

Produção de Combustíveis de Aviação Sustentável no Brasil visando a substituição do JET-A1

DOI: 10.5281/zenodo.10569552

Luiza Pedrosa Ferreira de Souza^{a*}

This work seeks to provide a current view on the production of sustainable aviation fuels in Brazil, in addition to reviewing the most current literature available and comparing them with Cremonez and collaborators expectations in 2014.

Esse trabalho busca trazer uma visão atual sobre a produção de combustíveis de aviação sustentáveis no Brasil, além de fazer uma resenha das literaturas mais atuais disponíveis e comparar com as expectativas de Cremonez e colaboradores em 2014.

Introdução

A preocupação com as mudanças climáticas e a busca por alternativas sustentáveis para a produção de combustíveis tem sido uma grande preocupação das últimas décadas. Cada vez mais, estudos estão sendo feitos sobre como substituir os derivados do petróleo por outras alternativas mais verdes, que causam menos impacto ao meio ambiente. Uma das áreas que recentemente está sendo explorada é a de produção de combustíveis sustentáveis na aviação, uma vez que esse transporte exige uma grande quantidade de combustível e é muito utilizado pela sociedade contemporânea.

Devido à preocupação com os fatores ambientais, juntamente com questões econômicas em que a flutuação no preço do petróleo exerce pressão direta na indústria da aviação, tem havido um crescente interesse no desenvolvimento de combustíveis alternativos para a aviação nas últimas décadas.⁴ A utilização de baterias como uma alternativa está sendo explorada por outros setores de transporte por seu sucesso com os carros. No entanto, a eletrificação do setor da aviação apresenta alguns desafios, principalmente associada à substituição da frota de aeronaves, além de limitações quanto à densidade de energia da bateria.⁵ Dessa forma, a utilização de combustíveis e suas formas alternativas continua sendo a opção mais viável para esse setor.

Uma das opções para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é o uso de combustíveis com pegada de carbono mais baixa, substituindo, mesmo que parcialmente, o combustível convencional de aviação à base de petróleo, o Jet A-1.¹ Esse combustível também é conhecido como querosene

^a Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

*E-mail: luizapedrosafouza@gmail.com

Palavras-chave: FT-SFK; SAF; hidrogênio; HTL.

Recebido em 04 de dezembro de 2023,

Aceito em 17 de janeiro de 2024,

Publicado em 31 de janeiro de 2024.

de aviação e é amplamente utilizado por ser compatível com a maioria das aeronaves a jato, mesmo que seja um combustível fóssil que libera muitos GEE.

Os combustíveis alternativos serão classificados como Combustíveis de Aviação Sustentáveis, em inglês *Sustainable Aviation Fuel* (SAF), se atenderem aos critérios de sustentabilidade da cadeia de suprimentos definidos pelo Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA). Nesse caso, os combustíveis elegíveis devem alcançar reduções de pelo menos 10% em comparação com as emissões do ciclo de vida convencional do combustível de aviação, no qual desde a extração até a queima são emitidas grandes quantidades de carbono.^{2,3}

Vários requisitos devem ser atendidos para que o combustível seja utilizado como um combustível de aviação, entre esses requisitos estão: alta densidade de energia, de forma a reduzir a carga de combustível transportada com o máximo alcance; evaporação e atomização rápidas; baixo risco de explosão; viscosidade adequada; estabilidade física e química; e baixo ponto de congelamento. O Bioetanol, a célula de hidrogênio, os Ésteres de Ácidos Graxos, em inglês *Fatty Acid Ester* (FAEs), o Querosene Parafínico Sintético de Fischer-Tropsch, em inglês *Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene* (FT-SPK), e os biocombustíveis de Hidroconversão Térmica Líquida (HTL), também conhecido como Hidrotermólise Catalítica, são algumas das opções consideradas.⁴

