

ENERGIA ALTERNATIVA NA AVIAÇÃO: panorama e desafios

Breno Ferreira Pereira  0009-0001-5323-4703

Primeiro Esquadrão do Décimo Primeiro Grupo de Aviação, Base Aérea de Natal, BANT, Parnamirim, RN, Brasil

Luiz Gustavo Antonio de Souza  0000-0002-6937-8576

Departamento de Economia do Instituto de Ciências da Sociedade e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal Fluminense, UFF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Camila Bezerra Calherani Cavalcante  0009-0005-2810-7509

Secretaria da Divisão de Ensino da Academia da Força Aérea, Academia da Força Aérea, AFA, Pirassununga, SP, Brasil

RESUMO

A atual matriz energética global, fortemente dependente de combustíveis fósseis, é insustentável, sendo a principal responsável pela degradação atmosférica e pelo aquecimento global. O transporte aéreo tem aumentado significativamente ao redor do mundo nos últimos anos. No Brasil, o número de voos domésticos e internacionais cresceu 69% de 2009 a 2018. O setor da aviação contribui com aproximadamente 2% da emissão de gases de efeito estufa, uma parcela relativamente pequena do total de emissões na atmosfera. Nesse contexto, a utilização de novas fontes de energia na aviação se faz necessária a fim de mitigar os efeitos negativos da queima dos combustíveis fósseis e para aumentar a sustentabilidade da atividade de transporte aéreo. Este artigo busca responder qual o potencial para a adoção de fontes alternativas de energia em aeronaves no futuro. O objetivo deste artigo é analisar os desafios e oportunidades das energias alternativas, verificando o atual desenvolvimento dessas tecnologias sustentáveis e das barreiras a serem superadas a fim de competirem com a utilização dos combustíveis fósseis. O procedimento metodológico utilizado é de natureza exploratória com base em literatura especializada. Conclui-se que há diversos desafios para que todas as tecnologias abordadas se tornem acessíveis para utilização em escala comercial. Não obstante, passos importantes têm sido realizados, permitindo o surgimento de um maior número de inovações tecnológicas com vistas a um futuro com menor dependência do petróleo e de seus derivados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Energia Alternativa, Combustível, Emissão de Gases.

ALTERNATIVE ENERGY IN AVIATION: perspective and challenges

ABSTRACT

The current global energy matrix, heavily dependent on fossil fuels, is unsustainable and the main cause of atmospheric pollution and global warming. Air transportation has significantly increased worldwide in recent years. In Brazil, the number of domestic and international flights grew by 69% between 2009

and 2018. The aviation sector contributes approximately 2% to greenhouse gas emissions, a relatively small portion of the total global emissions. In this context, the use of new energy sources in aviation is necessary to mitigate the negative effects of fossil fuel combustion and increase the sustainability of the aviation industry. This article seeks to answer what is the potential for the adoption of alternative energy sources for aviation in the future. The objective of this article is to analyze the challenges and opportunities of alternative energies, examining the current development of these sustainable technologies and the barriers to be overcome in order to compete with the use of fossil fuels. The methodological procedure used is exploratory in nature, based on specialized literature. It is concluded that there are several challenges for all the technologies discussed to become accessible for commercial use. Nevertheless, important steps have been taken, allowing for the emergence of a greater number of technological innovations aimed at a future with less dependence on oil and its derivatives.

Keywords: Sustainability, Alternative Energy, Fuel, Gas Emissions.

ENERGÍA ALTERNATIVA EN LA AVIACIÓN: panorama y desafíos

RESUMEN

La matriz energética global actual, fuertemente dependiente de combustibles fósiles, es insostenible y es la principal responsable de la degradación atmosférica y del calentamiento global. El transporte aéreo ha aumentado significativamente en todo el mundo en los últimos años. En Brasil, el número de vuelos nacionales e internacionales aumentó un 69% entre 2009 y 2018. El sector de la aviación contribuye aproximadamente con el 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero, una parte relativamente pequeña del total de emisiones en la atmósfera. En este contexto, es necesario utilizar nuevas fuentes de energía en la aviación para mitigar los efectos negativos de la quema de combustibles fósiles y aumentar la sostenibilidad de la actividad del transporte aéreo. Este artículo busca responder si existe potencial para la adopción de fuentes alternativas de energía en las aeronaves en el futuro. El objetivo de este artículo es analizar los desafíos y oportunidades de las energías alternativas, examinar el desarrollo actual de estas tecnologías sostenibles y las barreras que deben superarse para competir con el uso de los combustibles fósiles. El procedimiento metodológico utilizado es de naturaleza exploratoria basado en literatura especializada. Se concluye que existen diversos desafíos para que todas las tecnologías abordadas sean accesibles para su uso a escala comercial. No obstante, se han dado pasos importantes, lo que ha permitido el surgimiento de un mayor número de innovaciones tecnológicas con miras a un futuro con una menor dependencia del petróleo y sus derivados.

