

ENEI 2025 Fortaleza IX ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL

"Financiamento e Desenvolvimento Brasileiro:
oportunidades e desafios"



Realização:  Banco do Nordeste  ABEIN
Associação Brasileira de Economia Industrial e Inovação

DESCARBONIZAÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: PROSPECÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA APLICADA AO SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF)

José Ricardo de Santana¹

Marina Bezerra da Silva²

Nash Stonny Cordeiro Wanderley³

Lindomayara França Ferreira⁴

Resumo: Com o processo de descarbonização em pauta, diferentes economias têm promovido agendas de transformações nas atividades mais intensivas em dióxido de carbono (CO₂), como a de aviação. Considerada como uma atividade com altos níveis de emissões, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), com o Programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA), tem desenvolvido mecanismos de compensação e descarbonização. O Combustível de Aviação Sustentável (SAF), utilizando biomassa ou reaproveitamento de resíduos, surge como uma possibilidade de transformação do setor. A Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) estima que a substituição de combustíveis fósseis para sustentáveis demandará cerca de 82 bilhões de litros de biocombustíveis anualmente, até 2030. Para as economias produtoras de bens primários, com menor capacidade científica e tecnológica, o cenário de transformação é mais desafiador. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da produção científica (*proxy* artigos) e tecnológica (*proxy* patentes) de SAF, identificando os principais países e a posição relativa do Brasil nesse cenário. Em específico identificar a posição do Brasil em relação a outros países diante desse mercado de biocombustíveis para aviação. Os resultados apontam um crescimento exponencial da produção científica na última década, com maior volume de publicações nos Estados Unidos, China, Alemanha, Reino Unido e Brasil. Parte dos estudos enfatizam os problemas relacionados aos níveis de emissões do setor, bem como, a importância da transformação dessas atividades. No âmbito tecnológico, desde 2020, é perceptível um aumento no volume de inovações em SAF, liderado pela China, Estados Unidos e Reino Unido. As empresas que mais apresentaram patentes foram de origem americana e inglesa, com 24 e 23 documentos, respectivamente. Em linhas gerais, as patentes têm focado na produção de bio-matéria-prima aplicada nas atividades de aviação, destacando-se também, as tecnologias relacionadas à produção de hidrogênio. A correlação entre artigos e patentes foi positiva e estatisticamente significativa, com destaque para Estados Unidos e China. Além desses, destacam-se

¹ Universidade Federal de Sergipe (UFS). E-mail: jsantana.ufs@gmail.com.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI). E-mail: marina.silva@ifpi.edu.br.

³ Universidade Federal de Sergipe (UFS). E-mail: stonnynash@gmail.com.

⁴ Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). E-mail: lindomayara@hotmail.com.

alguns países como importantes *players* no setor de SAF, em sua maioria países desenvolvidos, no entanto, também se observa a presença de países em desenvolvimento, como o Brasil e o México. No caso brasileiro, embora haja um volume de estudos científicos e de geração de patentes em SAF, o ambiente é marcado por desafios tecnológicos, regulatórios e econômicos. É imprescindível solucionar esses gargalos para que se possa usufruir da “janela de oportunidade” que a transição em curso apresenta para economias com menor grau de desenvolvimento.

Palavras-chave: Descarbonização; Combustível Sustentável de Aviação; Patentes.

Código JEL: O33; L93.

Área Temática: Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade.

DECARBONIZATION AND THE USE OF BIOFUELS: TECHNOLOGICAL PROSPECTION APPLIED TO SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF)

Abstract: With the decarbonization process on the agenda, different economies have been promoting transformation initiatives intensive activities in carbon dioxide (CO₂), such as aviation. Recognized as a high-emission sector, the International Civil Aviation Organization (ICAO), through the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), has been developing compensation and decarbonization mechanisms. Sustainable Aviation Fuel (SAF), derived from biomass or waste reutilization, emerges as a potential solution for transforming the sector. The International Renewable Energy Agency (IRENA) estimates that replacing fossil fuels with sustainable alternatives will require approximately 82 billion liters of biofuels annually by 2030. For economies that produce primary goods, but have limited scientific and technological capabilities, the transformation scenario is more challenging. This work aims to conduct scientific (proxy articles) and technological (proxy patents) production of SAF, identifying the main countries and Brazil's relative position in this scenario. Specifically, it aims to identify Brazil's position compared to other countries in this aviation biofuels market. The results indicate an exponential growth in scientific production over the past decade, with the highest volume of publications coming from the United States, China, Germany, the United Kingdom, and Brazil. Some studies emphasize the sector's emission challenges and the importance of transforming these activities. From a technological perspective, since 2020, there has been a noticeable increase in SAF-related innovations, led by China, the United States, and the United Kingdom. The companies with the highest number of patents were American and British, with 24 and 23 documents, respectively. Overall, patents have focused on the production of bio-based raw materials for aviation activities, with particular attention also given to hydrogen production technologies. The correlation between scientific articles and patents was positive and significant, with the United States and China standing out. In addition to these, several other countries have emerged as key players in the SAF sector, mostly developed nations; however, developing countries such as Brazil and Mexico are also present. In Brazil's case, although there is a volume of scientific studies and patent generation in SAF, the sector still faces technological, regulatory, and economic challenges. Therefore, addressing these bottlenecks is essential to take advantage of the “window of opportunity” that the ongoing transition presents for economies with lower levels of development.

Keywords: Decarbonization; Sustainable Aviation Fuel; Patents.

1. INTRODUÇÃO

Além dos desafios para promover segurança energética, especialmente, provocados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis e escassez de recursos naturais, a transição energética tem ocupado cada vez mais a pauta de discussão sobre o processo de descarbonização global. A partir de metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), os países têm assumido agendas e medidas para mitigar os níveis de emissões até 2050, promovendo energia acessível, renovável e sustentável para todos (IRENA, 2023). A estratégia de ação inclui a priorização de setores específicos, como é o caso do segmento de transportes. Neste, a alternativa de uso de biomassa deve contribuir para uma redução nos níveis de emissões de 8,1 GtCO₂, em 2019, para 0,4 GtCO₂, em 2050, com destaque nesse segmento para o transporte aéreo (IRENA, 2023; 2024). O alto volume da queima de combustíveis fósseis por aeronaves vem causando diversas discussões ao longo do tempo sobre a quantidade expressiva de emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

Segundo a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) para que se possa atender aos objetivos estabelecidos pela ONU até 2050, o Combustível de Aviação Sustentável (SAF⁵) precisará ser responsável por 65% da redução de emissões necessárias do setor de aviação (IRENA, 2024). Considerado como uma atividade em expansão, para a próxima década, a IATA prevê um crescimento significativo no número global de passageiros aéreos, com um aumento de mais de 100%, partindo de 3,8 bilhões, em 2016, para 8,2 bilhões, em 2037, impulsionado por melhorias no padrão de vida, crescimento populacional e redução dos custos de viagens aéreas (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2017). Isso ressalta, portanto, a importância de medidas de compensação e mitigação nessas atividades (IRENA, 2021; 2024).

Ainda em estágios iniciais, os combustíveis SAF são produzidos a partir de fontes renováveis e devem atender aos padrões de certificação da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para aviação (NG *et al.*, 2021). A produção de SAF deverá ter uma demanda crescente, pois, conforme o Projeto ProQR/MCTI/GIZ (2022), a maior planta planejada apresenta uma escala de 82 mil toneladas de SAF/ano. Isso representa um potencial de atuação para os países com disponibilidade de matéria-prima e infraestruturas energéticas, como o Brasil, que dispõe de um programa consolidado de produção de biocombustíveis nas atividades adjacentes dos segmentos de automóveis. Portanto, regiões com capacidades produtivas (físicas, industriais, científicas e tecnológicas) podem criar sinergias com as atividades pré-existentes e promover a transformação do setor, assim como atingir vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU, para prevenir as mudanças climáticas.

Estudos recentes têm discutido a importância de transformação do setor, bem como do papel do Estado, enquanto formulador de políticas, metas e regulações do mercado, especialmente, por se tratar de atividades de elevado risco e incerteza, isto é, projetos que demandam elevados custos iniciais de transição. Porém, ainda há lacunas de discussões no que se refere ao mapeamento no âmbito científico e tecnológico de diferentes economias que apresentam potencial para atender à futura demanda de SAF. Isso demanda estudos de acompanhamento e avanço no desenvolvimento de combustíveis renováveis e a velocidade na qual caminha a inovação no setor, sendo essa a principal contribuição do presente trabalho. No Brasil, em específico, as iniciativas em universidades e empresas do setor aéreo já estão desenvolvendo diferentes formas de produção de SAF. Grandes companhias aéreas como LATAM, Azul e Gol, além da fabricante nacional de jatos comerciais, a Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), assumiram compromissos para usar SAF e se tornarem *net zero*⁶ nas próximas décadas (MCTI, 2022). Esse cenário mostra a importância de investigar o setor na perspectiva científica e tecnológica não apenas em países desenvolvidos que dispõem de recursos econômicos, mas também em países que apresentam potencial para a transformação do setor e de sua economia, como o Brasil.

Diante da importância da temática e do estágio nascente do desenvolvimento de combustíveis

⁵ Sustainable Aviation Fuel (SAF)

⁶ Estratégias focadas na redução das emissões de gases de efeito estufa.

sustentáveis em diferentes economias, o presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise da produção científica (*proxy* artigos) e tecnológica (*proxy* patentes) de SAF, identificando os principais países e a posição relativa do Brasil nesse cenário. Especificamente, busca-se: i) investigar o desenvolvimento e a evolução da produção de artigos científicos e patentes em nível global sobre SAF, destacando os países com maior volume de produção, com foco nas últimas duas décadas, ii) analisar a posição relativa do Brasil no contexto global de inovação tecnológica e científica no mercado de SAF, identificando seus avanços e potenciais para a transição energética, e iii) identificar países de acordo com a capacidade instalada de produção do conhecimento científico e tecnológico de SAF.

A comparação entre o Brasil e outros países no contexto da produção de SAF é crucial, pois enquanto economias desenvolvidas já investem significativamente em infraestrutura tecnológica e científica, o Brasil, com seu grande potencial agrícola e energético, possui uma grande oportunidade de integrar essas tecnologias e se posicionar estrategicamente no mercado global de combustíveis sustentáveis. Assim, este trabalho se destaca ao analisar as tendências globais de produção de SAF e a posição do Brasil, identificando a lacuna no conhecimento sobre a capacidade de inovação e adaptação de diferentes economias, incluindo países periféricos, para atender à crescente demanda por SAF, trazendo uma nova perspectiva sobre o papel das economias emergentes na transição energética global.

