



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO PRODUZIDO A PARTIR DO SEBO BOVINO PELA ROTA HEFA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL BIOQUEROSENO DE AVIACIÓN PRODUCIDO A PARTIR DEL SEBO BOVINO POR LA RUTA HEFA: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF AVIATION BIOKEROSENE PRODUCED FROM BEEF TALLOW VIA THE HEFA ROUTE: BIBLIOGRAPHIC REVIEW

Apresentação: Comunicação Oral

Gabriele dos Santos¹, Fernanda Cabral Borges², Juliana da Silveira Espindola³

DOI:<https://doi.org/10.31692/VIICIAGRO.0088>

RESUMO

O setor de transporte aéreo busca ativamente mitigar suas emissões de gases de efeito estufa para atender às metas globais de descarbonização estabelecidas pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) por meio do programa CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Como base teórica, o Combustível Sustentável de Aviação (SAF) desponta como a principal alternativa tecnológica viável a curto e médio prazo para a substituição do querosene fóssil. Dentre as rotas certificadas, o hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA) apresenta a maior maturidade comercial. No cenário agroindustrial brasileiro, o sebo bovino destaca-se como matéria-prima estratégica devido à expressiva escala do rebanho comercial nacional e ao seu caráter estritamente residual, permitindo sua inserção nas biorrefinarias com baixa carga ambiental inicial por meio da aplicação metodológica da regra de corte. Neste contexto, este artigo tem por objetivo revisar e analisar a literatura científica sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do bioquerosene de aviação produzido a partir do sebo bovino via rota HEFA, identificando os principais determinantes da intensidade de carbono (IC) e evidenciando o potencial da rota no Brasil. A metodologia consistiu em uma revisão narrativa e integrativa da literatura, de caráter exploratório, abrangendo estudos publicados entre 2019 e 2026 nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, fundamentada nas diretrizes normativas da série ISO 14040. Os resultados indicam que a IC do SAF via rota HEFA pode variar drasticamente dependendo da matéria-prima e das escolhas metodológicas, mas as matérias-primas residuais como o sebo bovino e o óleo de cozinha usado (UCO) apresentam consistentemente as menores emissões entre as avaliadas, podendo atingir valores tão baixos quanto 3,12 gCO₂e/MJ (UCO) e 5,13 gCO₂e/MJ (sebo bovino) em cenários renováveis, sendo a origem do hidrogênio o fator de maior impacto isolado, capaz de representar entre 43% e 52% das emissões da etapa industrial. Conclui-se que a substituição do hidrogênio cinza pelo verde é capaz de reduzir a pegada de carbono industrial a valores próximos de zero, fazendo com que o sebo bovino supere consistentemente os óleos vegetais cultivados em desempenho ambiental, alcançando reduções superiores a 94% em relação à linha de base fóssil. Por fim, o estudo aponta para a urgência de pesquisas primárias com escopo Gate-to-Wake utilizando o software openLCA, visando suprir as lacunas na

¹ Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Agroindustriais nível de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), santsgabriele@furg.br

² Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), docente da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). fernanda-borges@furg.br

³ Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), docente da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). jespindola@furg.br

literatura nacional.

Palavras-chave: Combustível Sustentável de Aviação (SAF), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Sebo Bovino, Rota HEFA, Hidrogênio Verde.

RESUMEN

El sector del transporte aéreo busca activamente mitigar sus emisiones de gases de efecto invernadero para cumplir con las metas globales de descarbonización establecidas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) mediante el programa CORSIA. Como base teórica, el Combustible Sostenible de Aviación (SAF) se destaca como la principal alternativa tecnológica viable a corto y mediano plazo para reemplazar el queroseno fósil. Entre las rutas certificadas, el hidropcesamiento de ésteres y ácidos grasos (HEFA) presenta la mayor madurez comercial. En el escenario agroindustrial brasileño, el sebo bovino resalta como materia prima estratégica debido a la gran escala del rebaño comercial nacional y a su carácter estrictamente residual, permitiendo su inserción en las biorrefinerías con una baja carga ambiental inicial mediante la aplicación metodológica de la regla de corte. En este contexto, este artículo tiene como objetivo revisar y analizar la literatura científica sobre la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) del bioqueroseno de aviación producido a partir de sebo bovino vía la ruta HEFA, identificando los principales determinantes de la intensidad de carbono (IC) y evidenciando el potencial de la ruta en Brasil. La metodología consistió en una revisión narrativa e integradora de la literatura, de carácter exploratorio, abarcando estudios publicados entre 2019 y 2026 en las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar, fundamentada en las directrices normativas de la serie ISO 14040. Los resultados indican que la IC del SAF vía ruta HEFA puede variar drásticamente dependiendo de la materia prima y las elecciones metodológicas, pero las materias primas residuales como el sebo bovino y el aceite de cocina usado (UCO) presentan consistentemente las menores emisiones entre las evaluadas, pudiendo alcanzar valores tan bajos como 3,12 gCO₂e/MJ (UCO) y 5,13 gCO₂e/MJ (sebo bovino) en escenarios renovables, siendo el origen del hidrógeno el factor de mayor impacto aislado, capaz de representar entre el 43% y el 52% de las emisiones de la etapa industrial. Se concluye que la sustitución del hidrógeno gris por el verde es capaz de reducir la huella de carbono industrial a valores cercanos a cero, haciendo que el sebo bovino supere consistentemente a los aceites vegetales cultivados en desempeño ambiental, logrando reducciones superiores al 94% respecto a la línea base fósil. Finalmente, el estudio señala la urgencia de investigaciones primarias con alcance Gate-to-Wake utilizando el software openLCA, con el fin de llenar los vacíos en la literatura nacional.

Palabras clave: Combustible Sostenible de Aviación (SAF), Evaluación del Ciclo de Vida (ACV), Sebo Bovino, Ruta HEFA, Hidrógeno Verde.