Palabras clave: Sostenibilidad, Energías Alternativas, Combustible, Emisiones de Gases.

1 INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial a humanidade teve pouca preocupação com os resíduos provenientes das indústrias, especialmente os provenientes do uso de combustíveis fósseis, os quais, para o crescimento econômico, tiveram seu uso intensificado ao longo

do tempo. Desde o ano de 1750 as emissões passaram de 280¹ ppm para 400 ppm, com cerca de 9 milhões de toneladas de CO₂ injetados na atmosfera anualmente (Goldemberg, 2000; Artaxo, 2014).

Não obstante, o debate acerca do fenômeno conhecido como mudanças climáticas intensificou-se na década de 90 diante das alterações no clima que não podiam ser explicados como fenômenos regulares, isto é, atípicos para o padrão terrestre. Especificamente, o Protocolo de Kyoto foi um tratado internacional assinado em 1997 com a intenção de obrigar as nações industrializadas a reduzirem as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Souza, 2013; Gupta, 2016).

Os GEE absorvem e refletem energia na baixa atmosfera, sendo que, dentre os derivados de emissão antropogênica destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), gases destruidores da camada de ozônio, hidrofluorcarbonetos (HFC), hexafluoreto de enxofre (SF₆) e perfluorcarbonetos (PFC). Destes, a maior contribuição do aumento do CO₂ é proveniente da queima de combustíveis fósseis (Montzka *et al.*, 2011), além do vapor d'água (Molion, 2023). Em 2021, petróleo e derivados representavam 29,5% da matriz energética mundial, seguidos do carvão mineral (26,8%) e gás natural (23,7%) (IEA, 2020).

A aviação produz cerca de 2% de toda a emissão de CO₂ antropogênico, sendo 915 mil toneladas em 2019. O sistema a jato da aeronave emite de 5% a 6% de CO₂, 2% de vapor d'água, 0,03% de óxidos nitrosos, hidrocarbonetos não queimados, óxidos sulfurosos, traços da família hidroxílica e compostos nitrogenados e uma pequena quantidade de fuligem, entre 91,5% e 92,5% do que o sistema da aeronave exausta é oxigênio atmosférico e nitrogênio (Iata, 2019; Mathys, *et al.* 2021). Tais emissões são mais danosas e prejudiciais se comparadas às diversas outras fontes; isso ocorre devido aos gases lançados pelas aeronaves intensificarem mais os efeitos do dióxido de carbono, em virtude de serem lançados em elevadas altitudes (alta troposfera e baixa estratosfera). Essa incidência de gases diretamente nas altas camadas da atmosfera é difícil de ser quantificada e torna-se difícil concluir as reais consequências (IPCC, 1999).

Em outra perspectiva, o setor da aviação pode contribuir com a redução do GEE com a utilização de fontes de energia alternativa que atuam no sistema propulsor da aeronave, permitindo a substituição parcial ou total dos combustíveis fósseis. Atualmente, as melhores alternativas disponíveis são a utilização de biocombustíveis, energia elétrica e energia solar no sistema propulsor. Tais tecnologias já são realidade, como por exemplo: i) o Solar Impulse 2 que deu uma volta ao mundo somente com a energia proveniente do sol; e ii) a aeronave Ipanema da Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A – EMBRAER a qual é abastecida com etanol, biocombustível renovável de origem agrícola.

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2019) há perspectivas de crescimento do setor de transporte aéreo para os próximos anos, o que implicará em um aumento no consumo de combustível de aviação (gasolina e querosene de aviação).

¹ Concentração atmosférica em partes por milhão (ppm).

Fato que ressalta a importância do desenvolvimento de inovações tecnológicas que garantam maior sustentabilidade ao setor de transporte aéreo.

Apesar de tais tecnologias gerarem grande expectativa de sustentabilidade, ainda existe um hiato de eficiência dos biocombustíveis se comparados com os combustíveis de origem fóssil, seja pelo custo de produção, potência do motor, autonomia ou capacidade que as aeronaves possuem.