Além disso, a literatura anterior, de modo geral, contemplou abordagens teóricas sobre o tema, trazendo discussões sobre o avanço tecnológico mundial no setor, mas não foram identificadas abordagens específicas que correlacionassem a produção científica e a produção tecnológica, visando a compreensão da posição estratégica dos países em SAF, sendo esta uma lacuna preenchida pelo presente estudo. Avançou-se, também, em relação à compreensão do caso brasileiro, com um estudo que analisa o panorama tecnológico do país, confrontando-a com outras realidades, sendo estas, portanto, as principais contribuições do presente trabalho.

O presente trabalho está estruturado em cinco sessões, incluindo a presente introdução e as considerações finais. A segunda seção, inicialmente, discutirá o papel científico e tecnológico das tecnologias de fronteiras no âmbito do transporte e, posteriormente, discutirá a descarbonização no setor de transportes, seguido pelas iniciativas no setor de transportes no Brasil. Na terceira seção, serão apresentados os métodos e procedimentos utilizados para alcançar os objetivos propostos, bem como o uso da bibliometria, da prospecção e de análises descritivas de Correlação de *Pearson*. Na quarta seção, serão apresentados os resultados obtidos com os procedimentos, os apontamentos de oportunidades e desafios identificados na temática. Por fim, são trazidas as considerações finais.

2. DEBATE SOBRE ESTRATÉGIAS DE DESENVOLVIMENTO E DESCARBONIZAÇÃO: ÊNFASE NO SETOR DE TRANSPORTE AÉREO

Esta seção trata do debate sobre a transição no setor de transporte, com ênfase nas atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) e no mercado de biocombustíveis sustentáveis para a aviação. Inicialmente, traz um resgate na literatura dos principais conceitos e fundamentos das atividades de CT&I. Posteriormente, são explorados o cenário global de descarbonização, do mercado de biocombustíveis, além das projeções de uso de SAF. Por fim, o debate se concentra no cenário brasileiro.

2.1 Debate sobre desenvolvimento com sustentabilidade e os avanços das pesquisas em energias renováveis

A temática da inovação tem sido considerada, desde o início do século XX, uma agenda essencial para promover as transformações tecnológicas e o desenvolvimento econômico. O desenvolvimento é promovido por um processo dinâmico conduzido pela inovação, em que novas tecnologias substituirão as antigas, denominado de “destruição criadora”, de acordo com Schumpeter (1982). A inovação é definida como a introdução de novos produtos, novos métodos de produção,

novas fontes de matéria-prima, novos mercados ou novas indústrias, em contextos disruptivos ou incrementais (OCDE, 1997). Trata-se de um processo sistêmico em que o conhecimento é acumulado por meio do aprendizado e da interação (FREEMAN, 1996).

O conhecimento é o recurso mais importante para a inovação e, conseqüentemente, o processo mais relevante é o aprendizado (Lundvall, 2007). De natureza pública, o conhecimento não se esgota quando compartilhado, além disso, o seu estoque é muitas vezes ampliado. Assim, tanto o conhecimento codificado (como regras e manuais) quanto o conhecimento tácito (como habilidades dos indivíduos) podem ser favorecidos com o seu compartilhamento, especialmente, devido às limitações individuais de habilidades, equipamentos e materiais (Stephan, 2010). A pesquisa não é feita de forma isolada, mas, ao contrário, requer a interação de diferentes agentes, o que destaca a importância dos mecanismos de transferência do conhecimento por meio de alianças e redes de relacionamento (*networks*), seja a partir da proximidade geográfica, social ou organizacional (Chaminade *et al.*, 2017).

No desenvolvimento do conhecimento científico e tecnológico de países periféricos, o estabelecimento de *networks* de informações e compartilhamento do conhecimento são ainda mais relevantes (Garcia, 2022). Diferentes instrumentos têm sido utilizados para medir a importância do conhecimento no avanço tecnológico, dentre esses, destacam-se: número de artigos científicos publicados, número de patentes depositadas, o número de citação dos documentos (como os artigos e patentes) e número de co-citação dos documentos (como os artigos relacionados ou tecnologias relacionadas).

Devido às características do surgimento de um novo mercado, os estágios iniciais das inovações necessitam de uma atuação mais incisiva por parte do Estado, seja na formulação de normas e regras (incentivos indiretos), ou na disponibilidade de recursos financeiros para as atividades (incentivos diretos). Para Mazzucato (2013), no processo de desbloqueio de “novos caminhos”, faz-se imprescindível a criação de um ambiente capaz de promover determinadas mudanças e incentivar a atuação conjunta do setor privado, a partir da criação de instrumentos regulatórios e disponibilidade de financiamento para C&T e P&D.

Nesse sentido, as atividades de P&D são apenas uma parte do processo de inovação, no qual englobam a pesquisa básica, aplicada e o desenvolvimento experimental (OCDE, 2013). Considerado como um processo não aleatório, após cada inovação radical, as noções de trajetória ou paradigma tecnológico destacam a importância das inovações incrementais no caminho de crescimento econômico (Perez, 2010). Em linhas gerais, as mudanças de paradigmas implicam numa complexa combinação de inovações radicais e incrementais e novos conjuntos de sistemas tecnológicos, no qual exigem novas instituições e novas formas de funcionamento (Felipe; Villaschi Filho, 2023). Segundo Lema e Perez (2024), os saltos tecnológicos criaram “janelas de oportunidades” para melhorias econômicas e sociais, com mudanças de instituições, mercados e tecnologias. Portanto, a trajetória da inovação de um novo paradigma não é determinada somente pela tecnologia em si, mas também pela mudança dos atores sociais no qual moldam a direção preferida dentro de um novo sistema. Uma mudança de paradigma em curso está relacionada às discussões nas temáticas de meio ambiente e sustentabilidade.

Para Ferreira *et al.* (2023), o desenvolvimento de pesquisas científicas em energias renováveis tem sido primordial para o avanço e a maturidade dessas tecnologias. Do mesmo modo, para Pamplona *et al.* (2023), faz-se imprescindível solucionar os gargalos em CT&I para que se possa promover o desenvolvimento da bioeconomia no Brasil. Há um crescimento no debate da transição sustentável de diferentes setores em defesa da descarbonização em nível global e da mitigação dos desafios provocados pelas atividades intensivas no uso de combustíveis fósseis. No entanto, é a construção social da direção para um novo paradigma, em vez da natureza inerente das próprias “tecnologias sustentáveis”, que pode criar as “janelas de oportunidades” para o desenvolvimento das economias e, em especial, para as economias retardatárias, conforme apontado por Lema e Perez (2024).

Por fim, as atividades de ciência, pesquisa e inovação têm sido apontadas como primordiais para promover as transformações estruturais que esse novo paradigma requer. No contexto da

transformação do setor de transporte, que abrange as principais atividades intensivas em emissões de CO₂, os governos têm procurado encorajar um maior desenvolvimento e adoção de tecnologias verdes e sustentáveis, a partir de políticas verticais, criação de normas e leis, e disponibilidade de investimentos.

2.2 Descarbonização e biocombustíveis: mercados e regulação, com foco no setor de transporte aéreo

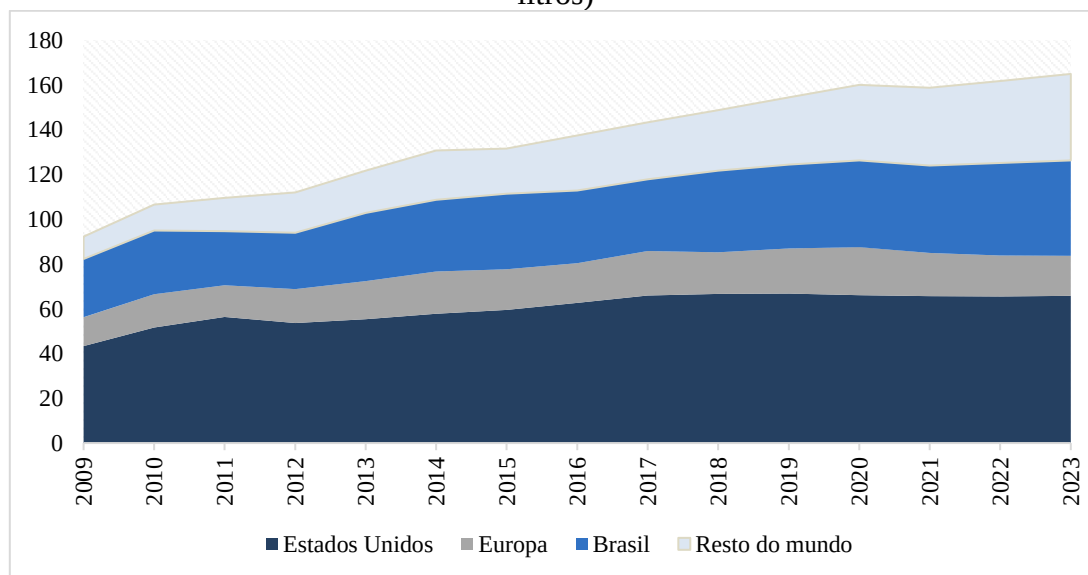
O uso generalizado de combustíveis fósseis resulta em consequências ambientais e econômicas como poluição, aumento do aquecimento global e competição por reservas de petróleo visto que esta é uma fonte cada vez mais limitada (Mayvan *et al.*, 2012). Nesse sentido, os subsídios para “tecnologias verdes” podem expandir a demanda global, freando alternativas fósseis e reduzindo a poluição. Esse debate sobre a preservação ambiental e a mitigação dos danos causados por mudanças climáticas tem sido objeto de interesse dos países no âmbito dos acordos resultantes das Conferências das Partes (COP), desde a primeira versão, realizada em Berlim, em 1995.

Recentemente, a Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU) consolidou as metas para o desenvolvimento sustentável. Na COP 26, realizada em 2020, na Escócia, foi apontada como estratégia relevante para o processo de descarbonização a transformação da matriz de transportes. A perspectiva é reduzir as emissões líquidas de CO₂ para zero até 2050 (IRENA, 2023). Esse cenário se reflete tanto no aumento da produção de biocombustíveis, quanto nas iniciativas de regulação do setor, em diversos países, inclusive no Brasil. Recentemente, as atenções têm se voltado para o setor aéreo, impulsionadas pelo movimento de regulação nesses países.

