



Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas

Artigos

IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA AVIAÇÃO

Vitor Ricardo Fiuza Teodoro Silva¹

Anna Paula Bechepeche²

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo entender o processo de mitigação dos efeitos dos gases de efeito estufa emitidos pelas aeronaves, por meio do uso de técnicas de captura de dióxido de carbono, a partir da atmosfera, por meio de uma revisão bibliográfica, a respeito dos estudos voltados para a sustentabilidade na aviação. Dessa forma, buscou-se identificar os potenciais benefícios que essa forma de combate pode trazer para o setor, além de averiguar as alternativas exploradas até então. Os resultados sugerem que a neutralização das emissões, provavelmente, não será alcançada apenas pela aplicação de um método como o de captura direta do ar, mas por meio da implementação de múltiplas soluções complementares.

Palavras-Chave: Aviação. Sustentabilidade. Neutralidade de Emissões. Captura de carbono do ar. Combustíveis Sustentáveis da Aviação.

¹ Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). E-mail: vitor.ricardo36@outlok.com

² Graduada em Física pela Universidade Federal de Goiás (1988), mestre em Física pela Universidade de São Paulo (1991), doutora em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1996). Professora efetiva na Pontifícia Universidade Católica de Goiás e na Universidade Estadual de Goiás. Possui experiência na área de Física, com ênfase em Física da Matéria Condensada. E-mail: abechepeche@yahoo.com.br

IMPACTS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND SUSTAINABILITY STRATEGIES IN AVIATION

ABSTRACT

This work aimed to understand the process of mitigating the effects of greenhouse gases emitted by aircraft, through the use of carbon dioxide capture techniques, from the atmosphere, through a literature review, regarding studies focused on sustainability in aviation. Thus, we sought to identify the potential benefits that this form of combat can bring to the sector, in addition to investigating the alternatives explored so far. The results suggest that emission neutralization will probably not be achieved only by applying a method such as direct air capture, but by implementing multiple complementary solutions.

Keywords: *Aviation. Sustainability. Net-zero. direct air capture. Sustainable Aviation Fuels.*

1 INTRODUÇÃO

A aviação tem um papel primordial no desenvolvimento econômico e no bem-estar social do ser humano, e cresce, de forma constante, década após década. Porém, essa expansão vem acompanhada do aumento das emissões de poluentes, em especial, do dióxido de carbono (CO₂), causado, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis nos motores das aeronaves (Becantinni, 2021). Em um mundo cada vez mais preocupado com as mudanças climáticas, em decorrência das interferências antropológicas, é imperativo que o setor procure maneiras de combater tais efeitos negativos decorrentes da atividade aérea.

Desse modo, considerando a pergunta de pesquisa “Quais as estratégias podem ser adotadas, na aviação civil, a fim de mitigar as emissões de gases de efeito estufa?”, esta pesquisa aborda a sustentabilidade de uma maneira geral, a fim de identificar os impactos das emissões de GEE e as possíveis alternativas e estratégias a serem exploradas para contê-los na aviação, especialmente, a técnica de captura de CO₂, diretamente do ar. Além disso, busca averiguar se a

tecnologia de captura direta do ar (DAC) pode ser considerada uma solução adequada para a neutralidade das emissões dentro do setor.

Para atingir tais objetivos, utiliza-se a revisão bibliográfica, uma metodologia descritiva de abordagem qualitativa, desenvolvida por meio de procedimentos documentais e bibliográficos, que se enquadra como de natureza básica.

2 REVISÃO TEÓRICA

A busca pela sustentabilidade não é um fenômeno recente, mas sim uma jornada que remonta a diferentes períodos da história. Desde os primórdios da civilização, várias culturas e pensadores têm abordado a relação entre a sociedade e o ambiente, o que delinea conceitos que ressoam até os dias atuais. Ainda na Grécia Antiga, Platão, em sua obra, “A República” já falava da preservação de recursos naturais e a importância do equilíbrio entre o desenvolvimento da polis e os limites da natureza. O filósofo, provavelmente, não reconheceria os termos modernos que permeiam a discussão ambiental atual, porém, evidenciou sua preocupação com o meio ambiente, ao descrever o conceito de uma cidade saudável (Stone, 2017).

Durante a Idade Média, é possível dizer que São Francisco de Assis (1182-1226) se destacou como um pioneiro no discurso acerca da sustentabilidade. Em suas obras, percebe-se o apreço que tinha pela natureza e o cuidado com os animais. O seu trabalho influenciou o pensamento ecológico e a ética ambiental da atualidade e serve de inspiração a obras contemporâneas que discutem o tema, como a “*Laudato Si*”, que aponta não somente os danos ecológicos, mas também os sociais causados pela emissão de GEE, uma vez que as classes mais empobrecidas são as mais expostas aos efeitos do aquecimento global, como as secas e enchentes (Bordini; Souza, 2020; Miranda, 2022).

No século XIX, o escritor e filósofo norte-americano Henry David Thoreau, autor de “Walden”, destaca-se por sua obra icônica, que alerta a respeito dos riscos e efeitos nocivos para o meio ambiente, causados pela rápida industrialização, em que o mundo já passava. O livro enfatiza a importância da

simplicidade, e foi um precursor do movimento de volta à natureza e da busca por um estilo de vida mais sustentável, ao inspirar a reflexão acerca da conexão entre humanidade e meio ambiente, uma ideia que ecoa vigorosamente nos debates contemporâneos a respeito da sustentabilidade e do papel do ser humano na preservação do planeta (Alexander; Baumann, 2020).

No entanto, foi somente no século XX, por meio de estudos direcionados pela Organização das Nações Unidas (ONU) que o termo "sustentabilidade" ganhou destaque. Em 1987, durante a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas, presidida pela ex-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, foi lançado o famoso relatório "Nosso Futuro Comum". Segundo Brundtland, o desenvolvimento sustentável foi definido como "o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades". Este ficou conhecido também como o Relatório de Brundtland e contribuiu, significativamente, para o entendimento que se tem, na atualidade, a respeito da sustentabilidade (Carvalho, 2019).

Segundo Moura (2011), no início da década de 1990, o desenvolvimento sustentável experimentou um significativo impulso, por intermédio da notável ampliação, tanto em termos de qualidade quanto de quantidade das legislações ambientais. Este fenômeno se deve, em grande parte, à Rio 92, conferência da ONU realizada no Rio de Janeiro, em 1992, em que foram discutidos os impactos ambientais pela poluição e o desmatamento, entre os 172 países presentes. Durante a conferência, foram adotadas importantes declarações e acordos, como a "Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento" e a "Agenda 21", que estabeleceram diretrizes para a promoção do desenvolvimento sustentável em nível global. A conferência destacou uma mudança generalizada na priorização do meio ambiente, especialmente, entre os países em desenvolvimento, que passaram a reconhecer a necessidade de equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental.

A mesma conferência deu origem à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que ocorreu na cidade de Quioto, no Japão.

Nesse encontro, foi estabelecido o Protocolo de Quioto, no qual novos acordos foram firmados entre os países presentes, a fim de reduzir os impactos das emissões de poluentes, de maneira mais significativa. O protocolo dividiu os países em dois anexos distintos, o primeiro era composto pelos desenvolvidos e o segundo por aqueles em desenvolvimento. Os participantes do Anexo I teriam a responsabilidade de colocar em prática medidas mais severas de redução, em razão de sua contribuição histórica de poluição e poder econômico. Em contraste, os participantes do Anexo II não teriam obrigação alguma por serem menos industrializados e não poluírem há tanto tempo como o outro grupo, embora caso quisessem poderiam contribuir com as reduções. O Brasil, como integrante do segundo grupo, em 2002, optou por se comprometer em reduzir voluntariamente suas emissões em 37% até o ano de 2025, a fim de contribuir para o esforço global pela sustentabilidade (Reisch, 2022).

Atualmente, a sustentabilidade é percebida como um princípio fundamental que orienta a tomada de decisões em diversos setores da sociedade, que abrange desde políticas governamentais até práticas comerciais e individuais. Ela é vista como um paradigma que visa atender às necessidades das gerações presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às próprias necessidades. A preocupação com a sustentabilidade engloba não apenas aspectos ambientais, como conservação de recursos naturais e redução de emissões de GEE, mas também questões sociais, como equidade, justiça e inclusão, e considerações econômicas que buscam um desenvolvimento econômico equilibrado e de longo prazo. A busca pela sustentabilidade é, agora, uma parte intrínseca da cultura global, que impulsiona inovações, políticas e práticas, que levem a um futuro mais resiliente e equitativo para todos (Oliveira, 2017).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa possui abordagem qualitativa, de natureza básica, com objetivos exploratórios, e com procedimentos bibliográficos e documentais. A

pesquisa bibliográfica é caracterizada pela análise direta de fontes científicas, que podem ser livros, periódicos, enciclopédias, ensaios críticos, dicionários e artigos científicos, e que não necessariamente utilizam, diretamente, fatos/fenômenos da realidade empírica. Já a pesquisa documental é baseada em documentos que não são considerados científicos, como jornais, revistas, cartas, filmes, gravações, fotografias, sites da internet, entre outros meios de divulgação (Oliveira, 2007).

A fim de atender os objetivos da pesquisa, a proposta é, prioritariamente, realizar busca em bases de dados científicos, que abordem temas relacionados à sustentabilidade, efeito estufa, *direct air capture* e aviação civil. Além disso, buscou-se conteúdos publicados em sites relacionados ao tema da pesquisa.

A busca foi realizada na base Google Acadêmico, entre 19 de agosto a 31 de outubro de 2023, com o uso dos descritores: "aviação civil", "sustentabilidade", "direct air capture", "efeito estufa" e "net-zero". Utilizou-se estudos das áreas do conhecimento relacionadas à administração, economia, gestão ambiental e engenharia de produção publicados entre 2018 e 2023, em português e inglês. A busca retornou 78 artigos relacionados à "aviação civil", "efeito estufa" e "sustentabilidade" e 140 artigos relacionados aos "direct air capture" e "net-zero".

Devido à grande quantidade de artigos retornados, e com base em sua relevância para o estudo, foram selecionados 22, os quais foram lidos integralmente e resumidos: Keith *et al.* (2018); Masson-Delmonte (2018); Assad (2019); Beuttler *et al.* (2019); Carvalho (2019); Fasihi (2019); Bordini e Souza (2020); Adami (2021), Becantinni *et al.* (2021); Fankhauser (2021); Lee *et al.* (2021); Pavlenko e Searle (2021); Erans *et al.* (2022), Galimova *et al.* (2022); Miranda (2022); Reisch (2022); Shepardson (2022); Timmons e Terwel (2022); Figueiredo (2023); Jiang *et al.* (2023); Ravishankara (2023); Sodiq (2023).

4 DESENVOLVIMENTO

A seguir, apresentam-se os principais conceitos e contextos relacionados à sustentabilidade na aviação civil, efeito estufa e *net-zero*, e *direct air capture*.

4.1 AVIAÇÃO NET-ZERO

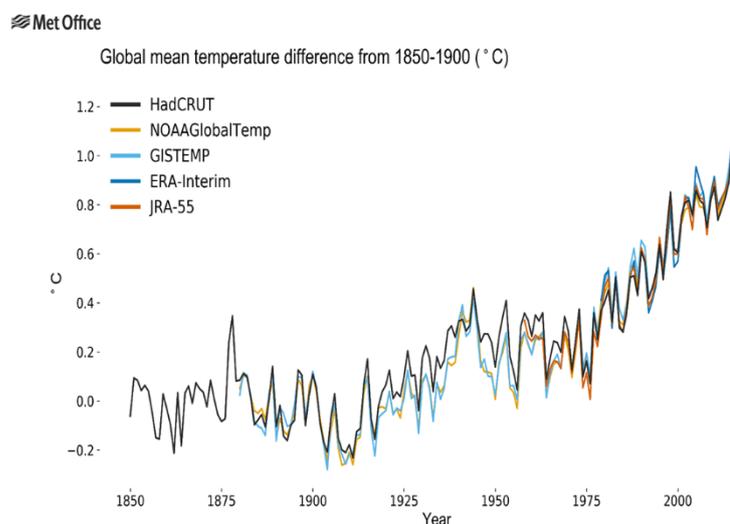
Os princípios fundamentais do sistema climático da Terra estão ligados ao fluxo constante de energia solar que atravessa a atmosfera na forma de luz visível e raios ultravioletas. Uma parcela dessa energia é reemitida pela Terra como radiação infravermelha. Nesse contexto, os GEE desempenham um papel crucial. Esses gases naturais, como o vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃), existem na atmosfera e desempenham um papel vital na regulação do clima, quando retêm parte dessa radiação infravermelha, o que impede que a Terra fique excessivamente fria e a mantém em uma temperatura habitável (estima-se que a temperatura seria 30°C mais baixa, sem o efeito estufa). No entanto, devido às atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento generalizado, seja para fins agrícolas ou para a expansão urbana, tem se observado um aumento expressivo na concentração de alguns desses gases, como o CO₂, CH₄ e N₂O na atmosfera e, conseqüentemente, elevado as temperaturas para além dos níveis ideais, o que caracteriza o aquecimento global antropogênico (Assad, 2019).

Apesar de todos os GEE contribuírem para o aquecimento exacerbado da atmosfera, o enfoque da pesquisa é voltado ao CO₂ por dois fatores principais. O primeiro é o fato de que este é o GEE presente em maior quantidade na atmosfera, com uma concentração de 420 partes por milhão (ppm), enquanto os outros podem ser considerados resíduos, quando comparados a ele. O segundo fator é a longevidade, o gás carbônico pode perdurar por um milênio, enquanto o CH₄ e N₂O não duram mais que algumas décadas. Somando a isso, o dióxido de carbono é o GEE com a maior capacidade de forçagem radiativa, ou seja, ele é o principal responsável por alterar o equilíbrio entre a entrada e saída de calor na troposfera e, conseqüentemente, causar o aquecimento do planeta (Sodiq *et al.*, 2023).

Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PIMC ou IPCC, em inglês), desde o início da industrialização, em meados do século XVIII, as atividades antropológicas causaram um aumento superior a 40% na concentração de dióxido de carbono na atmosfera. Isso,

somado a outros GEE, elevou a temperatura média global em mais de 1 °C, em relação ao mesmo período histórico, com um acréscimo de aproximadamente 0,2 °C a cada década (Figura 1).

Figura 1 - Aumento da temperatura média registrada entre o século XIX e XXI



Fonte: State (2019).

O mesmo relatório ainda afirma que esse aumento na temperatura é consideravelmente maior nos continentes, do que sobre superfície oceânica; e algo entre 20% e 40% da população mundial já experimentaram números superiores a 1,5°C entre 2006 e 2015. Isso demonstra que as consequências do efeito estufa são, por diversas vezes, maiores que os números revelam. Além desse cenário trazer uma série de implicações graves, que inclui a ocorrência mais frequente e intensa de eventos climáticos extremos, elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos, impactos significativos na biodiversidade e na segurança alimentar, ainda ameaça a estabilidade de comunidades e ecossistemas em todo o mundo (Masson-Delmonte, 2018; Royal Society, 2019).

Por isso, acordos e políticas voltados para a questão climática são cada vez mais recorrentes. Com destaque para a 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21), ocorrida em dezembro de 2015, na qual foi firmado o Acordo de Paris, assinado por 195 nações, que estabeleceu o compromisso de limitar o aumento global de temperatura a 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para não exceder 1,5 °C até metade

do século. Se as emissões continuarem a crescer na taxa atual, as projeções climáticas para o futuro são alarmantes, já que há uma previsão de aumento de até 4 °C até o ano 2100. Contudo, o relatório do IPCC revela que é improvável que as emissões presentes na atmosfera possam sozinhas alcançar este limite de 1,5 °C (Masson-Delmonte, 2018).

Com base nesses dados, o *net-zero* tem ganhado destaque nos últimos anos, termo baseado no conceito físico de que há um limite de dióxido de carbono permitido na atmosfera, juntamente com outros GEE, para que o aquecimento global não ultrapasse a meta definida pela conferência. De acordo com Fankhauser (2022), *net-zero* representa um estado no qual as emissões de GEE não excedem a quantidade removida, que neutraliza as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, o que, por conseguinte, contribui para a redução do aumento da temperatura global. Para permanecer dentro desse limite, é imperativo que as emissões de CO₂ alcancem seu ponto máximo antes de 2030 e, posteriormente, reduzam ao *net-zero*, por volta de 2050. Dessa forma, é possível que as temperaturas não cheguem a esse limite, ou pelo menos decaiam para números inferiores até o fim do século. Essa tarefa representa um desafio crítico na contenção das mudanças climáticas e na mitigação dos impactos adversos associados ao aquecimento global (Fankhauser, 2022).

Diante dessa realidade, tem se estudado maneiras de reduzir, drasticamente, as emissões de carbono em todos os setores da economia. Isso inclui a aviação, cujas emissões de CO₂ tiveram um aumento vertiginoso nas últimas décadas, principalmente devido ao crescimento repentino da aviação civil, que vem ocorrendo na Ásia. A Airbus projeta que 41% dos pedidos de suas aeronaves virão de linhas aéreas da região da Ásia-Pacífico nas próximas décadas. Entre os anos de 1960 e 2018, as taxas médias de crescimento anual nas emissões de CO₂ eram de 15 milhões de toneladas por ano. Porém, se forem destacados somente os anos de 2013 e 2018 esse crescimento se torna muito maior, 44Mt/ano, com taxas que passam de 2.2%/ano para 5%/ano. Em 2018, as emissões globais anuais da aviação excederam, a marca de 1Bi de toneladas, pela primeira vez. Além disso, as emissões totais da aviação, desde a década de 1940 até 2018, totalizam 32.6

bilhões de toneladas de CO₂, sendo, aproximadamente, metade emitida apenas nos últimos 22 anos. Atualmente, o setor é responsável por 2,4% das liberações de gás carbônico antropogênico na atmosfera (Lee *et al.*, 2021).

4.2 ATUAIS MÉTODOS DE COMBATE ÀS EMISSÕES

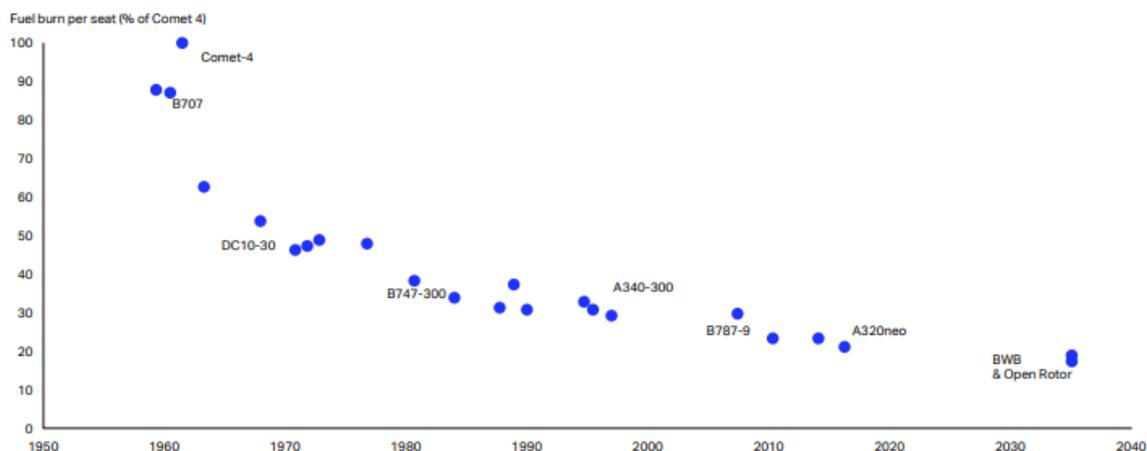
Em busca de tornar a aviação livre de emissões de carbono até o ano de 2050, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, em inglês) desenvolveu um roteiro que destaca os principais avanços tecnológicos, necessários para alcançar esse objetivo, assim como quando tais avanços devem ser alcançados para se manter dentro da meta estabelecida. O roteiro foi estabelecido com base em tecnologias anunciadas por fabricantes do setor e centros de pesquisa, que agregam informações provenientes de relatórios, planos estratégicos, sites e conferências públicas de companhias. O cenário estabelecido pela IATA, inclui a redução do consumo energético durante o voo, por intermédio da mudança de combustível, que prepara aeronaves capazes de utilizar os SAF¹, hidrogênio e baterias elétricas (Net Zero, 2023).

A Figura 2 contém um gráfico que revela como o consumo de combustível das aeronaves se tornou menor nos últimos 70 anos, com o uso de um equipamento popular daquele período (Comet 4) como parâmetro de comparação. Historicamente, os aviões de nova geração reduzem em 20% o gasto energético, em relação à aeronave em substituição. Isso se deve à implementação de motores mais eficientes, que trabalham com pressões mais altas, possuem menores perdas térmicas, menor arrasto e relação peso/potência. Além de avanços na estrutura e na aerodinâmica, como o surgimento de asas mais alongadas por meio do uso de *winglets* e a redução do peso com a aplicação de materiais mais leves, como os compósitos (material sintético formado por duas ou mais substâncias diferentes), em detrimento do alumínio na fuselagem (Net Zero, 2023). A substituição dos pesados sistemas hidráulicos que dependem de bombas, tubulações, válvulas e

¹Combustível sustentável de aviação (SAF) é o principal termo usado pela indústria da aviação para descrever um combustível de aviação não convencional (derivado de fósseis).

motores das aeronaves por atuadores elétricos mais simples e leves também trouxeram ganhos consideráveis na eficiência energética durante o voo, desde sua primeira implementação no Boeing 787 (Sinnett, 2007).

