que pode estar relacionado com o forte pioneirismo brasileiro na produção de etanol e considerável participação brasileira no mercado global de agronegócio.

• Financiadores

A Figura 35 mostra que as principais agências financiadoras, como a CAPES, o CNPq, e a FAPESP, indicam o suporte do governo brasileiro e das universidades na pesquisa sobre combustíveis sustentáveis.

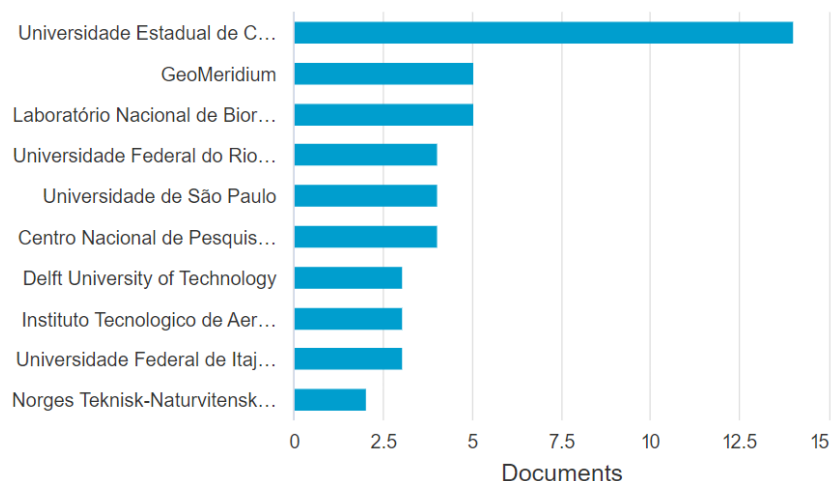
Figura 35 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Sustainable Aviation Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

• Instituições

Figura 36 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Sustainable Aviation Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 22/10/2024

As universidades brasileiras, como a Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), lideram a produção científica sobre SAF, reforçando o papel das instituições acadêmicas no desenvolvimento de biocombustíveis e se mostrando pioneiras no âmbito brasileiro, conforme visto na Figura 36.

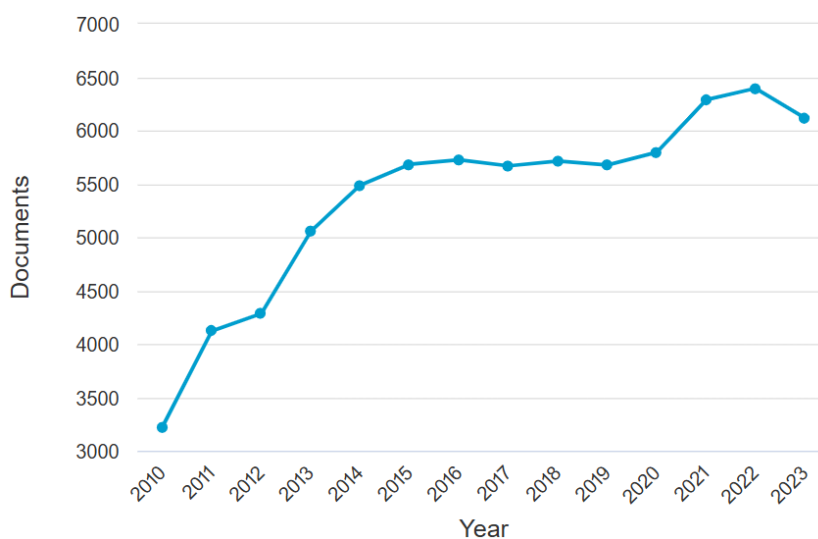
7.6 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 06

O pesquisa em *Biofuels* (biocombustíveis) de maneira mais geral reflete o crescente interesse em fontes de energia renovável para diferentes aplicações, incluindo a aviação.

• Distribuição temporal

Observa-se na Figura 37 crescimento sólidos nas publicações a partir de 2010, seguido de estabilização e crescimento novamente a partir de 2019, o que pode ter sido causado pelo contexto pandêmico.

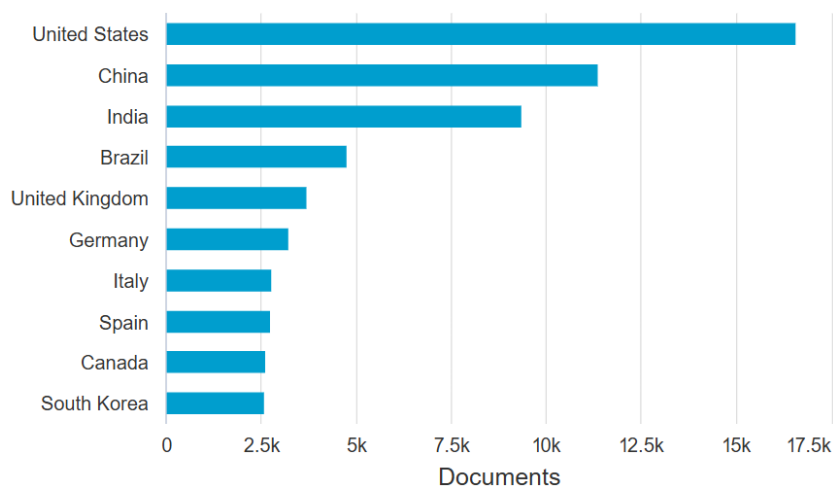
Figura 37 – Número de publicações por ano no mundo para *Biofuels*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

- **Distribuição geográfica**

Figura 38 – Número de publicações por país no mundo para *Biofuels*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

Como demonstra a Figura 38, pode-se notar a liderança dos EUA nas publicações no tema, seguido da China, Índia e Brasil, todos potências globais do agronegócio e com vasta área para plantio.

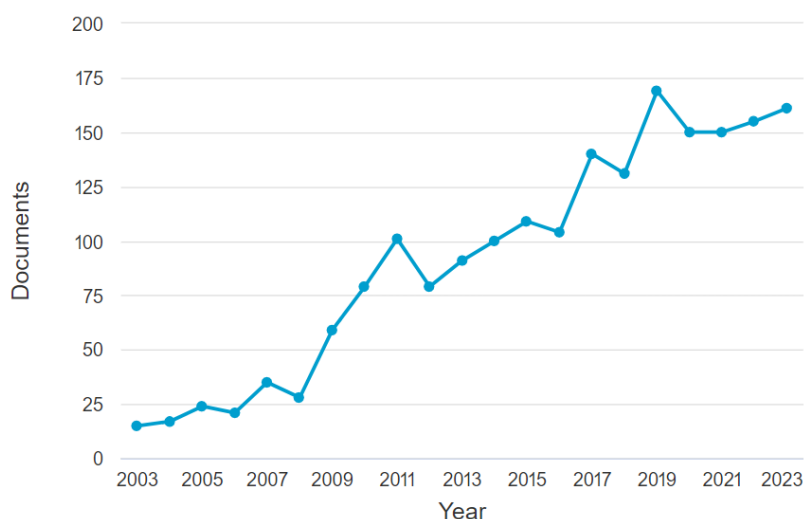
7.7 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 07

A sexta busca foi feita com as palavras *Alternative Jet Fuel* (Combustível alternativo para motor a jato) a nível global com objetivo de identificar as tendências de pesquisa sobre combustíveis alternativos, dentre estes o bioquerosene e o querosene sintético.

- **Distribuição temporal**

A produção científica sobre o tema, segundo a Figura 39, apresenta um crescimento consistente desde 2008, com picos em 2011 e 2019. Esse comportamento mostra que o desenvolvimento de combustíveis alternativos para jatos tem se tornando uma realidade cada vez mais próxima, o que pode estar sendo incentivado pelas metas de descarbonização ambiciosas estabelecidas.