O Brasil está empenhado em alcançar uma descarbonização efetiva no setor de transporte. Desde 2017, o

país tem promovido a descarbonização por meio da implementação da Política Nacional de Biocombustíveis, conhecida como RenovaBio, que gera investimentos da ordem de USD 2,4 bilhões, ou R\$ 11,85 bilhões, no setor de biocombustíveis brasileiros. Eses investimentos e incentivos desempenham um papel crucial no avanço de tecnologias voltadas para a redução das emissões de GEE.⁵

A grande quantidade de matéria prima disponível no país que pode ser utilizada para o desenvolvimento de biocombustíveis se mostra como uma oportunidade para a substituição dos combustíveis fósseis no Brasil. O estudo de Deuber e colaboradores.⁵ mostra que a indústria canavieira, por exemplo, possui alta disponibilidade de resíduos agroindustriais, juntamente com um sistema de biorrefinaria muito bem estabelecido. Essa indústria poderia se beneficiar com a implementação da tecnologia HTL e fortalecer a produção de SAF para atender à crescente demanda por combustíveis nas próximas décadas.

Outro aspecto que merece atenção na produção de SAF é a possibilidade de usar hidrogênio na atualização do bio-óleo bruto. O hidrogênio pode ser adquirido ou produzido no local por meio da Reforma a Vapor de Metano (RVM) ou por meio de alternativas mais limpas, em que a trajetória de produção terá um impacto direto nas emissões de GEE do SAF.⁵

O estudo de Walter e colaboradores.¹ analisou a viabilidade da produção de SAF no Brasil e os resultados mostraram que a produção pode ser mais barata do que em muitos outros países, sem os riscos significativos associados às mudanças no uso da terra. Os biocombustíveis têm sido considerados uma das alternativas mais sustentáveis para substituir as fontes de energia fóssil devido à sua condição renovável e à redução de GEE que eles geram.⁴

Para esse artigo em questão, analisaremos a referência de Cremonez e colaboradores⁴ que traz observações sobre o cenário de 2014 de SAF além de prospecções futuras que serão comparadas com artigos mais atuais para entendermos o futuro dos combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil.

Metodologia

A presente resenha baseia-se no artigo de Cremonez e colaboradores⁴ que foi desenvolvida por meio da seleção, do estudo e da discussão dos pontos e fatos dos artigos acadêmicos escolhidos pelos autores que abordam a produção e o uso de biocombustíveis na aviação. Poucos estudos relacionados à

temática podem ser encontrados na literatura segundo os autores e alguns são até contraditórios. Por isso, foi feita a argumentação sobre a situação atual e as perspectivas para o uso de biocombustíveis na aviação no Brasil, incluindo as principais tecnologias utilizadas e seu potencial, além dos impactos causados pelo seu uso.

Resultados e discussão

Os combustíveis sustentáveis de aviação são *drop-in*, ou seja, molecularmente idênticos ao querosene fóssil, porém derivados de biomassa, hidrogênio, CO₂ ou resíduos, reduzindo sua pegada de carbono. Dessa forma, algumas das rotas que estão sendo exploradas atualmente são a de uso de Ácidos Graxos e Ésteres Hidroprocessados, em inglês *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA), atualmente a única fornecedora em escala comercial, de Querosene Parafínico Sintético (FT-SPK), de Álcool para Jatos, em inglês *Alcohol-to-jet* (ATJ), de Isoparafinas Sintetizadas, em inglês *Synthesized Isoparaffins* (SIP) e de Hidrotermólise Catalítica ou Hidroconversão Térmica Líquida (HTL), além dessas, novos estudos estão surgindo sobre outras possíveis formas de produção de SAF.⁶ Nesse quesito, o Brasil por ter uma grande quantidade de matérias-primas se mostra como um produtor promissor, porém encontra dificuldades de infraestrutura e de falta de tecnologia.