Figura 2 - Consumo de combustível em aeronaves



Fonte: Net Zero (2023).

Em relação aos SAF, muitos estudos consideram os biocombustíveis como o principal caminho rumo ao *net-zero* na aviação. Estes são produzidos a partir de hidrocarbonetos advindos de biomassa e possuem uma composição semelhante ao querosene aeronáutico. Eles ainda se dividem em dois subgrupos principais, os biocombustíveis convencionais ou parafínicos, e os biocombustíveis avançados ou completamente formulados. O primeiro grupo é o mais antigo, e já está disponível comercialmente, o segundo é mais moderno e oferece vantagens em relação ao anterior (Adami, 2021). A diferença entre os dois se encontra em sua composição e propriedades químicas. O biocombustível convencional é o combustível sustentável mais difundido e comercialmente disponível do setor. Porém, na forma que ele é atualmente fabricado, não pode ser utilizado diretamente para abastecer aeronaves, somente de forma diluída com o querosene convencional (QAV). Isso ocorre devido à falta de alguns hidrocarbonetos em sua composição química, notavelmente, os aromáticos, composto necessário para manter as válvulas, tanques e linhas de combustível da aeronave em boa forma e impedir vazamentos. Além disso, pequenas diferenças de densidade, energia específica e outros

parâmetros do biocombustível impedem o funcionamento correto de alguns sistemas de medição embarcados, projetados especificamente para o QAV (Net Zero, 2023).

Por outro lado, Adami (2021) afirma que o biocombustível avançado, produzido por meio de técnicas mais modernas, possui uma estrutura química semelhante o suficiente para ser compatível com os aviões e estruturas aeroportuárias que existem atualmente. Com a adição moderada de hidrocarbonetos aromáticos, para que não ocorra a produção de fumaça, é possível realizar voos com o uso de apenas esse SAF. Contudo, a autora do estudo aponta a existência de diversas barreiras para que isso ocorra, e uma delas é o alto custo de sua produção. Além disso, há incertezas relacionadas à capacidade de performance e combustão, assim, são necessários longos testes e a homologação de órgãos competentes internacionais para garantir sua segurança e efetividade.

O combustível do hidrogênio não é uma novidade, uma vez que a técnica para o extrair com o uso da eletrólise foi descoberto há quase 250 anos. Sua energia específica é muito superior ao querosene aeronáutico, isto é, 1kg de H₂ libera uma quantidade de caloria bem maior que um 1kg de QAV, o que o torna atrativo para a aviação. Contudo, o volume necessário para armazená-lo, mesmo liquefeito em baixíssimas temperaturas, é largamente superior aos combustíveis atuais (cerca de quatro vezes maior). Seu uso requer, portanto, um redesenho completo das aeronaves e estruturas aeroportuárias atuais. A reprogramação das estações de reabastecimento e layout dos aeroportos, somados à vida útil dos aviões em operação na atualidade, de aproximadamente 30 anos, tornam uma opção potencial apenas para o longo prazo (Becantinne *et al.*, 2021, Timmons; Terwell, 2021).

O outro caminho para alcançar a descarbonização estabelecido pela IATA diz respeito ao uso de baterias e motores elétricos nos aviões. Um relatório do Conselho Internacional de Transportes Limpos (ICCT, em inglês) indica que uma aeronave elétrica pode reduzir em 90% as emissões de CO₂, em relação a uma

convencional. Todavia, a comunidade científica, de um modo geral, é cética em relação ao tema, principalmente, em decorrência da baixa capacidade de armazenamento de energia das baterias atuais, em relação ao seu peso, que limitam, consideravelmente, a autonomia desse tipo de voo (Mukhopadhaya; Graver, 2022).

Ao analisar o projeto de uma aeronave elétrica de 19 passageiros da empresa sueca, Heart Aerospace, chegou-se à conclusão de que sua máxima distância de cruzeiro seria de 140NM, número que cai, significativamente, quando se considera a reserva necessária para voar a uma alternativa. Portanto, o futuro desse tipo de voo é significativamente dependente da evolução das baterias, que precisariam duplicar sua eficiência energética para permitir voos em rotas curtas com pequenas aeronaves e, ainda assim, lidar com a competição de meios de transporte regionais terrestres sustentáveis, como trens e metrô (Mukhopadhaya; Graver, 2022).

Vale ressaltar que, apesar de os SAF reduzirem drasticamente as emissões de poluentes durante o seu uso, eles ainda podem ocorrer em outras etapas do seu ciclo de vida. Uma delas é a da produção, em que a geração de GEEs pode ocorrer de forma direta ou indireta. Na primeira, elas ocorrem diretamente no cultivo dos insumos utilizados na fabricação desses combustíveis, assim como durante o processamento e transporte, devido à queima de biomassa, o uso de fertilizantes e a decomposição de resíduos orgânicos. Indiretamente, ela ocorre devido às alterações no uso da terra, quando a indústria de alimentos que utiliza a matéria-prima ou área de plantio precisa ser deslocada. Isso também afeta a conservação das florestas, pastagens e solos naturais, que passam a ser desmatadas para dar espaço a novas áreas agricultáveis. Assim, são liberadas quantidades elevadas de CO₂, previamente contido no chão e na flora. A grande variedade de impactos observados na conversão de biomassa em biocombustíveis demonstra que simplesmente substituir o querosene fóssil por uma alternativa sustentável não é suficiente para uma descarbonização profunda no contexto da aviação (Pavlenko; Searle, 2021).

4.3 COMPENSAÇÃO DE CARBONO

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é mais um instrumento criado pelas Nações Unidas pós Protocolo de Quioto, para auxiliar na redução do aquecimento global, que incentiva a criação de projetos voltados para a sustentabilidade. Tais projetos podem ser baseados no setor de energia, como a melhoria da eficiência e conservação energética, geração de energia por fontes renováveis e na sua distribuição. Alternativamente, também podem ocorrer nos setores de produção industrial, construção, transporte, mineração, gestão e tratamento de resíduos, agricultura ou reflorestamento (Reisch, 2022).

O MDL realiza a verificação e autenticação desses projetos, por meio de uma autoridade designada nacional e, caso sejam aprovados, eles se tornam habilitados a criar Reduções Certificadas de Emissão (em inglês, CER). Por convenção, cada CER equivale a uma tonelada de CO₂ retirado ou que não foi emitido para atmosfera, porém, essa mesma unidade pode ser utilizada para designar outros GEE e não somente o gás carbônico. Essa é a origem dos conhecidos “créditos de carbono”, e estes podem ser comercializados no mercado internacional, entre os membros participantes do Anexo I e II. Esse processo deu origem ao termo *Carbon Offset*, que é uma forma de compensar as emissões de CO₂ ou de GEE, ao financiar uma economia equivalente de CO₂ em outro lugar (Reisch, 2022; Massel-Delmonte, 2018).