2.2.1. Biocombustíveis: mercado e regulação de SAF no cenário internacional

O mercado de biocombustíveis tem se expandido nesta última década. De acordo com Torroba e Orozco (2022), de 2013 a 2022, a produção mundial de bioetanol cresceu 20%. A variação anual oscilou entre -10% e 7%, com queda para 101,25 milhões de m³ (metros cúbicos), em 2020, devido à crise sanitária, porém, em 2021, a produção subiu 3%, atingindo mais de 108,2 milhões de m³. Há uma crescente produção de biocombustíveis convencionais (biomassa de cana-de-açúcar, biomassa de milho, óleo de palma, óleo de soja e outros), com destaque para os Estados Unidos e o Brasil, entre 2009 e 2023, o Gráfico 1 ilustra esse movimento.

Gráfico 1 – Grupo de países: Produção de biocombustíveis convencionais, 2011-2023 (Bilhões de litros)



Fonte: Elaboração dos autores, com base em IRENA (2024).

Os principais produtores de biocombustíveis líquidos foram, em 2022, respectivamente, os Estados Unidos (42%), Brasil (24%), Indonésia (6%), China (3%) e Alemanha (3%), de acordo com Torroba e Orozco (2022). Os demais países, incluindo França, Índia, Tailândia, Argentina, Países Baixos, Espanha e Canadá, somam 22% da produção. No entanto, mesmo diante dos avanços na utilização de biocombustíveis no modal terrestre em diferentes economias, as alterações no setor aéreo permanecem sendo um desafio.

A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) com o Programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) tem estabelecido metas de redução de emissões para mercados com uma participação acima de 0,5%, a partir do uso de combustíveis sustentáveis, o SAF (ANAC, 2019). De acordo com os dados da EPE (2024), em 2023, os Estados Unidos lideravam a produção mundial de SAF, com as empresas Gevo, Fulcrum Bioenergy e Alder Renewables somando um volume total superior a 22 bilhões de litros. Os dados mais detalhados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Grupo de países: Principais empresas produtoras de SAF, 2023 (Bilhões de litros)

Empresa	Volume total (até out. 2023)	País
Gevo	9,55	EUA
Fulcrum - Bioenergy	6,72	EUA
Alder - Renewables	5,68	EUA
Shell - Aviator	2,80	Reino Unido
Neste	2,45	Finlândia

Fonte: Elaboração dos autores, adaptado da EPE (2024).

A maior produtora é a empresa Gevo, com 9,55 bilhões de litros no mesmo ano. A empresa Shell - Aviator (Reino Unido) e a Neste (Finlândia) também apresentam uma participação significativa desse mercado, com 2,80 bilhões e 2,45 bilhões de litros, respectivamente. Esse volume de produção tem se expandido diante das iniciativas globais para incentivar o uso de SAF mostram diferentes estágios de maturidade. O Quadro 1 descreve algumas iniciativas por países para produção de SAF.

Quadro 1 – Grupo de países: Principais iniciativas para implementação da SAF

País	Iniciativa	Mandato	Duração
Reino Unido	Política pública em fase de construção com o objetivo de introduzir metas a partir de 2025 e atingir pelo menos 10% de utilização de SAF	Em análise	2030
EUA	Objetivo de ampliar a produção de SAF em, pelo menos, 3 bilhões de litros por ano.	Em análise	2030
França	Definiu <i>Roadmap</i> de SAF com objetivos de consumo de 2% até 2025, 5% até 2030 e 50% em 2050.	Implementado	2050
Espanha	Objetivo de fornecimento de 2% de SAF em 2025. Novas biorrefinarias em planejamento, com foco especial em resíduos.	Em análise	-
Países Baixos	<i>Roadmap</i> de SAF em desenvolvimento com um mandato a nível nacional ou da união Europeia.	Em análise	-
Alemanha	Planeja introduzir um mandato de SAF em 2026 com foco na rota <i>Power to Liquids</i> (PtL).	Em análise	-
Noruega	Em 2020, introduziu o mandato de SAF de 0,5% com a ambição de aumentar para 30% em 2030.	Implementado	2030
Suécia	Implementou mandato volumétrico de SAF de 1% em 2021, com o objetivo de atingir 30% em 2030.	Implementado	2030
Finlândia	Intenção de implementar mandato de SAF de 30% até 2030.	Em análise	2030
Coreia do Sul	Estabelecerá padrões de qualidade para SAF em 2024 e planeja iniciar mandato de mistura em 2026.	Em análise	-

Fonte: Elaboração dos autores, adaptado da EPE (2024).

A Noruega, a Suécia e a França, por exemplo, têm liderado a implementação de mandatos e

metas progressivas, enquanto Reino Unido, Alemanha e Coréia do Sul ainda estão em fase de análise e planejamento. O ano de 2030 emerge como um marco de mudança para muitas economias, o que reflete também o seu compromisso com a descarbonização das atividades de aviação estabelecidas pelo CORSIA.

2.2.2. *Biocombustíveis: mercado e regulação de SAF no caso brasileiro*

No Brasil, a transformação do setor de transportes é fundamental para a redução da poluição atmosférica. Em 2022, este setor atingiu níveis de emissões de 210 milhões de toneladas (Mton) de CO₂ equivalentes, o que representou cerca de 50% do total de emissões do país, superando os níveis de emissões das indústrias (EPE, 2023).

O país tem historicamente incentivado o uso de biocombustíveis e, mais recentemente, apresentou o Programa Nacional do Bioquerosene, em 2017, e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), em 2021 (BRASIL, 2017, 2021). No âmbito dos compromissos assumidos, o Brasil está em processo de regulamentação do programa Combustível do Futuro (Projeto de Lei nº 528, de 2020). Embora o setor aéreo ainda enfrente desafios com a produção de SAF, foi aprovada em outubro de 2024 a Lei nº 14.993, que regulamenta e incentiva a produção e o uso de biocombustíveis sustentáveis no país. No âmbito desse esforço, o governo brasileiro lançou o Programa Combustível do Futuro, que tem como objetivos: i) instituir programas de combustíveis sustentáveis; ii) alterar limites de combustíveis sustentáveis na mistura com fósseis; iii) regulamentar as atividades de captura de carbono e comercialização de combustíveis sintéticos; iv) integrar iniciativas adotadas em programas federais - RenovaBio, Mover, PBEV.

O Programa Combustível do Futuro, é composto por um conjunto de outros programas, envolvendo: i) Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; ii) Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV); e iii) Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (PROBIOQAV). O objetivo é intensificar as ações de descarbonização, em três frentes: i) elevar o uso de etanol na gasolina, incentiva o uso do biometano e busca regular a captura de carbono; ii) ampliar as ações para o segmento de transporte de carga, com o incentivo ao uso do biodiesel (PNDV) e, por fim, iii) abranger o segmento de aviação seguindo a tendência mundial, ao incentivar a pesquisa, a produção e o uso do bioquerosene de aviação (PROBIOQAV). No caso deste último, há metas específicas para utilização de SAF no mercado de combustíveis de aviação.

De acordo com os dados do MCTI (2022), para promover a redução dos níveis de emissões do setor e atender todas as rotas do mercado de SAF, precisarão de cerca de 25 milhões de litros entre 2027 e 2035. Ainda segundo o MCTI (2022), os percentuais de emissões evitadas variaram conforme a rota e a matéria-prima de SAF utilizadas, variando de 64,8% na rota ATJ com cana-de-açúcar até 100% na rota HEFA com resíduos de esgoto e 94,4% na rota FT com biogás. A Tabela 2 traz um resumo esquemático das principais rotas de produção.

Tabela 2 – Brasil: Projeções de SAF para a meta de 1% de redução de emissões (Milhões de litros)

Rota	Matéria-prima	Volume de SAF (2027)	Volume de SAF (2035)
ATJ	Cana-de-açúcar	78	106
ATJ	Resíduo de madeira	70	98
FischerTropsch (FT)	Captura de CO ₂ do ar	56	79
FischerTropsch (FT)	Etanol	58	81
FischerTropsch (FT)	Biogás	54	76
HEFA	Reciclagem de óleo fritura	57	80
HEFA	Sebo	65	91
HEFA	Resíduos de esgoto	11	16

Fonte: Elaboração dos autores, adaptado do MCTI (2022).

Cabe destacar que um desafio importante para atingir as metas estabelecidas pelo CORSIA e a política nacional – de 1% de redução de emissões – refere-se à disponibilidade limitada de SAF em volumes suficientes. Conforme descritas na Tabela 2, as rotas *FischerTropsch* (FT) exigem menos

SAF para o mesmo nível de redução. A rota HEFA com resíduos de esgoto se destaca pelo maior potencial de redução de emissões ao evitar o metano. Mas nas rotas ATJ e FT há um potencial considerável para o país, com o uso da cana-de-açúcar como matéria-prima.

Diante do processo de transição nas atividades de aviação e dos múltiplos desafios acoplados nessa transformação, faz-se necessário o desenvolvimento e a otimização da cadeia de produção para que se possa obter os benefícios das economias de escala, incluindo o desenvolvimento tecnológico da atividade e o estabelecimento de infraestruturas de processamento. Cabe destacar que há uma “janela de oportunidade” nesse processo de transição, especialmente nos países que dispõem de uma extensão de terras agrícolas, condições naturais e capacitação humana.

No entanto, nos cenários com oscilações do mercado associadas a políticas de curto prazo e estruturação sistêmica inadequada, o processo de transição para uma economia de baixo carbono poderá intensificar as disparidades existentes. E, nesse contexto, o Brasil pode ter uma oportunidade para desenvolver uma indústria de combustíveis renováveis em alta escala.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia adotada apresenta caráter quantitativo e descritivo, tendo como propósito, neste contexto, o mapeamento científico e tecnológico, a partir dos procedimentos de bibliometria científica e prospecção de patentes, a fim identificar a evolução desse mercado e os principais *players* globais. Isto é, identificar no âmbito científico os principais autores, termos e instituições, e no âmbito tecnológico os principais produtores, países e empresas responsáveis pelo maior número de patentes publicadas nessa área de inovação. Em específico, identificar a posição do Brasil em relação a outros países diante desse mercado de biocombustíveis para aviação.