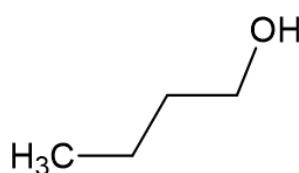
O artigo de Cremonez e colaboradores,⁴ trouxe como importantes estudos na área de SAF o Bioetanol, as Células de Hidrogênio, o Bioquerosene Parafínico Sintético (FT-SPK) e o Biocombustível de Liquefação Hidrotérmica (HTL). O artigo em questão apresenta o etanol como um interessante combustível de aviação devido à sua fórmula molecular conhecida e ao comportamento previsível, independentemente da sua síntese. Além das fontes convencionais, o etanol também pode ser obtido a partir da conversão de biomassa celulósica, como resíduos de colheitas, resíduos florestais e outros, que apresentam baixo custo e alta disponibilidade no país.⁴

Pequenas aeronaves monomotoras operam há anos no Brasil utilizando exclusivamente etanol, principalmente direcionado a aviação agrícola. Entretanto, a quantidade de energia concentrada no etanol não é interessante para a aviação comercial, porém, com a expansão do uso de etanol no setor de transporte, surge a oportunidade de estudar álcoois superiores como combustíveis alternativos para aviação.⁴

Os álcoois superiores oferecem vantagens em relação à densidade de energia. O n-butanol, cuja fórmula pode ser

vista na Figura 1, é um concorrente direto do etanol para uso como combustível, sendo produzido a partir de biomassa por meio de processos de fermentação, além de sua produção a partir de combustíveis fósseis. Este álcool é menos hidrofílico, ou seja, tem uma cadeia mais longa, e possui uma concentração de energia mais elevada, um índice de cetano superior, que indica a qualidade de combustão, maior viscosidade, pressão de vapor mais baixa e ponto de fulgor mais elevado. Essas características tornam o n-butanol uma opção interessante, uma vez que mostram uma proximidade físico-química à gasolina e ao diesel, podendo ser usado especialmente em misturas com esses combustíveis de cadeia longa.^{4,7}

Figura 1. Estrutura molecular do n-butanol



Além disso, em comparação com o biodiesel, que é um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação, o n-butanol contém maior teor de hidrogênio, levando a uma menor geração de fuligem na combustão, e a faixa de combustão é baixa, gerando níveis mais baixos de NOx, que podem poluir a atmosfera. Apesar de todas as suas vantagens, a baixa produção de n-butanol é o fator limitante para seu uso, sendo sua produção de 10 a 30 vezes inferior à produção de etanol por fermentação alcoólica com leveduras.^{4,8}

Desde 1939, muitos estudos têm sido feitos para explorar a utilização do hidrogênio como combustível para motores a jato. As tecnologias de células de hidrogênio, uma tecnologia que utiliza a combinação química dos gases hidrogênio e oxigênio para gerar energia elétrica e moléculas de água, destacam-se entre as formas mais eficientes e limpas de transformar energia elétrica em energia transportável e têm recebido muita atenção no Brasil, um país com grande potencial no desenvolvimento dessa tecnologia. A grande disponibilidade de água do país garante o fornecimento de energia a preços muito mais baixos em comparação com outros países. A produção por meio da eletrólise é uma rota amplamente utilizada, mesmo quando se utiliza energia proveniente de fontes hidrelétricas, solares ou eólicas.^{4,9}

As características das células de hidrogênio, como sua alta densidade de energia, que possibilita uma alta potência, além do seu baixo ponto de congelamento e baixa corrosividade, garantem condições operacionais favoráveis para este combustível em aeronaves a jato.⁴

Uma das formas de obtenção de hidrogênio que tem sido estudada também é a hidrólise do biogás metano, que tem alta densidade de energia em células de combustível. O biogás é um combustível muito versátil cuja energia química pode ser facilmente convertida em energia mecânica, em energia elétrica e em energia térmica. A conversão desse material em hidrogênio é uma possibilidade promissora que garante maior concentração de energia por unidade de massa, ou seja, menor peso operacional para as aeronaves. No entanto, para o uso desse combustível seriam necessárias alterações nos motores, no sistema de injeção e no armazenamento das aeronaves, além de que o processo de conversão catalítica de biogás em hidrogênio ainda é considerado economicamente desfavorável. O biogás costuma ser produzido a partir da digestão anaeróbica de matéria orgânica presente em águas residuais, lodo de esgoto, esterco e outros resíduos, logo poderia ser uma alternativa de fonte de energia limpa. Entretanto, esse biocombustível ainda é pouco utilizado no Brasil.^{4,10}