ABSTRACT

The air transport sector is actively seeking to mitigate its greenhouse gas emissions to meet global decarbonization targets set by the International Civil Aviation Organization (ICAO) through the CORSIA program. As a theoretical basis, Sustainable Aviation Fuel (SAF) emerges as the main viable technological alternative in the short and medium term for replacing fossil kerosene. Among the certified routes, the hydroprocessing of esters and fatty acids (HEFA) presents the highest commercial maturity. In the Brazilian agro-industrial scenario, beef tallow stands out as a strategic feedstock due to the large scale of the national commercial herd and its strictly residual nature, allowing its insertion into biorefineries with a low initial environmental burden through the methodological application of the cut-off rule. In this context, this article aims to review and analyze the scientific literature on the Life Cycle Assessment (LCA) of aviation biokerosene produced from beef tallow via the HEFA route, identifying the main determinants of carbon intensity (CI) and highlighting the route's potential in Brazil. The methodology consisted of an exploratory narrative and integrative literature review, covering studies published between 2019 and 2026 in the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases, based on the ISO 14040 series normative guidelines. The results indicate that the CI of SAF via the HEFA route can vary drastically depending on the feedstock and methodological choices, but residual feedstocks such as beef tallow and used cooking oil (UCO) consistently present the lowest emissions among those assessed, reaching values as low as 3.12 gCO₂e/MJ (UCO) and 5.13 gCO₂e/MJ (beef tallow) in renewable scenarios, with the origin of hydrogen being the most impactful isolated factor, accounting for 43% to 52% of the emissions in the industrial stage. It is concluded that replacing grey hydrogen with green hydrogen can reduce the industrial carbon footprint to near-zero values, making beef tallow consistently outperform cultivated vegetable oils in environmental performance, achieving reductions exceeding 94% compared to the fossil baseline. Finally, the study points to the urgency of primary research

with a Gate-to-Wake scope using the openLCA software to fill gaps in the national literature.

Keywords: Sustainable Aviation Fuel (SAF), Life Cycle Assessment (LCA), Beef Tallow, HEFA Route, Green Hydrogen.

INTRODUÇÃO

O transporte aéreo global representa um dos setores de mais difícil descarbonização na economia contemporânea. Em 2019, ano de referência do programa CORSIA, a aviação consumiu cerca de 360 bilhões de litros de querosene fóssil, emitindo aproximadamente 914 milhões de toneladas de CO₂, o que representou entre 2% e 3% das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Assis; Andrade, 2022). As projeções indicam crescimento da demanda por voos de aproximadamente 3% ao ano até 2050 (Costa et al., 2024), com potencial de elevar a participação da aviação para até 20,2% das emissões humanas totais caso nenhuma medida estrutural de mitigação seja adotada (Costa, 2022).

Diante desse cenário, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) estabeleceu a meta de emissões líquidas zero (net zero) até 2050, operacionalizada pelo programa CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), que define um teto de emissões equivalente a 85% dos volumes registrados em 2019 e estabelece o valor de 89 gCO₂e/MJ como linha de base oficial para o querosene de aviação fóssil (Jet A-1) (Prussi et al., 2021; ICAO, 2024). Nesse contexto, o Combustível Sustentável de Aviação (*SAF - Sustainable Aviation Fuel*) emerge como a alternativa estratégica mais viável a curto e médio prazo, uma vez que é classificado como combustível *drop-in*: compatível com a infraestrutura e motores existentes, sem necessidade de adaptações técnicas (Costa et al., 2024; Marreco, 2022).

Dentre as sete rotas aprovadas pela norma ASTM D7566, a tecnologia de Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (*HEFA - Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) é a mais madura, com Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) entre 8 e 9, sendo responsável por mais de 95% dos voos operados com SAF no mundo (Cabrera; Sousa, 2022). No cenário nacional, o Brasil emerge como protagonista potencial para essa rota: detentor do maior rebanho bovino comercial do mundo em 2019, com 214,69 milhões de cabeças (ABIEC, 2019), o país gera entre 1,5 e 2,5 milhões de toneladas de sebo bovino por ano, subproduto do abate que, por ser classificado como resíduo industrial pelo ISCC CORSIA (2023), permite a aplicação da regra de corte com carga ambiental zero na modelagem do ciclo de vida do biocombustível. Em dezembro de 2023, a Petrobras assinou contrato com a Honeywell UOP para implantação da primeira unidade HEFA na Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), em Cubatão/SP, com capacidade para processar 2.700 m³/dia com mistura de 70% de óleo de soja e 30% de sebo bovino (PETROBRAS, 2023).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a metodologia científica central para mensurar o

desempenho ambiental do SAF, estruturada conforme as normas ABNT NBR ISO 14040 e ISO 14044. A literatura aponta ampla variação nos resultados de intensidade de carbono (IC) para o SAF/HEFA, condicionada por escolhas metodológicas e tecnológicas, sobretudo a origem do hidrogênio consumido no processo. Desta forma a presente revisão bibliográfica tem por objetivo analisar os estudos de ACV do bioquerosene de aviação produzido a partir do sebo bovino pela rota HEFA, identificar os principais fatores determinantes da IC e evidenciar o potencial ambiental e estratégico dessa matéria-prima no contexto brasileiro, com alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A dependência histórica da aviação de combustíveis fósseis líquidos está ancorada nas propriedades físico-químicas insubstituíveis do querosene de aviação (QAV), regulado pela norma ASTM D1655. O Jet A-1, utilizado na maior parte dos voos internacionais, apresenta ponto de congelamento de -47°C , composição predominantemente parafinica e isoparafinica (cerca de 57%), além de altíssima densidade energética requisitos que, até o momento, nenhuma tecnologia alternativa consegue reproduzir com viabilidade comercial para aeronaves de grande porte (Assis; Andrade, 2022; Marreco, 2022). O detalhamento das propriedades físico-químicas e os limites operacionais exigidos pelas normas internacionais para o querosene convencional podem ser observados na Tabela 1. Essa dependência estrutural explica por que o CORSIA e a ICAO convergem ao apontar o SAF como a principal via de descarbonização do setor a curto e médio prazo.

Tabela 1: Especificações técnicas dos querosenes de aviação.