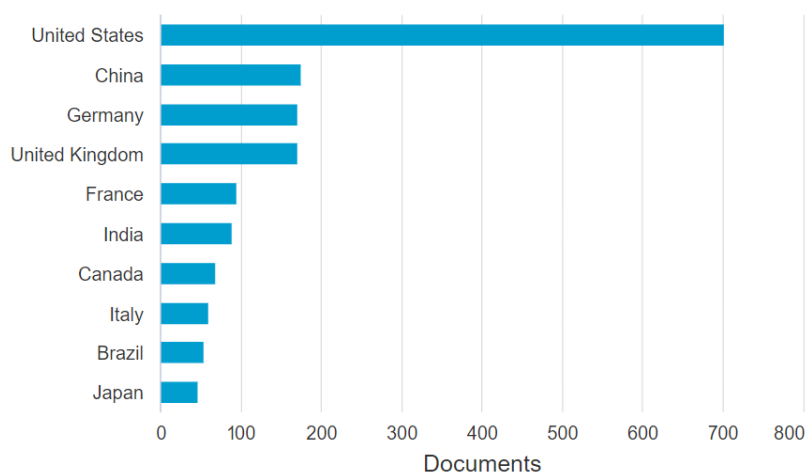
Figura 39 – Número de publicações por ano no mundo para *Alternative Jet Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Distribuição geográfica

Figura 40 – Número de publicações por país no mundo para *Alternative Jet Fuel*



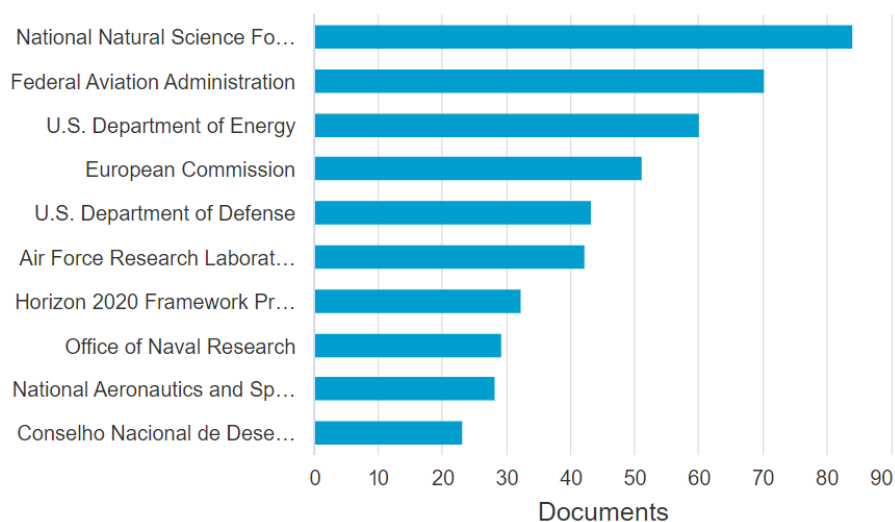
Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

Os números de publicações são liderados com sobra pelos Estados Unidos, seguidos pela China e Alemanha, como mostra na Figura 40. O Brasil aparece em uma ótima colocação, na nona posição.

• Financiadores

Como mostra a Figura 41, instituições como a *National Science Foundation* (NSF) e a *Federal Aviation Administration* (FAA) lideram o financiamento, evidenciando o apoio dos EUA na pesquisa de combustíveis alternativos para motores a jato.

Figura 41 – Número de publicações por financiador no mundo para *Alternative Jet Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

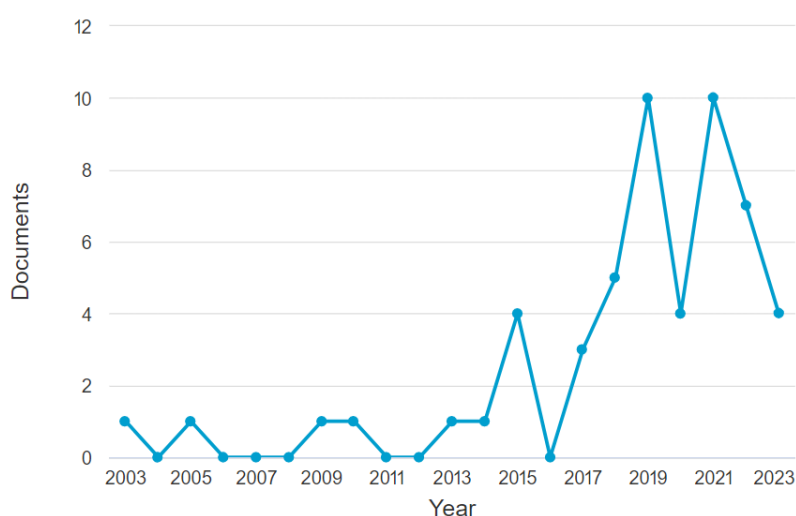
7.8 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 08

Alternative Jet Fuel no contexto brasileiro mostra o interesse e a contribuição científica nacional no desenvolvimento de combustíveis alternativos para a aviação. Dada a *expertise* do Brasil em biocombustíveis, há potencial para o país contribuir significativamente para esse campo.

• Distribuição temporal

Apesar de o número de publicações começar a aumentar gradualmente a partir de 2016, como se vê na Figura 42, e ter picos mais significativos nos últimos anos, o Brasil já vem publicando na área desde 2003, o que mostra certo potencial.

Figura 42 – Número de publicações por ano no Brasil para *Alternative Jet Fuel*

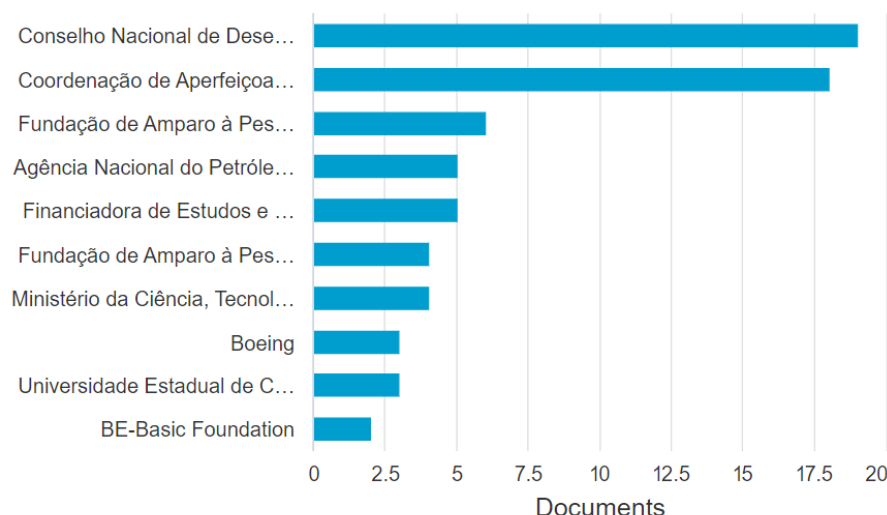


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Financiadores

Segundo a Figura 43, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que está ligado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, a CAPES, ligada ao Ministério da Educação e FAPESP são os financiadores mais frequentes, mostrando o apoio governamental, principalmente nacional, para pesquisas que ampliem a produção de biocombustíveis.

Figura 43 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Alternative Jet Fuel*

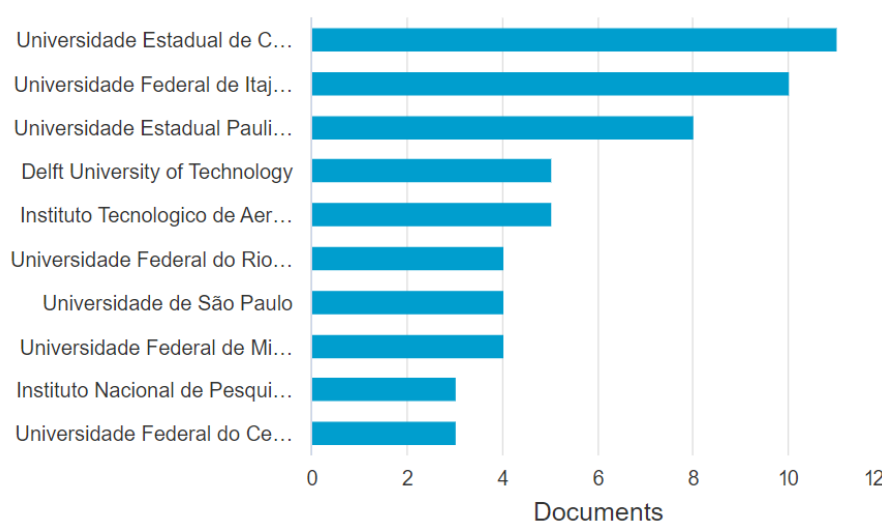


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

• Instituições

Quando se fala em combustíveis alternativos para motores a jato, segundo a Figura 44 Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) estão na linha de frente das publicações, reforçando o papel de destaque dessas universidades na pesquisa de combustíveis.