Outra forma explorada de se obter SAF é a partir dos FAEs, que são materiais provenientes da transesterificação de triglicerídeos e ácidos graxos de origem vegetal ou animal, também conhecido como biodiesel. Óleos vegetais têm sido testados como combustíveis em motores de combustão interna, no entanto, devido à sua alta viscosidade, podem causar sérios danos ao motor de uma aeronave.⁴

Alguns fatores, como clima e região do país, determinam qual material tem o maior potencial para a produção de biodiesel. O biodiesel é um substituto natural e renovável do diesel fóssil, produzido usando álcoois mono hidroxilados de cadeia curta, seja na presença ou não de um catalisador homogêneo, heterogêneo ou enzimático. No Brasil, o biodiesel tem grandes vantagens por apresentar tecnologias de produção definidas e grande disponibilidade de matérias-primas.⁴

Contudo, o biodiesel ainda enfrenta muitos desafios para se tornar um potencial combustível de aviação devido ao seu baixo valor calorífico inferior e alto ponto de congelamento. Ademais, as características e propriedades dos ésteres variam consideravelmente conforme a matéria-prima

utilizada em sua obtenção, e alguns contaminantes podem ser prejudiciais durante a combustão nos motores.⁴

Outra forma de obtenção de combustíveis renováveis é pelo processo FT-SPK, no qual a biomassa lenhosa é convertida em gás de síntese usando gaseificação e, em seguida, uma reação de síntese de Fischer-Tropsch (FT) converte o gás de síntese em combustível de aviação. Embora apresente um considerável potencial, essa abordagem para a produção de biocombustíveis sintéticos ainda enfrenta desafios significativos para sua adoção em larga escala no mercado global. Esses desafios incluem a identificação de locais ideais para instalações, os elevados custos de investimento necessários para operar tais instalações, garantia do fornecimento seguro de biomassa, e questões relacionadas ao transporte e logística.⁴

Além disso, há outras preocupações ambientais e técnicas essenciais, como a produção de catalisadores e o tratamento de resíduos. O acesso à água também é crucial para o desenvolvimento do processo FT e para a síntese de combustíveis sintéticos, como é o caso do hidrogênio.^{4,11}

Os materiais obtidos por meio dos processos FT são geralmente hidrocarbonetos de cadeias lineares que tendem a atacar os elastômeros do sistema de combustível, resultando em desperdício de combustível. No entanto, isso pode ser corrigido misturando biocombustíveis com combustíveis sintéticos que contenham aromáticos suficientes para garantir um teor mínimo de 8%.⁴

O artigo de Walter e colaboradores¹ trouxe igualmente como o maior desafio para a utilização de FT-SPK a definição dos locais de produção, uma vez que o transporte de madeira por longas distâncias, mesmo por meio ferroviário, impacta significativamente a viabilidade da produção de SAF. Mesmo considerando as condições brasileiras para a produção de biomassa de baixo custo, ainda haveria restrições econômicas significativas para substituir os combustíveis de aviação convencionais. Todavia, eles ainda levantaram a questão do preço do petróleo e que preços mais altos do petróleo e/ou tributação de carbono definiriam um contexto mais favorável para os combustíveis alternativos de aviação. Também, salientaram a necessidade de reduzir os custos de transporte e de maquinário industrial.¹