4.4 CAPTURA DIRETA DE AR

Como já citado, mesmo que seja alcançado o melhor cenário possível, isto é, uma transição significativa para combustíveis renováveis e uma grande redução no consumo de energia, as emissões de GEE continuarão ocorrendo, devido às mudanças no uso da terra. Ademais, em médio prazo, é provável que usinas termoelétricas sejam necessárias para suprir a demanda energética para a produção. A captura direta de ar, (DAC, do inglês Direct Air Capture) se refere a uma ampla gama de tecnologias projetadas para capturar o dióxido de carbono

diretamente da atmosfera, e assim, reduzir os efeitos do aquecimento global (Erans *et al.*, 2022).

O DAC ainda possui a vantagem de poder ser aplicado no combate de uma ampla variedade de agentes difusores de GEE, que inclui aqueles que são móveis, como os aviões. Algo que se deve ao fato de, no ar ambiente, o CO₂ está distribuído de maneira basicamente uniforme na atmosfera, ao redor de todo o globo terrestre. Isso permite que sua captura ocorra em um local remoto, independentemente de onde a fonte das emissões tenha acontecido (Erans *et al.*, 2022; Sate, 2019).

A remoção de CO₂ não é um conceito recente, ainda na década de 1930, o gás começou a ser retirado do ar ambiente para impedir a formação de gelo nos equipamentos usados em plantas de separação criogênica de gases para uso em laboratório. Essa foi a primeira aplicação documentada da técnica de forma comercial, e continua sendo a alternativa mais rentável financeiramente, até os dias atuais. Posteriormente, o conceito também foi aplicado em sistemas de suporte de vida em naves espaciais e submarinos, a fim de purificar o ar do gás carbônico, tóxico para os seres humanos. Porém, foi somente no ano de 1999, em um documento publicado pelo Laboratório Nacional de Los Alamos nos Estados Unidos, que a ideia de utilizar essa técnica para contrapor os efeitos do aquecimento global foi proposta de forma pioneira (House *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2023).

Figura 3 - Usina DAC localizada na Islândia



Fonte: Orca (2021).

Contudo, para este fim, o DAC é consideravelmente mais complexo, uma vez que o CO₂ se encontra em densidades bem menores na atmosfera, e corresponde a somente 0,04% de seu volume total. Portanto, para que isso seja possível, é preciso utilizar uma planta industrial (Figura 1), por onde ocorre a passagem de uma grande massa de ar ambiente por uma superfície que contenha solvente ou sorvente capaz de reter as moléculas do gás. Este, por sua vez, é coletado e o ar volta para a sua circulação natural com uma fração da quantidade original do GEE. Em seguida, ocorre a regeneração do agente absorvente para que o ciclo ocorra novamente. Atualmente, existem duas maneiras difundidas de realizar esse processo, o DAC de Alta Temperatura (*high temperature*, HT) e DAC de Baixa Temperatura (*low temperature*, LT) (Ravishankara, 2023; Figueiredo, 2022)

O **DAC HT**, também chamado de solução aquosa, consiste em duas etapas que podem ocorrer simultaneamente. A primeira, designada como absorção, inicia-se com o contato do ar ambiente e a coluna de absorção pulverizada com hidróxido de sódio (NaOH) como solvente. Esse ar pode ser movido de forma ativa, por meio de ventiladores, ou de forma passiva, ao utilizar o fluxo natural. As moléculas de CO₂ reagem com o NaOH e formam uma solução de carbonato de sódio (Na₂CO₃). Essa fase acontece em pressão e temperatura ambientes. A solução é, então, transportada para a próxima etapa e o ar pobre em CO₂ deixa a coluna (Fasihi et al., 2019).

A segunda etapa é chamada de regeneração, nela, o Na₂CO₃ é misturado com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), que causa a formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) sólido, enquanto o NaOH é regenerado. Este é, então, levado de volta para a coluna de absorção para que a etapa inicial possa acontecer novamente. Na sequência, o CaCO₃ passa por um forno calcinador, no qual é aquecido, a uma temperatura próxima de 900 °C, para que haja a liberação do CO₂. Os resultados dessa reação são a cal (CaO) e o CO₂. Este último é coletado e o CaO misturado com água para voltar à forma de Ca(OH)₂, o que finaliza o ciclo do DAC HT (Fasihi et al., 2019; Keith et al., 2018).

O **DAC LT** ou de sorvente² sólido funciona de forma semelhante ao anterior. Em temperatura ambiente, o ar atmosférico é levado a entrar em contato com um filtro, de forma espontânea ou por meio de auxílios, e pode ser composto por um polímero sólido ou fibra de celulose, ambos baseados em amina. As moléculas de CO₂ acabam retidas pelo sorvente, juntamente com umidade, característica que permite que esta modalidade de DAC produza a água para o seu próprio uso. O ar livre de CO₂ é, então, liberado de volta à atmosfera. Quando o filtro está saturado, as válvulas de entrada são fechadas e os ventiladores desligados (caso tenham sido utilizados) e a pressão do sistema é reduzida. A depender do tipo de sorvente, na fase da regeneração, o sistema é aquecido a temperaturas que variam entre 85-100 °C para que o CO₂ se desprenda e possa ser coletado (Beuttler *et al.*, 2019).

É na fase de regeneração que reside a maior parte do custo de operação do DAC, pois esta exige grandes quantidades de energia térmica para acontecer. Chega a consumir 2.250 kWh, a cada tonelada de CO₂, somado a cerca de 400 kWh, caso seja utilizada ventilação ativa para introduzir o ar atmosférico na usina. Devido às temperaturas menores, o gasto energético do DAC LT é de \cong 1440 kWh, consideravelmente, inferior ao DAC HT, \cong 2.250 kWh, o que torna a primeira uma alternativa mais atrativa. Portanto, o uso de fontes de energia renováveis representa uma parte central da operação dessa tecnologia, uma vez que utilizar fontes não renováveis traria consigo emissões residuais (Beuttler *et al.*, 2019).

Atualmente, existem somente 27 usinas DAC em operação, em diferentes regiões do mundo. A “Orca”, da empresa suíça Climeworks, é uma delas e utiliza sua forma de DAC LT com energia renovável, possui a capacidade de capturar 4 mil toneladas de CO₂. Esses números relativamente pequenos, no entanto, a demanda por CO₂ de origem atmosférica tem crescido rapidamente, e diversos projetos de plantas maiores têm sido anunciados. Planos para a construção de pelo menos 130 usinas DAC estão, atualmente, em vários estágios de desenvolvimento. A mesma empresa planeja inaugurar uma usina apta a remover 37 mil toneladas, anualmente, na Islândia. Enquanto nos EUA, será construída a

² Sorventes ou solventes são materiais sólidos capazes de reter compostos químicos em sua estrutura. Eles, preferencialmente, contam com uma superfície porosa para que sua área de contato seja ampliada.