A estratégia de busca adotada envolveu o uso de palavras-chave e operadores *booleanos* nas principais bases de dados fornecidas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a base de dados internacional, *The Lens*. Esses métodos permitem analisar grandes conjuntos de dados, destacando áreas emergentes e sutilezas evolutivas de um campo, facilitando a identificação de tendências e inovações futuras (Mayerhoff, 2008; Amparo; Ribeiro; Guarieiro, 2012; Donthu, *et al.*, 2021). Além disso, possibilitam organizar e orientar avanços prospectivos em Ciência e Tecnologia (C&T), que podem influenciar decisões de partes interessadas como indústria e sociedade civil. Não obstante, para fins comparativos, utiliza-se a análise de correlação e o mapeamento para um grupo de países que apresentam potencial acima da média de produção científica e/ou tecnológica.

Nesse contexto, a presente seção discutirá os procedimentos bibliométricos e de prospecção de patentes, bem como a correlação de *Pearson* utilizada para fins comparativos.

3.1 Procedimentos de bibliometria e de prospecção de patentes

Os indicadores bibliométricos têm sido frequentemente utilizados para a avaliação das atividades científicas. Esse procedimento permite inferir tendências de pesquisas e identificar mudanças nas fronteiras temáticas (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Além disso, são procedimentos de caráter robusto que permitem adotar critérios replicáveis (TRANFIELD *et al.*, 2003).

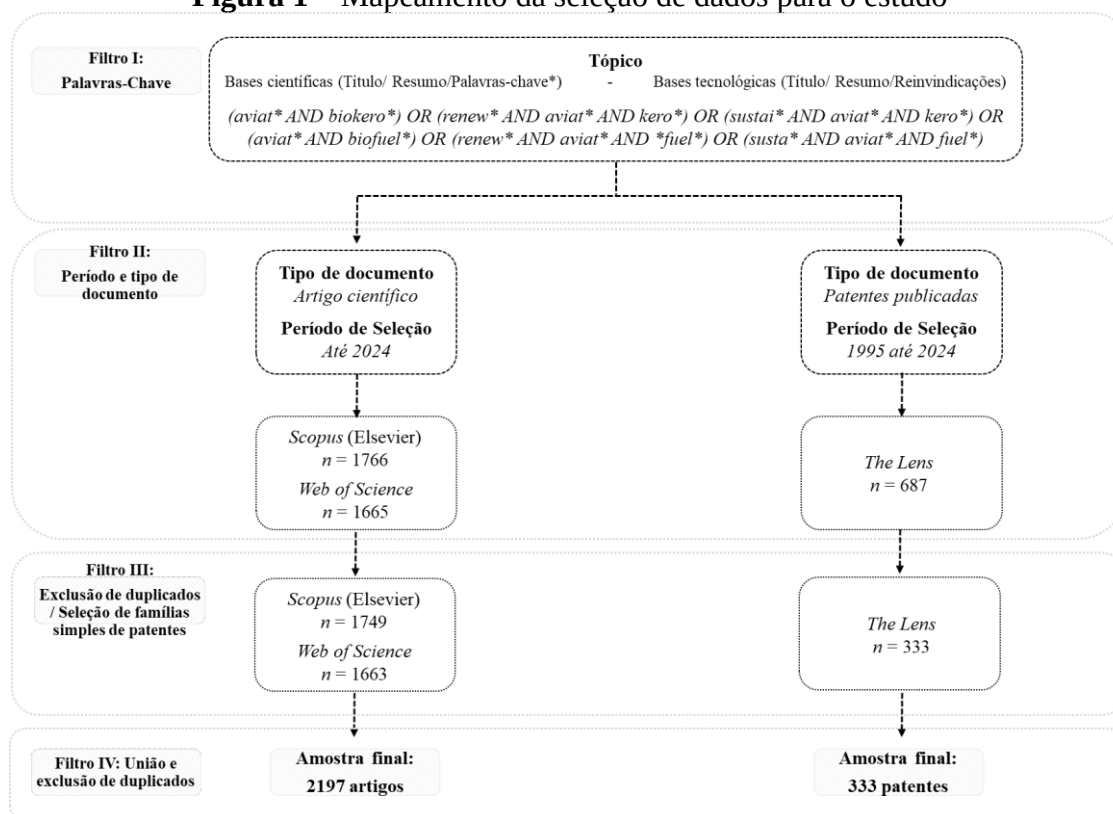
No presente trabalho, utiliza-se das principais bases de dados dos periódicos revisados por pares disponibilizados no portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a saber: *Scopus (Elsevier)* e *Web of Science (Coleção Principal)*. A busca foi realizada em janeiro de 2025, utilizando como Filtro I as seguintes palavras-chave e operadores *booleanos* em todos os tópicos (título, resumo ou palavras-chave): (*aviat* AND biokero**) OR (*renew* AND aviat* AND kero**) OR (*sustai* AND aviat* AND kero**) OR (*aviat* AND biofuel**) OR (*renew* AND aviat* AND *fuel**) OR (*susta* AND aviat* AND fuel**). O Filtro II seleciona por documentos do tipo “artigo científico” para o período “até 2024”. O Filtro III, exclui as duplicações dentro da própria base, enquanto o Filtro IV extrai do somatório das bases o número de duplicações. Cabe ressaltar que a fim de extrair o número máximo de artigos associados da presente temática a escolha das palavras-chave

partiram de um *brainstorm* da literatura preliminarmente.

Em relação ao mapeamento de patentes (patentometria), contribui com informações que podem ser usadas na análise de panoramas e tendências tecnológicas (Antunes *et al.*, 2018) de determinado segmento de mercado. Assim, para a prospecção de patentes, realizada em janeiro de 2025, utilizou-se a base de dados internacional *The Lens*. A escolha dessa base justifica-se por sua relevância em relação ao expressivo volume de documentos e informações disponibilizadas, quando comparada a outras bases. As palavras-chave utilizadas foram mantidas em relação à busca de artigos científicos, na etapa anterior, diferenciando-se apenas o fato de que nas bases tecnológicas não há o campo “palavras-chave”, enquanto há o de “reinvidicações”. Assim, as buscas de documentos foram feitas a partir dos campos título, resumo e reinvidicações, na base de “patentes publicadas” (Filtro I). Em seguida, no Filtro II, definiu-se o período de 1995 até 2024 para levantamento de dados. No Filtro III, foi selecionada a opção “Grupo por Família Simples” (*Group by Simple Family*), no item Família de Documentos, visando excluir as patentes duplicadas.

Em relação à região geográfica da busca, optou-se pelo mapeamento de todos os países depositantes no mundo, assim como as principais empresas que detém a tecnologia, o que permitiu observar a posição do Brasil e as suas rotas de produção. Ainda, em relação ao mapeamento dos países, foi possível, por meio da base *The Lens*, a identificação de todos os países em que a patente foi depositada, considerando as “jurisdições simples de membros da família”. Assim, mediante esse levantamento, realizou-se a contagem de patentes em cada país, a fim de entender qual o seu quantitativo efetivo de tecnologias. A Figura 1 ilustra o mapeamento da seleção dos dados para a análise da bibliometria e da prospecção de patentes.

Figura 1 – Mapeamento da seleção de dados para o estudo



Fonte: Elaboração dos autores.

Cabe destacar que a classificação de patentes escolhida foi a Classificação Cooperativa de Patentes (CPC), visto que possui, de acordo com o INPI (2024), um número maior de grupos (200 mil), enquanto a Classificação Internacional de Patentes (IPC) possui 70 mil, ou seja, a CPC possibilita uma análise mais detalhada para a prospecção. De modo complementar, visando a compreensão da situação do Brasil, fez-se um levantamento patentário específico da Petrobras, por meio da base *The Lens*. Foram listados os números prioritários, a primeira data de prioridade

(depósito), o título e os inventores de cada patente da empresa.

Por fim, visando estabelecer uma comparação, realizou-se a análise de Correlação de *Pearson* entre o número de patentes publicadas por países e o número de artigos produzidos segundo a origem do autor-correspondente. Para a interpretação da correlação, um coeficiente “ $r=1$ ” indica uma relação positiva perfeita, “ $r>0$ ” indica uma relação positiva e “ $r<0$ ” indica uma relação negativa, entre “X” e “Y” (Hill *et al.*, 2010). Cabe destacar que a correlação não implica causalidade, isto é, não significa que a publicação de patentes gera a produção de artigos e *vice-versa*, porém apresenta indícios de uma relação estatística entre os elementos. Para esse procedimento optou-se por selecionar não apenas o país de origem da patente, mas também todos os países em que as patentes se encontram protegidas, o que pode indicar a relevância do mercado nessas economias, descritas com mais detalhes na seção de análises.

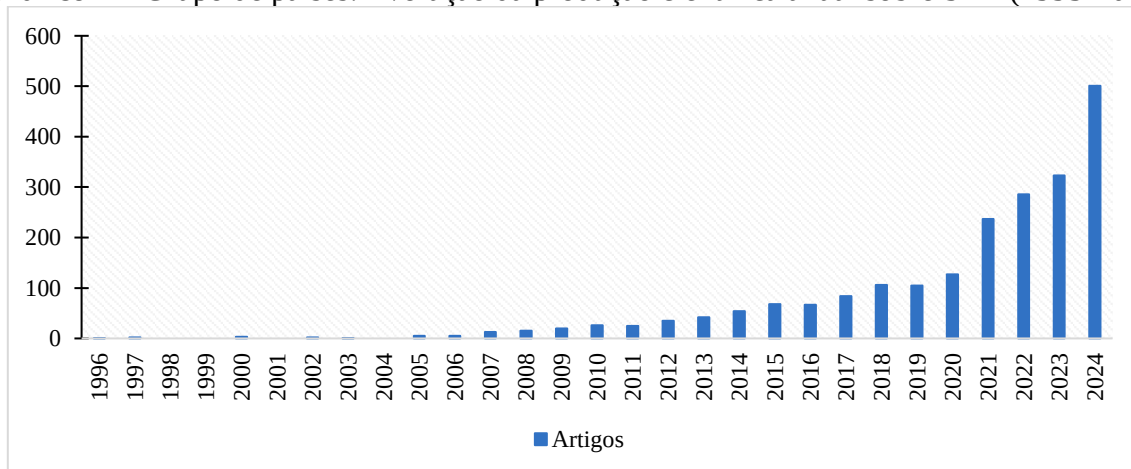
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos procedimentos descritos anteriormente, a presente seção se subdivide em três subseções. Inicialmente, serão discutidos os resultados obtidos para a produção científica (*proxy* de artigos científicos) e suas principais implicações. Posteriormente, serão analisados os resultados obtidos para a produção tecnológica (*proxy* patentes) e os direcionamentos inovativos que têm sido apresentados no setor. Por fim, a última seção apresentará discussões em torno da associação entre a produção de conhecimento científico e a sua proteção por meio de patentes, bem como suas principais implicações para o processo de transição do setor de transporte, posicionando o Brasil na corrida global.