Juntamente, o artigo de Real Guimarães e colaboradores¹² fala sobre o uso da rota de produção por meio de gaseificação e síntese de Fischer-Tropsch de matérias-primas lignocelulósicas em plantas para produzir combustível

de aviação renovável como promissora para ajudar a atingir as diretrizes de emissões líquidas zero de carbono até 2050. No entanto, mesmo com cerca de 80 g de CO₂ evitados por MJ de SAF produzido, uma planta autônoma processando biomassas lignocelulósicas ainda não é economicamente viável, não sendo atrativa para investidores.¹²

Outra escolha para a produção de SAF são os biocombustíveis, que podem ser produzidos por meio de vários processos de conversão de biomassa sem competir com áreas designadas para cultivo de alimentos. Nesse cenário, a liquefação hidrotérmica (HTL), uma tecnologia que utiliza água em um estado subcrítico, com temperaturas geralmente superiores a 250 °C e pressões variando de 5 a 25 MPa, para converter biomassa em bio-óleos ricos em carbono, tem se destacado no uso de biomassa de microalgas. Esse processo é normalmente empregado na transformação de biomassa de algas em biocombustíveis, visando espécies com menor teor de lipídios. As etapas de desidratação são as que consomem mais energia nesse processo, o que mostra a importância do processo de HTL, que elimina a secagem completa da biomassa, sendo considerado mais sustentável quando comparado aos métodos de extração convencionais.⁴

Biocombustível de aviação pode ser obtido a partir de algas, seja por extração de lipídios ou, neste caso, a partir de bio-óleo produzido via processo HTL em estações de tratamento de águas residuais (ETAR). No Brasil, o cultivo de algas é realizado principalmente em sistemas ao ar livre que são altamente suscetíveis a contaminações e às condições meteorológicas, tornando impossível controlar algumas variáveis cruciais no desenvolvimento de microalgas.⁴

O estudo de Deuber e colaboradores⁵ mostrou que no início de 2023 a produção de SAF a partir da tecnologia HTL foi grandemente beneficiada pela integração com destilarias de etanol, resultando na redução dos custos totais de capital e operacionais do projeto. A análise de incerteza mostrou que há uma chance de 38% do SAF produzido por HTL atingir preços compatíveis com o combustível de aviação fóssil no cenário integrado. No entanto, ainda não é possível garantir a viabilidade econômica, mas com a integração é possível alcançar a competitividade com o combustível de aviação convencional. Atualmente, no entanto, ainda não é um projeto com viabilidade econômica pela falta de tecnologia necessária. Em larga escala, também não é viável a utilização de um solvente orgânico para a liquefação, segundo o estudo, penalizando significativamente o desempenho ambiental dos biocombustíveis HTL.⁵

O Brasil tem uma grande base industrial com disponibilidade de matérias-primas para a produção de biodiesel e bioetanol, cuja produção depende de culturas oleaginosas, porém, as matérias-primas mais importantes para a produção de biocombustíveis de aviação também são óleos vegetais e gorduras, o que deve ser levado em consideração.⁴

O artigo de Cremonez e colaboradores⁴ trouxe alguns padrões e metas devem ser atendidos para a utilização futura desses biocombustíveis na aviação, como a necessidade de apresentar uma alta densidade de energia e um ponto de congelamento inferior a -47 °C, além do desenvolvimento de processos de produção eficientes com baixo impacto ambiental e competitividade econômica com os combustíveis fósseis. Algumas dessas preocupações também foram levantadas em outros estudos,^{1,12} principalmente sobre a viabilidade econômica e a competitividade com os combustíveis atuais, além disso outra preocupação é a necessidade de desenvolver tecnologias adequadas para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação, o biodiesel ainda enfrenta muitos desafios para se tornar um potencial combustível de aviação devido ao seu baixo valor calorífico inferior e alto ponto de congelamento.

Conclusões

Dentre os artigos mais atuais encontrados na literatura, que tratam do âmbito do Brasil, pode-se observar que a maioria fala sobre a utilização de hidrogênio integrado a outros sistemas, sobre FT-SPK e sobre HTL. Os Ácidos Graxos e Ésteres Hidro Processados também são muito utilizados no cenário atual. Esses devem ser caminhos de estudo que veremos ser mais aprofundados nas próximas décadas, além de vermos os surgimentos de novas formas de produção de SAF conforme as tecnologias avançam.