Propriedade	Jet A/Jet A-1	JP-8	Jet B
Base química	Querosene	Querosene militar	Nafta
Ponto de congelamento ($^{\circ}\text{C}$)	-40 a -47	-47	-50
Densidade (kg m^{-3})	775-840	775-840	751-802
Ponto de fulgor ($^{\circ}\text{C}$)	≥ 38	≥ 38	Inferior ao Jet A
Poder calorífico (MJ kg^{-1})	42,8	42,8	42,8
Aplicação principal	Aviação civil	Aviação militar	Operações em climas muito frios

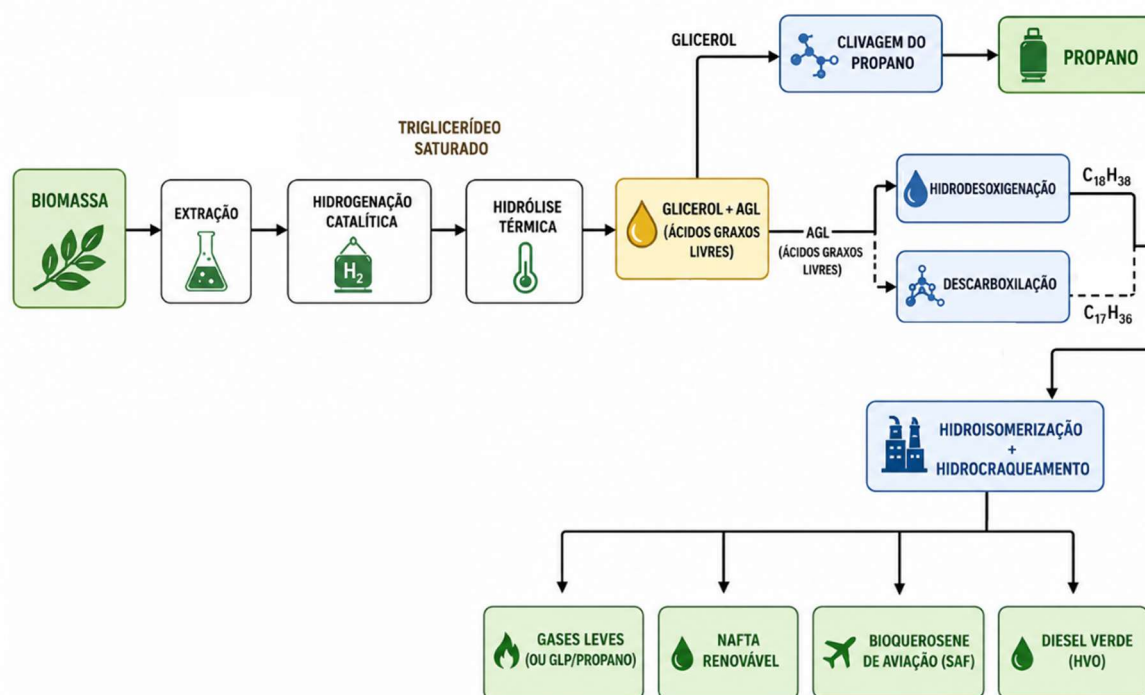
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), adaptado de NG et al., 2021

O CORSIA é o primeiro mecanismo internacional de compensação de emissões de carbono para a aviação civil, tendo entrado em fase piloto em 2021. O programa utiliza a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida para calcular as emissões de GEE dos combustíveis elegíveis, comparando-as à linha de base fóssil de $89 \text{ gCO}_2\text{e/MJ}$, e exige redução mínima de 10% para que um

SAF seja considerado elegível (ICAO, 2024). Em 2024, a 6ª edição do documento de valores padrão de emissões de ciclo de vida do CORSIA incluiu, pela primeira vez, valores específicos para sebo bovino (*tallow*), gordura de aves (*poultry fat*), banha (*lard*) e gorduras animais mistas na rota HEFA reconhecimento formal do potencial dessas matérias-primas residuais (ICAO, 2024).

A tecnologia HEFA converte lipídios em hidrocarbonetos pela seguinte sequência de etapas: (1) purificação e pré-tratamento da matéria-prima; (2) hidroxidação (HDO), processo exotérmico que remove o oxigênio dos triglicerídeos e ácidos graxos com consumo intensivo de H_2 ; (3) hidrocrackeamento, que quebra as cadeias longas em fragmentos na faixa C9-C15; (4) isomerização, que gera alcanos ramificados para reduzir o ponto de congelamento; e (5) destilação fracionada, que separa os produtos finais (Cabrera; Sousa, 2022; Assis; Andrade, 2022). O produto principal é o querosene parafínico sintetizado (SPK), acompanhado de coprodutos de alto valor: diesel verde (HVO), nafta renovável e gases combustíveis, representado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma detalhado do processo de hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), adaptado de NG *et al.*, 2021.

A rota HEFA apresenta o mais baixo Preço Mínimo de Venda (MFSP) entre as tecnologias de SAF e pode ser facilmente integrada a refinarias existentes, o que explica seu protagonismo no mercado global de SAF (Cabrera; Sousa, 2022). O rendimento típico supera 1.000 litros por tonelada de carga seca processada (Marreco, 2022). Por ser um sistema multifuncional que gera simultaneamente SAF, HVO e nafta, a rota HEFA exige procedimentos de alocação ambiental entre

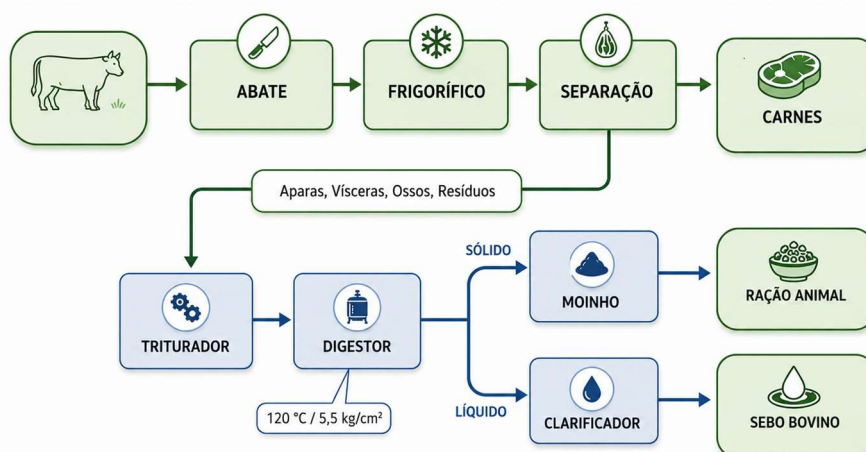
os fluxos de saída. A alocação energética baseada no Poder Calorífico Inferior (PCI, do inglês LHV) de cada produto é a abordagem adotada pela metodologia do CORSIA e amplamente recomendada para estudos de ACV de SAF (ICAO, 2024; Capaz et al., 2021).