4.1 Desenvolvimento científico: produção de conhecimento em SAF

A capacidade do país em conhecimento científico sobre um tema pode ser mensurada pela sua produção de artigos científicos. No caso do SAF, desde a década de 1970 a temática tem sido investigada, porém, foi apenas nas duas últimas décadas que houve um volume regular mais expressivo de publicações sobre a temática, conforme ilustra o Gráfico 2. Os estudos inicialmente se concentraram nas discussões em torno dos níveis de emissões das aeronaves na atmosfera (ver Lee *et al.*, 1997), da substituição de combustíveis fósseis na aviação por hidrogênio (ver Gretz *et al.*, 1990; Gretz, 1991; Gretz *et al.*, 1994; Contreras *et al.*, 1997; Corchero; Montañés, 2005) e as vantagens da substituição (ver Coroneos *et al.*, 2005).

Gráfico 2 – Grupo de países: Evolução da produção científica anual sobre SAF (1995-2024)



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados da CAPES (2025).

Dentre os principais trabalhos citados da temática, alguns merecem destaque. O trabalho de Chapman (2007) aborda sobre as emissões de gases de efeito estufa do setor de transporte. Lee (2010)

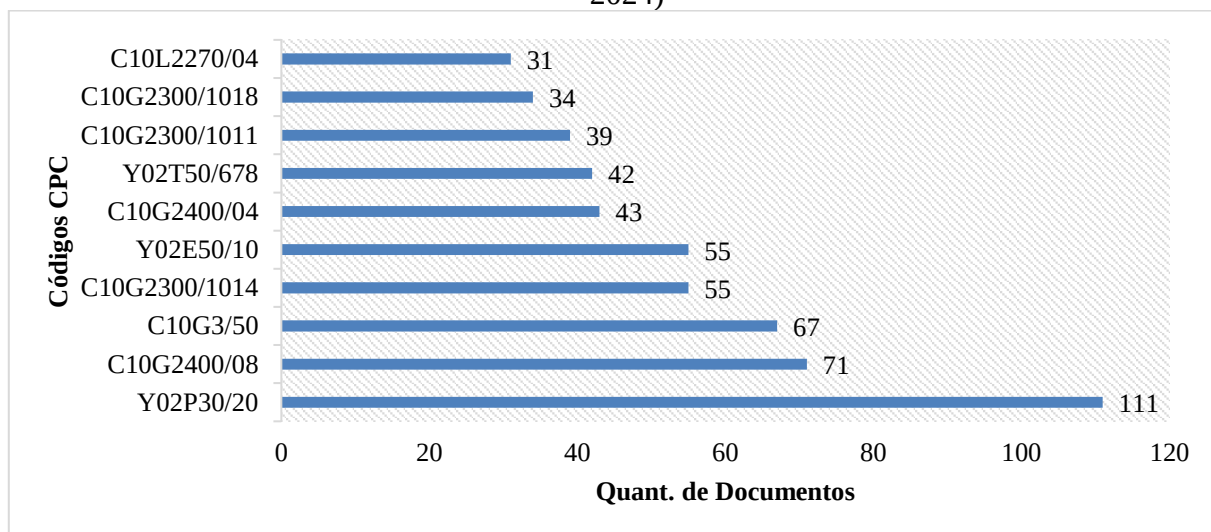
Cabe destacar que os principais países da produção do conhecimento, isto é, países de origem do autor foram também USA, China, Alemanha, Reino Unido e Brasil, no entanto, com magnitudes diferentes do *ranking* da publicação científica, como no caso brasileiro que apresenta um total de 293 artigos publicados, porém apenas 81 artigos tinham o Brasil como origem do autor-correspondente. Um outro ponto é o número de estudos de casos investigados pelos artigos, liderados por USA, China, Reino Unido, Alemanha e Austrália, o que pode sinalizar a importância da temática nesses mercados. Os principais termos utilizados na produção científica estão representados na Figura 2, que traz uma nuvem de palavras obtidas com os resumos dos artigos e com as palavras-chave indicadas pelos autores. Por fim, as palavras-chave em inglês que mais aparecem nos trabalhos são: “biomassa”, “emissões”, “combustível de jato”, “conversão”, “performance”, “aeronave” e “energia”, conforme ilustra a Figura 2.

4.2 Desenvolvimento tecnológico: patentes em SAF

O conhecimento científico tem uma expressão econômica mais bem definida quando está protegido por um título de propriedade intelectual. Nesse caso, foram consideradas as patentes, que protegem o conhecimento em um determinado país, garantido a exploração econômica com exclusividade para uma dada tecnologia.

Considerando o maior número de patentes identificado na base *Lens*, a análise concentrou-se nos resultados apresentados por essa fonte, no total, foram identificados 687 pedidos de patentes, distribuídas em 333 famílias patentárias.

Gráfico 4 – Grupo de países: *Ranking* dos códigos CPC na classificação das patentes de SAF (1995 – 2024)



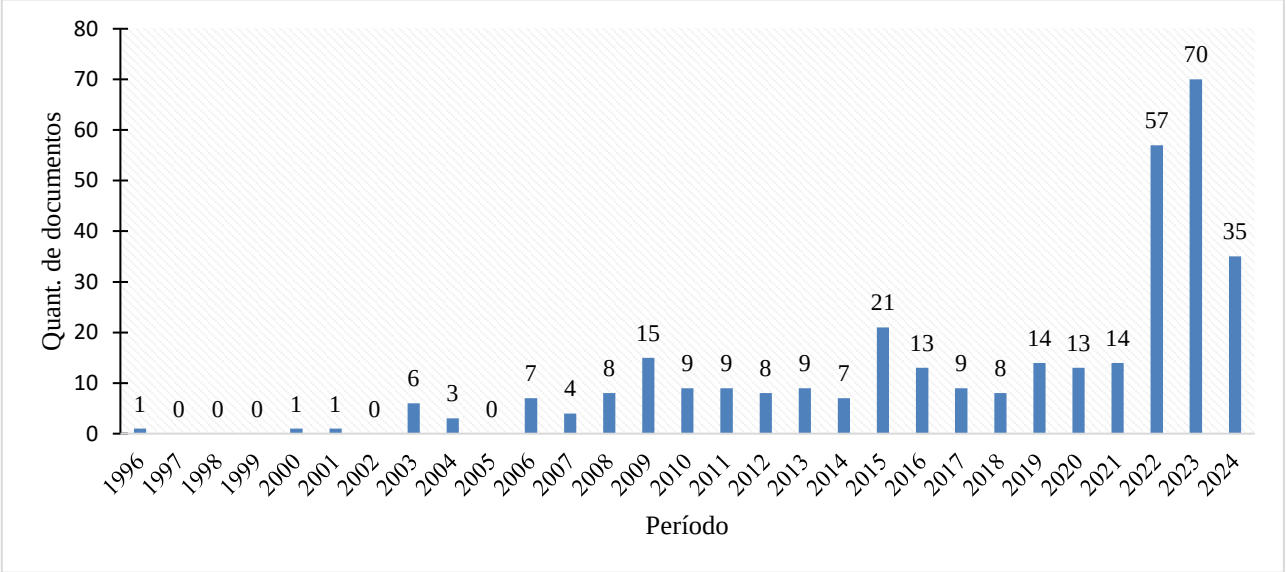
Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da base *Patents Lens* (2025).

O Gráfico 4 demonstra a classificação dessas patentes de acordo com o tipo de tecnologia e matéria-prima empregada. O sistema de classificação adotado foi o CPC. As classificações mais predominantes são Y02P30/20, com 111 patentes, C10G2400/08, com 71, e C10G3/50 com 67 documentos. A primeira classificação mencionada é utilizada para indexar tecnologias referentes ao refino de petróleo e à indústria petroquímica usando bio-matéria-prima. A segunda está atrelada à produção de combustíveis de avião, a partir de recuperação de óleos de hidrocarbonetos de xaxil, areia ou gases; misturas de refino constituídas principalmente por hidrocarbonetos; reforma da nafta; e ceras minerais. A terceira, à produção de misturas de hidrocarbonetos líquidos a partir de materiais orgânicos contendo oxigênio, na presença de hidrogênio, doadores de hidrogênio ou compostos geradores de hidrogênio. Assim, é um grupo tecnológico focado na produção de bio-matéria-prima aplicada à aviação. Por fim, destacam-se as tecnologias que utilizam o hidrogênio em seu processo

produtivo, considerando que mais recentemente o uso do hidrogênio verde vem sendo discutido como combustível renovável e que utiliza energia limpa, não gerando emissões de carbono na atmosfera.

O Gráfico 5 apresenta a evolução do quantitativo de patentes em nível mundial. Mesmo após décadas de baixa atividade (1960-2000), o crescimento de patentes relacionadas a SAF na última década sinaliza um processo acelerado na transição da atividade de aviação para a sustentabilidade. O número de patentes aumentou moderadamente a partir de 2003, com crescimento oscilante, porém, com crescimento contínuo após o ano de 2021 (14 patentes), com pico em 2023 (70 patentes). A “queda” observada no gráfico, referente ao ano de 2024 (35 patentes), pode ser justificada pelo período de “sigilo” destes documentos, referente aos 18 primeiros meses após o depósito, em que as invenções ainda não foram publicadas e, portanto, gera uma redução temporária nos registros identificados. De modo geral, o crescimento na produção de tecnologias pode ser reflexo de pressões ambientais, avanços tecnológicos, compromissos globais com a descarbonização e mudanças nas legislações dos países, indicando um mercado promissor.