“DAC 1”, inicialmente, com objetivo de capturar 500 mil toneladas, todos os anos, e expandir para 1Mt, posteriormente. Se todos os projetos planejados forem realizados e operarem em plena capacidade, o potencial de captura de DAC poderia chegar a cerca de 4,7Mt de CO₂ por ano até 2030 (Direct Air, 2022).

4.5 UTILIZAÇÃO DO DAC

Uma vez retirado da atmosfera, o CO₂ pode seguir basicamente por dois caminhos. A primeira possibilidade é seu uso em uma ampla gama de aplicações. Diretamente, ele pode ser utilizado como fertilizante na agricultura, ou na fabricação de bebidas carbonatadas, como refrigerantes, cervejas e água gaseificada. De forma indireta, ele pode funcionar como componente químico na fabricação de novos produtos, como polímeros, materiais da construção civil e na produção de combustíveis sintéticos. Dessa forma, o DAC funciona como uma tecnologia de neutralização das emissões, uma vez que elimina a necessidade de explorar fontes naturais de carbono fóssil (poços de petróleo, gás natural) e liberar novas quantidades de CO₂ no ar livre para manufaturar esses produtos. O impacto dessa prática pode variar bastante, de acordo com a longevidade dos produtos gerados, enquanto o CO₂ utilizado para combustíveis sintéticos volta para a atmosfera rapidamente, já aquele utilizado em produtos de grande longevidade (como o concreto) podem ter um impacto muito mais positivo na redução do aquecimento global (Temmerman; Rochette, 2023).

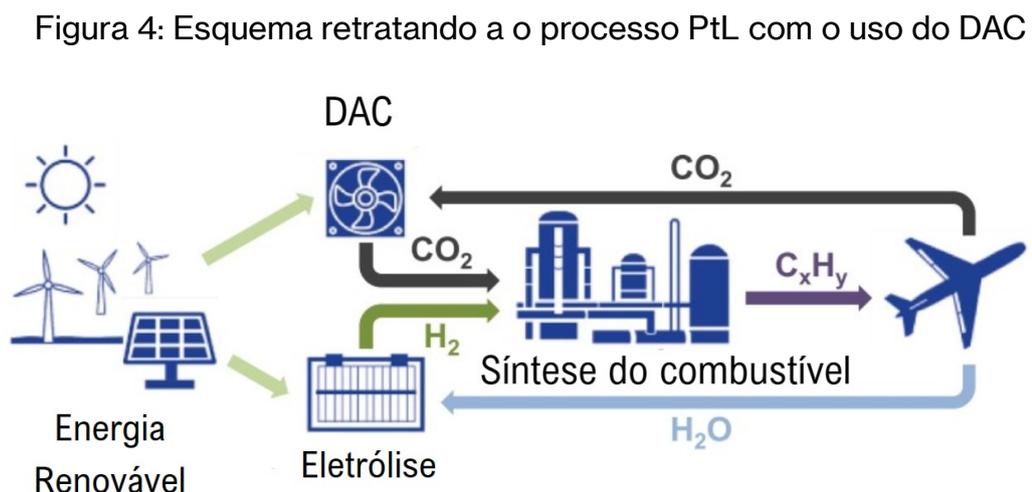
A segunda possibilidade é transformar o CO₂ em um líquido de alta densidade e bombeá-lo por meio de canos até reservatórios geológicos subterrâneos, como antigas salinas, poços de petróleo ou gás natural esgotados. Armazenado nesses locais, o gás deixa de causar impactos negativos na atmosfera, como o efeito estufa. A natureza das usinas DAC permite sua instalação em locais distantes dos centros urbanos, ou até sobre os locais de armazenamento, o que reduz os custos de transporte e elimina a obrigatoriedade de longos e dispendiosos sistemas de encanamento para levar o CO₂ até eles. Ademais, esse tipo de aplicação permite que ocorra o monitoramento preciso das quantidades de gás removido, e permite

sua captura de forma contínua, uma vez que a instalação se encontrar estabelecida. Isso faz com que essa seja uma das maneiras mais interessantes para reduzir os impactos das emissões antropogênicas sobre a atmosfera (Temmerman; Rochette, 2023).

4.6 QUEROSENE SINTÉTICO

Combustíveis *Power-to-Liquid* (PtL) são formados basicamente por meio da síntese de CO_2 e hidrogênio (H_2), utilizando energia elétrica, o que leva à produção de hidrocarbonetos em forma líquida. A síntese em questão, é baseada no processo de Fischer-Tropsch (FT), que envolve a introdução de um catalisador, geralmente metálico, a temperaturas que variam entre $150\text{ }^\circ\text{C}$ e $300\text{ }^\circ\text{C}$ para desencadear uma série de reações químicas, que resultam em um líquido bruto de CO e H_2 ou hidrocarbonetos líquidos (Power-to-liquids, 2021).

Para que esses combustíveis sejam considerados sustentáveis, é necessário que algumas demandas sejam cumpridas. A começar pela energia, esta deve ser exclusivamente proveniente de fontes renováveis, como fotovoltaicas ou eólicas (Figura 4) (Drünert, 2020).



Fonte: Adaptada de Drünert (2020).

O CO₂ precisa ser reaproveitado das emissões de fábricas ou indústrias em geral, ou retirado diretamente da atmosfera com o uso do DAC. Enquanto o H₂ pode ser produzido por uma ampla gama de processos, em que o principal deles é a eletrólise, também utilizando energias de fontes limpas. Finalmente, esses recursos passam pela síntese FT, e geram um subproduto que pode ser, posteriormente, química e fisicamente modificado, em uma ampla gama de combustíveis, que inclui o querosene aeronáutico (Drünert, 2020).

O querosene sintético, produzido por meio do PTL, é visto como uma alternativa promissora para alcançar o *net-zero* na aviação, uma vez que possui propriedades de combustão melhoradas e ajuda a reduzir as emissões no setor. Somado a isso, ele possui a vantagem de poder ser transportado e distribuído por meio da infraestrutura já empregada, na atualidade, para combustíveis fósseis, sem necessitar do redesenho das estruturas aeroportuárias em funcionamento, que incluem redes de tubulações e estações de abastecimento (*Power-to-liquids*, 2020).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Há um consenso crescente de que a captura de CO₂ terá um papel central na descarbonização da aviação. Em um relatório recente, apoiado por grandes líderes de linhas aéreas globais e assinaturas, que incluem mais de um terço da indústria, o DAC foi destacado como uma solução-chave para a descarbonização do setor. A indústria da aviação, como um setor de difícil descarbonização, não é capaz de remover todo o CO₂ lançado por ela na atmosfera, diretamente da fonte. Contudo, o DAC associado com o armazenamento seguro desse gás no solo poderia realizar tal feito, remotamente, sem a necessidade de modificar as aeronaves. Isso permite a retirada de uma quantidade equivalente de CO₂, daquela emitida, e contrabalancear suas emissões residuais, em uma forma de *offsetting*, diretamente do ar (Ravishankara, 2023).