O sebo bovino é constituído majoritariamente por triglicerídeos de cadeias longas (C_{16} e C_{18}), com perfil de ácidos graxos que inclui ácido palmítico ($C_{16:0}$), ácido esteárico ($C_{18:0}$) e ácido oleico ($C_{18:1}$), com ácidos graxos saturados correspondendo a mais de 50% da composição total (Amal; Nizamuddin, 2025; Varão et al., 2017). Sua característica fortemente saturada é tecnicamente vantajosa para o processo HEFA: um perfil lipídico rico em ácidos graxos saturados demanda menor quantidade de H_2 nas reações de HDO. A reação de HDO consome cerca de 9 mol de H_2 por mol de carga para gorduras mais insaturadas, mas essa demanda é proporcionalmente reduzida para o sebo, resultando em menor impacto ambiental na fase industrial (Assis; Andrade, 2022; Pereira, 2021).

Do ponto de vista regulatório, o sebo bovino recebe tratamento diferenciado pelos sistemas de certificação de sustentabilidade, conforme as diretrizes do ISCC CORSIA (2023), o sebo enquadra-se na categoria de resíduo industrial: chega à biorrefinaria com carga ambiental zero pela regra de corte (*cut-off rule / zero-burden approach*), pois os encargos ambientais da fase agropecuária são integralmente alocados à cadeia produtiva da carne, produto principal. Esse tratamento diferencia o sebo bovino do óleo de soja, por exemplo, que carrega as emissões da fase agrícola e pode apresentar variações extremas de IC por efeitos de mudanças no uso da terra (dLUC) (Capaz et al., 2021).

No Brasil, a disponibilidade estrutural do sebo é garantida pelo tamanho e pela dinâmica da pecuária nacional. O Brasil produzia 1,5 a 2,5 milhões de toneladas de gordura animal por ano em 2021 (Moreira, 2021; Assis; Andrade, 2022), e projeções indicam crescimento do rebanho para mais de 220 milhões de cabeças até 2028 (ABIEC, 2019). O detalhamento técnico das etapas de processamento e transformação dos resíduos do abate nas graxarias até a obtenção do sebo purificado pode ser observado no fluxograma apresentado na Figura 2. O sebo já é a segunda matéria-prima mais utilizada na produção de biodiesel nacional (EPE, 2020), o que indica infraestrutura logística e industrial parcialmente estabelecida. Entretanto, essa inserção consolidada no mercado de biodiesel rodoviário também representa uma limitação: a aviação competiria diretamente com o biodiesel pelo mesmo insumo, o que pode encarecer a matéria-prima e exigir expansão da capacidade de coleta e processamento (Varão et al., 2017).

Figura 2: Fluxograma de processamento e obtenção do sebo bovino.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), adaptado de Andrade Filho (2007).

A demanda de hidrogênio é a característica mais crítica do processo HEFA do ponto de vista ambiental. A etapa de HDO consome cerca de 9 mol de H_2 por mol de carga para remover o oxigênio dos lipídios e saturar as ligações duplas, gerando água como subproduto; a demanda estimada é de aproximadamente 36,40 kg de H_2 por tonelada de óleo processado (Pereira, 2021). Em configurações de biorrefinaria com dois reatores em série, Assis e Andrade (2022) e Marreco (2022) reportam consumos de 33 kg/t no primeiro reator e 19 kg/t no segundo, totalizando cerca de 52 kg/t.

A maior parte do hidrogênio consumido globalmente é produzida via reforma a vapor do gás natural (hidrogênio cinza), processo que emite entre 9 e 10 kg de CO_2 por kg de H_2 gerado, sem captura de carbono (EPE, 2021). No contexto do SAF/HEFA, essa pegada do H_2 representa entre 43% e 52% das emissões totais da etapa industrial e entre 18% e 22% da IC de todo o ciclo de vida do combustível (Pereira, 2021). Em contraste, o hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água com energia eólica ou solar, reduz essa pegada a patamares próximos de zero (EPE, 2021; Cabrera; Sousa, 2022). A transição para o hidrogênio verde é, portanto, o alavancador mais eficaz da eficiência ambiental da biorrefinaria HEFA, e também o mais relevante para a geração de Créditos de Descarbonização (CBIOS) no âmbito do programa RenovaBio (Pereira, 2021).

A ACV é a ferramenta metodológica central para a avaliação ambiental do SAF, normatizada pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ISO 14044:2009. Segundo essas normas, o estudo deve incluir obrigatoriamente quatro fases: (I) definição do objetivo e escopo; (II) análise de inventário do ciclo de vida (ICV); (III) avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); e (IV) interpretação dos resultados (ABNT, 2009). A unidade funcional mais adotada para a comparação de biocombustíveis aeronáuticos é 1 MJ de energia do combustível entregue, que permite comparação direta com o querosene fóssil equivalente e é exigida pela metodologia do CORSIA (Capaz et al., 2020; Pereira, 2021).

Para o SAF, dois escopos de fronteira do sistema são predominantes na literatura: Well-to-Wake (WtW), que abrange toda a cadeia desde a produção da matéria-prima até a combustão na aeronave; e Gate-to-Wake (GtW), que inicia no portão da biorrefinaria e encerra-se com a exaustão dos gases. Para matérias-primas residuais como o sebo bovino, o escopo GtW com aplicação da regra de corte é especialmente relevante, pois isola os impactos estritamente gerados pela fase industrial e de uso, conforme recomendado pelo ISCC CORSIA (2023) e discutido por Capaz et al. (2021). A escolha entre os escopos, os métodos de alocação por massa, energia ou valor econômico, e o tratamento da matéria-prima como resíduo ou coproduto são os principais fatores que explicam a amplitude dos resultados de IC encontrados na literatura (Seber et al., 2022; Capaz et al., 2021; Moreira, 2021).