Gráfico 5 - Grupo de países: Evolução do número de patentes publicadas sobre SAF (1995 – 2024)

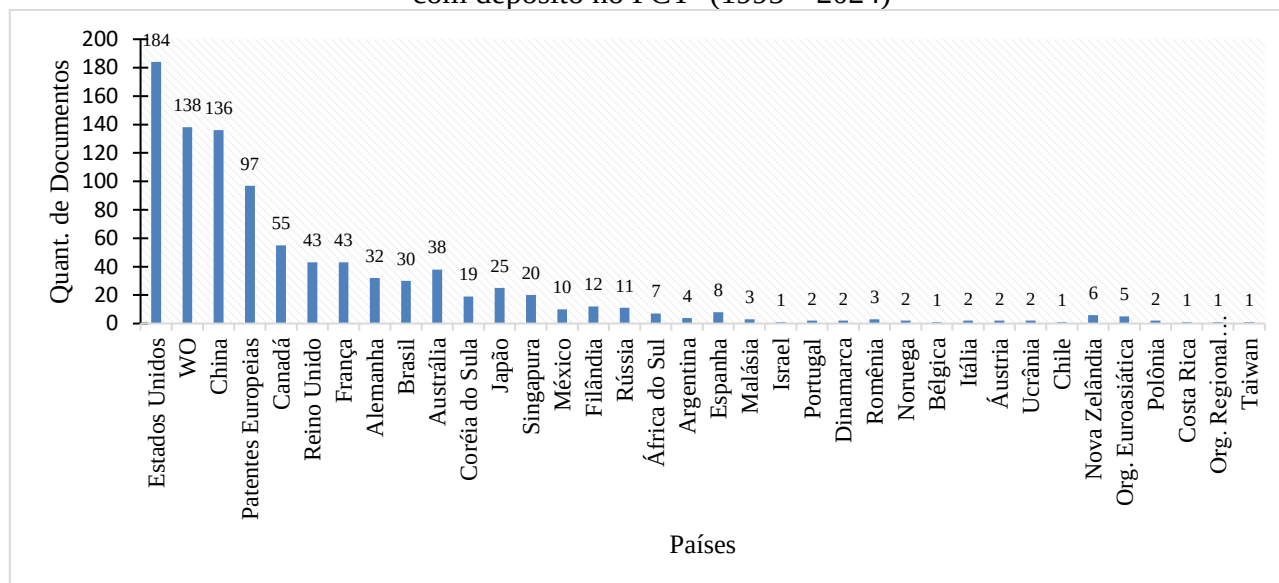


Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da base *Patents Lens* (2025).

Em relação aos países de origem das tecnologias de biocombustíveis de aviação, os EUA, com 184 patentes, mantêm-se na posição de liderança, assim como identificado nos resultados de produção científica. A segunda posição é ocupada pelas patentes depositadas via Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT)⁷, representando um total de 138 patentes publicadas. Em terceira colocação, tem-se a China, com 136 patentes. Além dessas, tem-se as patentes da Organização Europeia de Patentes (97 documentos), o Canadá (55), Reino Unido (43), França (43) e Alemanha (32), marcando uma posição de destaque também dos países europeus. Dentre os países com uma importante posição nesse seguimento, destaca-se o Brasil, país periférico e com um total de 30 documentos patentários de SAF, conforme ilustra o Gráfico 6.

⁷ O código WO refere-se à WIPO (OMPI), sendo documentos originários da Organização Mundial de Propriedade Intelectual, sendo uma sigla que indica que o depositante se beneficiou do PCT (Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes).

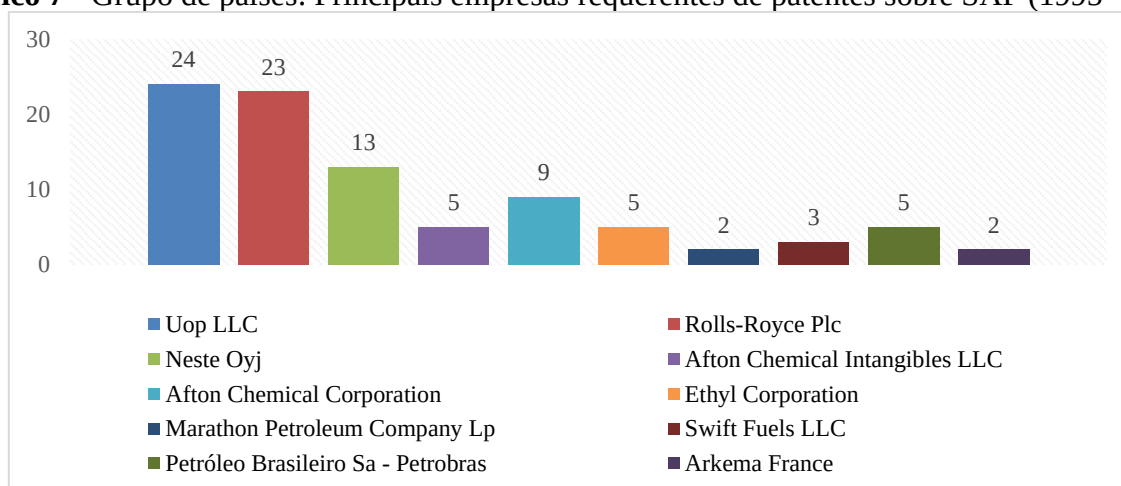
Gráfico 6 - Grupo de países: Evolução do número de patentes publicadas sobre SAF, nos países com depósito no PCT⁸ (1995 – 2024)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da base *Patents Lens*, 2025.

No que se refere às empresas que mais tiveram patentes publicadas sobre biocombustível aplicado para as atividades de aviação, verificou-se o esforço da empresa americana *Uop LLC* (24 patentes), da empresa inglesa *Rolls Royce* (23 patentes) e a empresa *Neste* (13 patentes) da Finlândia, que estão na liderança do desenvolvimento de tecnologias inovadoras para SAF. A brasileira Petrobras, que também consta no *rol* de principais requerentes no mundo, participa desse contexto, ainda que o interesse por soluções sustentáveis esteja em estágio nascente, como pode ser observado no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Grupo de países: Principais empresas requerentes de patentes sobre SAF (1995 – 2024)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da base *Patents Lens*, 2025.

No que se refere ao Brasil, no *ranking* das principais empresas do mercado, a Petrobras encontra-se na 5ª (quinta) posição, o que proporciona ao país um mercado promissor, com considerável perspectiva estratégica na produção de biocombustíveis para aviação. O Quadro 2 apresenta as patentes depositadas pela Petrobrás, conforme identificado na base *The Lens*.

⁸ O gráfico apresenta algumas organizações multilaterais que representam vários países em matéria de depósitos de patentes, tais como WIPO (WO), Organização de Patentes Europeias, Organização Euroasiática e Organização Regional Africana da Propriedade Intelectual.

Quadro 2 – Petrobras: Patentes de SAF depositadas em SAF

Números prioritários	Primeira data de prioridade	Título	Inventores
BR 102021015852 A	2021-08-11	<i>Process for the integrated production of H2 and aviation kerosene from a renewable raw material</i>	Roberto C. P. Bittencourt
BR 102021024746 A	2021-12-07	<i>Process for production of aviation kerosene from a stream rich in aromatic compounds of renewable source</i>	Jose Luiz Zotin; Marcelo E. Pacheco; Rodrigo C. Chistone; William R. Gilbert; Isa S. Duarte; Andrea de R. Pinho; Jefferson R. Gomes
BR 102020017281 A; BR 2021050352 W	2020-08-24	<i>Catalysts and selective process for the production of renewable aviation fuels and biofuel produced</i>	Jefferson R. Gomes; Jose Luiz Zotin; Rodrigo C. Chistone; Anilza de A. L. Correa; Marcelo E. Pacheco
BR 102020020883 A; BR 2021050406 W	2020-10-09	<i>Renewable aviation kerosene production process</i>	Rafael M. de Almeida
BR PI1001608 A; BR 2011000095 W	2010-05-21	<i>Process for the production of aviation biokerosene and aviation kerosene composition</i>	Roberto L; Carvalho; José A. V. Vieira; Mauro I. Rocha; Marcelo V. Alves
BR 102021026313 A; BR 102022025516 A; BR 2022050506 W	2021-12-23	<i>Integrated process for producing long-chain linear olefins and aviation biokerosene from homogeneous metathesis</i>	Carlos R. K. Rabello; Marlito G. Junior
BR 102019027016 A; BR 2020050542 W	2019-12-17	<i>Verfahren zur erzeugung von erneuerbaren strömen aus bioöl und dessen verwendung zur herstellung von erneuerbaren brennstoffen</i>	Andrea de R. Pinho; Adriano do C. Fraga; Luiza T. Abrantes; Jefferson R. Gomes; Jose L. Zotin; Iris M. Junior; Vitor L. Ximenes; Marlon B. B. de Almeida

Fonte: elaboração dos autores, a partir dos dados da The Lens (2025).

Considerando o mercado de combustíveis sustentáveis de aviação, destaca-se o pioneirismo da Petrobras no setor, com o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o meio ambiente e contribuição para a descarbonização do setor aéreo. Verifica-se, também, que nos últimos anos tem havido crescimento da produção tecnológica em questão. Além da Petrobras, outras empresas ou instituições brasileiras que possuem patentes na área são a Embraer, o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e o Instituto Militar de Engenharia (IME). De modo geral, esse quadro demonstra que o Brasil, embora não esteja nas primeiras posições no ranking mundial de produção de tecnologias no setor, constitui também um mercado de interesse para a produção de SAF.

4.3 Produção de conhecimento científico e tecnológico em SAF: análise para um grupo de países

A produção de artigos científicos busca refletir a capacidade do país em produzir conhecimento. Nesse sentido, foram observados os artigos considerando o país dos autores da produção. Já a patente, refere-se ao título que garante ao seu detentor o direito de exploração do conhecimento protegido num determinado país.

Para a análise, foram observados os pedidos de patentes publicados nos respectivos países. Buscou-se estabelecer uma associação entre a produção de artigos e de patentes. O objetivo preliminar é investigar se os países que produzem conhecimento estão em mercados de interesse para a proteção desse conhecimento. Foi utilizado inicialmente uma análise de correlação e em seguida montou-se um quadro para classificação dos países, de acordo o respectivo posicionamento em relação a essas variáveis.

A análise de correlação foi realizada para duas amostras, o período total de análise (1995-2024) e o período da última década (2010-2024), a fim de verificar se a associação entre as variáveis se mantém. A Tabela 3 traz os resultados da correlação, em ambos os períodos.