Nesse contexto, este trabalho tem o propósito de responder se: há potencial para a adoção de fontes alternativas de energia em aeronaves no futuro? Para responder esta questão o estudo tem por objetivo analisar os desafios e oportunidades das energias alternativas, verificando o atual desenvolvimento dessas tecnologias sustentáveis e das barreiras a serem superadas em um futuro próximo a fim de competirem com a utilização dos combustíveis fósseis.

O procedimento metodológico utilizado nesta pesquisa foi de natureza exploratória com base em literatura especializada, analisando dados e a manifestação de seus fenômenos, de conclusões originais de diversos autores de artigos científicos, monografias e livros relacionados à temática, páginas oficiais do governo, revistas científicas brasileiras e estrangeiras; ademais, também serão consultados documentos institucionais nacionais da ANAC e legislações da política energética nacional, além de relatórios e portfólios de instituições internacionais.

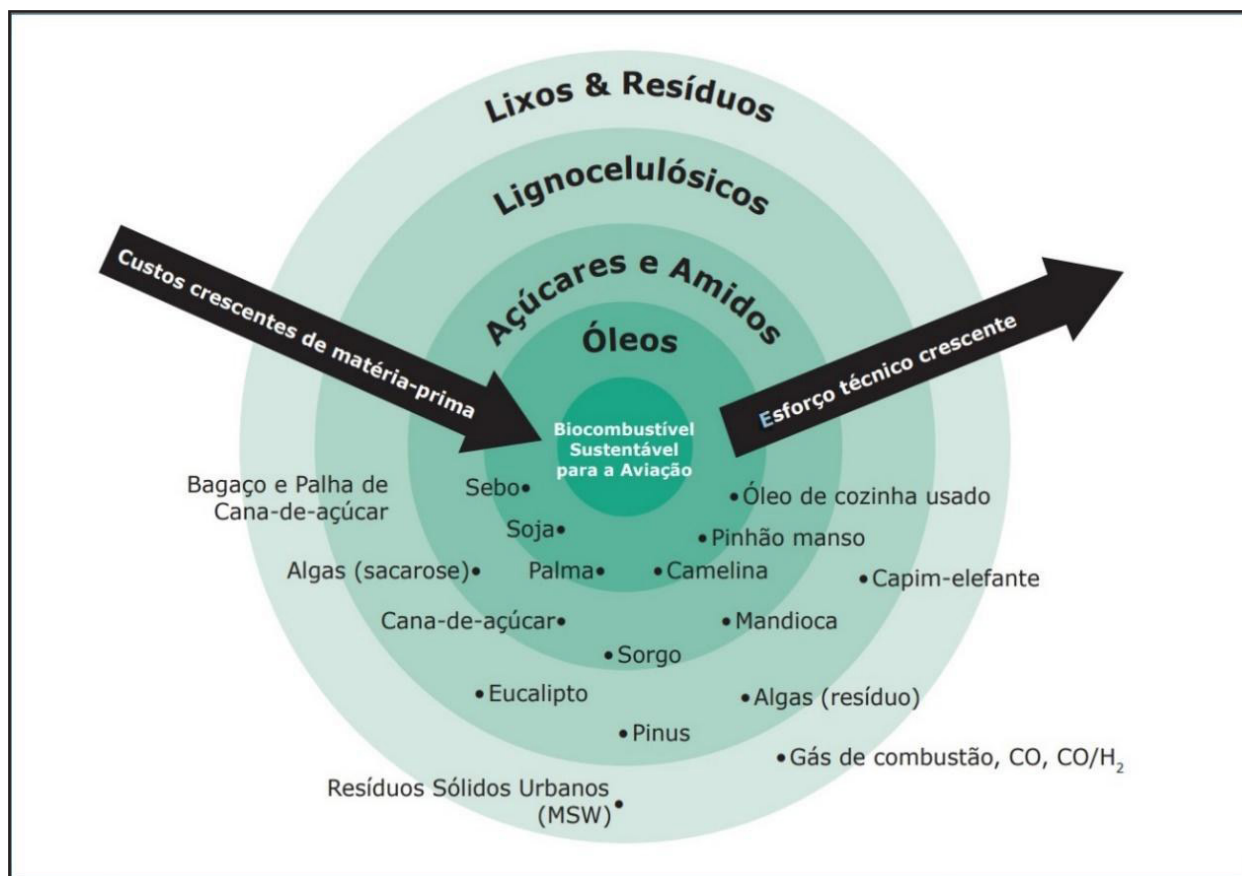
Este artigo está estruturado em cinco seções incluindo esta introdução. Na seção dois apresenta-se uma breve revisão acerca do tema de biocombustíveis e sua utilização em aeronaves. Na seção três apresenta-se a energia elétrica como alternativa ao setor de transporte aéreo. Na quarta seção apresenta-se a potencialidade da energia solar. As considerações finais são apresentadas na quinta seção.