Conforme já citado, o setor da aviação é altamente dependente do uso de combustíveis fósseis e, provavelmente, permanecerá dessa maneira por um tempo,

seja pelas limitações das alternativas ou por estas estarem em um estágio de desenvolvimento embrionário. A produção em larga escala dos biocombustíveis necessitará de severas mudanças no uso das terras, e as aeronaves elétricas ainda enfrentam diversos desafios técnicos para se tornarem viáveis. Além disso, a produção de combustíveis sintéticos pode se beneficiar da produção extra de CO₂. Portanto, o DAC pode se provar uma tecnologia crucial na transição do setor em direção a um sistema energético limpo, cobrir uma possível demanda de outras alternativas e mitigar alguns dos prováveis impactos negativos de suas respectivas adoções (Galimova *et al.*, 2022).

Devido a esses fatores, a Airbus anunciou seu investimento na Carbon Engineering, uma das mais antigas empresas especializadas no desenvolvimento de tecnologias de captura de CO₂ da atmosfera. Esse investimento faz parte dos esforços da fabricante francesa em reduzir a pegada de carbono de suas aeronaves e ajudará a Carbon Engineering a aumentar a escala de sua tecnologia DAC. Simultaneamente, a Airbus estabeleceu uma parceria com a 1PointFive, outra empresa do ramo e subsidiária da anterior, para explorar o potencial do DAC na indústria da aviação. A parceria tem como foco avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização da captura de CO₂ para a produção de combustíveis sustentáveis e, assim, reduzir os impactos negativos de suas aeronaves no planeta. Em um esforço para atingir metas de emissões zero estabelecidas pela União Europeia, a gigante francesa ainda se juntou a uma iniciativa conjunta entre a comissão europeia e outras fabricantes aeronáuticas para desenvolver novas tecnologias DAC, além de fazer parcerias com companhias aéreas para garantir créditos de remoção de carbono (Power-to-liquids, 2022; Ravishankara, 2023)

Da mesma forma, o DAC tem despertado o interesse de diversas linhas aéreas, como o grupo LATAM, Air Canada, Air France, Lufthansa, Virgin Atlantic que, recentemente, assinaram cartas de intenção de investigar a potencial compra de créditos de remoção de carbono advindos da tecnologia entre 2025 e 2028. Tais créditos seriam disponibilizados pela 1PointFive, que planeja construir uma planta industrial DAC no Texas, EUA que, segundo a empresa, será capaz de capturar 1 milhão de toneladas de CO₂ anualmente. Sua parceria com a Airbus já

inclui a compra de créditos correspondentes a 400T do gás, em um período de quatro anos. A United Airlines também demonstrou interesse na produção de querosene sustentável com o uso de CO₂ removido da atmosfera, ao investir 5 milhões de dólares em uma startup que tem desenvolvido sua própria tecnologia DAC, com a expectativa de compensar 10% de suas emissões totais (Foster, 2023; Shepardson, 2022)

É fato que as contribuições anuais da aviação para a emissão de CO₂ na atmosfera são relativamente pequenas, cerca de 2,4%, quando observadas de um ponto de vista mais amplo. Contudo, o crescimento da demanda por voos somada à descarbonização de outros setores poderá tornar essa parcela cada vez maior (Lee *et al.*, 2018).

Os resultados desta pesquisa indicaram que alcançar a neutralidade das emissões é fundamental para que os limites estabelecidos pelo IPCC não sejam ultrapassados. Somado a isso, foi observado que a aviação é altamente dependente da utilização de combustíveis fósseis, o que a torna uma indústria de difícil mitigação das emissões de CO₂. Ainda assim, foi firmado um compromisso de atingir o *net-zero* nas próximas décadas, a partir de múltiplas técnicas e alternativas, como os SAFs e otimizações nas aeronaves.

Percebeu-se que a tecnologia DAC se mostrou uma ferramenta promissora para atender as demandas do setor aeronáutico em se tornar mais sustentável. Sua capacidade de capturar as emissões causadas pelas aeronaves e armazená-las no solo ou utilizá-las para a manufatura de um combustível renovável a tornam muito propícia para o setor como um todo. Contudo, para que ela de fato neutralize as emissões anuais da aviação de quase 1.000 milhões de toneladas de CO₂, é preciso que sua escala aumente consideravelmente. Mas ainda que não seja a solução definitiva para o problema abordado, o DAC pode servir de suporte para as alternativas propostas pela IATA.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa está inserida no contexto em que o aquecimento global, somado às mudanças climáticas representa uma grave ameaça ao ecossistema e a sobrevivência humana no planeta, e que o constante aumento da concentração de CO₂ é o principal responsável por tais fenômenos. Desse modo, o objetivo foi identificar os impactos das emissões de GEE e as possíveis alternativas e estratégias a serem exploradas para contê-los na aviação, especialmente, a técnica de captura de CO₂, diretamente do ar.

Dado o atual estado de dependência do setor nos combustíveis de origem fóssil, atingir um estado de completa descarbonização do setor mais se assemelha à uma utopia. Não há solução simples para o problema abordado, todas as alternativas propostas têm o potencial de causar um grande impacto no crescimento e redução nas receitas do setor.

O net-zero, provavelmente não será alcançado por meio de uma única solução. No estágio de desenvolvimento em que a tecnologia DAC se encontra, apesar de trazer extensas contribuições, esta ainda não é capaz de suprimir as emissões da aviação em sua totalidade. Porém, por meio ampla adoção de múltiplas alternativas de forma conjunta e gradual, como os SAFs, motores elétricos, DAC e futuramente o hidrogênio, é possível que esta neutralidade seja alcançada.

Por fim, é preciso ressaltar que o escopo da pesquisa e suas ramificações são amplas e suas fontes estão longe de terem sido esgotadas. Como sugestão de desdobramento do tema em pesquisas futuras, sugere-se abordar a possibilidade da exploração da tecnologia DAC no contexto brasileiro, considerando que o país dispõe de uma robusta infraestrutura de geração de energia elétrica e poderia projetá-la em escalas superiores, o que pode diminuir seus custos e, potencialmente, beneficiar a sua economia.

REFERÊNCIAS

ADAMI, R. *et al.* Alternative fuels for aviation: possible alternatives and practical prospects of biofuels. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. p. 012113. Acesso em: 1 out. 2023.

ALEXANDER, S.; BAUMANN, A. Towards the 'Walden wage'. *The Ecologist*. 4 mar. 2020. Disponível em: <https://theecologist.org/2020/mar/04/towards-waldenwage>. Acesso em: 19 ago. 2023

ASSAD, E. D. *et al.* Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. *In: BUNGENSTAB, D. J. et al. ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*. Brasília: Embrapa, Cap. 11, p. 153-167, 2019.

BECANTINNI, V.; GABRIELLI, P.; MAZZOTTI, M. Role of Carbon Capture, Storage, and Utilization to Enable a Net-Zero-CO₂-Emissions Aviation Sector. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Zurique, Suíça, v. 60, n. 18, p. 6848-6862, 5 jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05392>.

BEUTTLER, C.; CHARLES, L.; WURZBACHER, J. The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in climate*, [S.l.], v. 1, 21 nov. 2019. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>.

BORDINI, G.; SOUZA, I. M. A influência de São Francisco de Assis na Laudato Si'. *Caderno Intersaberes*, [S. l.], v. 9, n. 19, 2020. Disponível em: <https://www.cadernosuninter.com/index.php/intersaberes/article/view/1506>. Acesso em: 13 set. 2023.