Figura 44 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Alternative Jet Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 23/10/2024

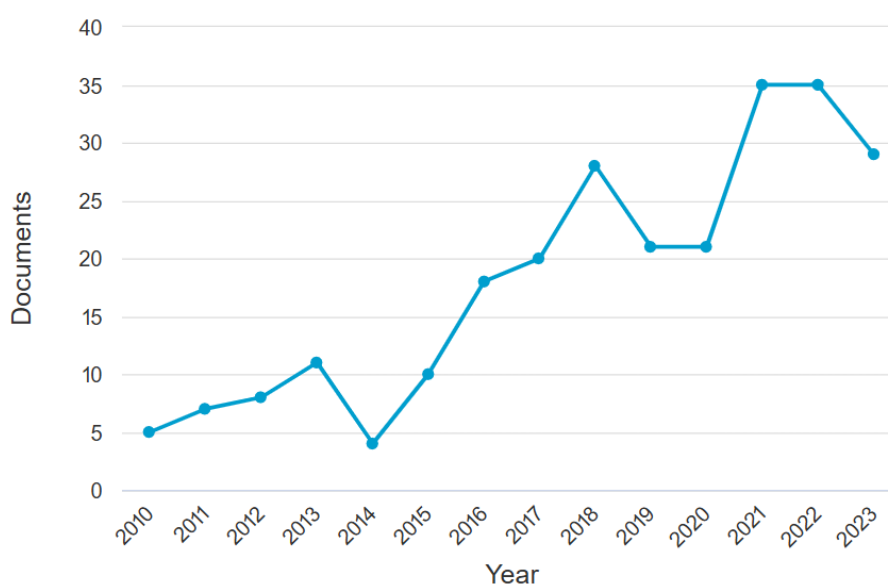
7.9 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 09

A escolha pelo *Biojet Fuel* (bioquerosene) analisa as publicações que envolvem biocombustíveis em termos globais como alternativa possível para a aviação. O bioquerosene é de interesse crescente para atender às metas de redução de emissões.

• Distribuição temporal

A busca mostra que as primeiras publicações científicas no tema foram em 2010 e que a partir desse ano, com exceção de 2014, o tema esteve em pleno crescimento, como exposto na Figura 45. Nota-se também um bom salto em 2020, ano pós pandemia onde as emissões e os combustíveis entraram fortemente em voga e as atividades de pesquisa não ligadas à saúde puderam ser retomadas.

Figura 45 – Número de publicações por ano no mundo para *Biojet Fuel*

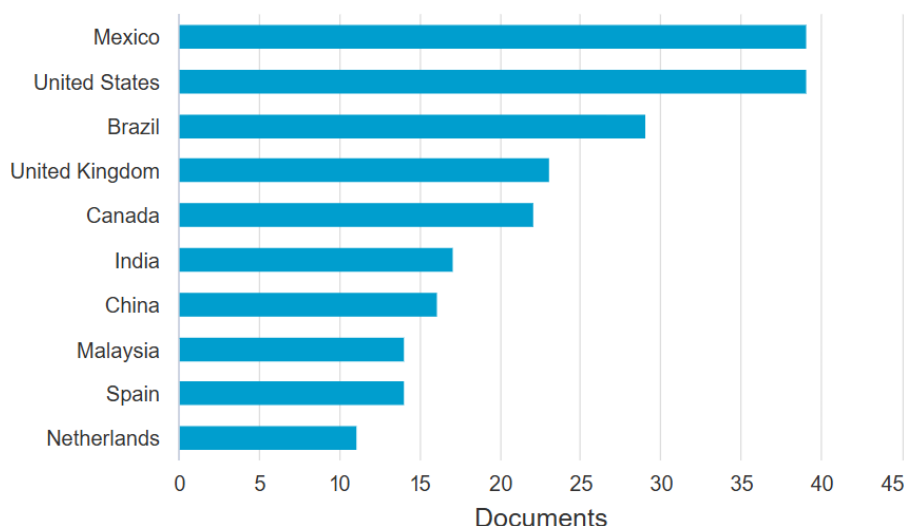


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Distribuição geográfica

Como se vê na Figura 46, México, EUA e Brasil dominam as publicações, o que evidencial potenciais a serem explorados.

Figura 46 – Número de publicações por país no mundo para *Biojet Fuel*

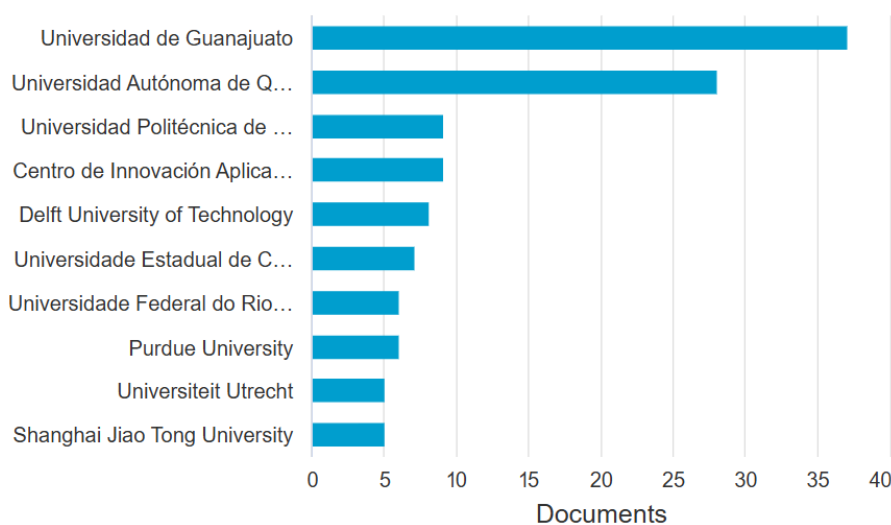


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Como visto na Figura 47, merece um bom destaque as posições em números de publicações de sexto e sétimo lugar do mundo para a Unicamp e UFRJ, respectivamente.

Figura 47 – Número de publicações por instituição no mundo para *Biojet Fuel*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

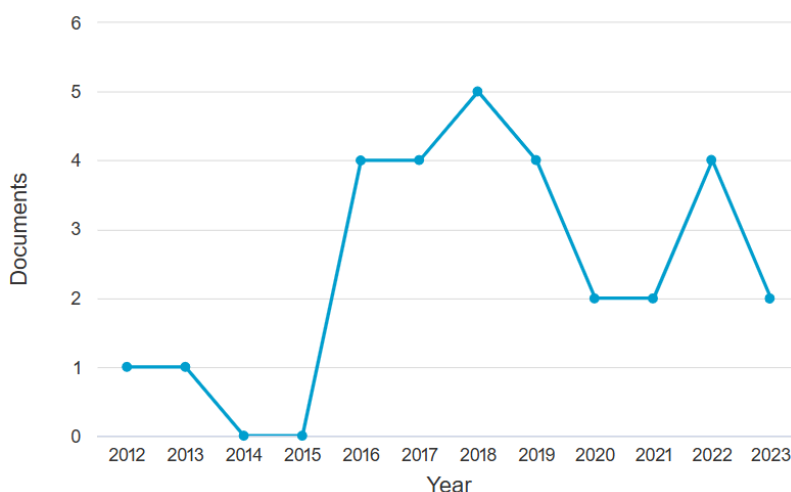
7.10 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 10

A pesquisa sobre *Biojet Fuel* no Brasil avalia o envolvimento e a produção científica internas ao Brasil em bioquerosenes, especialmente relevantes em um país com abundância de biomassa.

• Distribuição temporal

Como se vê na Figura 48 Houve um crescimento nas publicações especialmente após 2015, indicando o aumento do interesse brasileiro em alternativas de aviação sustentáveis. No entanto, principalmente se comparados com os outros combustíveis, ainda não é uma tecnologia na qual se deposita tantos esforços para pesquisa devido suas limitações.

Figura 48 – Número de publicações por ano no Brasil para *Biojet Fuel*

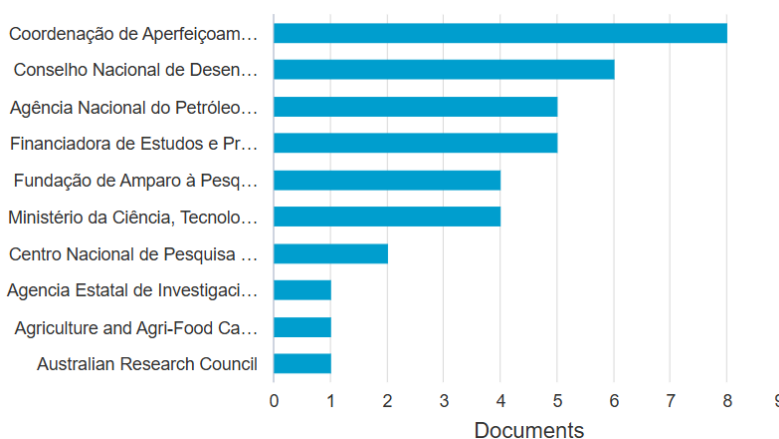


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Financiadores

Como se vê na Figura 49, no caso dos bioquerosenes, CAPES e CNPq são os principais, mostrando o apoio público para a expansão da pesquisa nacional em bioquerosenes.