Na etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), os métodos mais utilizados em estudos de SAF são o ReCiPe 2016 Midpoint e o CML-IA Baseline. O método ReCiPe 2016 Midpoint destaca-se por sua abordagem sistemática em diversas categorias de impacto, como mudanças climáticas, uso da terra, consumo de água, formação de material particulado e depleção de recursos minerais, sendo amplamente empregado na avaliação de sustentabilidade de biocombustíveis aeronáuticos (Capaz et al., 2020). O método CML-IA Baseline, desenvolvido pela Universidade de Leiden, fornece indicadores consolidados para categorias como potencial de aquecimento global (GWP), acidificação, eutrofização e ecotoxicidade, complementando a análise e permitindo a validação cruzada dos resultados. A aplicação conjunta de ambos os métodos é considerada uma boa prática metodológica, pois amplia a robustez analítica do estudo e permite identificar hotspots ambientais que seriam invisíveis em uma avaliação restrita ao GWP (Capaz et al., 2020).

METODOLOGIA

O presente trabalho configura-se como uma revisão narrativa e integrativa da literatura, de natureza qualitativa e exploratória, cujo procedimento técnico central é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao bioquerosene de aviação (SAF) produzido a partir do sebo bovino pela rota HEFA. O levantamento do referencial teórico foi conduzido nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, além de repositórios técnicos da ICAO, da EPE e do ISCC, no período de dezembro de 2025 a maio de 2026, buscando compilar o estado da arte sobre o tema sem a finalidade de esgotamento quantitativo das bases de dados, o que justifica a opção pela abordagem narrativa e integrativa em vez de uma revisão sistemática.

Os descritores utilizados na busca foram: "Life Cycle Assessment", "Sustainable Aviation Fuel", "HEFA", "SAF", "beef tallow", "animal fat", "biojet", "biokerosene", combinados com termos em português: "Avaliação do Ciclo de Vida", "bioquerosene de aviação", "sebo bovino", "hidrogênio

verde", "rota HEFA". Os critérios de inclusão adotados foram: (i) publicações entre 2019 e 2026; (ii) aplicação de metodologia de ACV conforme ISO 14040/14044 ou ferramenta equivalente (RenovaCalc, SimaPro, openLCA); (iii) avaliação da rota HEFA como tecnologia de produção do SAF; e (iv) resultados expressos em intensidade de carbono ($\text{gCO}_2\text{e/MJ}$). Foram excluídos estudos puramente econômicos sem avaliação ambiental e publicações que não apresentavam metodologia clara de avaliação de impacto.

Os estudos selecionados foram analisados com foco nos seguintes aspectos: matéria-prima avaliada; fronteira do sistema adotada (WtW ou GtW); software e base de dados utilizados; métodos de alocação e de avaliação de impacto; e valores de intensidade de carbono reportados. Foram efetivamente analisadas 25 referências principais, que compuseram a síntese qualitativa e o Quadro 1 apresentado a seguir. Os resultados foram organizados em tabela comparativa e também discutidos de forma narrativa, com identificação de padrões, convergências e lacunas na literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 sintetiza os principais estudos de ACV identificados na literatura para o SAF produzido pela rota HEFA, com ênfase nos que incluíram sebo bovino ou gorduras animais entre as matérias-primas avaliadas. A amplitude dos resultados de IC variando de 3,12 $\text{gCO}_2\text{e/MJ}$ (óleo de cozinha usado em cenário renovável) a 99 $\text{gCO}_2\text{e/MJ}$ (soja com dLUC elevado), demonstra que o desempenho ambiental do SAF/HEFA não é uma propriedade inerente à tecnologia, mas o resultado de interações complexas entre matéria-prima, origem dos insumos industriais, escopo da fronteira e escolhas metodológicas.

Quadro 1: Síntese comparativa dos estudos de ACV aplicados ao SAF via rota HEFA

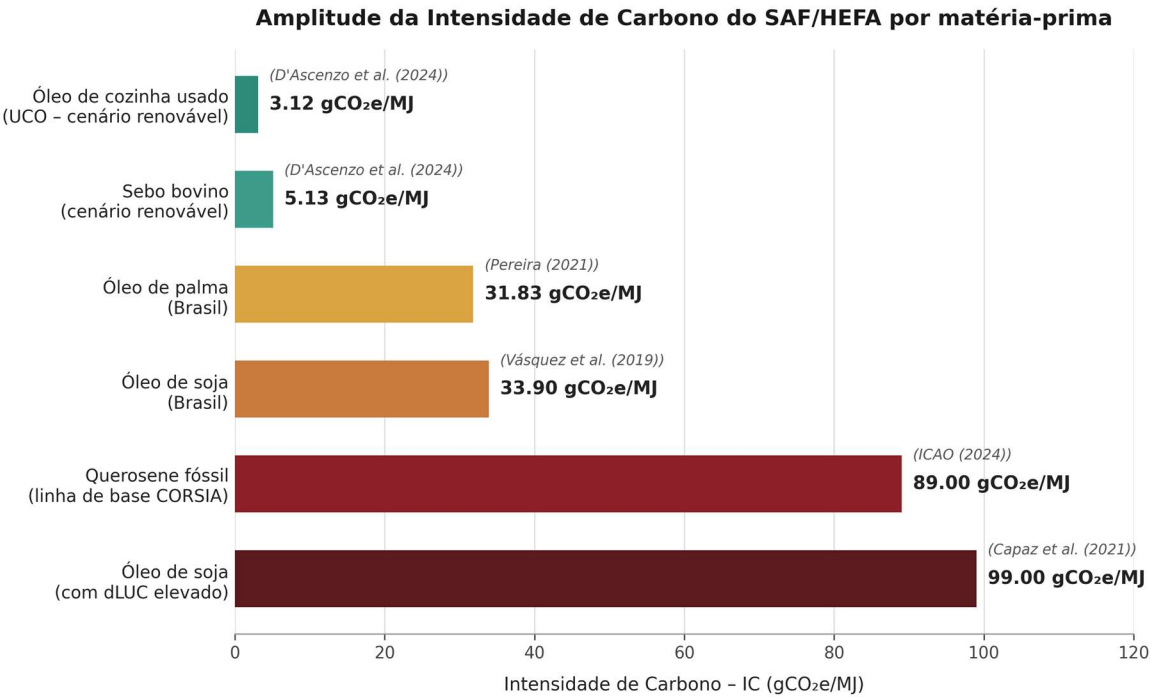
Autores	Matéria-prima	Ferramenta / Base	Fronteira	IC ($\text{gCO}_2\text{e/MJ}$) / Resultados principais
Capaz et al. (2021)	Sebo bovino, UCO, soja, palma (Brasil)	ACV atributiva e consequential	Well-to-Wake	Sebo com cut-off: menores emissões. Soja atinge até +99 e palma chega a -33 ($\text{gCO}_2\text{e/MJ}$) por efeito do dLUC. Altamente sensível ao método de alocação.
Pereira (2021)	Óleo de soja e palma (Brasil)	RenovaCalc	Well-to-Wake	31,83 (palma - melhor cenário). IC do SAF fortemente dependente da origem e pegada ambiental do H_2 .
Seber et al. (2022)	Óleos vegetais não alimentares (EUA/global)	ACV estocástica / Monte Carlo	Well-to-Wake	34-65% de redução vs. fóssil sem dLUC. Incerteza paramétrica: até 26% desvio. dLUC = maior fonte de incerteza.
Vásquez et al. (2019)	Palma e soja (Brasil)	ACV Holística /	Well-to-Wake	4,8 (palma) a 33,9 (soja). Substituição de H_2 fóssil por renovável maximiza

		Impact 2002+ e CED		descarbonização.
Costa (2022)	Óleo de canola (Brasil)	openLCA / Ecoinvent	Cradle- to-Wake	Fase industrial = principal hotspot. Demanda de H ₂ e utilidades dominam o perfil de impactos.
D'Ascenzo et al. (2024)	Sebo, UCO, palma, jatrofa, canola, soja	SimaPro 9.5 / ISO 14040/44	Well-to- Wake	5,13 gCO ₂ e/MJ (sebo - cenário renovável). WCO: 3,12. Resíduos têm desempenho ambiental superior em redes descarbonizadas.
ICAO / Prussi et al. (2021)	Querosene fóssil (Jet A-1)	Metodologia CORSIA	Well-to- Wake	89,0 - Linha de base oficial global para cálculo de redução de emissões do SAF.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 3 ilustra visualmente essa amplitude, situando os valores de IC do sebo bovino e do UCO nos cenários renováveis em relação às demais matérias-primas e à linha de base fóssil do CORSIA.

Figura 3: Comparação da intensidade de carbono (IC) entre o SAF/HEFA de diferentes matérias-primas e a linha de base fóssil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com dados de Capaz *et al.* (2021), Pereira (2021), Vásquez *et al.* (2019), D'Ascenzo *et al.* (2024) e ICAO (2024).

A amplitude dos resultados de IC observada na literatura decorre, em grande medida, de três fatores principais. O primeiro e mais determinante é a origem do hidrogênio, isoladamente o de maior impacto sobre a IC do SAF/HEFA. Pereira (2021), utilizando a ferramenta RenovaCalc para cenários brasileiros, demonstrou que a intensidade de carbono da rota é fortemente dependente da origem do

H₂: enquanto cenários com hidrogênio de biogás por reforma a vapor apresentaram IC de 31,83 gCO₂e/MJ para o óleo de palma, a mesma rota com hidrogênio cinza de gás natural registrou valores significativamente mais altos. D'Ascenzo et al. (2024), utilizando o SimaPro 9.5, confirmaram que, em cenários com 20% de energia solar e biometano na matriz energética, o sebo bovino atinge 5,13 gCO₂e/MJ, redução de 94,2% em relação à linha de base fóssil do CORSIA (89 gCO₂e/MJ). Vásquez et al. (2019), em estudo holístico para o Brasil, concluíram que a substituição do H₂ de gás natural por rotas renováveis (eletrólise ou gaseificação) é a estratégia mais eficaz para maximizar a descarbonização, alcançando emissões de 4,8 gCO₂e/MJ para o óleo de palma com H₂ renovável.

Um segundo fator decisivo é o tratamento metodológico dado à matéria-prima. Capaz et al. (2021) realizaram a análise mais abrangente para o contexto brasileiro, comparando sebo bovino, UCO, soja e palma sob abordagens atributiva e consequencial, cruzadas com seis esquemas regulatórios (CORSIA, RenovaBio, entre outros). Os resultados evidenciaram que o sebo bovino tratado como resíduo pela regra de corte apresenta as menores emissões entre todas as matérias-primas analisadas. Contudo, sob alocação econômica, os resultados se alteram substancialmente. Entre as oleaginosas, a contabilização das mudanças diretas no uso da terra (dLUC) sobre pastagens leva a variações extremas: a soja atinge até +99 gCO₂e/MJ, enquanto a palma pode registrar valores negativos, da ordem de -33 gCO₂e/MJ. Essa amplitude reforça a vantagem ambiental intrínseca das matérias-primas residuais como o sebo bovino. Seber et al. (2022), em análise estocástica com simulações de Monte Carlo para óleos vegetais, demonstraram que a incerteza paramétrica pode gerar desvios de até 26% da mediana das emissões WtW, e que a escolha do método de alocação por energia, massa ou valor de mercado pode impactar os resultados em até 46%.

Por fim, o escopo da fronteira do sistema e o software utilizado também moldam os resultados absolutos. Costa (2022), ao aplicar ACV ao bioquerosene de canola no openLCA com a base de dados Ecoinvent no escopo Cradle-to-Wake, identificou a fase industrial de conversão como o principal hotspot ambiental, resultado consistente com os demais estudos que apontam a demanda de H₂ e as utilidades energéticas como os principais pontos críticos da rota HEFA. D'Ascenzo et al. (2024) utilizaram o escopo Well-to-Wake com SimaPro 9.5 e avaliaram 18 categorias de impacto além do GWP, demonstrando que camelina e palma se destacam em mais categorias de impacto, mas o sebo bovino e o UCO apresentam os menores valores de IC no cenário de sensibilidade com fontes renováveis. A escolha entre WtW e GtW, portanto, não altera a comparação relativa entre matérias-primas, mas influencia significativamente os valores absolutos de IC reportados.

Um marco relevante para a presente discussão é a inclusão, pela primeira vez, de valores padrão de emissões de ciclo de vida para sebo bovino, gordura de aves, banha e gorduras animais mistas na 6ª edição (2024) do documento oficial da ICAO sobre emissões padrão para combustíveis

elegíveis ao CORSIA. Esse reconhecimento formal pelo principal organismo regulatório da aviação civil internacional confirma a maturidade científica do sebo bovino como matéria-prima para SAF e cria condições para que produtores brasileiros calculem suas emissões de ciclo de vida com base em valores padronizados, facilitando o processo de certificação (ICAO, 2024).

O movimento da Petrobras, ao contratar a tecnologia HEFA da Honeywell UOP para a RPBC em Cubatão com previsão de processamento de 30% de sebo bovino na composição da carga (PETROBRAS, 2023), representa a primeira materialização industrial dessa convergência no país. A unidade, com capacidade de processar 2.700 m³/dia e produção estimada de 350 mil m³/ano de SAF e HVO a partir de 2029, sinaliza que o sebo bovino transitará de matéria-prima potencial para componente real da cadeia de produção de bioquerosene nacional.

Do ponto de vista regulatório nacional, o programa RenovaBio, instituído pela Lei nº 13.576/2017, estabelece metas anuais de descarbonização para os distribuidores de combustíveis e cria os Créditos de Descarbonização (CBIOS) como instrumento econômico central. Cada CBIO representa uma tonelada de CO₂ equivalente evitada ao longo do ciclo de vida do biocombustível, calculada em comparação com o combustível fóssil de referência. Nesse contexto, quanto menor a IC do SAF produzido, maior o volume de CBIOS gerado por unidade de energia entregue, tornando o desempenho ambiental do combustível diretamente proporcional à sua atratividade econômica. Pereira (2021) demonstrou que a substituição do hidrogênio cinza pelo hidrogênio verde no processo HEFA amplia significativamente o volume de CBIOS gerado, reforçando o argumento econômico para o investimento em infraestrutura de H₂ renovável integrada às biorrefinarias de SAF. A sinergia entre o CORSIA que cria demanda internacional por SAF certificado, e o RenovaBio que cria incentivos econômicos nacionais configura um ambiente regulatório favorável à consolidação do sebo bovino como matéria-prima estratégica para a aviação sustentável no Brasil.

A revisão bibliográfica revelou lacunas relevantes que justificam estudos primários futuros. A principal delas é a ausência de estudos de ACV específicos para o sebo bovino brasileiro com escopo Gate-to-Wake modelados no software openLCA com a base de dados Ecoinvent. A maioria dos estudos revisados adotou escopo Well-to-Wake ou utilizou ferramentas distintas (RenovaCalc, SimaPro), o que dificulta comparações diretas e a integração dos resultados à base de dados global de ACV de biocombustíveis. O openLCA, por ser software de código aberto e amplamente adotado pela comunidade científica brasileira, seria especialmente adequado para produzir resultados reprodutíveis e comparáveis.

Uma segunda lacuna é a ausência de estudos que apliquem simultaneamente dois ou mais métodos de avaliação de impacto como ReCiPe 2016 Midpoint e CML-IA Baseline ao sebo bovino brasileiro. A maior parte da literatura revisada limita-se ao Potencial de Aquecimento Global (GWP)

como indicador de desempenho, desconsiderando categorias igualmente relevantes como uso da terra, consumo de água, acidificação, eutrofização e ecotoxicidade. D'Ascenzo et al. (2024) constituem a exceção mais abrangente, com avaliação de 18 categorias de impacto, mas sem foco específico no contexto brasileiro e sem análise de sensibilidade direcionada ao H₂.

Por fim, nenhum dos estudos identificados realizou análise de sensibilidade sistemática e comparativa entre hidrogênio cinza e hidrogênio verde especificamente para o sebo bovino no Brasil, considerando o perfil energético da matriz elétrica nacional. Dado o peso dominante do hidrogênio nas emissões da etapa industrial, já discutido, e que o Brasil possui uma das matrizes elétricas mais renováveis do mundo com elevada participação de hidroelétrica, eólica e solar, essa análise teria implicações diretas para o posicionamento do SAF/sebo bovino brasileiro nos mercados regulados pelo CORSIA e pelo RenovaBio. A condução desse estudo primário, com escopo GtW, modelagem em openLCA/Ecoinvent, alocação energética por LHV e métodos ReCiPe e CML-IA, constitui a próxima etapa desta pesquisa.

Adicionalmente, observa-se que a maior parte dos estudos internacionais sobre ACV do SAF/HEFA foi conduzida no contexto europeu ou norte-americano, com bases de dados que não refletem adequadamente as condições específicas da pecuária e da cadeia produtiva de carne brasileira. O Brasil apresenta características únicas que podem influenciar significativamente os resultados de ACV: sistema de criação predominantemente extensivo a pasto, raças zebuínas com composição lipídica distinta das raças europeias, processos de graxaria com características próprias, e matriz energética industrial baseada em fontes com intensidade de carbono diferente da média global. A modelagem dessas especificidades regionais no openLCA, com dados primários coletados junto a frigoríficos e graxarias brasileiras, é condição necessária para que os resultados de IC do SAF/sebo bovino nacional sejam reconhecidos pelos sistemas de certificação internacionais, como o ISCC CORSIA, com valores específicos para o contexto do país, o que pode resultar em IC ainda mais baixa do que os valores padrão globais adotados pela ICAO (2024). Para a pesquisa primária em desenvolvimento, a combinação dos métodos ReCiPe e CML-IA no software openLCA permitirá uma caracterização ambiental mais completa e reproduzível da rota HEFA com sebo bovino no contexto brasileiro.

CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica conduzida neste trabalho demonstrou que o bioquerosene de aviação produzido a partir do sebo bovino pela rota HEFA apresenta potencial de redução de emissões de GEE superior a 94% em relação à linha de base fóssil do CORSIA (89 gCO₂e/MJ), podendo atingir valores tão baixos quanto 5,13 gCO₂e/MJ em cenários com fontes renováveis de energia, conforme

reportado por D'Ascenzo et al. (2024), que reportaram ainda 3,12 gCO₂e/MJ para o óleo de cozinha usado (UCO) no mesmo cenário. Esse desempenho posiciona o sebo bovino, ao lado do UCO, entre as matérias-primas residuais de melhor desempenho ambiental dentre as avaliadas para a rota HEFA, beneficiando-se da aplicação da regra de corte com carga zero conforme as diretrizes do ISCC CORSIA (2023), do perfil lipídico saturado que reduz a demanda de H₂, e da ausência de competição com a produção de alimentos.

A origem do hidrogênio é o fator determinante mais impactante da IC do SAF/HEFA, podendo representar entre 43% e 52% das emissões da etapa industrial. Portanto, a transição do hidrogênio cinza para o hidrogênio verde é o principal alavancador da eficiência ambiental da biorrefinaria e o elemento de maior sensibilidade para que o SAF de sebo bovino alcance reduções expressivas e competitivas no mercado regulado pelo CORSIA. O reconhecimento formal do sebo bovino pela ICAO na 6ª edição (2024) dos valores padrão de emissões, combinado com o avanço do programa Petrobras/HEFA na Refinaria de Cubatão, sinaliza que essa matéria-prima está consolidando sua posição na cadeia produtiva nacional de bioquerosene.

Do ponto de vista científico, a revisão evidenciou a necessidade de estudos primários de ACV com escopo Gate-to-Wake para o sebo bovino brasileiro, modelados em openLCA/Ecoinvent com múltiplos métodos de impacto (ReCiPe 2016 Midpoint e CML-IA Baseline) e análise de sensibilidade sistemática para a origem do hidrogênio. Tais estudos fornecerão dados robustos para subsidiar políticas públicas de certificação de SAF no âmbito do RenovaBio e do CORSIA, fortalecer a literatura nacional sobre ACV de biocombustíveis aeronáuticos e evidenciar a contribuição efetiva do Brasil para o cumprimento das metas da Agenda 2030, em especial as ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 7 (Energia Acessível e Limpa), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (Silva, 2020).

A presente revisão bibliográfica contribui para a literatura ao revisar, de forma comparativa e crítica, o ACV do SAF/HEFA com matérias-primas lipídicas, com foco no sebo bovino brasileiro tema ainda pouco explorado em profundidade na literatura nacional. Ao identificar as principais variáveis metodológicas que explicam a dispersão dos resultados de IC entre os estudos, este trabalho oferece um mapa de decisões para pesquisadores que conduzirão estudos primários futuros. Espera-se que os resultados aqui discutidos contribuam para o amadurecimento da cadeia produtiva do SAF no Brasil, apoiando a tomada de decisão sobre investimentos em biorrefinarias, políticas de fomento ao hidrogênio verde e estratégias de inserção do bioquerosene brasileiro nos mercados regulados pelo CORSIA e pelo programa RenovaBio.

REFERÊNCIAS

- AMAL, R.; NIZAMUDDIN, S. Towards sustainable biodiesel production: efficient utilization of animal fat wastes and shell-derived catalysts. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, n. 24, p. 14383-14404, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36540-y>.
- ANDRADE FILHO, M. **Aspectos técnicos e econômicos da produção de biodiesel: o caso do sebo bovino como matéria-prima**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Centro de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Salvador, Salvador, 2007.
- ASSIS, G. N. C. M. de; ANDRADE, L. F. da C. **Simulação e análise econômica de diferentes matérias-primas para produção de bioquerosene de aviação pelo processo HEFA no cenário brasileiro**. 2022. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES (ABIEC). **Beef report: Brazilian livestock profile**. São Paulo: ABIEC, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípio e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- CABRERA, E.; SOUSA, J. M. M. de. Use of sustainable fuels in aviation - a review. **Energies**, v. 15, n. 7, art. 2440, p. 1-23, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15072440>.
- CAPAZ, R. S. *et al.* Environmental trade-offs of renewable jet fuels in Brazil: beyond the carbon footprint. **Science of the Total Environment**, v. 714, p. 136696, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136696>.
- CAPAZ, R. S. *et al.* The carbon footprint of alternative jet fuels produced in Brazil: exploring different approaches. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 166, p. 105260, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105260>.
- COSTA, R. C. da; TEIXEIRA, C. A. N.; MENDES, A. P. do A.; ROCIO, M. A. R. Combustível sustentável de aviação. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 97-142, set. 2024.
- COSTA, T. S. **Avaliação de ciclo de vida do bioquerosene de canola**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- D'ASCENZO, F. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of Sustainable Aviation Fuel Production from Different Biomasses. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 6875, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16166875>.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de conjuntura dos biocombustíveis: ano 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio: nota técnica**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels**. 6. ed. Montreal: ICAO, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA>. Acesso em: 15 maio 2026.

ISCC. **ISCC CORSIA 201: System Basics**. Versão 2.0. Colônia: ISCC System GmbH, 2023. Disponível em: <https://www.iscc-system.org>. Acesso em: 25 abr. 2026.

MARRECO, J. **Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação**. Brasília: Projeto ProQR (MCTI; GIZ; MME), 2022.

MOREIRA, J. R. C. **A sustentabilidade ambiental da produção de biodiesel no Brasil: uma revisão de estudos de avaliação de ciclo de vida**. 2021. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

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

PEREIRA, S. L. da S. **Uso da RenovaCalc para avaliação da intensidade de carbono na produção de QAV-alternativo HEFA considerando diversas rotas de obtenção de hidrogênio**. 2021. 86 f. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

PETROBRAS. **Petrobras contrata tecnologia para produção de bioquerosene de aviação e diesel 100% renovável**. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, 30 dez. 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br>. Acesso em: 20 maio 2026.

PRUSSI, M. *et al.* CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, p. 111398, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.

SEBER, G. *et al.* Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuels from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 170, p. 112945, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112945>.

SILVA, Mónica Santos. **ABC dos objetivos de desenvolvimento sustentável**. Lisboa: Rede de Desenvolvimento; Instituto Marquês de Valle Flôr (IMVF), 2020. Disponível em: <http://www.rumoa2030.pt>. Acesso em: 14 jun. 2026.

VARÃO, L. H. R. *et al.* Vantagens e limitações do sebo bovino enquanto matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. *Holos*, Natal, ano 33, v. 7, p. 39-54, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5010>.

VÁSQUEZ, M. C. *et al.* Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, p. 117796, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117796>.