CARVALHO, G. O. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma visão contemporânea. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 789–792, 2019. DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019789-792.

DIRECT AIR Capture – Energy System – IEA. *IEA, Agência Internacional de Energia*, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>. Acesso em: 25 nov. 2023.

DRÜNERT, Sebastian; NEULING, Ulf; ZITSCHER, Tjerk; KALTSCHMITT, Martin. Power-to-Liquid fuels for aviation – Processes, resources and supply potential under German conditions. *Applied Energy*, [S.l.], v. 277, p. 115578, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115578>.

ERANS, M.; SANZ-PÉREZ, E. S.; HANAK, D.P.; CLULOW, Z.; REINER, D. M.; MUTCH, G. A.. Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges. **Energy & Environmental Science**, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 1360-1405, 2022. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d1ee03523a>.

FASIHI, M.; EFIMOVA, O.; BREYER, C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 224, p. 957–980, 1 jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

FANKHAUSER, S. *et al.* The meaning of net zero and how to get it right. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 1, p. 15–21, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01245-w>. Acesso em: 20 set. 2023.

FIGUEIREDO, **Avaliação da Tecnologia de Captura Direta de CO₂ como opção de mitigação climática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa 2022. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/141308>. Acesso em: 26 out. 2023.

FOSTER, J. United Airlines Invests \$5 Million In Svante As Part Of Carbon Capture Drive. **Simple Flying**, [S.l.], 30 mar. 2023. Disponível em: <https://simpleflying.com/united-airlines-svante-carbon-capture-investment/>. Acesso em: 30 out. 2023.

GALIMOVA, T.; RAM, M.; BOGDANOV, D.; FASIHI, M.; KHALILI, S.; GULAGI, A.; KARJUNEN, H.; MENSAH, T. N. O.; BREYER, C. Global demand analysis for carbon dioxide as raw material from key industrial sources and direct air capture to produce renewable electricity-based fuels and chemicals. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 373, p. 133.920–133.920, 1 nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133920>.

HOUSE, K. Z.; BACLIG, A. C.; RANJAN, M.; VAN NIEROP, E. A.; WILCOX, J.; HERZOG, H. J. Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S.l.], v. 108, n. 51, p. 20.428–20.433, 5 dez. 2011. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1012253108>.

JIANG, L. *et al.* Sorption direct air capture with CO₂ utilization. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v. 95, p. 101069, mar. 2023. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101069>. Acesso em: 19 ago. 2023.

KEITH, D. W.; HOLMES, G.; DAVID ST. ANGELO; HEIDEL, K. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. **Joule**, [S.l.], v. 2, n. 8, p. 1.573–1.594, 1 ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>.

LEE, D. S. *et al.* The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. **Atmospheric Environment**, [S.l.], v. 244, p. 117834–117834, 1 jan. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* Global Warming of 1.5°C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/> Acesso em: 4 set. 2023.

MIRANDA, R. Da Mística à Ecologia: uma análise sobre a vida de São Francisco de Assis em uma perspectiva ecológica. **Religare: Revista do Programa de Pós-Graduação em Ciências das Religiões da UFPB**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 484–516, 2022. DOI: 10.22478/ufpb.1982-

MOURA, L. A. A. **Qualidade e gestão ambiental**. Belo Horizonte: Del Rey, 2011.

MUKHOPADHAYA, J.; GRAVER, B. **Performance analysis of regional electric aircraft**. International Council on Clean Transportation, 13 jul. 2022. Disponível em: <https://theicct.org/publication/global-aviation-performance-analysis-regional-electric-aircraft-jul22/>. Acesso em: 24 nov. 2023.

NET ZERO Roadmaps Aircraft – Technology Net Zero Roadmap. **IATA, International Air Transport Association**. 2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/programs/environment/roadmaps/>. Acesso em: 13 out. 2023.

OLIVEIRA, M. M. **Como fazer pesquisa qualitativa**. Petrópolis, Vozes, 2007.

OLIVEIRA, M. M. D. *et al.* **Cidadania, meio ambiente e sustentabilidade**. Caxias do Sul: Educs, 2017.

ORCA is Climeworks' new large-scale carbon dioxide removal plant. **Climeworks**, 2021. Disponível em: <https://climeworks.com/plant-orca>. Acesso em: 25 nov. 2023.

POWER-TO-LIQUIDS, explained. **AIRBUS**. 2021. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-07-power-to-liquids-explained>. Acesso em: 18 out. 2023.

PAVLENKO, N. ; SEARLE, S. Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels. Master Thesis Report (Master of Science in Complex Systems Engineering and Management) – Delft University of Technology Holand, 2023. Disponível em: <https://www.in.gr/wp-content/uploads/2022/01/%CE%AD%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%B7.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

RAVISHANKARA, A. **Institutional Analysis of Direct Air Capture in the context of Aviation Sustainability**. Master Thesis Report (Master of Science in Complex Systems Engineering and Management) – Delft University of Technology Holand, 2023. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:c56964d4-3dc5-47ae-9cb4-4e82eac63d13>. Acesso em: 29 out. 2023.

REISCH, R. D. N. O potencial brasileiro para gerar créditos de carbono através da conservação florestal, reflorestamento e produção agrícola sustentável. **Humboldt – Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 1, n. 3, 2022. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/humboldt/article/view/61662>. Acesso em: 18 out. 2023.

ROYAL SOCIETY climate change briefings. **The Royal-Society**, 18 nov. 2019. Disponível em: <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/royal-society-climate-change-briefings/>. Acesso em: 24/11/2023.

SHEPARDSON, D. Airbus, airlines to explore carbon capture technology. **Reuters**, [S. l.], 18 jul. 2022. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/airbus-airlines-explore-carbon-capture-technology-2022-07-18/>. Acesso em: 30 out. 2023.

SINNETT, M. 787 No-Bleed Systems: saving fuel and enhancing operational efficiencies. **AERO Magazine**, [S. l.], 2007. Disponível em: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/AERO_Q4_07_article2.pdf. Acesso em: 26 out. 2023.

SODIQ, A. *et al.* A review on progress made in direct air capture of CO₂. **Environmental Technology and Innovation**, [S. l.], v. 29, p. 102991–102991, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2022.102991>.

STATE of the Climate in 2018 shows accelerating climate change impacts. **WMO**, World Meteorological Organization. 28 mar. 2019. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2018-shows-accelerating-climate-change-impacts>. Acesso em: 26 out. 2023.

STONE, M. Plato, environmental sustainability, and social justice. **Athens Journal of Humanities & Arts**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 105-118, 29 dez. 2017. Athens Institute for Education and Research ATINER. <http://dx.doi.org/10.30958/ajha.5.1.6>.

TEMMERMAN, G.; ROCHETTE, F. The CDR series: Direct Air Capture (DAC). **Hal.science**, p. 16, 2023. Disponível em: <https://hal.science/hal-03947547/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

TIMMONS, D.; TERWEL, R. Economics of aviation fuel decarbonization: A preliminary assessment. **Journal of Cleaner Production**, [S./], v. 369, p. 133.097–133.097, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133097>.