Tabela 3 – Correlação de Pearson entre patentes e artigos sobre SAF

Período	Coefficiente	p-valor
(1995-2024)	0.9321	0.0000
(2010-2024)	0.9400	0.0000

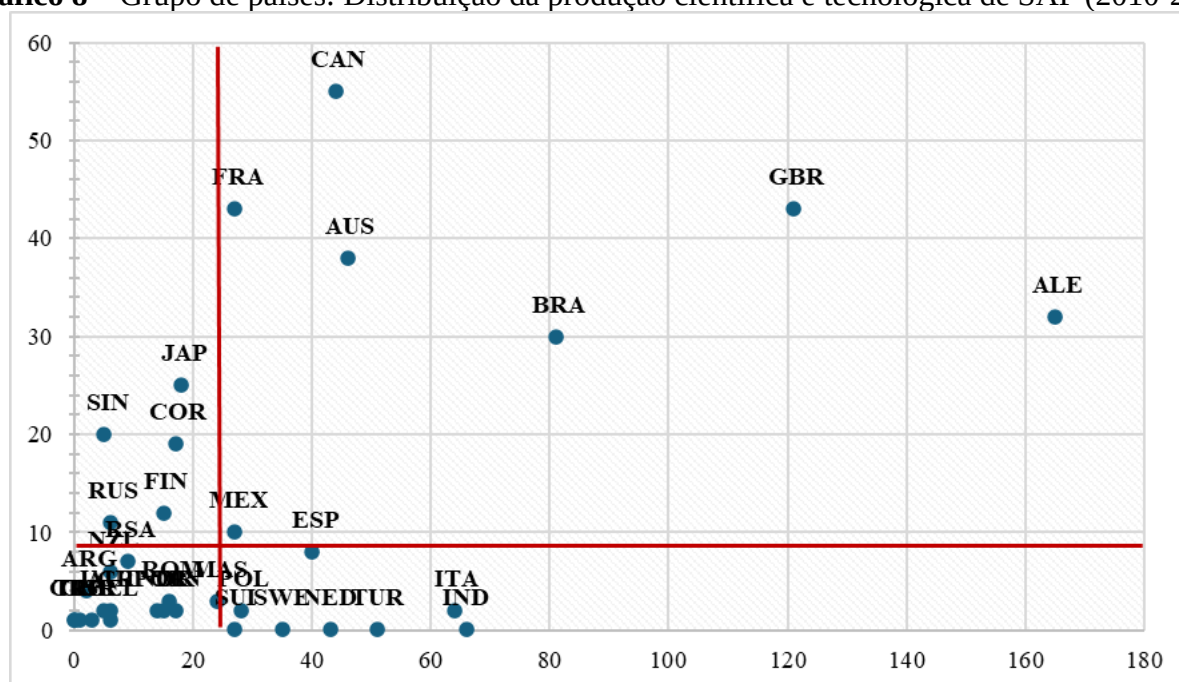
Fonte: Elaboração dos autores.

Os resultados indicam que a correlação foi positiva e significativa a 1%, em ambos os períodos. A correlação entre artigos e patentes no período total (1995-2024) foi de 0,9321. E no período mais recente (2010-2024), a correlação foi de 0,9400. Isso mostra que a produção de conhecimento parece estar acontecendo majoritariamente em países onde há um interesse econômico no respectivo mercado. Essa elevada correlação é observada em todo o período, com significativo aumento no período recente.

Esse resultado foi obtido a partir de um total de 89 países que aparecem na produção de artigos, a partir da nacionalidade do primeiro autor ou aparecem como mercado onde há alguma patente depositada. Os dados foram abertos por países, num quadro de dispersão, que considera essas duas dimensões de artigos e patentes. Para uma melhor visualização, foram considerados os países com produção científica relevante, acima da média de 22 artigos, no período total (1995-2024). Em seguida, foram considerados todos os países que tinham pelo menos uma patente publicada, no mesmo período. O que resultou em uma amostra final de 37 países.

O Gráfico 8 traz a situação dos 37 países⁹, plotados por quadrante. No quadrante I estão os países com alta produção científica e alto interesse de mercado na proteção. No quadrante II estão os países com baixa produção científica e alto interesse de mercado na proteção. No quadrante III estão os países com baixa produção científica e baixo interesse de mercado na proteção. E no quadrante IV estão os países com alta produção científica e baixo interesse de mercado na proteção. O Quadro 8 traz o detalhamento desses países.

Gráfico 8 – Grupo de países: Distribuição da produção científica e tecnológica de SAF (2010-2024)



Fonte: Elaboração dos autores.

⁹ Embora Estados Unidos e China estejam no quadrante I, são países que possuem artigos e patentes em níveis bastante superiores aos demais. Portanto, optou-se por não ilustrar no gráfico, a fim de possibilitar uma melhor visualização dos demais países da amostra.

Na classificação do Quadro 3, é importante citar os países do quadrante I, em função do elevado potencial na produção de conhecimento e pela importância do mercado. Nesse quadrante destacam-se Estados Unidos e China, em função tanto da elevada produção científica quanto da alta importância de mercado, despertando interesse no depósito de patentes. Ambos aprestam iniciativas para a implementação de SAF até 2030. No caso dos Estados Unidos, especificamente, estima-se a produção da média de 3 bilhões de litros por ano, sendo este o maior mercado até o presente momento.

Quadro 3 – Classificação da produção científica e tecnológica dos países, 1995-2024

Quadrante (ARTIGO – PATENTE)	Países
(I) ALTO-ALTO	Estados Unidos (EUA), China (CHN), Canadá (CAN), Reino Unido (GBR), França (FRA), Austrália (AUS), Alemanha (ALE), Brasil (BRA), Espanha (ESP), México (MEX)
(II) BAIXO-ALTO	Japão (JAP), Singapura (SIN), Coreia do Sul (COR), Finlândia (FIN), Rússia (RUS), África do Sul (AFS), Nova Zelândia (NZL)
(III) BAIXO-BAIXO	Argentina (ARG), Romenia (ROM), Áustria (AUT), Ucrânia (UCR), Bélgica (BEL), Israel (ISR), Chile (CHL), Costa Rica (CRC), Taiwan (TPE)
(IV) ALTO-BAIXO	Malásia (MAS), Itália (ITA), Polônia (POL), Dinamarca (DIN), Noruega (NOR), Portugal (POR), Índia (IND), Turquia (TUR), Holanda (HOL), Suécia (SWE), Suíça (SUI)

Fonte: Elaboração dos autores.

Ainda cabe ressaltar que o quadrante I apresenta em sua maioria países desenvolvidos como importantes *players* no setor de SAF. No entanto, também se observa a presença de países em desenvolvimento, como o México e o Brasil. No caso do Brasil, chama a atenção as possibilidades de produção de SAF a partir, por exemplo, de resíduos da cana-de-açúcar, que é a base da produção de biocombustíveis no país. Vale ainda ressaltar a atuação de uma empresa nacional (Petrobras), como uma das principais empresas depositantes de patentes em SAF, sinalizando uma oportunidade para o desenvolvimento desse mercado no país.

Por fim, o mercado de SAF ainda se apresenta em estágio nascente, assim é perceptível alguns países liderando tanto o âmbito científico quanto tecnológico. No entanto, há um esforço global para o processo de descarbonização das atividades de aviação, especialmente, dos países com elevada demanda no setor aéreo. Nesse sentido, o desenvolvimento de um mercado interno para a produção de SAF pode trazer tantos benefícios econômicos, sociais e climáticos no âmbito doméstico, quanto para o contexto geopolítico. Portanto, para que se possa aproveitar essa “janela de oportunidades” no processo de transição em curso, faz-se imprescindível a superação de alguns gargalos, bem como, o aprimoramento científico e tecnológico, o desenvolvimento de políticas de longo prazo e a criação de um ambiente regulatório no país.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades de ciência, pesquisa e inovação têm sido apontadas como primordiais para promover as transformações estruturais que o novo paradigma relacionado às discussões nas temáticas de meio ambiente e sustentabilidade requer. Com uma transição energética global em curso, diferentes economias têm promovido a transformação dos seus sistemas, especialmente, economias intensivas no uso de combustíveis fósseis. Dentre as atividades-chave do processo de mitigação das mudanças climáticas destaca-se o setor aéreo, com metas de redução de emissões estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) até 2050.

Dentre os incentivos criados para alcançar as metas da ONU, destaca-se a produção de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF) de fontes renováveis. A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) com o Programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) tem estabelecido metas de redução de emissões para mercados com uma participação acima de 0,5%. Os dados para 2023, destaca os Estados Unidos como um país líder na produção mundial de SAF, somando um volume total superior a 22 bilhões de litros. Outros países

desenvolvidos também têm apresentados políticas direcionadas para o setor, como a Noruega, Suécia e França, não obstante, em fase de análise e planejamento o Reino Unido, Alemanha e Coreia do Sul.

No caso de países em desenvolvimento, destaca-se o Brasil, considerado como o segundo maior produtor de biocombustíveis (24%) do mundo, atrás apenas dos EUA (42%). Ao longo das últimas décadas o Brasil tem ganhado competência na produção dos biocombustíveis a partir de diferentes programas e políticas destinadas para as atividades terrestres. Embora o setor aéreo ainda enfrente desafios com a produção de SAF, foi aprovada em outubro de 2024 a Lei nº 14.993, a regulação que incentiva a produção e o uso de biocombustíveis sustentáveis aéreos no país.

De fato, com o processo de transição em curso há uma “janela de oportunidade” para a transformação das atividades aéreas, especialmente nos países que dispõem de uma extensão de terras agrícolas, insumos de matéria-prima, condições naturais e capacitação humana. Nesse contexto, o Brasil pode ter uma oportunidade para desenvolver uma indústria de combustíveis renováveis em alta escala, o que ressalta seu potencial dentre os *players* do mercado.

O presente estudo parte desse ponto, tendo como principal objetivo realizar uma análise da produção científica (*proxy* artigos) e tecnológica (*proxy* patentes) de SAF, identificando os principais países e a posição relativa do Brasil nesse cenário. Observou-se que o interesse na temática tem sido apontado desde a década de 1970, porém, apenas nos anos mais recentes que se identifica um aumento significativo no âmbito científico e tecnológico. A publicação e a produção científica tem sido liderada pelos Estados Unidos, China e Alemanha. Parte dos estudos têm discutido sobre temáticas de combustíveis, energia, engenharia e sustentabilidade, bem como, a substituição de combustíveis fósseis na aviação por hidrogênio.

Ao investigar o desenvolvimento e a evolução da produção de artigos científicos e patentes em nível global sobre SAF, destacando os países com maior volume de produção, ficou evidente a liderança dos Estados Unidos, China e Canadá. Em relação às principais empresas requerentes, observou-se a origem dos Estados Unidos, Inglaterra e Finlândia.

Ao analisar a posição relativa do Brasil no contexto global de inovação tecnológica e científica no mercado de SAF, identificando seus avanços e potenciais para a transição energética, o país é destacado pela empresa Petrobras pelo seu pioneirismo, desenvolvendo alternativas sustentáveis para o meio ambiente e contribuindo para a descarbonização no setor aéreo. Embora não esteja entre os principais *players* do mercado, o Brasil tem sido apontado como um potencial mercado de interesse para a produção de SAF.

A análise de correlação entre a produção do conhecimento científico e tecnológico de SAF apresenta um coeficiente positivo e significativo, sinalizando que a produção de conhecimento parece estar acontecendo majoritariamente em países onde há um interesse econômico no respectivo mercado. Nesse sentido, o enquadramento por países acima da média destaca que além dos Estados Unidos e China, países como Brasil e México possuem destaque na produção e inovação desse setor.

Na comparação entre o Brasil e outros países com características similares, mas que possuem maior ou menor capacidade instalada de produção e inovação no setor, tanto o Brasil quanto o México têm sinalizado o desenvolvimento científico e tecnológico de SAF, ambos países periféricos. Nesse contexto, economias com menor grau de desenvolvimento também podem promover uma mudança em direção a uma economia mais sustentável, com a transformação de setores e/ou atividades-chave, como a atividade área no setor de transporte.

Em suma, ao identificar a evolução da produção de artigos e patentes no âmbito global em uma perspectiva comparativa, apesar da infraestrutura consolidada para biocombustíveis e do elevado potencial para expandir essa tecnologia no Brasil, faz-se necessário a superação de desafios tecnológicos, regulatórios e econômicos específicos. Políticas que incentivem a pesquisa e inovação e invistam em infraestrutura podem promover parcerias público-privadas para impulsionar a produção de SAF. O estudo também sugere que essas ações poderão acelerar a transição energética no setor aéreo, posicionando o Brasil como líder global em sustentabilidade.

Como proposição de políticas, podem ser feitos esforços de incentivos econômicos voltados para subsídios para produtores de SAF, redução de impostos para empresas que usam tais tecnologias e criação de linhas de crédito focadas em projetos referentes a SAF. Em relação à pesquisa e inovação,

podem ser estruturados programas nessa temática, com foco no investimento em pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novas tecnologias na área, bem como estabelecimento de parcerias públicas e privadas para fomento de infraestrutura. No que se refere à regulamentação, podem ser estabelecidas metas para o uso de SAF no setor aéreo. Finalmente, é importante a expansão da infraestrutura focada na produção e distribuição de SAF, bem como o incentivo à construção de plantas industriais focadas em SAF, em regiões estratégicas.

A pesquisa reconhece limitações metodológicas nas buscas tanto de artigos quanto de patentes de SAF, especialmente, nos critérios de busca e no que tange aos efeitos causais da análise de correlação. No entanto, esse esforço inicial apresenta uma contribuição notável para a literatura existente, especialmente no que tange ao mapeamento e os indícios de possíveis cenários no processo de transição das atividades de aviação, no qual pode guiar pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- AMPARO, K. *et al.* Estudo de caso utilizando mapeamento de prospecção tecnológica como principal ferramenta de busca científica. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, p. 195–209, dez. 2012
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (2019). **CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation**. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/ptbr/assuntos/meio-ambiente/corsia>. April 2024 Atlas dos biocombustíveis líquidos 2020 - 2021/. Última visualização fevereiro 2025.
- TORROBA, Agustín. **Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura**. – São José, C.R.: IICA, 2021. 36 p.
- ANTUNES, A. M. S. *et al.* Métodos de prospecção tecnológica, inteligência competitiva e foresight: principais conceitos e técnicas. In: RIBEIRO, N. M. (org.). **Prospecção tecnológica**. Salvador, BA: IFBA, 2018. p. 19-108
- ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v.11, p. 959–975, 2017.
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília-DF, 2017.
- BRASIL. Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021. **Estabelece o Programa Nacional do Bioquerosene para o incentivo à pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassas, visando à sustentabilidade da aviação brasileira**. Brasília-DF, 2021.
- BOBINAITE, Viktorija; TARVYDAS, Dalius. Financing instruments and channels for the increasing production and consumption of renewable energy: Lithuanian case. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 38, 2014.
- BAROUTAJI, Ahmad; *et al.* Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 106, p. 31-40, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>
- BOND, Jesse; *et al.* Production of renewable jet fuel range alkanes and commodity chemicals from integrated catalytic processing of biomass. **Energy & Environmental Science**, n. 4, 2014.
- CHAPMAN, Lee. Transport and climate change: a review. **Journal of Transport Geography**, v. 15, n. 5, p. 354-367, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008>
- CORCHERO, G.; *et al.* An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 219, n. 1, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1243/095441005X9139>
- CONTRERAS, A.; *et al.* Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 22, n. 10-11, p. 1053-1060, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00008-6)
- CHAMINADE, Cristina; *et al.* The Geography and Structure of Global Innovation Networks: Global Scope and Regional Embeddedness. **Handbook of the Geographies of Innovation**. Chentelham: Edward Elgar, p. 370-381, 2017.

- CORTEZ, Luís; *et al.* **PROÁLCOOL 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2016
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2023). Balanço Energético Nacional – ano 2023. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2023. Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil (Sustainable aviation fuel – saf) perspectivas futuras. Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis, setembro de 2024.
- DONTHU, N.; *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070>.
- FREEMAN, Chris. The Greening of Technology and Models of Innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 53, p. 27-39, 1996.
- FERREIRA, Lindomayara; *et al.* Instituições e financiamento para pesquisa: Avanços e desafios para as energias renováveis no Brasil. In: **Prêmio ABDE-BID [recurso eletrônico]: Edição 2022/Associação Brasileira de Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: ABDE Editorial, 2023.
- FELIPE, Ednilson; VILLASCHI FILHO, Arlindo. Schumpeter, os Neoschumpeterianos e as instituições: Conceito e atuação numa economia dinâmica e globalizada. **Economia da ciência, tecnologia e inovação Fundamentos teóricos e a economia global** /Márcia Siqueira Rapini, Janaina Ruffoni, Leandro Alves Silva e Eduardo da Motta e Albuquerque organizadores. – 2.ed. Belo Horizonte: FACE – UFMG, 2021.
- GARCIA, Renato. Geografia da inovação. **Economia da ciência, tecnologia e inovação Fundamentos teóricos e a economia global** /Márcia Siqueira Rapini, Janaina Ruffoni, Leandro Alves Silva e Eduardo da Motta e Albuquerque organizadores. – 2.ed. Belo Horizonte: FACE – UFMG, 2021.
- GUTIÉRREZ-ANTONIO, C.; *et al.* A review on the production processes of renewable jet fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 709-729, 2017. DOI://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108
- GRETZ, Joaquim; *et al.* The 100 MW euro-Quebec hydro-hydrogen pilot project. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 15, n. 6, p. 419-424, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(90\)90199-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(90)90199-9)
- GRETZ, Joaquim. Solar hydrogen. **Renewable Energy**, v. 1, n.3-4, p. 413-417, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(91\)90051-P](https://doi.org/10.1016/0960-1481(91)90051-P)
- GRETZ, Joaquim; *et al.* Status of the hydro-hydrogen pilot project (EQHHPP). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 19, n. 2, p. 169-174, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90123-6](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90123-6)
- HILL, Carter; *et al.* **Econometria**/R. Carter Hill, William E. Griffiths, George G. Judge; tradução: Alfredo Alves de Farias; revisão técnica: Edric Martins Ueda. -3.ed. - São Paulo : Saraiva, 2010.
- KORONEOS, C; *et al.* Advantages of the use of hydrogen fuel as compared to kerosene. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 44, n. 2, p. 99-113, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.09.004>
- LEE, David; *et al.* Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 37, p. 4678-4734, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>
- LEE, David; *et al.* Estimations of global no, emissions and their uncertainties. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 12, p. 1735-1749, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00327-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00327-5)
- INPI – Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (2024). **Classificação de patentes. 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes/classificacao>. Último acesso julho de 2024.
- IRENA – International Renewable Energy Agency. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi, 2023.
- LEMA, Rasmus; PEREZ, Carlota. The green transformation as a new direction for techno-economic development. **Maastricht Economic and social Research institute on Innovation and**

Technology (UNU-MERIT) - Working Papers, 2024.

LUNDVALL, Bengt-Åke. National Innovation Systems - Analytical Concept and Development. Tool. **Industry and Innovation**, v. 14, n. 1, p. 95-119, 2007.

MAYERHOFF, Z. Uma Análise sobre os Estudos de Prospecção Tecnológica. **Cadernos de Prospecção**, v. 1, n. 1, p. 7–9, 2008

MAYVAN, A.; GHOBADIAN, B.; OMIDKHAH, M. R.; NAJAFI, G. Current biodiesel production technologies: a comparative review. **Energy Conversion and Management**, v. 63, p. 138-148, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>

MAZZUCATO, Mariana. **O Estado Empreendedor: Desmascarando o Mito do Setor Público vs. Setor Privado**. São Paulo: Portfolio Perquin, 2013.

NG, K. S.; *et al.* Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel. production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111502, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111502>

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (1997). **Manual de Oslo: diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação**. Editora: ARTI/FINEP, 1997.

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2013). **Manual de Frascati: Metodologia proposta para levantamentos sobre pesquisa e desenvolvimento experimental**. Coimbra: F-Iniciativas, 2013.

PAMPLONA, Leonardo; *et al.* Potencial da Bioeconomia para o Desenvolvimento Sustentável da Amazonia e o papel das Instituições Financeiras de Desenvolvimento. In: **Prêmio ABDE-BID [recurso eletrônico]: Edição 2022/Associação Brasileira de Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: ABDE Editorial, 2023.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2022). **Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos**/Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economicadiferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Último acesso em abril de 2024.

PEREZ, Carlota. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, v. 34, p. 185–202, 2010. DOI:10.1093/cje/bep051

RAPSON, D.; MUEHLEGGGER, E. Global Transportation Decarbonization. **Federal Reserve Bank of Dallas, Working Papers**, p. 1-28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24149/wp2309>.

SCHUMPETER, Joseph. **Teoria do desenvolvimento econômico**. São Paulo, Abril (Os pensadores), 1982.

STEPHAN, Paula. The Economics of Science. **Handbooks in Economics**, v. 1, 2010.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, 207–222, 2003.