A preocupação com a competitividade e viabilidade da produção dos SAF também foram problemas recorrentemente levantados. Todas as rotas de produção apresentaram vantagens e desvantagens, a baixa produção de n-butanol, por exemplo, é o fator limitante para seu uso, a conversão catalítica de biogás em hidrogênio ainda é considerada economicamente desfavorável, a definição dos locais de produção de FT-SPK também é uma dificuldade a ser superada, pela falta de tecnologia ainda não é viável a produção de energia por HTL e apesar do Brasil possuir vastas terras agrícolas e diversas culturas oleaginosas com potencial para a produção de biocombustíveis, a alta demanda causada pelo uso atual de biodiesel adicionado ao óleo diesel na frota de veículos

brasileira compromete o uso desses materiais para outros fins energéticos.

Para o futuro, espera-se que essas dificuldades possam ser superadas ou novas tecnologias surjam para novas formas de produção de Combustíveis de Aviação Sustentáveis. É de extrema importância o estudo e o investimento nos SAF, a fim de aproveitar as matérias-primas e resíduos disponíveis no país, para poderemos no futuro diminuir cada vez mais o consumo de combustíveis fósseis.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Luiza P. F. de Souza.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Referências

1. A. Walter, J. Seabra, J. Rocha, M. Guarenghi, N. Vieira, D. Damame and J. L. Santos, Spatially Explicit Assessment of the Feasibility of Sustainable Aviation Fuels Production in Brazil: Results of Three Case Studies, *Energies*, 2021, **14**, 4972.
2. CORSIA Eligible Fuels, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>, (accessed 4 December 2023).
3. A. Walter, J. Seabra, J. Rocha, M. Guarenghi, N. Vieira, D. Damame and J. L. Santos, Spatially Explicit Assessment of Suitable Conditions for the Sustainable Production of Aviation Fuels in Brazil, *Land*, 2021, **10**, 705.
4. P. A. Cremonez, M. Feroldi, A. V. De Araújo, M. Negreiros Borges, T. Weiser Meier, A. Feiden and J.

Gustavo Teleken, Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **43**, 1063–1072.

evaluation, *Energy Conversion and Management*, 2023, **276**, 116547.

- 5 R. D. S. Deuber, J. M. Bressanin, D. S. Fernandes, H. R. Guimarães, M. F. Chagas, A. Bonomi, L. V. Fregolente and M. D. B. Watanabe, Production of Sustainable Aviation Fuels from Lignocellulosic Residues in Brazil through Hydrothermal Liquefaction: Techno-Economic and Environmental Assessments, *Energies*, 2023, **16**, 2723.
- 6 O que é SAF?, <https://epbr.com.br/o-que-e-saf-conheca-as-diferentes-rotas-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>, (accessed 4 December 2023).
- 7 E. G. Giakoumis, C. D. Rakopoulos, A. M. Dimaratos and D. C. Rakopoulos, Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **17**, 170–190.
- 8 C. Jin, M. Yao, H. Liu, C. F. Lee and J. Ji, Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**, 4080–4106.
- 9 D. Hotza and J. C. Diniz Da Costa, Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, **33**, 4915–4935.
- 10 H. J. Alves, C. Bley Junior, R. R. Niklevicz, E. P. Frigo, M. S. Frigo and C. H. Coimbra-Araújo, Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38**, 5215–5225.
- 11 D. Iribarren, A. Susmozas and J. Dufour, Life-cycle assessment of Fischer-Tropsch products from biosyngas, *Renewable Energy*, 2013, **59**, 229–236.
- 12 H. Real Guimarães, J. Marcon Bressanin, I. Lopes Motta, M. Ferreira Chagas, B. Colling Klein, A. Bonomi, R. Maciel Filho and M. Djun Barbosa Watanabe, Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental