



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NIMOLY LUCIANA SAMPAIO LUZ

**ROTAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE
AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ALGAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GOIÂNIA
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE QUÍMICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Nimoly Luciana Sampaio Luz

Título do trabalho: Rotas para produção de combustível de aviação sustentável a partir de algas

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Christian Goncalves Alonso, Professor do Magistério Superior**, em 02/07/2026, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nimoly Luciana Sampaio Luz, Discente**, em 02/07/2026, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6306453** e o código CRC **D1C53931**.

Referência: Processo nº 23070.032731/2026-33

SEI nº 6306453

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NIMOLY LUCIANA SAMPAIO LUZ

ROTAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ALGAS

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da graduação em Engenharia Química do Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Christian Gonçalves Alonso

GOIÂNIA
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Luz, Nimoly Luciana Sampaio
ROTAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO
SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ALGAS [Digital] / Nimoly Luciana Sampaio Luz. -
2026.

47 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Christian Gonçalves Alonso
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal
de Goiás, Instituto de Química (IQ), Engenharia Química, Goiânia, 2026.

1. HEFA. 2. Atj. 3. Síntese de Fischer-tropsch. 4. Querosene
Parafínico Sintético.

I. Alonso, Christian Gonçalves, orient. II. Título.

CDU 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE QUÍMICA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 26 dia(s) do mês de Junho do ano de 2026 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ROTAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ALGAS”, de autoria de NIMOLY LUCIANA SAMPAIO LUZ, do curso de Bacharelado em Engenharia Química, do Instituto de Química da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Christian Gonçalves Alonso com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof^a. Dr^a. Indianara Conceição Ostroski (IQ/UFG) e Dr^a. Isabela Milhomem Dias (IQ/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição da estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de **8,5**, tendo sido o TCC considerado **APROVADO**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Isabela Milhomem Dias, Usuário Externo**, em 01/07/2026, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Christian Goncalves Alonso, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Indianara Conceicao Ostroski, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6305619** e o código CRC **E69ADFA0**.

À minha família que sempre foi minha base e não deixou que eu caísse quando eu mesma quis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus guias, que me abençoaram e estiveram firmes ao meu lado me dando forças para seguir. À Ibeji, dedico toda minha devoção, alegria e felicidade, pois sem a alegria das crianças, jamais poderia ser quem eu sou.

À minha família que sempre foram presentes e que fizemos nossa vida em conjunto, porque crescemos juntos nesses últimos 24 anos de vida, que me formaram como mulher e me deram a oportunidade de me tornar uma bacharela em Engenharia Química.

À minha mãe Nilza, que me ensinou a ser forte, a persistir, a me acalmar, a nunca me deixar ser levada, e, principalmente, a me amar. À minha irmã Mony, que teve muita paciência comigo e que pode me ensinar que eu seria capaz de escrever algo, de ser alguém e que o mundo não era apenas números. Ao meu pai Mozaniel, meu protetor, àquele que sempre me acalmou, me deu os melhores conselhos, a melhor vida que eu poderia ter, que me ensinou a ser forte, destemida e nunca desistir de mim mesma.

Aos meus amigos, que nem sempre entenderam o quão importante era eu deixar de comemorar momentos incríveis ao lado deles, mas sempre apoiaram a minha trajetória e continuemos juntos. À Atlética Sulfurosa que foi minha casa por alguns anos e me ensinou que um time trabalhando e treinando em conjunto só obtém os melhores resultados. Aos meus amigos da Engenharia Química que me mostraram que eu podia ser muito mais capaz do que eu acreditava.

À TUPOFAC, que entrou na minha vida quando eu menos esperava, que pode me manter sã nesses últimos anos de faculdade, e todos àqueles que fazem parte dessa casa. Aos meus padrinhos e madrinhas que sempre me ouviram, me apoiaram e estiveram lá para me oferecer os melhores conselhos da vida.

Ao suporte de todos os meus professores da Engenharia Química da Universidade Federal de Goiás, pois sem o conhecimento deles, eu não estaria aqui. Sou eternamente grata a esse curso e aos docentes.

RESUMO

As crescentes emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) têm agravado os impactos ambientais associados às mudanças climáticas, demonstrando a necessidade de desenvolver combustíveis mais sustentáveis. O presente trabalho tem por objetivo a realização de uma revisão bibliográfica sobre as diferentes rotas de produção de combustível de aviação sustentável (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuel*) a partir de microalgas, por meio da análise das principais rotas de conversão tecnológica certificadas pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM, do inglês *American Society for Testing and Materials*). A metodologia adotada foi de natureza qualitativa, baseada em um levantamento bibliográfico realizado nas bases de dados CAPES e ScienceDirect. Das rotas analisadas, foram selecionadas o Hidroprocessamento de Ésteres e Ácidos Graxos (HEFA, do inglês *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), por meio do óleo de microalgas, o Álcool para Jato (AtJ, do inglês *Alcohol-to-Jet*) e a Síntese de Fischer-Tropsch (FT), esses dois últimos por meio de gaseificação de microalgas. As microalgas se destacam como insumo da terceira geração de matéria-prima, por apresentarem uma elevada taxa de crescimento, alto teor de lipídeos, capacidade de captura de CO₂ e a possibilidade de cultivo em águas residuárias sem competir com a cadeia alimentar. A rota HEFA é a mais madura atualmente, porém, quando utiliza biomassa algácea seu Nível de Maturidade Tecnológica (TRL, do inglês *Technology Readiness Level*) cai para 6 a 7, com um rendimento laboratorial de 55% a 76%. A rota AtJ apresenta eficiência energética global de 40% e um TRL de 6. Já a rota FT, possui um TRL menor de 4 a 6, utilizando toda a biomassa. Do ponto de vista ambiental, a produção de SAF a partir de microalgas pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em mais de 50% em relação ao querosene convencional ao longo do ciclo de vida. Em contrapartida, economicamente, o custo de produção é de 2 a 5 vezes maior que a produção do QAV, sendo a rota HEFA com maior potencial de redução de custo a médio prazo. Conclui-se que, embora apresentem ideias vantajosas, nenhuma das rotas apresenta uma competitividade econômica e aplicável em escala industrial que supere, ou seja, compatível com a produção de querosene fóssil, necessitando avanços tecnológicos e marcos regulatórios favoráveis para viabilização comercial do SAF a partir de microalgas.

Palavras-chave: HEFA. AtJ. Síntese de Fischer-Tropsch. Querosene Parafínico Sintético.

ABSTRACT

The increasing emissions of carbon dioxide (CO₂) and nitrogen oxides (NO_x) have intensified the environmental impacts associated with climate change, highlighting the need to develop more sustainable fuels. This study aims to conduct a literature review on the different production pathways of Sustainable Aviation Fuel (SAF) derived from microalgae, through the analysis of the main technological conversion routes certified by the American Society for Testing and Materials (ASTM). The adopted methodology is qualitative in nature, based on a bibliographic survey primarily conducted using the CAPES and ScienceDirect databases. Among the analyzed pathways, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), using microalgae oil, Alcohol-to-Jet (AtJ), and Fischer-Tropsch Synthesis (FT) were selected, the latter two through microalgae gasification. Microalgae stand out as a third-generation feedstock due to their high growth rate, high lipid content, ability to capture CO₂, and the possibility of cultivation in wastewater without competing with the food supply chain. The HEFA pathway is currently the most mature; however, when using algal biomass, its Technology Readiness Level (TRL) decreases to 6–7, with a laboratory yield ranging from 55% to 76%. The AtJ pathway presents an overall energy efficiency of 40% and a TRL of 6. Meanwhile, the FT pathway has a lower TRL of 4–6 and utilizes the entire biomass. From an environmental perspective, SAF production from microalgae can reduce greenhouse gas emissions by more than 50% compared to conventional jet fuel over the life cycle. On the other hand, from an economic standpoint, production costs are 2 to 5 times higher than conventional aviation kerosene, with the HEFA pathway showing the greatest potential for cost reduction in the medium term. It is concluded that, although these pathways present advantageous prospects, none currently demonstrates economic competitiveness or scalability that surpasses or matches fossil kerosene production. Therefore, technological advancements and favorable regulatory frameworks are required to enable the commercial viability of SAF derived from microalgae.

Keywords: HEFA. AtJ. Fischer-Tropsch Synthesis. Synthetic Paraffinic Kerosene.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos Específicos.....	17
3 METODOLOGIA	18
4 COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL	200
5 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS	24
5.1 Características bioquímicas das microalgas	244
5.2 Cultivo e produção de biomassa.....	25
5.3 Vantagens frente às outras gerações.....	25
6 ROTAS DE PRODUÇÃO	27
6.1 Hidroprocessamento De Ésteres E Ácidos Graxos – HEFA.....	277
6.2 Gaseificação da Biomassa Algácea	29
6.3 Álcool Para Jato – AtJ	311
6.4 Síntese de Fischer-Tropsch – FT.....	32
7 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV) E SUSTENTABILIDADE	355
8 VIABILIDADE ECONÔMICA	377
9 DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	39
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
11 DECLARAÇÃO DE USO DE IA GENERATIVA	40
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descritores de pesquisas nos repositórios.....	18
Tabela 2 - Descritivo das etapas da rota SPK-HEFA.....	29
Tabela 3 - Gaseificação de algumas microalgas para a produção de gás de síntese.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histórico de emissão de Gases de Efeito Estufa durante o período de 2013 a 2023 na área de transporte. -----	15
Figura 2 - Figura 2 – Rotas de produção de SAF certificadas pela ASTM. -----	23
Figura 3 - Classificação das gerações de matéria-prima com base em sua fonte. -----	26
Figura 4 - Representação esquemática do fluxograma de blocos da rota HEFA para a conversão de ésteres e ácidos graxos em SPK. -----	27
Figura 5 - Representação esquemática da etapa de gaseificação. -----	29
Figura 6 - Representação esquemática do fluxograma de blocos da rota AtJ para a conversão de microalgas em SPK. -----	31
Figura 7 - Representação esquemática da rota FT para a conversão microalgas em SPK. ----	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais (do inglês, <i>American Society for Testing and Materials</i>)
AtJ	Álcool para Jato (do inglês, <i>Alcohol-to-Jet</i>)
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DCX	Descarboxilação
FFA	Ácidos Graxos Livres (do inglês, <i>Free Fatty Acids</i>)
FT	Síntese de Fischer-Tropsch (<i>Fischer-Tropsch Synthesis</i>)
GEE	Gases de Efeito Estufa
HDO	Hidrodessoxigenação
HEFA	Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>)
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo (<i>International Air Transport Association</i>)
IEA	Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency</i>)
MTO	Metanol para Olefinas (<i>Methanol-to-Olefins</i>)
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional (<i>International Civil Aviation Organization</i>)
QAV	Querosene de Aviação
SAF	Combustível de Aviação Sustentável (<i>Sustainable Aviation Fuel</i>)
SPK	Querosene Parafínico Sintético (<i>Synthetic Paraffinic Kerosene</i>)
TRL	Nível de Maturidade Tecnológica (<i>Technology Readiness Level</i>)

SÍMBOLOS

Letras Latinas

CO_2	Gás carbônico
H_2	Hidrogênio
CH_4	Metano
NO _x	Óxidos de nitrogênio

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das civilizações esteve diretamente relacionado à disponibilidade e ao aproveitamento de diferentes fontes de energia. Ao tratar do uso da energia ao longo da história, Farias e Sellitto (2011) discutem a evolução de suas diferentes formas de utilização até os dias atuais. Observa-se que, ao longo dos séculos, a humanidade foi transformando suas fontes energéticas, passando do uso do vapor, da energia mecânica e da força dos ventos para os combustíveis fósseis, a eletricidade e a energia nuclear, chegando também ao aproveitamento da biomassa, dos biocombustíveis e das fontes alternativas, como a energia eólica. Essa trajetória evidencia a constante capacidade humana de adaptação e renovação diante das necessidades e desafios de cada período histórico.

Diante desse aparato histórico, o compromisso com a sustentabilidade é um dos principais desafios do homem com a natureza. As emissões atmosféricas da aviação, especialmente de CO₂ e NO_x, impulsionam o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis como estratégia de descarbonização. No Brasil, a partir da promulgação da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017¹, que institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), passou-se a reforçar o compromisso com a eficiência energética e a redução da emissão de gases de efeito estufa. Entre os pontos elencados, o artigo 1º, inciso II, explicita essa necessidade, enquanto o inciso III destaca a promoção da expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional. Diante dessa determinação legal, observa-se a relevância e a necessidade de aprofundamento dos estudos sobre essa temática.

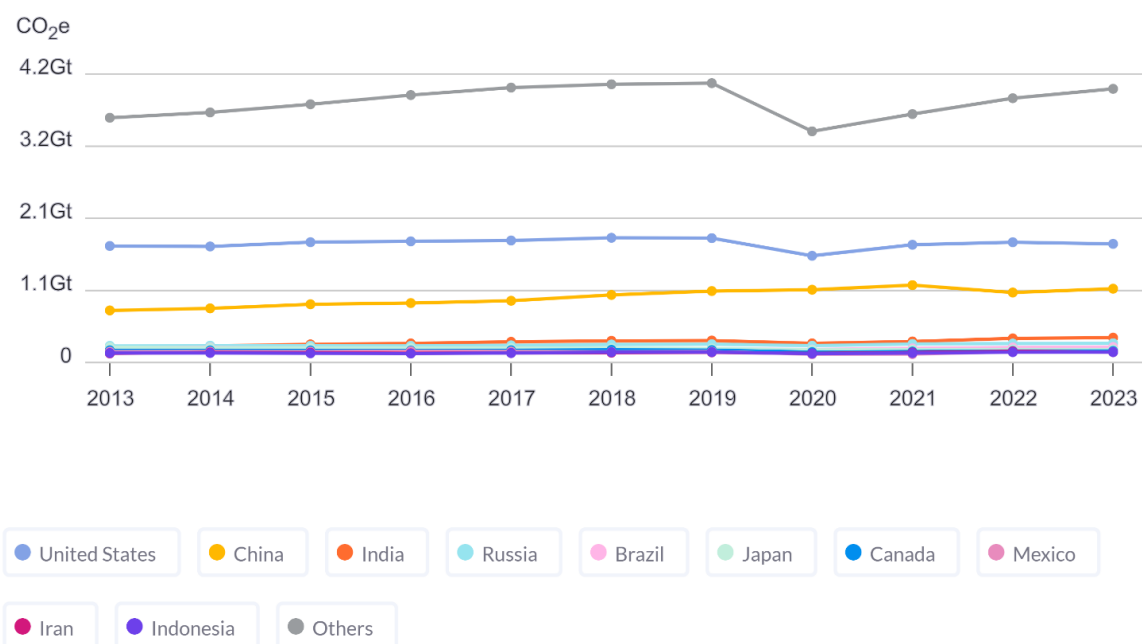
Atualmente, o querosene de aviação (QAV) é o principal combustível utilizado no setor, somando um consumo de 390 bilhões de litros anuais (Zaparolli, 2022). Entretanto, os impactos ambientais gerados pelo QAV são em maiores proporções, visto que a produção antropogênica de CO₂ que se origina da aviação contribui com cerca de 2% a 2,6% de emissões totais mundial (Magalhães *et al.*, 2026). Na aviação, a combustão de combustíveis fósseis consome mais de cinco milhões de barris de petróleo diariamente, ocasionando em um alto consumo de matéria-prima não renovável (Magalhães *et al.*, 2026). Embora a aviação contribua com uma fração relativamente pequena das emissões globais de CO₂ e NO_x, o setor apresenta desafios singulares para a descarbonização, uma vez que alternativas de propulsão de baixa emissão, como a eletrificação, ainda não são tecnicamente viáveis para voos de longa distância. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação emergem como a principal alternativa para reduzir as

¹ Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 3 maio 2026.

emissões do transporte aéreo. Além da dependência de uma matéria-prima não renovável, o petróleo, o uso do querosene convencional está associado à emissão de gases de efeito estufa e de outros poluentes atmosféricos, contribuindo para o aquecimento global e para impactos ambientais na alta atmosfera. Considerando que ainda não existem alternativas tecnologicamente viáveis para a propulsão de aeronaves em voos de longa distância, o desenvolvimento e a adoção de combustíveis sustentáveis capazes de substituir, total ou parcialmente, o querosene fóssil tornam-se essenciais para a descarbonização do setor aéreo (Lee *et al.*, 2021).

Na Figura 1 é possível verificar a crescente de emissão de gases de efeito estufa durante os anos de 2013 a 2023. O Brasil em 2013 enquadrava-se em 6º colocado, emitindo cerca de 216,97 Mt² de gases de efeito estufa (GEE), em 2023 alcançou o patamar de 226,81 Mt de GEE, atingindo o 5º colocado mundial, na área de transportes (CLIMATE WATCH, 2026).

Figura 1 – Histórico de emissão de Gases de Efeito Estufa durante o período de 2013 a 2023 na área de transporte.



Fonte: Climate Watch (2026).

Diante do cenário do alto consumo de reservas fósseis e a crescente emissão de GEE, o desenvolvimento do uso de combustíveis sustentáveis para o setor de aviação se fez necessário. A Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, do inglês *International Air Transport*

² Mt: megatonelada.

Association) se comprometeu a atingir emissões líquidas de zero carbono até 2050 (IATA, 2021). Os estudos a respeito da produção de combustível sustentável de aviação (SAF, do inglês *Sustainable Aviation Fuel*) se tornaram frequentes, utilizando como fontes matérias-primas renováveis, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis, e contribuindo para a redução de CO₂. Entretanto, em 2025, a produção de SAF contribuiu com apenas 0,6% do consumo global de aviação, necessitando de investimentos para aumentar a capacidade de atendimento do público (IATA, 2025). Alinhada aos objetivos da IATA, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, do inglês *International Civil Aviation Organization*) também atua na promoção e priorização do acesso aos combustíveis sustentáveis de aviação (ICAO, 2024).

Atualmente a produção de SAF se dá por sete rotas certificadas pela ASTM, dentre as quais destacam-se as rotas HEFA, do inglês, *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*, o AtJ, do inglês, *Alcohol-to-Jet*, e a FT, do inglês, *Fischer-Tropsch Synthesis* (INPI, 2026). Dentre essas três principais rotas, todas podem empregar microalgas como matéria-prima para a produção de SAF. Na rota HEFA, são utilizados principalmente os lipídios extraídos das microalgas; na AtJ, os carboidratos são convertidos em álcoois que servem como intermediários para a produção do combustível; enquanto, na rota FT, a biomassa algal pode ser aproveitada integralmente por meio de sua gaseificação. (Jiang *et al.*, 2026).

Diante do exposto, o presente trabalho visa uma análise comparativa entre essas rotas de produção de SAF a partir da biomassa algácea. Por conseguinte, a metodologia deste trabalho concentra-se em uma abordagem qualitativa. Na próxima seção, será apresentada a metodologia utilizada na pesquisa, com base no levantamento bibliográfico. Posteriormente, nas seções seguintes, serão discutidos o uso de algas como alternativa sustentável e econômica para a aviação, bem como suas potencialidades no contexto da produção de combustíveis renováveis.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a produção de combustível sustentável de aviação (SAF) a partir de algas, especificamente microalgas, analisando as principais rotas de conversão tecnológica certificadas pela ASTM, com foco em suas características, potencialidades e desafios de aplicação.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização das microalgas como matéria-prima para SAF e sua relação com as rotas tecnológicas;
- Comparação das normas internacionais entre querosene convencional e sintético;
- Descrever as principais rotas tecnológicas, abordando as principais etapas;
- Realizar diferentes comparativos entre os resultados das rotas a partir da identificação de desafios técnicos, ambientais e econômicos que limitam a escala comercial de SAF produzido a partir de microalgas.

3 METODOLOGIA

O levantamento bibliográfico foi realizado durante o mês de abril de 2026 nos repositórios Portal de Periódicos da CAPES, ScienceDirect e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), selecionados em razão de sua abrangência e relevância para a disseminação de artigos científicos, teses e dissertações.

As estratégias de busca foram elaboradas a partir de descritores em português e inglês, combinados pelo operador booleano AND, com o objetivo de restringir os resultados à interseção entre os temas de interesse. Os descritores utilizados foram: "*combustível de aviação sustentável*" AND *algas* e "*sustainable aviation fuel*" AND *algae*. Em cada repositório, quando disponíveis, foram aplicados filtros específicos, como acesso aberto (*open access*), artigos revisados por pares (*peer-reviewed*) e artigos de revisão (*review articles*), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Descritores de pesquisas nos repositórios.

Descritores	Trabalhos encontrados	Trabalhos selecionados	Filtros	Repositório
“combustível de aviação sustentável” AND algas	0	0	Nenhum	Periódico da CAPES
“sustainable aviation fuel” AND algae	62	4	Acesso aberto; Revisado por Pares	Periódico da CAPES
“combustível de aviação sustentável” AND algas	1	1	Nenhum	BDTD
“sustainable aviation fuel” AND algae	0	0	Nenhum	BDTD
“combustível de aviação sustentável” AND algas	0	0	Nenhum	ScienceDirect
“sustainable aviation fuel” AND algae	74	8	Review articles Open access & Open archive	ScienceDirect
Total	137	13	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Após a recuperação dos estudos, foi realizada uma triagem baseada na leitura dos títulos, resumos e, quando necessário, do texto completo. Foram incluídas publicações que abordavam diretamente o uso de algas como matéria-prima para a produção de SAF, contemplando aspectos relacionados às rotas de conversão, potencial tecnológico, viabilidade econômica e impactos ambientais. Foram excluídos estudos que tratavam de biocombustíveis sem aplicação ao setor aeronáutico, pesquisas sobre SAF produzidos a partir de outras matérias-primas, trabalhos voltados exclusivamente para outros microrganismos e estudos com enfoque

estritamente laboratorial que não apresentavam relação com a produção de combustível para aviação.

Além das publicações inicialmente selecionadas, foram consultadas referências bibliográficas citadas nesses trabalhos, ampliando a base teórica da revisão e permitindo a incorporação de estudos relevantes não recuperados nas buscas iniciais.

4 COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL

A análise das publicações recuperadas permitiu traçar um panorama do estado da arte sobre a utilização de algas como matéria-prima para a produção de SAF. Além de quantificar a produção científica disponível, a revisão possibilitou identificar tendências de pesquisa, lacunas do conhecimento e os principais enfoques adotados pela literatura nacional e internacional. Os resultados obtidos refletem o estágio de desenvolvimento dessa área de pesquisa e evidenciam a necessidade de ampliação dos estudos, especialmente no contexto brasileiro.

A aplicação da estratégia de busca resultou na recuperação de 137 publicações, das quais 13 atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos (Tabela 1). Os resultados evidenciaram uma expressiva diferença entre a produção científica nacional e internacional sobre o uso de algas para a produção de combustível sustentável de aviação.

As buscas em língua portuguesa evidenciaram a escassez de estudos sobre o tema. Não foram encontrados trabalhos no Portal de Periódicos da CAPES e na ScienceDirect utilizando o descritor "*combustível de aviação sustentável*" AND *algas*, enquanto a BDTD apresentou apenas uma dissertação. Em contrapartida, a busca pelo descritor "*sustainable aviation fuel*" AND *algae* recuperou 136 publicações, das quais 12 artigos atenderam aos critérios de seleção.

Os estudos excluídos abordavam biocombustíveis sem aplicação ao setor aeronáutico, combustíveis sustentáveis produzidos a partir de outras matérias-primas, outros microrganismos ou apresentavam enfoque exclusivamente laboratorial.

Os resultados evidenciam que a produção científica sobre algas aplicadas à produção de SAF ainda é incipiente. Por outro lado, a literatura internacional reconhece o potencial dessa biomassa para a produção de SAF, destacando benefícios como elevada produtividade, redução das emissões de gases de efeito estufa e menor competição com áreas agrícolas. Entretanto, desafios tecnológicos e econômicos relacionados ao cultivo, processamento da biomassa e redução dos custos de produção ainda limitam sua aplicação em escala comercial.

Atualmente, no contexto global, o uso principal de combustível para a aviação advém do querosene convencional, o qual é produzido de refinarias petrolíferas. O refino do petróleo é um conjunto de operações físico-químicas capaz de transformar o combustível fóssil em produtos de maior valor agregado, como gasolina, diesel e querosene de aviação (QAV). As refinarias são sistemas complexos com distintas operações, entre elas a separação por destilação, a conversão pelo craqueamento, e os diferentes tipos de tratamentos e processos auxiliares para converterem até o produto desejado (Szklo; Uller, 2008).

Apesar da centralidade na matriz energética global, o modelo baseado no refino do petróleo enfrenta questionamentos quanto à sua sustentabilidade a longo prazo. Do ponto de

vista dos recursos naturais, o crescimento constante da população intensifica a demanda por energia, ao mesmo tempo que o esgotamento progressivo do petróleo já apresenta sinais evidentes (Wang; Azam, 2024). Analisando a demanda, a Agência Internacional de Energia (IEA) aponta que ainda antes de 2030, todos os combustíveis fósseis devem atingir o pico de demanda (IEA, 2023). Esse cenário reforça a necessidade e urgência de desenvolvimento de novas alternativas de produção de combustíveis.

O querosene de aviação, o qual normalmente é comercializado como Jet A ou Jet A-1 na aviação civil, é o atual e principal combustível nos motores a turbina das atuais aeronaves. Trata-se de uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, naftênicos e aromáticos, com cadeia carbônica predominantemente entre C₈ e C₁₆ e é retirado do petróleo como uma fração do óleo, na destilação atmosférica, com temperaturas entre 145°C e 300°C (Szklo, Uller, 2008). Sua principal distinção vem do ponto de congelamento, o qual o Jet A apresenta um limite de -40°C, enquanto o Jet A-1 suporta até -47°C, tornando-o mais adequado para operações de rotas longas e latitudes elevadas. Atualmente o Jet A é consumido predominantemente nos Estados Unidos e no Canadá, e o Jet A-1 adotado como padrão internacional. (Su-Ungkavatim *et al.*, 2023). A regulamentação do QAV se dá por meio de normas internacionais, como a ASTM D1655, norma que estabelece a especificação padrão para combustíveis de aviação.

Do ponto de vista ambiental, o querosene fóssil chega a emitir de forma significativa gases do efeito estufa, sendo a aviação responsável por representar cerca de 2,5% das emissões globais de gás carbônico com o uso desse combustível (IEA, 2026; IEA, 2023). O impacto da queima do querosene libera não apenas gás carbônico como diferentes óxidos de nitrogênio e partículas de fuligem, contribuindo com a emissão de gases tóxicos, elevando a contribuição efetiva ao aquecimento global, em cerca de 4%, além do risco da quebra da camada de ozônio com a emissão dos NO_x (Lee *et al.*, 2021). Esse impacto implica na necessidade de busca de alternativas aos meios de geração de combustíveis, a partir de combustíveis sustentáveis.

Em contrapartida do querosene convencional, surge o querosene parafínico sintético (SPK, do inglês, *Synthetic Paraffinic Kerosene*), o qual é produzido a partir de biorrefinarias. O conceito de biorrefinaria surgiu como um modelo em contrapartida da refinaria convencional do petróleo, buscando substituir os combustíveis fósseis por fontes renováveis de carbono. Assim como o refino do petróleo gera múltiplos derivados, uma biorrefinaria aproveita sua biomassa em sua totalidade, maximizando o aproveitamento de cada fração disponível. As biorrefinarias são classificadas em três principais tipos: energia, combustíveis e produtos acabados ou bens de consumo. As principais matérias-primas em biorrefinarias foram classificadas por quatro gerações: a) a cultura destinada à indústria alimentícia; b) a que não

tem potencial direto para comprometer a segurança alimentar; c) o cultivo de microalgas; e d) o desenvolvimento em biologia vegetal (EPE, 2024). A partir dessas diferentes matérias-primas é possível a produção de combustíveis sustentáveis.

O SAF, é um combustível líquido que reduz em até 80% as emissões de CO₂, considerando todo o ciclo de análise de vida, desde a matéria-prima a emissão na turbina de aeronaves (Rodrigues, 2025). O SAF é um combustível aeronáutico produzido a partir de fontes renováveis ou biomassas. Tem como funcionalidade principal a redução do consumo de QAV como combustível principal da aviação. Ao comparar o SAF com o QAV, considerando a química entre os combustíveis, esse é similar ao Jet A/A-1, sendo composto por hidrocarbonetos parafínicos sintetizados (Wang *et al.*, 2024). Assim como o QAV, para que o uso do SAF seja aprovado em voos comerciais, ele deve atender às especificações estabelecidas na norma ASTM D7566, que define as especificações padrão para a produção de combustível de aviação a partir de hidrocarbonetos sintetizados (ASTM, 2022). Conforme a norma, atualmente é autorizado o uso de SAF no querosene convencional em proporções em até 50% volume, a depender da rota de produção certificada e matéria-prima utilizada, de tal modo que esse percentual ainda dificulta a expansão do uso do SAF (Quante *et al.*, 2023).

Das principais vantagens frente ao querosene fóssil, o SAF reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, ao considerar o ciclo completo de produção. Em contrapartida, entre as principais barreiras à expansão do uso do SAF está o custo elevado da rota de produção e a limitação de matérias-primas sustentáveis em escala industrial. As principais matérias-primas elegíveis para a produção de SAF reconhecidas pela ASTM D7566 são madeira, algas, diferentes tipos de óleos, gases residuais entre outros (Marangon *et al.*, 2024).

Ao comparar o querosene convencional com o querosene sintético, conforme as especificações, observa-se que ambos apresentam propriedades e limites semelhantes, como ponto de congelamento mínimo de -47 °C e o ponto de fulgor 38 °C. Entretanto, existem algumas diferenças em sua composição química. No caso de presença de aromáticos, apesar de terem o limite máximo de aromáticos de 25 %vol, o SPK não apresenta aromáticos, apenas hidrocarbonetos parafínicos (Maheer *et al.*, 2026).

Os compostos aromáticos, embora contribuam pela emissão de partículas, desempenham um papel fundamental no combustível de aviação e os materiais do sistema de combustível. Segundo Kazmi *et al.* (2026) é necessário um teor mínimo de 8% de aromáticos nos combustíveis para garantir um melhor desempenho dos anéis de vedação nos sistemas de combustíveis de aeronaves. Com a presença de aromáticos, os anéis se expandem e ajustam nos

tanques, garantindo uma vedação. Caso não haja a presença de aromáticos, como em SAFs, os elastômetros dos anéis não incham o suficiente, podendo endurecer, ocasionando vazamentos e falhas na operação (Kazmi *et al.*, 2026).

Outro comparativo é em relação a utilização de ambos os combustíveis. Atualmente, o QAV é utilizado puro, enquanto o SAF só pode ser utilizado de 10% a 50%, a depender da rota de produção e da certificação emitida pela ASTM (Maheer *et al.*, 2026). Segundo estudos, atualmente, a rota HEFA produzindo SPK a partir de algas só tem a liberação de apenas 10% da utilização em mistura com o querosene convencional (INPI, 2026). Pesquisas em andamento buscam o desenvolvimento de utilização de SAF puro, seja por rotas que produzam componentes aromáticos nativos, seja por formulação de aditivos compatíveis (Su-Ungkavatin *et al.*, 2023; Quante *et al.*, 2023).

Na Figura 2 é possível observar que, atualmente, existem sete rotas autorizadas para a produção de SAF. As principais com maior atuação atualmente são as que produzem querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA), querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT), querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-AtJ) (CBIE, 2026).

Figura 2 – Rotas de produção de SAF certificadas pela ASTM.



Fonte: CBIE (2026)

5 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS

Nessa seção, aborda-se as principais características e uso das microalgas como matéria-prima para a produção de combustíveis de aviação sustentável.

5.1 CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS DAS MICROALGAS

As microalgas são microrganismos fotossintéticos unicelulares que habitam em diferentes ambientes, sejam eles marinhos, salobros, rios ou terrestres. Essas têm sido identificadas como matérias primas ideais para a produção de combustíveis de aviação renováveis em razão de suas inúmeras vantagens, como abundância, rápida taxa de crescimento, renovabilidade e capacidade de redução das emissões de carbono (Nashath *et al.*, 2025).

Diferentemente das culturas terrestres convencionais, as microalgas apresentam crescimento rápido, não ocupam terras aráveis, promovem o ciclo do carbono e possuem alta taxa de produção de óleo, tornando-as superiores às matérias-primas de primeira e segunda geração sob os aspectos ambiental e de produtividade. As microalgas podem crescer em água salgada ou em águas residuais, capturar CO₂ da atmosfera e produzir lipídios sem exigir grandes quantidades de recursos convencionais, o que amplia significativamente as possibilidades de cultivo em regiões não agricultáveis (Nashath *et al.*, 2025).

Analisando o cenário de produção de combustível sustentável, os compostos bioquímicos das microalgas de interesse são os lipídeos e carboidratos. O estudo proposto por Maheer *et al.* (2026) apresenta uma visão detalhada das algas como matéria-prima para o SAF.

Os lipídeos de microalgas são compostos de ácidos graxos livres e triglicerídeos, essenciais para a rota HEFA, os quais são submetidos a um hidrotreatamento produzindo SPK, por meio de algumas transformações as quais serão discutidas posteriormente (Song *et al.*, 2023). Espécies como *Nannochloropsis*, *Scenedesmus* e *Schizochytrium* apresentam, respectivamente, os seguintes teores de lipídeos: 37-60%, 30-50% e 50-77% da biomassa seca (Maheer *et al.*, 2026).

Os carboidratos são os substratos necessários para a produção de bio-alcóois, como bioetanol e biobutanol, que são responsáveis pela produção de querosene sintético. Posteriormente, esses álcoois serão processados pela rota AtJ para a produção de SPK (Maheer *et al.* 2026; ProQR, 2022). Por fim, no caso da rota FT, a produção de bioquerosene se dá a partir das microalgas por completo, através do processo de gaseificação acoplada à síntese FT. Utiliza de toda biomassa, a qual é transformada em gás de síntese, que a partir do reator catalítico produz o SPK (Lim *et al.*, 2021).

5.2 CULTIVO E PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Existem dois tipos de sistemas de cultivo de microalgas: as lagoas abertas e os fotobiorreatores. Em questão de aplicabilidade, os fotobiorreatores são aplicados a escala laboratorial, facilitando o controle operacional, enquanto em lagoas abertas apresentam um menor custo operacional. Os principais fatores que afetam a composição de microalgas são a temperatura, o pH, intensidade da luz e estresse nutricional (Lim *et al.*, 2021).

A temperatura afeta diretamente na taxa de divisão celular e na composição química das microalgas. A depender da cepa, existe uma variação de temperatura ideal. A maioria se situa entre 20 °C a 30 °C, sendo que valores superiores ou inferiores podem ser considerados prejudiciais ao crescimento. Para a produção de lipídeos, trabalhar na faixa superior favorece o acúmulo lipídico. De modo geral, o pH ideal para o cultivo é o neutro, próximo a 7, sendo regulado para desfavorecer a contaminação do meio por outros microrganismos e não prejudicar o cultivo de microalgas. Exceto algumas espécies que podem apresentar melhor desempenho em outras faixas (Lim *et al.*, 2021).

A intensidade luminosa, por sua vez, regula a eficiência fotossintética e a produtividade de biomassa. O excesso de luz pode causar uma fotoinibição e danos significativos aos pigmentos clorofilados e a escassez limita a taxa de crescimento. Depende da espécie e do tipo de sistema de cultivo, incluindo a duração. Por fim, o estresse nutricional, principalmente limitação de nitrogênio, é a estratégia mais utilizada para a produção de lipídios e carboidratos nas algas, pois o metabolismo é redirecionado à síntese proteica. Entretanto, também depende da espécie a ser cultivada (Lim *et al.*, 2021).

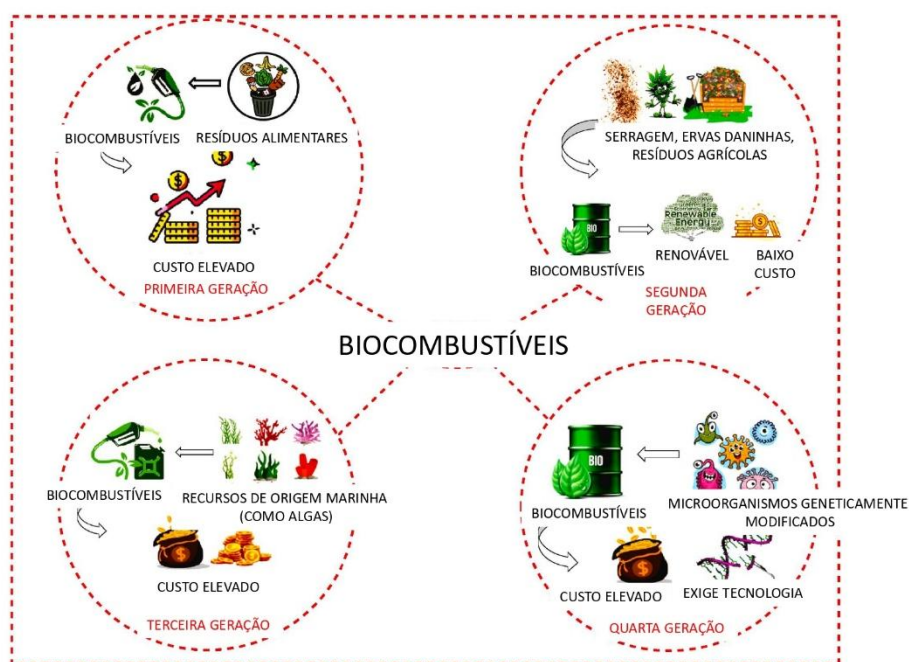
5.3 VANTAGENS FRENTE ÀS OUTRAS GERAÇÕES

O combustível de aviação sustentável é derivado de biomassa, que representa significativamente a transição da indústria de aviação para uma operação mais sustentável. Atualmente, utilizam de beterraba sacarina, grãos de milho, serragem, resíduos florestais, além de gorduras, animais e rejeitos óleos de cozinha (Kazmi *et al.*, 2026).

Segundo Bukhari *et al.* (2025), as matérias primas para a produção de biocombustíveis são classificadas por gerações. A Figura 3 abaixo representa as quatro gerações de matérias primas. Os combustíveis de primeira geração são derivados de culturas alimentares comestíveis, sendo menos utilizados por competirem com a alimentação humana e o uso da terra, como açúcares e amidos. Já a segunda geração, apresentam uma abordagem mais sustentável, utilizando uma biomassa lignocelulósica não alimentar, ou seja, qualquer material vegetal não comestível composto por celulose, hemicelulose e lignina. A terceira geração são aqueles que

utilizam de recursos de origem aquática, como as algas e organismos em geral como as leveduras, que além de produzirem óleos absorvem grandes quantidades de CO₂ e liberam O₂. A quarta geração é o resultado de um desenvolvimento de biotecnologia e biologia vegetal, com organismos capazes de absorver carbono (EPE, 2024).

Figura 3 – Classificação das gerações de matéria-prima com base em sua fonte.



Fonte: Modificado de Bukhari *et al.* (2025).

Apesar de sua importância no mercado atual, essas fontes convencionais apresentam limitações quanto à disponibilidade, à competição pelo uso da terra e à variabilidade na qualidade da matéria-prima, o que restringe sua escalabilidade para atender às metas globais de descarbonização da aviação (Shahriar; Khanal, 2022). Nesse contexto, as algas surgem como matérias primas da terceira geração, apresentando características substanciais, apesar de ainda não terem sido utilizadas comercialmente na produção de SAF em escala industrial.

Nesse cenário, as microalgas representam a solução mais promissora para a substituição dos combustíveis fósseis altamente poluentes por meio da produção de SAF, sendo compatíveis com múltiplas rotas de conversão já certificadas pela ASTM D7566, como HEFA, AtJ e Fischer-Tropsch, que serão detalhadas nos tópicos subsequentes deste trabalho.

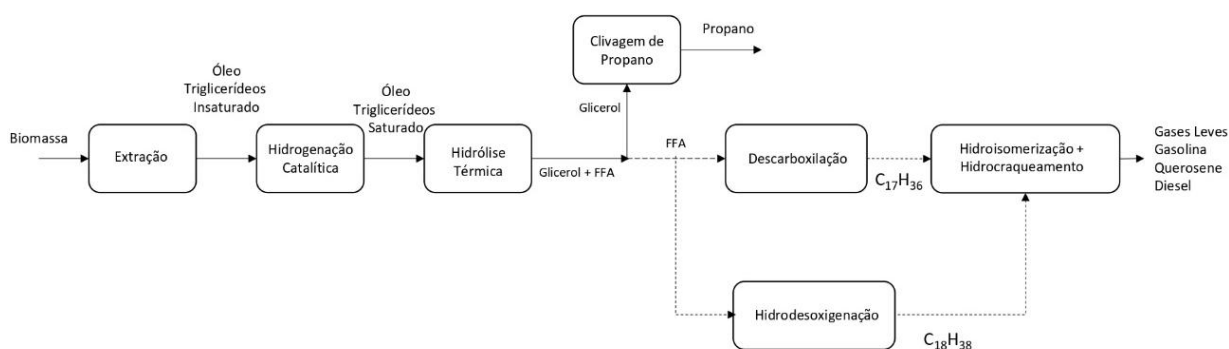
6 ROTAS DE PRODUÇÃO

Nessa seção serão apresentadas as principais rotas para a produção de SAF a partir das algas. Dentre as rotas certificadas pela ASTM D7566 para a produção de SAF as que apresentaram estudos a respeito da produção a partir de biomassa algácea foram a HEFA, FT e AtJ. Ademais, um estudo sobre a análise multicritério foi aplicado às principais rotas de produção de SAF, posicionando essas como as principais em maior desempenho, considerando a eficiência energética, emissões, maturidade tecnológica (Okolie *et al.*, 2023). É importante ressaltar que ainda não existem plantas industriais para a produção de SAF a partir de microalgas. Dessa forma, este estudo apresenta as rotas de produção dessa matéria-prima com base em estudos da literatura, incluindo, quando disponíveis, resultados obtidos em plantas piloto, comparações do nível de maturidade tecnológica (TRL), análises do ciclo de vida e dados de rendimento..

6.1 HIDROPROCESSAMENTO DE ÉSTERES E ÁCIDOS GRAXOS – HEFA

O hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos, denominado HEFA, é atualmente o principal método de produção de SAF no mundo, sendo responsável pela produção de 99% do SAF produzido globalmente (Maghzian, Saddler, 2026). O processo do HEFA consiste na conversão catalítica de lipídios, que são triglicerídeos e ácidos graxos livres (FFA, do inglês *Free Fatty Acids*) em alcanos na faixa do querosene de aviação, por meio de uma sequência de reações de hidroprocessamento, assim como representado na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática do fluxograma de blocos da rota HEFA para a conversão de ésteres e ácidos graxos em SPK.

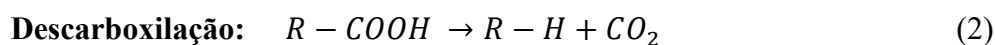
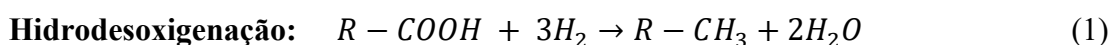


Fonte: Modificado de ProQR (2022).

Considerando o contexto de produção a partir de algas, o processo tem início com a extração do óleo da biomassa algácea, que pode ser feito por flotação, prensado, floculação.

(Liow *et al.*, 2026). O óleo obtido das algas é rico em ácidos graxos insaturados e glicerídeos, características as quais não atendem às especificações do SAF. Desse modo, o óleo é submetido inicialmente a uma hidrogenação catalítica, na qual produz triglicerídeos saturados através da adição de hidrogênio às duplas carbono-carbono. Essa reação ocorre a pressões entre 0,7 e 4 bar, com catalisadores de níquel na faixa de 150 a 220 °C, ou com catalisadores de paládio e platina entre 80 e 120 °C (ProQR., 2022). Na etapa seguinte, uma hidrólise térmica, em que os triglicerídeos saturados são quebrados em uma molécula de glicerol e outras três moléculas de ácidos graxos livres (Liow *et al.*, 2026).

O glicerol é convertido em propano através da adição de hidrogênio em uma clivagem de propano (ProQR., 2022). Os ácidos graxos livres gerados devem então ter seu oxigênio removido, uma vez que compostos oxigenados reduzem o poder calorífico do combustível e comprometem sua estabilidade térmica. Essa remoção ocorre por duas vias reacionais principais: a hidrodessoxigenação (HDO) que remove o oxigênio na forma de água, por adição de hidrogênio, preservando o comprimento original da cadeia carbônica e produzindo alcanos, como o octadecano (C₁₈H₃₈), com consumo de 9 mol de H₂ por mol de ácido graxo; a descarboxilação (DCX), por sua vez, remove o oxigênio na forma de CO₂, gerando alcanos como o heptadecano (C₁₇H₃₆). Ambas as reações estão dispostas nas Equações 1 e 2 abaixo, respectivamente. A principal vantagem da via DCX é operar favoravelmente a pressões mais baixas e com menor consumo de hidrogênio. Ambas as reações ocorrem entre 300 e 600 °C na presença de catalisadores heterogêneos (Song *et al.*, 2023) (ProQR., 2022). Ambas as vias podem produzir alcanos de cadeia carbônica longa, a depender do comprimento dos FFA.



Os alcanos produzidos da retirada de oxigênio são chamados de parafinas de cadeia reta, porém não atendem às especificações da norma ASTM D7566, como o ponto de congelamento, que deve ser de - 47 °C. Para adequar a essas propriedades, são submetidos a uma reação de hidroisomerização, com o objetivo de formação de parafinas com cadeias ramificadas, reduzindo o ponto de congelamento. Simultaneamente ou sequencialmente, acontece a reação de hidrocrackeamento, que quebra e satura os hidrocarbonetos a fim de formar o querosene parafínico sintético, com cadeias com 9 a 15 carbonos (ProQR, 2022). A Tabela 2 sintetiza as

principais condições operacionais dispostas anteriormente e as prováveis conversões laboratoriais em cada etapa da rota SPK-HEFA.

Tabela 2 – Descritivo das etapas da rota SPK-HEFA.

Etapa	T (°C)	P (MPa)	Conversão típica (%)
Hidrogenação catalítica	150 - 220	0,7 - 4	95
Hidrólise térmica	250 - 300	2 - 5	90 - 98
HDO	300 - 600	3 - 8	85 - 99
DCX	300 - 600	1 - 5	70 - 90
Hidroisomeração	250 - 380	2 - 6	80 - 95
Hidrocraqueamento	300 - 450	3 - 10	60 - 85

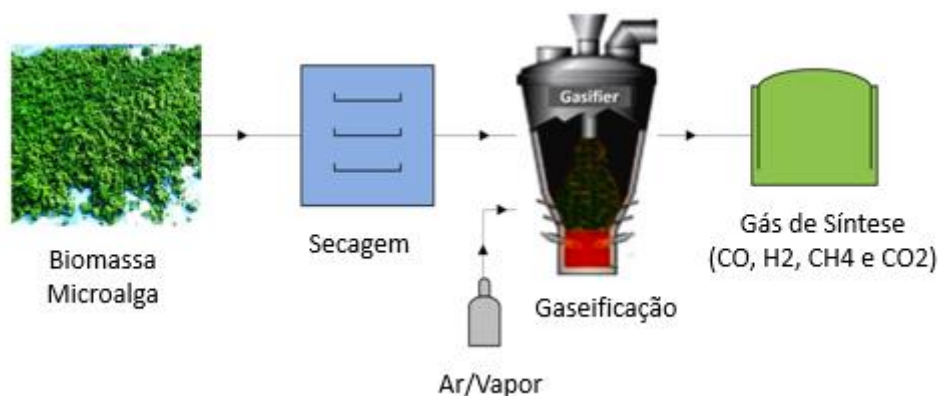
Fonte: Elaborado pela autora com dados de Song *et al.* (2023), ProQR (2022) e Maheer *et al.* (2026).

Segundo Maheer *et al.*, (2026), o rendimento em geral de uma rota HEFA, em escala laboratorial, a partir de microalgas situa-se em torno de 55 % a 76 %. O consumo de H₂ é o principal custo operacional, posterior à extração do óleo algáceo. Por fim, a rota HEFA apresenta o TRL³ de 6 a 9, mas utilizando a biomassa algácea, se encontra entre 6 e 7 (ProQR., 2022).

6.2 GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA ALGÁCEA

Inicialmente ao processo de produção do SPK por meio das rotas AtJ e FT é necessária uma etapa de gaseificação, com a necessidade de produção do gás de síntese, conforme esquematizado na Figura 5.

Figura 5 – Representação esquemática da etapa de gaseificação.



³ TRL: Nível de Maturidade Tecnológica, é uma escala de 1 a 9 para avaliar o grau de maturidade de uma tecnologia, desde os princípios básicos em um laboratório (TRL 1) até o sistema completamente desenvolvido, aprovado e em operação comercial (TRL 9).

Fonte: Modificado de Lim *et al.* (2021).

O processo inicia-se com cultivo, colheita e secagem das microalgas, etapa de alta importância devido à etapa de gaseificação. As microalgas apresentam alto teor de umidade, reduzindo a eficiência do gaseificador caso a secagem não seja realizada previamente (Doherty; Reynolds; Kennedy; 2009). A gaseificação é uma conversão termoquímica que submete a biomassa seca a temperaturas entre 800 e 1.000°C em condições de oxidação parcial, com ar como agente gaseificante, convertendo toda a biomassa em gás de síntese (Lim *et al.*, 2021). Após a gaseificação, o gás de síntese bruto é submetido a uma etapa de limpeza e condicionamento para remoção de contaminantes como alcatrões, partículas sólidas e compostos de enxofre e nitrogênio, que poderiam envenenar os catalisadores das etapas seguintes (Mansy *et al.*, 2025; ProQR, 2022). A razão hidrogênio e monóxido de carbono é então ajustada para a proporção de 2:1, condição ideal para a síntese de metanol nas etapas posteriores (Mansy *et al.*, 2025).

Em um estudo realizado por Lim *et al.* (2021), estudos de gaseificação com diferentes espécies de microalgas reportaram desempenhos distintos, como reportado na Tabela 3. A gaseificação da microalga *Spirulina sp* era composto por mais CO, CO₂, CH₄, H₂, e pouca quantidade de C₂H₄, N₂ e O₂, utilizando uma gaseificação a alta temperatura. Já com a microalga *Chlorella vulgaris*, a gaseificação foi realizada a baixa temperatura, com Ni como catalisador, aumentando a concentração de CH₄, que seria prejudicial para as próximas etapas.

Tabela 3 – Gaseificação de algumas microalgas para a produção de gás de síntese.

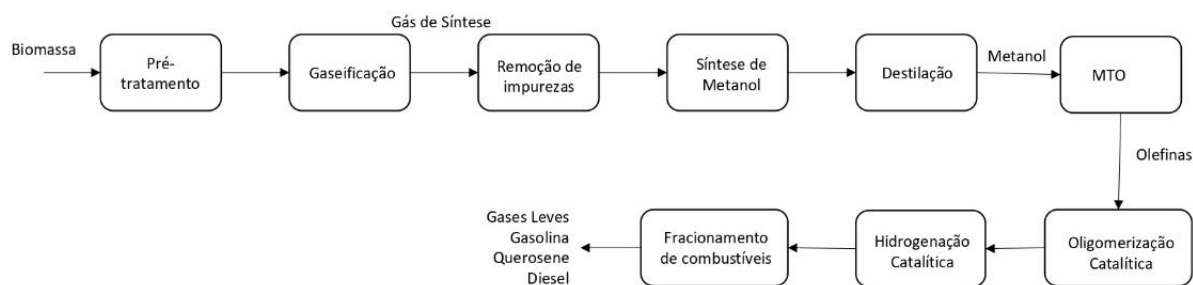
Espécies de microalgas	Temperatura de gaseificação (°C)	Principais conclusões
<i>Spirulina sp.</i>	850 - 1.000	O gás de síntese é composto principalmente de H ₂ , CO, CO ₂ e CH ₄ ; Conversão de carbono de 93% a 100%.
<i>Chlorella vulgaris</i>	350	Aumento de CH ₄ e conversão de carbono com catalisador de Ni. Conversão de carbono de 35% a 70,1% a depender da quantidade de catalisador.
<i>Nannochloropsis oculata</i>	500 - 800	Produz gás de síntese de alta qualidade sob catalisador Fe ₂ O ₃ - CeO ₂ . Conversão de carbono de 40% a 52%.
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	400	Produz gás de síntese rico em metano (40,6%), etano (56,7%) e propano (50,5%). Conversão de carbono de 68 a 74%;
<i>Chlorella vulgaris</i>	600 - 850	O catalisador CaO aumentou a produção de CO e H ₂ ; Conversão de carbono de 66,2% a uma temperatura de 850 °C.

Fonte: Elaborado pela autora baseado nos dados de Lim *et al.* (2021) e Minowa T.; Sawayama S. (1999)

6.3 ÁLCOOL PARA JATO – ATJ

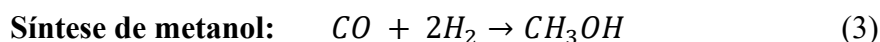
A rota denominada Álcool para Jato, denominada AtJ, consiste na conversão de álcoois em querosene parafínico sintético através de reações catalíticas. É considerada também uma rota aprovada pela ASTM D7566, podendo ser utilizada em até 50 % do volume do querosene convencional (ASTM International, 2022; ProQR, 2022). Para ser aplicável no contexto de biomassa algácea, a rota AtJ deve ter previamente uma etapa para a transformação das algas em álcoois. Utiliza-se principalmente carboidratos, dentre esses os amidos e açúcares, ou até mesmo a biomassa por completa, para ser submetida a uma etapa de gaseificação para a produção de gás de síntese (Lim *et al.*, 2021; Maheer *et al.*, 2026). Na Figura 6 é apresentado um esquema todas as etapas de produção de SAF a partir das algas por meio da rota AtJ. Inicialmente o processo começa com a etapa de gaseificação, anteriormente explicada. Após, o gás de síntese é tratado e direcionado para a produção do álcool, metanol, por meio da síntese de metanol.

Figura 6 – Representação esquemática do fluxograma de blocos da rota AtJ para a conversão de microalgas em SPK.



Fonte: Modificado de ProQR, 2022.

O gás de síntese é convertido em metanol por uma síntese catalítica, em reatores operando tipicamente entre 200 e 300°C e pressões de 5 a 10 MPa, na presença de catalisadores de cobre, zinco, alumínio (Cu/ZnO/Al₂O₃) conforme a Equação 3. O metanol produzido é purificado por destilação e, posteriormente, é encaminhado a conversão catalítica da rota AtJ (ProQR, 2022).



Após síntese do álcool necessário para a rota AtJ, inicia-se a etapa de desidratação, em que o metanol é convertido em olefinas leves, como o etileno e o propileno. A reação ocorre a

temperaturas entre 250 e 400°C, utilizando catalisadores zeolíticos (Lim *et al.*, 2021; ProQR, 2022). No caso do metanol, tem o nome específico de reação de MTO (Metanol para Olefinas, do inglês, *Methanol-to-Olefins*).

Após essa etapa, as olefinas são submetidas a oligomerização catalítica, na qual os monômeros de baixo peso molecular são combinados a fim de formar hidrocarbonetos de cadeia mais longa, compatível com o querosene de aviação (Mansy *et al.*, 2025). No estudo proposto por Lim *et al.* (2021), as condições operacionais caíram de 90 a 350°C e de 89 a 250 bar, com a utilização de catalisadores zeolíticos (H-ZSM-5), sendo esse catalisador efetivo para a utilização no processo de oligomerização.

Por fim, a rota finaliza com as etapas de hidrogenação catalítica, seguidas de uma destilação para a separação dos combustíveis produzidos. As olefinas oligomerizadas são saturadas por hidrogenação catalítica, em torno de temperaturas de 270°C e a presença de catalisadores de Pd/Pt, sobre carvão ativado e alimentação de hidrogênio. Essa etapa converte essas olefinas em parafinas ramificadas, garantindo ao SPK as propriedades necessárias para a atuação conforme os parâmetros da ASTM D7566. Por fim, o produto é submetido a destilação para a separação das frações, incluindo o querosene sintético (ProQR, 2022; Lim *et al.*, 2021; Mansy *et al.*, 2025).

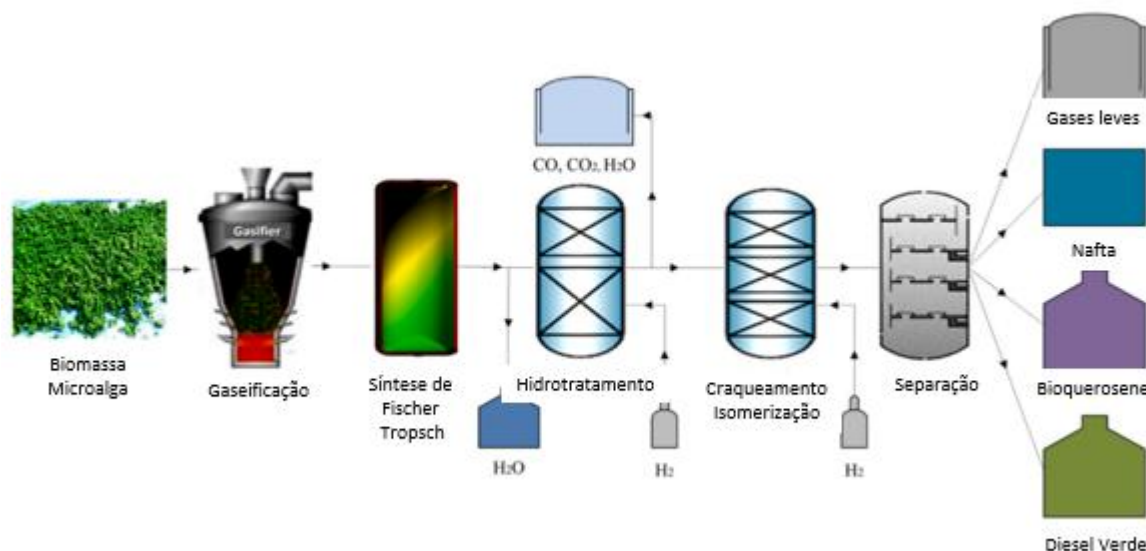
Em termos de eficiência energética global, a rota AtJ apresenta um desempenho de aproximadamente 40% segundo a análise do estudo de ProQR (2022). Vale ressaltar que os valores obtidos no estudo são com base na produção da rota, tendo como literatura e pesquisas limitadas em relação ao percentual de conversão da biomassa algácea. Considerando a maturidade tecnológica da rota, segundo a ASTM D7566, a rota a partir de síntese de metanol está entre TRL 6-7, entretanto, quando se considera o processo integrado desde a gaseificação da biomassa, a maturidade é reduzida devido à baixa evolução de estudos de protótipos (Lim *et al.*, 2021; ProQR, 2022).

6.4 SÍNTESE DE FISCHER-TROPSCH – FT

A rota denominada Síntese de Fischer-Tropsch pode ser realizada por vários processos de conversão da biomassa, como a gaseificação, a pirólise e liquefação. O processo descrito de gaseificação foi escolhido para o estudo, o mesmo estipulado na rota AtJ, descrito no tópico anterior. Segundo ProQR (2022), 5 a 6 toneladas de biomassa pode resultar em uma tonelada de combustível líquido de FT. Após a etapa de gaseificação, a rota FT é uma via que converte o gás de síntese em SPK por meio do craqueamento catalítico. Diferentemente da HEFA, a rota FT não requer a extração prévia de lipídios ou carboidratos das microalgas, utilizando a

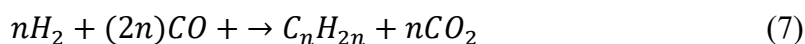
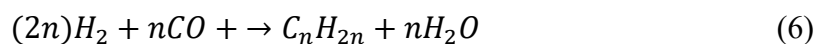
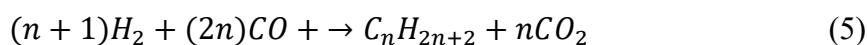
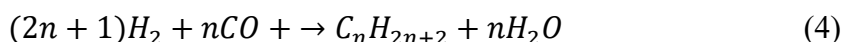
biomassa algácea em sua totalidade como insumo do processo, conforme representado na Figura 7 (Lim *et al.*, 2021; Maheer *et al.*, 2026).

Figura 7 – Representação esquemática da rota FT para a conversão microalgas em SPK.



Fonte: Modificado de Lim *et al.* (2021).

Na síntese de Fischer-Tropsch, o gás de síntese reage com hidrogênio na presença de catalisadores metálicos, à base de cobalto ou ferro. Essa etapa pode trazer uma grande variedade de hidrocarbonetos, desde alcanos até óleos, hidrocarbonetos de cadeias longas, conforme as Equações 4, 5, 6 e 7 abaixo (Wang, Tao, 2026).



O processo é categorizado em duas modalidades operacionais, a FT em alta temperatura (300-350°C), favorecendo a produção de olefinas de baixo peso molecular e a de baixa temperatura (200 - 240°C), favorecendo as olefinas de alto peso molecular, que posteriormente são submetidas a hidrocraqueamento para a obtenção de querosene. O reator pode ser de leito fixo, lama agitado, recirculante, entre outros, alterando o rendimento final. Em um estudo entre o reator de leito fixo e um reator de fase líquida, esse último mostrou um rendimento 50% maior

que o reator de leito fixo (Espionza *et al.*, 1999). A corrente produzida com maiores hidrocarbonetos, os quais são submetidos ao hidrotreatamento, composta de três estágios: hidredesoxigenação, hidroisomerização, hidrocrackeamento e separação, assim como na rota HEFA.

Uma das principais vantagens do combustível FT é a produção de SPK com redução de material particulado e ausência de emissões de NOx. Comparado ao carvão ou ao gás natural, o FT a partir de biomassa fornece eficiência energética máxima de 77%. Em termos de maturidade tecnológica, o processo FT, é considerado uma rota madura, apresentando um TRL entre 7 e 8 com a base de carvão, petróleo (ProQR, 2022). Entretanto, quando se aplica a utilização de microalgas como matéria-prima no processo, a síntese de Fischer-Tropsch enfrenta limitações adicionais relacionadas ao alto teor de umidade e aos desafios de limpeza do gás de síntese, situando o processo completo desde a gaseificação até ao bioquerosene, um nível de maturidade tecnológica entre 4 e 6 (Lim *et al.*, 2021; ProQR, 2022). Segundo Bauen *et al.* (2020) a TRL dessa rota está em torno de 6. A literatura específica sobre a conversão de microalgas em SPK pela rota FT ainda é limitada, sinalizando uma importante lacuna de pesquisa a ser explorada para a viabilização desta tecnologia em escala industrial.

7 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA E SUSTENTABILIDADE

No contexto de combustível de aviação sustentável, entender a análise de ciclo de vida e a sustentabilidade do processo é essencial para garantir que o processo para a produção do SPK apresente um avanço ambiental em relação ao querosene convencional, como a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Analisando o uso da matéria-prima, a biomassa algácea, assim como disposto anteriormente, com o estudo de Prussi *et al.* (2021), os autores concluíram que os resultados dependem das condições de produção e do sistema de cultivo e método de processamento adotado, de modo que não só o uso de biomassa algácea promove uma superioridade ambiental do produto. Já Maragon *et al.*, (2024), realizaram uma análise de ciclo de vida comparando diferentes rotas hidrotérmicas de produção de SAF a partir das microalgas, cultivadas em águas residuárias. Os estudos demonstram que o cultivo de microalgas em águas residuárias pode reduzir significativamente os impactos ambientais, ao diminuir a demanda por áreas de cultivo, fertilizantes sintéticos e água potável. Além disso, essa estratégia contribui para a mitigação da eutrofização, reduz o uso da terra e promove a captura de CO₂ atmosférico durante o crescimento da biomassa (Maheer *et al.*, 2026).

Em relação às rotas de produção, verificou-se que a HEFA apresenta elevada demanda por hidrogênio, cuja produção ainda é predominantemente baseada em fontes fósseis, o que pode comprometer parte dos benefícios ambientais associados ao combustível produzido. Dessa forma, a utilização de hidrogênio verde, produzido por eletrólise a partir de fontes renováveis, seria benéfico ambientalmente. Em contrapartida, o custo oneroso do processo de eletrólise encarece o valor final do hidrogênio verde, podendo se tornar inviável financeiramente para o valor final de SPK a ser comercializado.

A rota AtJ, que apresenta um perfil com baixa eficiência energética, é menos utilizada e estudada, e também apresenta o uso de hidrogênio em seu processo produtivo. Porém, devido à baixa eficiência de produção, cerca de 40%, implica em uma maior quantidade de biomassa algácea, demandando uma maior pressão sobre a produção de microalgas.

A rota FT, assim como descrito por Lim *et al.* (2021), apresenta desafios no alto teor de umidade das microalgas, sendo necessário pré-gaseificação, antes de entrar no reator, uma etapa de secagem energeticamente intensiva, resultando em um consumo maior de energia. Adjunto a esse ponto, também é utilizado uma grande quantidade de hidrogênio no processo de hidrotreamento, podendo elevar o valor de SPK a ser comercializado, assim como na rota HEFA.

Entre os principais fatores limitantes externos das rotas analisadas, destaca-se o consumo de hidrogênio como elemento comum às três tecnologias. De forma específica, a rota AtJ apresenta restrições relacionadas à eficiência de produção e à aplicabilidade em escala, enquanto a rota FT é condicionada pela demanda energética intensiva da etapa de secagem da biomassa, etapa obrigatória para a viabilização da síntese de Fischer–Tropsch. Diante dos estudos e artigos revisados, a rota HEFA foi a que melhor contemplou os critérios de sustentabilidade e de análise de ciclo de vida, sobretudo pela maior maturidade tecnológica, devido à maior aplicabilidade na indústria. Contudo, é válido ressaltar que nenhuma das rotas apresentou superioridade absoluta em todos os critérios avaliados.

8 VIABILIDADE ECONÔMICA

No contexto de combustível de aviação sustentável, a expansão da produção de querosene por vias sustentáveis ainda é mais onerosa que a produção de querosene fóssil devido aos custos envolvidos em todas as etapas da cadeia produtiva.

Estudos mostraram que o custo mínimo de venda do combustível produzido por microalgas pela rota HEFA é significativamente maior que o preço de mercado do querosene convencional. O custo de cultivo de microalgas, seguido pela extração de lipídeos e até o hidroprocessamento são a maioria das parcelas de custos operacionais. A análise de Atnoorkar *et al.* (2024) indicou que avanços na produtividade de biomassa algácea e na extração lipídica são os mais relevantes para a redução de custos da rota HEFA no contexto internacional.

Na análise econômica realizada pelo ProQR (2022) no contexto brasileiro, verificou-se que a rota HEFA apresenta o menor custo entre as rotas certificadas, quando considerado o uso de gorduras residuais como os óleos de cozinha. Em contrapartida, quando se considera a biomassa algácea e a necessidade de extração do óleo como o insumo principal, os custos são elevados, evidenciando que é necessário o desenvolvimento de cultivos e meios de extração mais eficientes e menos onerosos.

No que tange às rotas AtJ e FT, os custos de produção tendem a ser mais elevados devido ao maior número de etapas de conversão em comparação à rota HEFA. Entre essas etapas destacam-se a gaseificação da biomassa, comum às duas rotas, além da síntese de álcoois na AtJ e da síntese de Fischer-Tropsch na FT. Em contrapartida, ambas apresentam como principal vantagem a possibilidade de utilizar a biomassa algácea integral, dispensando a etapa de extração de lipídios, que representa uma das operações mais onerosas do processo.

Em um dos artigos utilizados, foi observado uma análise econômica da produção do SPK, indicando que o custo de produção do SAF, independentemente da rota e da matéria-prima, ainda é de 2 a 5 vezes superior ao do querosene convencional. Políticas públicas de incentivo, como subsídios e créditos de carbono, são instrumentos fundamentais para viabilizar economicamente a expansão do SAF (Shahriar; Khanal, 2022). Nesse contexto, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), estabelecida pela Lei nº 13.576/2017, representa um avanço relevante no cenário brasileiro, ao criar um ambiente regulatório favorável ao desenvolvimento de biocombustíveis, incluindo o SAF.

Sob uma análise de diferentes critérios, no estudo feito por Okolie *et al.*, (2023), como viabilidade econômica, impacto ambiental e eficiência energética, verificou-se que as diferentes rotas de produção do combustível de aviação sustentável, como HEFA, AtJ e FT apresentam atualmente o maior desempenho agregado, mas nenhuma dessas, na atual fase de pesquisa,

desenvolvimento e aplicações, principalmente a partir da biomassa algácea, apresenta uma competitividade econômica para uma atuação em escala industrial, necessitando de suporte avanços tecnológicos adicionais.

9 DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A produção de combustíveis de aviação sustentável a partir de microalgas representa uma fronteira promissora para a descarbonização da aviação. Entretanto, os estudos revisados mostram que a implementação dessas tecnologias ainda é limitada, devido ao alto custo associado a qualquer uma das três rotas analisadas.

Entre os principais desafios estão a redução dos impasses relacionados ao cultivo de microalgas e o aprimoramento tecnológico para a extração de óleo algáceo, fatores que elevariam a viabilidade da rota HEFA, atualmente a mais avançada tecnologicamente. Além desses desafios, é necessário o desenvolvimento de tecnologias capazes de converter a biomassa em querosene sintético com maior eficiência técnica e viabilidade econômica. No estágio atual de desenvolvimento, nenhuma das rotas avaliadas apresenta competitividade econômica em relação à produção de querosene convencional, evidenciando a necessidade de avanços tecnológicos que reduzam os custos e ampliem a eficiência dos processos.

Ademais, um dos principais desafios consiste na consolidação de rotas de produção de SAF a partir de microalgas que atendam, em escala industrial, aos critérios de sustentabilidade estabelecidos pela ASTM D7566. Para isso, torna-se essencial ampliar as pesquisas sobre o uso de microalgas como matéria-prima, uma vez que a produção científica nessa área ainda é limitada.

Zahid *et al.* (2024) apresentam uma visão geral sobre matérias-primas e processos sustentáveis para a produção de SAF, destacando que a integração de diferentes fontes de biomassa, incluindo as microalgas, em plataformas de biorrefinaria integrada pode ser o caminho mais eficiente para a redução de custos e maximização do aproveitamento de recursos.

Por fim, os desafios para a produção de SAF a partir de microalgas em escala comercial são significativos, mas ainda podem ser superados. O avanço simultâneo em pesquisa e desenvolvimento tecnológico, aliado a marcos regulatórios e ao aumento da demanda por SAF, configura o cenário mais promissor para a superação das limitações identificadas. A combinação entre os objetivos de descarbonização da aviação e a maturação das tecnologias de produção de SAF a partir de microalgas pode, a médio e longo prazo, tornar essa alternativa economicamente e ambientalmente competitiva.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma revisão bibliográfica sobre a produção de combustível de aviação sustentável a partir de microalgas, com foco nas três principais rotas de conversão certificadas pela ASTM D7566: hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA), álcool para jato (AtJ) e síntese de Fischer-Tropsch (FT). A análise permitiu caracterizar as microalgas como matéria-prima, descrever as etapas de cada rota tecnológica e comparar suas potencialidades e limitações sob as perspectivas ambiental e econômica.

Em resposta ao objetivo geral proposto, conclui-se que as microalgas constituem uma matéria-prima de terceira geração com características favoráveis à produção de SAF, incluindo elevada taxa de crescimento, alta produtividade de lipídios e carboidratos, capacidade de captura de CO₂ e possibilidade de cultivo em águas residuárias. Essas características tornam as microalgas superiores às matérias primas de primeira e segunda geração sob aspectos ambientais e de sustentabilidade, especialmente no que tange à não competição com a cadeia alimentar e ao não uso de terras aráveis.

No que se refere aos objetivos específicos, a análise das rotas tecnológicas revelou que cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens distintas. A rota HEFA é atualmente a mais madura tecnologicamente, com TRL entre 6 e 7 quando a biomassa algácea é a matéria-prima, porém, a depender origem do hidrogênio utilizado no processo, pode ser descaracterizada como sustentável. A rota AtJ, embora apresente menor eficiência energética global, por volta de 40%, permite o aproveitamento integral da biomassa algácea por meio da gaseificação. A rota FT, por sua vez, se destaca pela capacidade de aproveitar toda a biomassa algácea sem necessidade de extração prévia de frações específicas, assim como a AtJ, embora o alto teor de umidade das microalgas represente um desafio operacional relevante para essa rota.

Do ponto de vista ambiental, os estudos revisados indicam que a produção de SAF a partir de microalgas pode reduzir as emissões de GEE em mais de 50% em relação ao QAV ao longo do ciclo de vida, resultado que está alinhado com as metas de descarbonização estabelecidas pela IATA e pela ICAO para o setor de aviação global, como a redução de emissões líquidas até 2050. Entretanto, esses resultados são altamente sensíveis às condições operacionais de cada rota, especialmente à fonte de energia utilizada e ao sistema de cultivo adotado.

Do ponto de vista econômico, os resultados confirmam que a produção de SAF a partir de microalgas ainda enfrenta custos substancialmente superiores aos do querosene convencional, sendo o cultivo das microalgas o principal componente de custo em todas as rotas analisadas. A viabilização econômica desta tecnologia depende, simultaneamente, de avanços

na produtividade e desenvolvimento de tecnologias das culturas de microalgas, na redução dos custos da etapa de extração, e no estabelecimento de marcos regulatórios que incentivem a produção e o consumo de SAF.

Por fim, destaca-se que a literatura específica sobre a produção de SAF a partir de microalgas ainda é escassa, especialmente no contexto nacional. A lacuna identificada na produção científica brasileira sobre o tema reforça a relevância e a contribuição deste trabalho, que buscou sistematizar e analisar algumas das principais rotas de conversão, suas potencialidades e seus desafios. Espera-se que os resultados apresentados possam orientar futuras pesquisas e contribuir para o avanço do campo no Brasil, em consonância com os objetivos globais de descarbonização da aviação.

11 DECLARAÇÃO DE USO DE IA GENERATIVA

Destaca-se que este trabalho contou com o uso de Inteligência Artificial como recurso tecnológico de apoio, especialmente para revisão textual e atividades de *brainstorming*, por meio do software livre *Claude*. Ressalta-se, contudo, que todas as produções passaram por análise criteriosa da pesquisadora, que se responsabiliza integralmente pelo conteúdo apresentado. Tal indicação faz-se necessária em conformidade com a Portaria n. 2664/2026⁴.

⁴ Disponível em: http://memoria2.cnpq.br/web/guest/view/-/journal_content/56_INSTANCE_0oED/10157/23142775. Acesso em: 18 abr. 2026.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMHAMED, A. I. *et al.* Alternative sustainable aviation fuel and energy (SAFE)-A Review with selected simulation cases of study. **Energy Reports**, v. 11, p. 3317-3344, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724001471>
- ASTM International. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. 2022. Disponível em: <https://www.astm.org/d7566-22.html>. Acesso em: 18 maio 2026.
- ATNOORKAR, S. *et al.* Algae to HEFA: Economics and potential deployment in the United States. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 18, n. 5, p. 1121-1136, 2024. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.2623>
- BAUEN, A. *et al.*, Sustainable aviation fuels: status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. **Johnson Matthey Technol. Rev.**, v. 64, n. 3, p. 263-278, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>
- BUKHARI I. *et al.*, Lignocellulosic biomass as a renewable resource: Driving second-generation biofuel innovation from agricultural waste, **Biomass and Bioenergy**, Volume 201, 2025, 108133, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108133>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953425005446>
- CBIE. Potencial de produção de SAF no estado de Goiás. 2026. GOV GO. Disponível em: <https://goias.gov.br/governo/wp-content/uploads/sites/11/2026/03/Potencial-de-Producao-de-SAF-no-Estado-de-Goiias.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- CLIMATE WATCH. **Greenhouse Gas (GHG) Emissions: Transportation, All GHG, 2013-2023**. [S. 1.], 2026. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/embed/ghg-emissions%3Fap3c%3DIGatBOL2anIYOIIFAGatBOKBXgX-V3xkue2RkEci_4qxSd2HqA%26chartType%3Dline%26end_year%3D2023%26gases%3Dall-ghg%26sectors%3Dtransportation%26source%3DClimate%2520Watch%26start_year%3D2013. Acesso em: 3 maio 2026.
- DOHERTY W., REYNOLDS A., KENNEDY D., The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation, **Biomass and Bioenergy**, Volume 33, Issue 9, 2009, Pages 1158-1167, ISSN 0961-9534. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953409000865>.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Processos de biorrefinaria para a produção de SAF e biobunker. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-913/PROCESSOS_DE_BIORREFINARIA_PARA_A_PRODUC%CC%A7A%CC%83O_D_E_SAF_E_BIOBUNKER_3.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.
- ESPIONZA, R.L. *et al.*, Low temperature Fischer–Tropsch synthesis from a Sasol perspective. **Applied Catalysis A: General**. Volume 186, Issues 1–2, 1999, Pages 13-26, ISSN 0926-860X. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(99\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00161-1).

FARIAS, L. M.; SELMITTO, M. A.. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07-16, 2011. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/revista/article/view/164/154>. Acesso em: 3 maio 2026.

GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. et al., Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation, **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, Volume 124, 2018, Pages 122-130, ISSN 0255-2701. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.12.009>.

IATA. **Net-zero carbon emissions by 2050**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://airlines.iata.org/2021/10/04/net-zero-carbon-emissions-2050>. Acesso em: 7 maio 2026.

ICAO. **Sustainable Aviation Fuels (SAF)**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF>. Acesso em: 7 maio 2026.

INPI. Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF): pedidos de patente no Brasil e no mundo, 2026. **Instituto Nacional da Propriedade Industrial**. Disponível em: https://www.gov.br/inpi/pt-br/uso-estrategico-da-pi/estudos-e-informacao-tecnologica/radar-tecnologico_saf_2026_rev-final.pdf. Acesso em: 28 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Aviation**. Paris: IEA, 2026. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>. Acesso em: 4 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 4 maio 2026.

ISMAIL, R. *et al.* Catalytic pathways towards sustainable aviation fuel production from waste biomass: A systematic review. **Chemical Engineering Journal Advances**, p. 100927, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821125002236>.

JIANG, X., MANKAD, A., OKELO, W. Flying green: Life cycle assessment and decomposition of bio-based sustainable aviation fuels production in Australia and global benchmarks. **Energy Conversion and Management: X**, 2026, 101625. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259017452600108X>.

KAZMI, W. W. *et al.*, A review on sustainable aviation fuel production via diverse biomass and waste-derived feedstocks and cutting-edge conversion technologies. **Biomass and Bioenergy**. Volume 212, 2026, 109281, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109281>.

LEE, D. S. *et al.* The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. **Atmospheric Environment**, v. 244, p. 117834, jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>.

LIM J. H. K. *et al.* Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: Challenges and perspective, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 149, 2021, 111396, ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212100681X>.

LIOW, M. Y. *et al.* Lipid feedstocks for sustainable aviation fuel (SAF) production via hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) pathway: Current status and challenges in quality, sustainability, availability and cost. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 236, p. 117006, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032126003059>.

LIU, Z. *et al.* The balance of contradictory factors in the selection of biodiesel and jet biofuels on algae fixation of flue gas. **Energy and AI**, v. 9, p. 100156, 2022. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546822000179>.

MAGALHÃES, L. B. *et al.* Sustainable Aviation Fuels and their impact in commercial airport operation. **Atmospheric Environment: X**, v. 29, 2026, 100403. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162125000930>.

MAGHZIAN, A.; SADDLER, J. Which processes to making biojet/Sustainable Aviation Fuel (SAF) are likely to supplement the predominant, HEFA/lipid-to-biojet production route? **Bioresource Technology**, v. 441, p. 133631, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852425015986>.

MAHEER U., *et al.*, Microalgae as a feedstock for bio-aviation fuel production: A review of techno-economic feasibility and socio-environmental impacts, **Biomass and Bioenergy**, Volume 214, 2026, 109529, ISSN 0961-9534. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953426006045>.

MANSY, A. E. *et al.*, Catalytic production of aviation jet biofuels from biomass: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 2025, 23(2), 419-461. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01806-3> Acesso em: 30 maio 2026.

MARANGON, B. B. *et al.*, Wastewater-grown microalgae biomass as a source of sustainable aviation fuel: Life cycle assessment comparing hydrothermal routes. **Journal of Environmental Management**, v. 360, p. 121164, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724011502>.

MARIYAM, S. *et al.* Converting waste into Sustainable Aviation Fuel (SAF): A systematic literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 226, p. 116380, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125010536>.

Minowa T., Sawayama S., A novel microalgal system for energy production with nitrogen cycling, **Fuel**, Volume 78, Issue 10, 1999, Pages 1213-1215, ISSN 0016-2361. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00047-2).

NASHATH, F. Z. *et al.* Current contributions of microalgae in global biofuel production; cultivation techniques, biofuel varieties and promising industrial ventures. **Biomass and Bioenergy**, v. 201, p. 108092, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953425005033>.

OKOLIE, J. A. *et al.* Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways. **Iscience**, v. 26, n. 6, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223010210>.

PINHEIRO, G. S. *et al.* From biomass to jet fuel: A systematic review of modeling and simulation approaches for SAF production. **Bioresource Technology Reports**, p. 102579, 2026. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X2600037X>.

PROQR. Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação. GOV. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

PRUSSI, M. *et al.* Are algae ready to take off? GHG emission savings of algae-to-kerosene production. **Applied Energy**, v. 304, p. 117817, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921011478>.

QUANTE, G. *et al.*, Renewable fuel options for aviation – A System-Wide comparison of Drop-In and non Drop-In fuel options. **Fuel**, v. 333, p. 126269, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122030939>.

RODRIGUES, A. A aviação civil e inserção de combustíveis sustentáveis no Brasil, 2025. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rbt/article/view/93913/90556>. Acesso em: 18 maio 2026.

ROWLAND, S. M. *et al.* High-Resolution Lipidomics Reveals Influence of Biomass and Pretreatment Process on the Composition of Extracted Algae Oils As Feedstock for Sustainable Aviation Fuels. **Energy & Fuels**, v. 38, n. 7, p. 6547-6552, 2024. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.energyfuels.3c04857>.

SHAHRIAR, M. F.; KHANAL, A. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). **Fuel**. Volume 325, 2022, 124905, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>.

SONG M. *et al.*, Hydroprocessing of lipids: An effective production process for sustainable aviation fuel, **Energy**, Volume 283, 2023, 129107, ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422302501X>.

SU-UNGKAVATIN, P.; TIRUTA-BARNA, L.; HAMELIN, L. Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen?: A review of current and emerging sustainable aviation systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 96, p. 101073, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128523000035>.

SZKLO, A.; ULLER, V. C. Fundamentos do Refino de Petróleo: Tecnologia e Economia. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2008. p. 29-117. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/processos-de-refino-petrobrs-pdf-free.html>.

WANG W., TAO L. Bio-jet fuel conversion Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 53. 2016. Pages 801-822. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016>.

WANG, B.; TING, Z. J.; ZHAO, M. Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 13, p. 100263, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772656824000630>.

WANG, J.; AZAM, W. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. **Geoscience Frontiers**, v. 15, n. 2, p. 101757, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987123002244>.

ZAHID, I. *et al.* Current outlook on sustainable feedstocks and processes for sustainable aviation fuel production. **Current opinion in green and sustainable chemistry**, v. 49, p. 100959, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223624000804>.

ZAPAROLLI, Domingos. O desafio do setor aéreo para anular sua pegada de carbono. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 317, jul. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-setor-aereo-para-anular-sua-pegada-de-carbono/>. Acesso em: 3 maio 2026.