Figura 49 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Biojet Fuel*

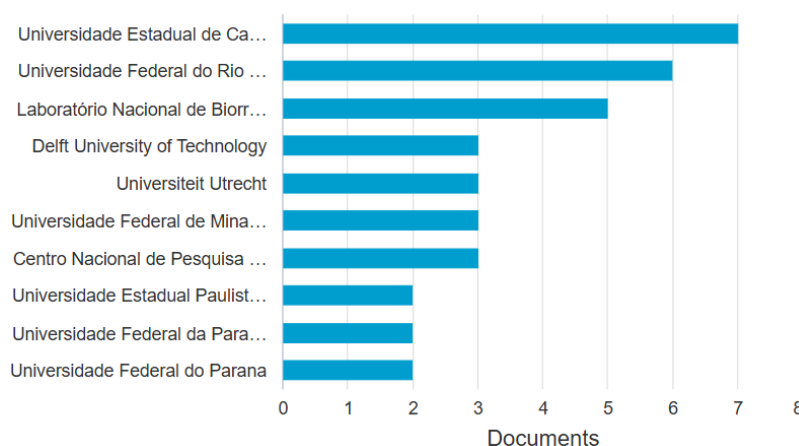


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Unicamp e UFRJ são as instituições que lideram as publicações sobre bioqueresenes, como se vê na Figura 50.

Figura 50 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Biojet Fuel*



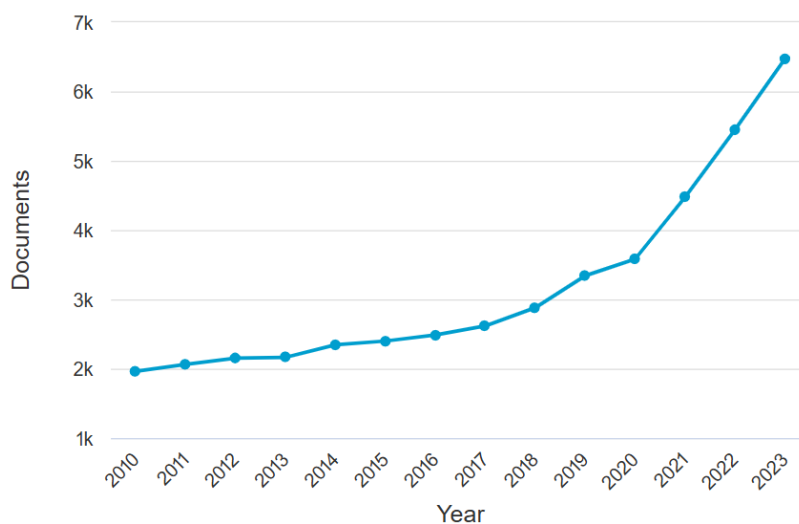
Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

7.11 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 11

O foco global em *Hydrogen Storage* (armazenamento de hidrogênio) reflete o interesse na viabilização do hidrogênio como combustível limpo e sua aplicação em aeronaves, passando pelo desafio do armazenamento seguro e eficiente para entrar em operação.

- **Distribuição temporal**

Figura 51 – Número de publicações por ano no mundo para *Hydrogen Storage*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

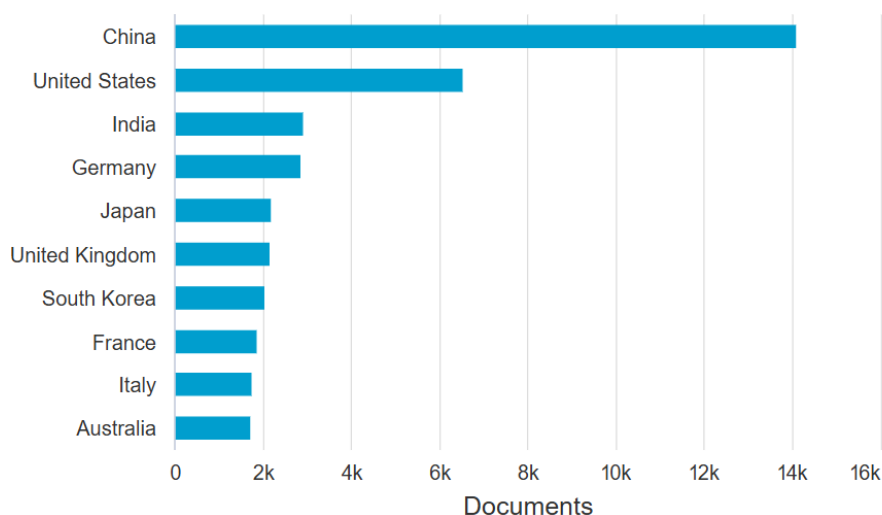
A Figura 51 mostra que as publicações sobre armazenamento de hidrogênio são bem recentes e tiveram um aumento significativo e sem oscilação após 2017, o que mostra o hidrogênio como uma opção extremamente forte para a transição energética.

- **Distribuição geográfica**

Dessa vez, diferente dos resultados anteriores, conforme indica a Figura 52, a China, e não os EUA, lidera o número de publicações científicas sobre o tema, apresentando uma quantidade mais que duas

vezes superior à americana. Esse dado não apenas destaca a posição da China como potência emergente na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para uma aviação mais sustentável, mas também reflete dinâmicas geopolíticas e econômicas globais. A China, com políticas robustas de incentivo à inovação tecnológica, tem investido massivamente em setores de energia limpa e biocombustíveis, buscando fortalecer sua autonomia e liderança nesses campos. Além disso, o protagonismo da China no desenvolvimento de biocombustíveis, como o bioquerosene, está diretamente relacionado às suas condições territoriais e à disponibilidade de áreas cultiváveis, fatores que influenciam a viabilidade da produção de combustíveis alternativos. A grande extensão territorial chinesa permite o cultivo em larga escala, embora o país também enfrente a crescente necessidade de equilibrar a produção de biocombustíveis com a produção de alimentos, devido à competição por terras cultiváveis. Essa tensão entre segurança alimentar e produção de energia renovável reflete um dilema estratégico importante para a China e países com vastos setores agroindustriais, que precisam atender à demanda crescente por combustíveis sustentáveis sem comprometer a segurança alimentar e o uso eficiente de seus recursos naturais.

Figura 52 – Número de publicações por país no mundo para *Hydrogen Storage*

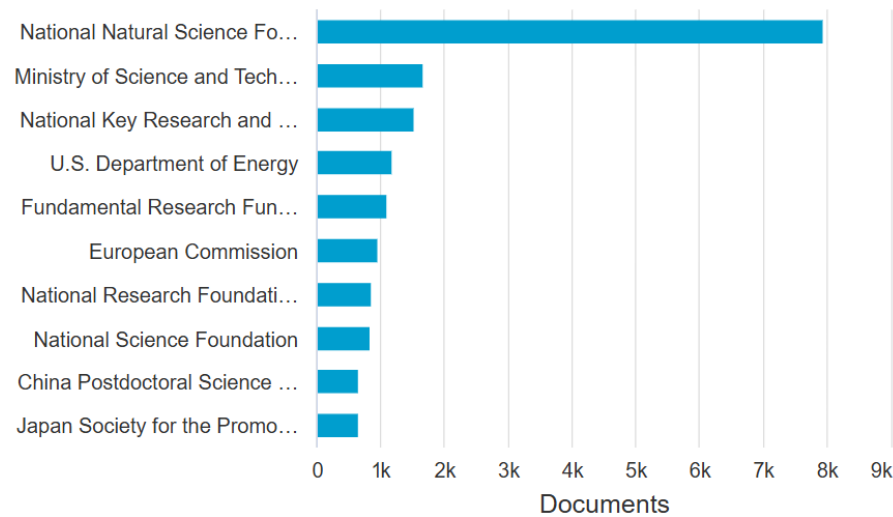


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Financiadores

Como esperado, a Figura 53 mostra um número bem a frente da China em relação ao financiamento de pesquisa no que se refere a armazenamento de hidrogênio.

Figura 53 – Número de publicações por financiador no mundo para *Hydrogen Storage*

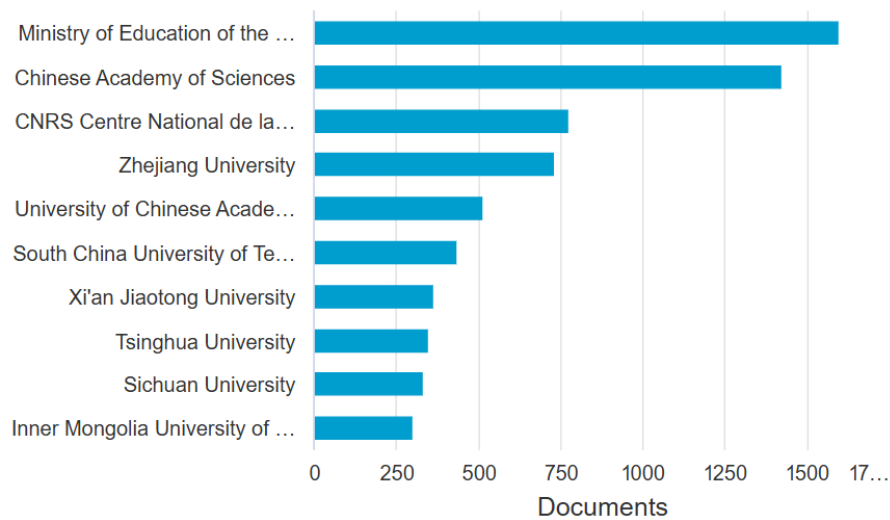


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Confirmando os dados dos financiadores, a Figura 54 mostra a China bem a frente das pesquisas no tema.

Figura 54 – Número de publicações por instituição no mundo para *Hydrogen Storage*

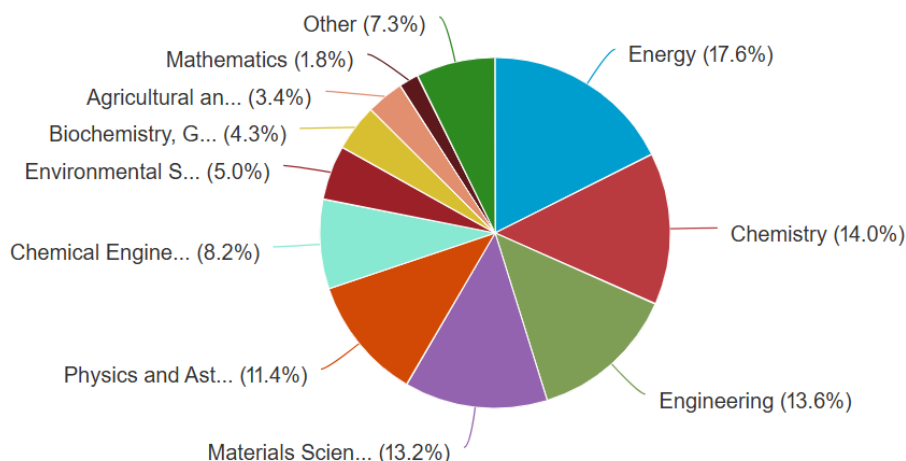


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Áreas de pesquisa

A Figura 55 mostra que nesse caso a química aparece como destaque, seguindo número próximos de engenharia e energia, refletindo a ênfase nos desafios tecnológicos multidisciplinares para armazenamento.

Figura 55 – Número de publicações por área de pesquisa no mundo para *Hydrogen Storage*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

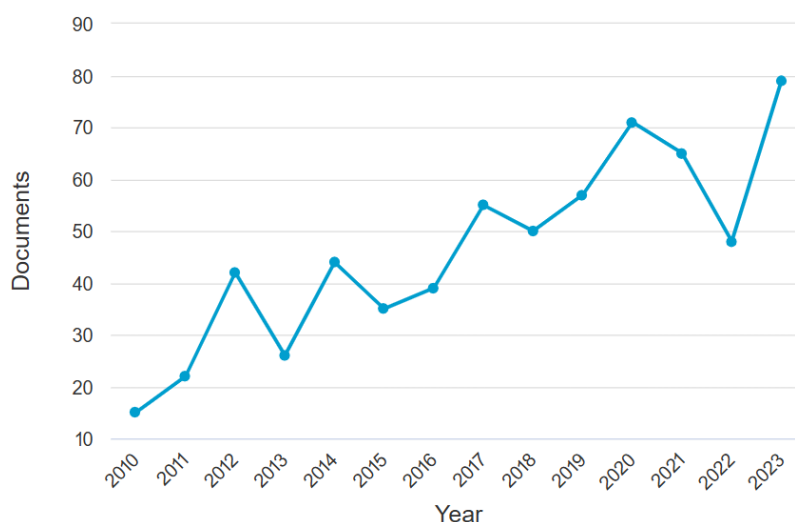
7.12 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 12

No Brasil, o armazenamento de hidrogênio é um tópico emergente, mas em tendência de crescimento.

• Distribuição temporal

A Figura 56 mostra que o ano das primeiras publicações no Brasil a respeito de armazenamento de hidrogenio foi o mesmo que publicado no mundo, o que confirma o Brasil como potência nos combustíveis alternativos ao petróleo.

Figura 56 – Número de publicações por ano no Brasil para *Hydrogen Storage*

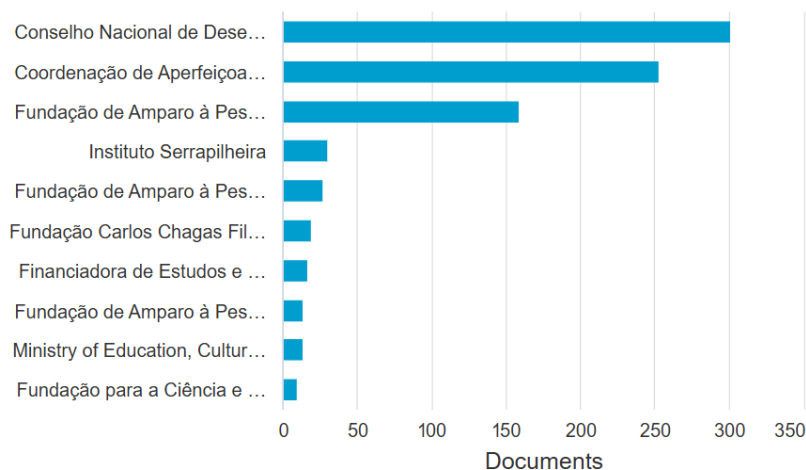


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Financiadores

Dentre os principais financiadores estão, principalmente, estão o CNPq, CAPES e FAPESP. Figura 57

Figura 57 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Hydrogen Storage*

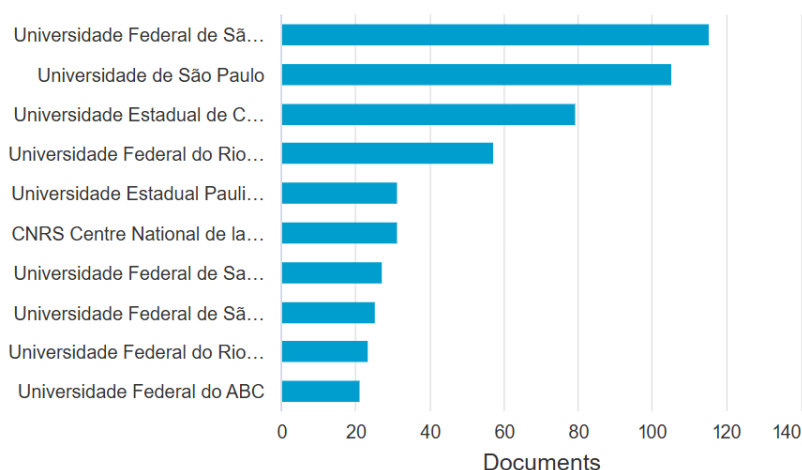


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Dentre as instituições líderes na publicação científica no tema estão UFSCAR, USP e Unicamp. Sendo todos os dez primeiros, universidades públicas. Figura 58

Figura 58 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Hydrogen Storage*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

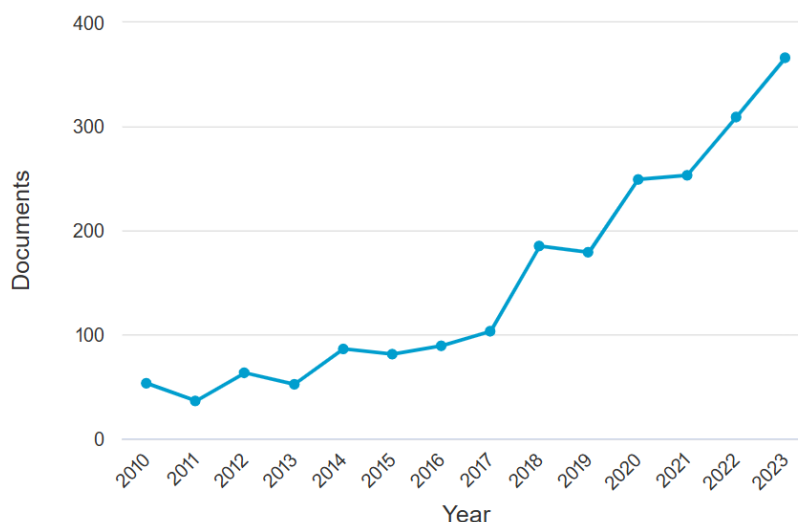
7.13 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 13

Hybrid Electric Aircraft (aeronaves híbridas elétricas) são uma área de pesquisa que tem ganhado relevância que combinam propulsão elétrica com motores convencionais, uma vez que o desempenho de motores elétricos e baterias é inferior ao os motores a combustão em condições de alta potência, como decolagem, subida e voo pairado.

• Distribuição temporal

O aumento das publicações de 2017 em diante, como mostrado na Figura 59, reflete o avanço tecnológico e o interesse na eletrificação parcial de aeronaves como alternativa.

Figura 59 – Número de publicações por ano no mundo para *Hybrid Electric Aircraft*

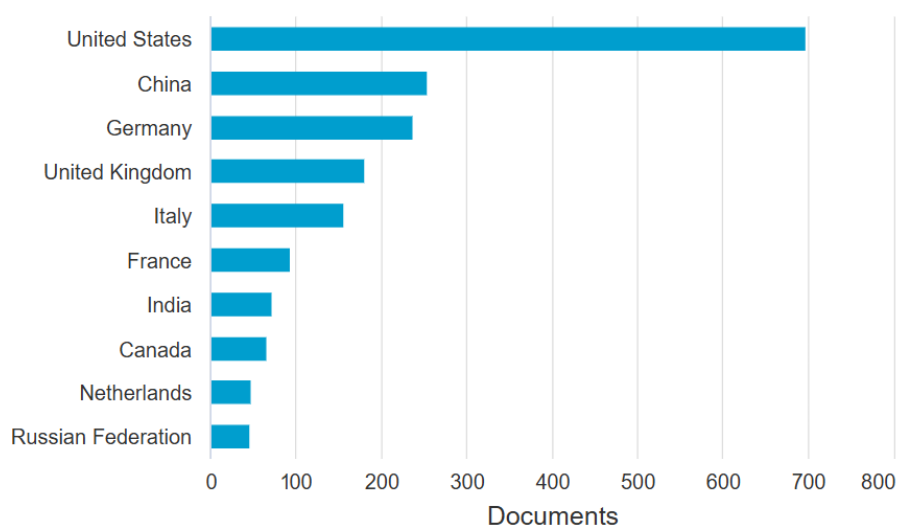


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Distribuição geográfica

Conforme demonstrado na Figura 60 os EUA dominam com folga os números de publicações no tema, seguido da China e países europeus. Brasil não aparece entre os dez primeiros.

Figura 60 – Número de publicações por país no mundo para *Hybrid Electric Aircraft*

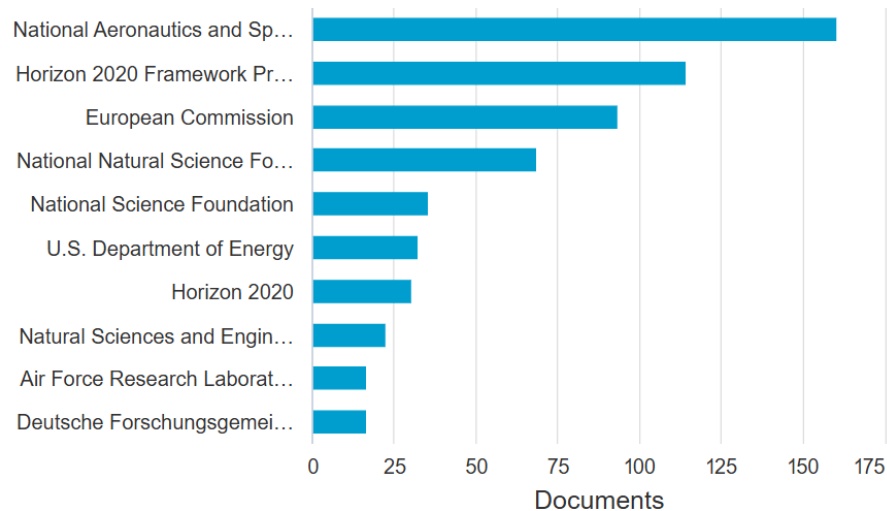


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Financiadores

Nesse caso, conforme a Figura 61, a NASA se destaca como maior financiadora, mas já vem seguida pelo Horizon 2020 e pela Comissão Europeia, demonstrando forte investimento da Europa no tema e indicando o interesse de países desenvolvidos em viabilizar aeronaves híbridas.

Figura 61 – Número de publicações por financiador no mundo para *Hybrid Electric Aircraft*

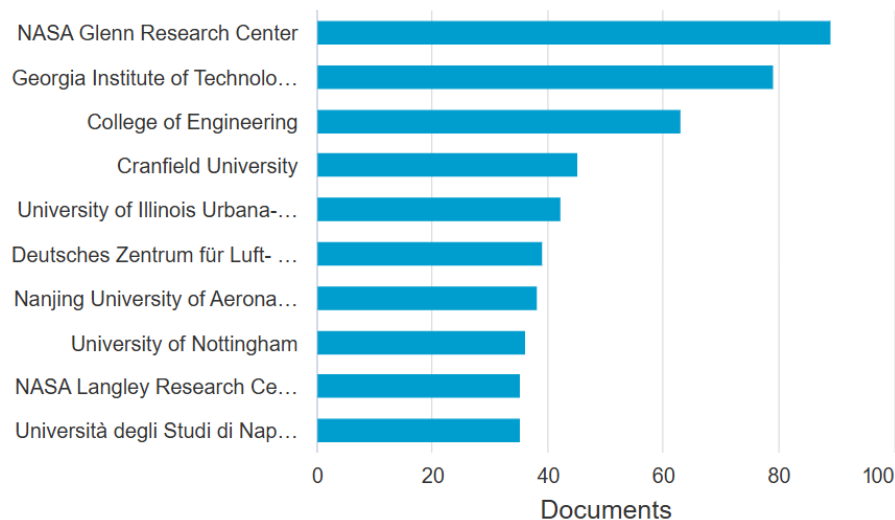


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Nesse caso, como se vê na Figura 62, A NASA e o Instituto de Tecnologia da Georgia estão à frente nas publicações científicas.

Figura 62 – Número de publicações por instituição no mundo para *Hybrid Electric Aircraft*

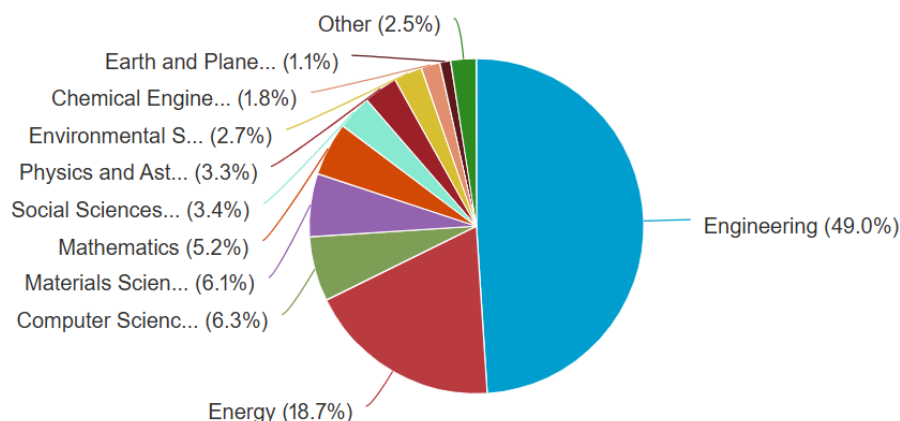


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Áreas de pesquisa

A Figura 63 demonstra força quase marjoritária da engenharia, de 49% das publicações no tema.

Figura 63 – Número de publicações por área de pesquisa no mundo para *Hybrid Electric Aircraft*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

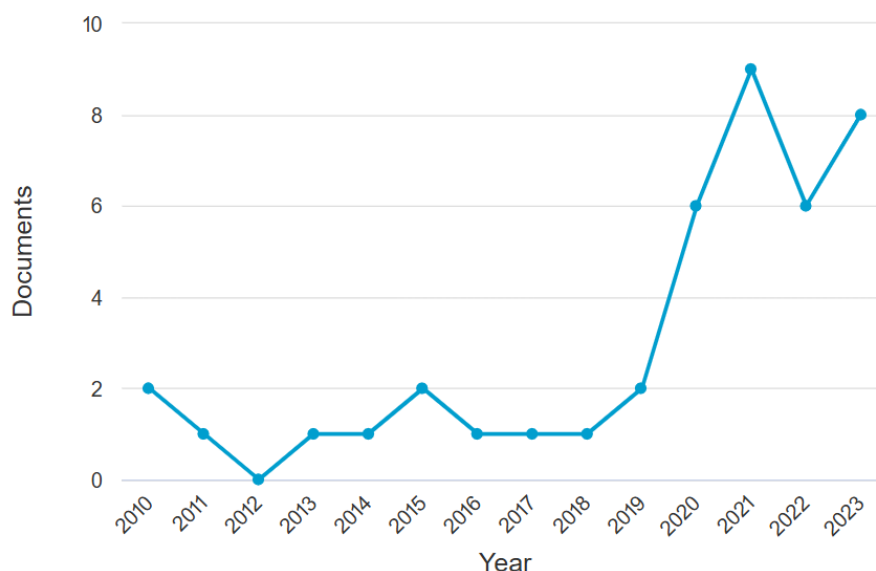
7.14 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA BUSCA 14

A publicação na área das aeronaves híbridas elétricas no Brasil, apesar de não terem uma posição global de destaque, apresenta tendência de crescimento.

• Distribuição temporal

Apesar de um histórico não tão forte, como mostra na Figura 64, de 2018 em diante as publicações neste tema tem despontado no Brasil, o que demonstra interesse dos pesquisadores brasileiro nessa tecnologia.

Figura 64 – Número de publicações por ano no Brasil para *Hybrid Electric Aircraft*

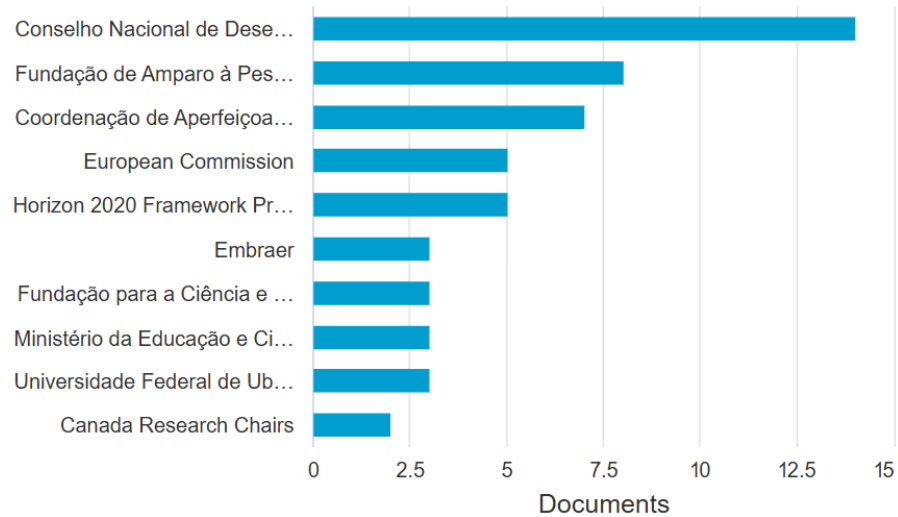


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Financiadores

Nesse tema, o CNPq, a FAPESP e a CAPES lideram o financiamento. A Embraer também aparece entre os principais financiadores nesse tema, como mostra a Figura 65.

Figura 65 – Número de publicações por financiador no Brasil para *Hybrid Electric Aircraft*

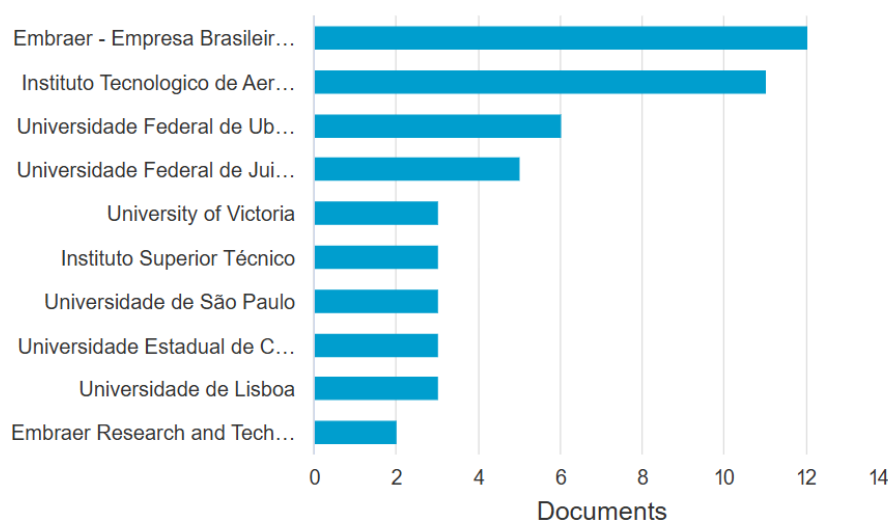


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Instituições

Nesse caso, como mostra a Figura 66, a Embraer e o ITA ocupam posição de destaque, evidenciando o interesse da indústria e das instituições brasileiras no desenvolvimento da pesquisa nesse tema.

Figura 66 – Número de publicações por instituição no Brasil para *Hybrid Electric Aircraft*

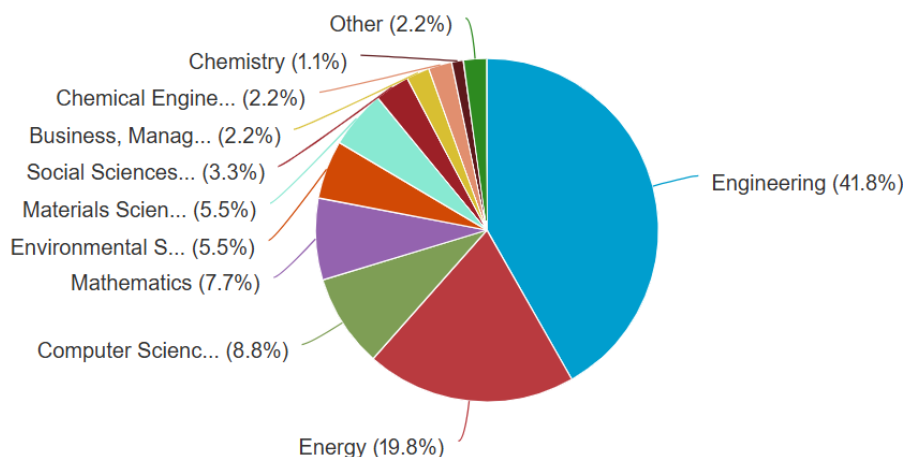


Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

• Áreas de pesquisa

Como se vê na Figura 67, assim como a tendência global, engenharia, a área com maior potencial de desenvolvimento nesse caso, domina as publicações no tema.

Figura 67 – Número de publicações por área de pesquisa no Brasil para *Hybrid Electric Aircraft*



Fonte: gerado pelo autor através do Scopus em 24/10/2024

7.15 SÍNTESE

A análise bibliométrica revelou um crescimento substancial no volume de publicações científicas sobre a transição energética na aviação, com especial atenção para combustíveis sustentáveis, propulsão a hidrogênio e motorização híbrida. Globalmente, os Estados Unidos, China, Reino Unido e Alemanha são os líderes em publicações, impulsionados por robustos investimentos de instituições como a National Science Foundation (NSF), a Federal Aviation Administration (FAA) e a Comissão Europeia. Essas nações destacam-se pela intensa pesquisa em soluções para mitigar as emissões da aviação, com a engenharia, energia e ciências ambientais como principais áreas de foco.

O Brasil, embora não esteja entre os principais países em volume total de publicações, apresenta notável engajamento na pesquisa sobre biocombustíveis, evidenciado pelo papel proeminente de instituições como a USP, Unicamp, Unesp, UNIFEI e UFRJ. O financiamento público de agências como CAPES, CNPq e FAPESP reforça o apoio governamental ao desenvolvimento de combustíveis renováveis, como o bioquerosene, aproveitando a histórica experiência nacional em biocombustíveis.

A análise temporal destaca um crescimento acelerado de publicações a partir de 2015, em consonância com compromissos globais como o Acordo de Paris e metas de descarbonização da aviação até 2050. Desde 2020, a pesquisa sobre SAFs, armazenamento de hidrogênio e aeronaves híbridas elétricas ganhou ainda mais relevância, impulsionada tanto pela recuperação pós-pandemia quanto pelo avanço de políticas ambientais.

O armazenamento de hidrogênio, que também foi explorado na análise bibliométrica, mostra a China despontando como líder em publicações e investimentos, seguida pelos EUA e países europeus. Essa liderança reflete o forte interesse em tecnologias de longo prazo, alinhando-se ao potencial do hidrogênio como combustível limpo para a aviação.

A motorização híbrida-elétrica também apresentou um crescimento consistente nos últimos anos, especialmente em países desenvolvidos, como Estados Unidos e China. A predominância da área de engenharia nas publicações ressalta os desafios tecnológicos, como a densidade de energia das baterias e a integração de sistemas elétricos com motores convencionais. Já no Brasil destacaram-se pelo número de pesquisas o ITA e a Embraer.

Em resumo, o cenário global e nacional aponta uma forte mobilização acadêmica e financeira para impulsionar a aviação sustentável, mas que precisa ser ainda maior. O crescente interesse por tecnologias de baixa emissão reforça a urgência de soluções viáveis para o setor, evidenciando desafios significativos, mas também oportunidades, para alcançar metas de sustentabilidade e descarbonização.

A integração entre revisão de escopo, bibliometria e análise crítica foi essencial para compreender os desafios e oportunidades em cada tecnologia, permitindo explorar como essas alternativas se complementam em diferentes horizontes temporais. A análise bibliométrica mostrou que a transição energética na aviação depende de esforços coordenados entre academia, indústria e governos. Enquanto os SAFs oferecem uma solução viável para o curto prazo, o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como o hidrogênio e a motorização híbrida, serão melhor aplicados no longo prazo para atender às demandas de descarbonização.

8 CONCLUSÃO

A transição para uma aviação neutra em carbono representa um desafio complexo para o setor aeronáutico e exige abordagens inovadoras e diversificadas. Este trabalho apresentou uma análise das alternativas para descarbonizar o setor, com foco nos combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs), bem como nas tecnologias emergentes de propulsão, como a híbrida-elétrica e a hidrogênio. Com base nos objetivos propostos, nota-se que os SAFs, devido à possibilidade de uso imediato com poucas adaptações na infraestrutura e nas aeronaves atuais, representam a solução mais viável para o curto a médio prazo. Entretanto, a efetiva implementação desses combustíveis e tecnologias sustentáveis exige esforço coordenado, investimentos robustos e políticas públicas adequadas, incluindo precificação de carbono e incentivos fiscais.

As análises bibliométricas apresentadas no Capítulo 7 mostraram-se complementares à revisão narrativa crítica realizada nos capítulos 3, 4 e 5, oferecendo uma visão quantitativa que reforçou a relevância global e nacional do tema. O crescimento significativo no volume de publicações, observado nas buscas realizadas, reflete o avanço dos esforços de pesquisa para viabilizar o uso de SAFs e outras tecnologias sustentáveis na aviação, em consonância com compromissos internacionais de descarbonização para 2050. Além disso, a análise destacou o papel fundamental de instituições de pesquisa e governos no desenvolvimento e financiamento de novas tecnologias. Esse cenário mostra que, além do avanço científico, a transição para uma aviação sustentável depende de decisões políticas e econômicas que facilitem a adoção de SAFs e incentivem a pesquisa em alternativas de longo prazo, como o hidrogênio e a propulsão elétrica e híbrida.

Do ponto de vista técnico e econômico, conforme detalhado nos capítulos 3 e 4, os SAFs representam a solução com maior potencial para descarbonizar o setor a curto prazo devido à sua compatibilidade com as aeronaves em serviço e infraestrutura atuais. Os dados bibliométricos confirmam isso, mostrando que a produção científica sobre SAFs tem crescido rapidamente, acompanhando o interesse global por soluções viáveis e acessíveis. A literatura analisada também indicou que esses combustíveis são os mais práticos para operar com a frota que deverá continuar em uso pelos próximos 20 anos, dado o longo ciclo de vida das aeronaves. No entanto, os desafios de produção, custo e escalabilidade dos SAFs ainda precisam ser superados. Estima-se que a produção de SAFs exigirá um investimento global de mais de um trilhão de dólares e que o preço desses combustíveis só será competitivo em larga escala com a aplicação de políticas de incentivo e subsídios, além de um mercado de carbono estruturado.

O Brasil, devido a sua extensa produção agrícola e potencial para desenvolver uma indústria de bio-combustíveis, pode desempenhar um papel estratégico na produção de SAFs. Geopoliticamente, o país possui uma vantagem competitiva, com recursos naturais que permitem o cultivo de matérias-primas para SAFs, como cana-de-açúcar e oleaginosas, além de resíduos agrícolas que podem ser convertidos em combustíveis. Essa posição favorecida não só possibilita a autossuficiência no abastecimento de SAFs, mas também permite que o Brasil atue como um exportador relevante, beneficiando-se de uma indústria sustentável em expansão e contribuindo para a descarbonização global da aviação. Os

resultados bibliométricos trazem que, embora o Brasil ainda esteja em posição secundária no volume total de publicações, o país tem um papel central na pesquisa e no desenvolvimento de biocombustíveis, o que reforça seu potencial para liderar a transição energética da aviação em nível regional.

Por fim, a transição para a aviação sustentável depende de uma integração de esforços que engloba investimentos em infraestrutura, apoio governamental e inovação tecnológica. O desenvolvimento e a adoção de SAFs são passos iniciais para reduzir as emissões de carbono, mas também é essencial que o setor continue a investir em tecnologias emergentes, como a propulsão elétrica e a hidrogênio, que deverão alcançar maior maturidade nas próximas décadas. Embora desafiadora, a descarbonização da aviação é viável e pode contribuir para as metas climáticas globais, desde que os compromissos políticos, econômicos e tecnológicos sejam cumpridos de forma conjunta.

8.1 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

A transição energética na aviação é um tema multidisciplinar, que abrange aspectos técnicos, econômicos, ambientais e políticos. O que representa um dos principais desafios deste estudo. A análise bibliométrica baseou-se exclusivamente no banco de dados Scopus. Apesar de ser uma das plataformas mais robustas para revisão científica, a exclusão de outras bases pode ter limitado o alcance da pesquisa. Essa limitação na abrangência exigiu boa interpretação dos dados para evitar generalizações ou conclusões enviesadas. Para isso, a análise foi complementada com uma revisão narrativa crítica, permitindo uma visão mais aprofundada sobre os padrões globais e regionais na produção científica. Além disso, o estudo foi baseado exclusivamente em literatura secundária, sem a coleta de dados primários, como entrevistas ou questionários com especialistas da área. Essa escolha metodológica, embora válida, restringiu a possibilidade de gerar insights práticos. No contexto brasileiro, um desafio adicional foi a menor disponibilidade de literatura científica sobre o tema, em comparação com países líderes. Essa limitação dificultou o detalhamento de análises específicas sobre o papel do Brasil na transição energética da aviação, apesar de seu reconhecido potencial em biocombustíveis.

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para aprofundar as discussões sobre a transição energética na aviação, estudos futuros podem ampliar as metodologias e fontes de dados utilizadas. Além do Scopus, a inclusão de outras bases, como a Web of Science, poderia complementar a análise bibliométrica, oferecendo maior abrangência e diversidade de fontes. Essa abordagem ampliaria a identificação de tendências globais e regionais na produção científica. A utilização de métodos qualitativos, como entrevistas com especialistas, representantes da indústria da aviação e produtores de SAFs também pode enriquecer a pesquisa. Esses atores têm perspectivas práticas e regionais valiosas, que podem esclarecer barreiras e oportunidades específicas para a implementação de tecnologias emergentes. Pesquisas futuras poderiam explorar mais detalhadamente o papel do Brasil na transição energética global. Análises focadas em cadeias de suprimento de biocombustíveis, desafios regionais e o potencial exportador do país seriam úteis para que ele se torne protagonista na descarbonização da aviação. Por fim, um estudo que combine análises

bibliométricas com modelagem de impacto ambiental, econômico e tecnológico pode oferecer uma perspectiva mais prática e aplicada.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Combustíveis sustentáveis para a aviação**. 2024. Acessado em 07/11/2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/combustiveis-sustentaveis-para-a-aviacao>>.
- ATAG. **Waypoint 2050 - Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency**: a vision of net-zero aviation by mid-century. Genebra, Suíça: ATAG, 2021.
- BERGERO, C. et al. Pathways to net-zero emissions from aviation. **Nature Sustainability**, v. 6, n. 4, p. 404–414, 2023.
- BOEING et al. **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil**: plano de ação. São Paulo, SP - Brasil: FAPESP, 2013.
- EPA. **EPA Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks**. 2019. Acessado em 13/11/2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>>.
- FAROKHI, S. **Future propulsion systems and energy sources in sustainable aviation**. Hoboken, New Jersey - EUA: John Wiley Sons, 2020.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap**. Montreal, Canada: IATA, 2015.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Annual Review 2021**. Montreal, Canada: IATA, 2021.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **ICAO environmental report 2022: innovation for a green transition**. Montreal, Canada: ICAO, 2022.
- LEE, D. et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 37, p. 4678–4734, 2010.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Technology readiness level (TRL) definitions**. 2017. Acessado em 07/11/2024. Disponível em: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/12/458490main_trl_definitions.pdf>.
- ZUMDAHL, S. S.; ZUMDAHL, S. **Chemistry**. Boston, EUA: Houghton Mifflin Company, 2000.