2 BIOCOMBUSTÍVEIS

Segundo APROBIO (2019), os biocombustíveis são todo material de origem orgânica e biológica não fóssil, em geral produzidos com base em um ou mais de um tipo de produtos agrícolas, como por exemplo a cana-de-açúcar, alga marinha, milho e soja, entre outros. São conhecidos como fontes de energia limpa e alternativa, porque, apesar de também emitirem CO₂ na atmosfera, o dano é reduzido por conta de seu ciclo produtivo, uma vez que a matéria-prima utilizada tem origem de plantas que absorvem o gás carbônico em sua vida e compensam o produto da combustão na forma do carbono jogada na atmosfera (Betioleto, *et al.*, 2009). Sua utilização para produção de energia constitui no aproveitamento do processo de combustão, assim como nos combustíveis fósseis.

Segundo Cortez *et al.* (2014), diversas matérias-primas podem ser utilizadas na produção de biocombustíveis para o setor da aviação. Entretanto, a escolha necessita do cumprimento de certos requisitos como: possuir baixa emissão direta e indireta de poluentes, eficiência no uso da terra, consequências sociais e econômicas positivas, baixo custo de refinamento, alto poder energético e uma eficiente produção. A Figura 1 exemplifica que quanto mais perto do centro, mais cara é a matéria-prima, porém mais fácil ou menos cara é a tecnologia de conversão.

Figura 1 - Matérias-primas e sua posição relativa segundo custos e esforços técnicos para serem convertidas em biocombustível para a aviação.



Fonte: FAPESP (2013, p. 33).

O Querosene de Aviação (QAV) é o combustível utilizado nos motores à reação, presentes na grande maioria dos aviões comerciais e militares no mundo inteiro; para tanto, é necessário que esse combustível tenha algumas características desejáveis, seguras e eficientes para a operação aérea, dentre os quais podemos destacar a permanência no estado líquido e estar homogêneo até a zona de combustão das aeronaves, possuir resistência química e física às variações de temperatura e pressão, além de ter boa capacidade lubrificante (Garbin; Henkes, 2018).

Quanto aos processos de produção de bioquerosene mais utilizados atualmente, podemos citar 3: os processos químicos, através da transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais; processos bioquímicos, utilizando leveduras ou bactérias modificadas os quais metabolizam matérias açucaradas e acabam produzindo diversos hidrocarbonetos; e processos termoquímicos, envolvendo o craqueamento catalítico, gaseificação e síntese catalítica (Bonassa *et al.*, 2014).

Levando em consideração o contexto global, o novo acordo climático, Acordo de Paris (2015), permitiu delegar aos países elaborarem as suas próprias metas de redução de emissão de gases de efeito estufa. O setor da aviação criou suas metas de mitigação dos futuros efeitos climáticos, estabeleceu, através da Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO), o Esquema de Compensação e Redução para a Aviação Internacional, o CORSIA (Yoshinaga *et al.*, 2020). Especificamente, a meta é atingir o Crescimento Neutro em Carbono (CNG) desde

2000 de forma a reduzir em 50% as emissões líquidas de CO₂ sob níveis anteriores (2005) até o ano de 2050 (Soares e Cenamo, 2018).

O CORSIA será implementado em três etapas: i) 2021-2023; ii) 2024-2026; iii) a partir de 2027. Nas etapas um e dois contam com a adesão voluntária de países e companhias aéreas. Na etapa três conta com metas e medidas que serão obrigatórias para todos os países, com exceções de países pouco desenvolvidos e que não atinjam um percentual mínimo de contribuição das emissões totais no setor (Soares e Cenamo, 2018).

Para o Brasil, o CORSIA demonstraria uma oportunidade de explorar o crescente mercado de produção de bioquerosene. Entretanto, somente será possível a adesão do país na fase obrigatória do CORSIA, o que dificulta todo o processo (Yoshinaga *et al*, 2020). Outro programa que pode auxiliar o desenvolvimento de biocombustíveis e veio com a intenção de corroborar o cumprimento dos compromissos feitos no Acordo de Paris é o RenovaBio, o qual se trata de uma política nacional com o objetivo principal de promover a expansão dessa matriz energética no país, lançada pelo Ministério de Minas e Energia (Yoshinaga *et al*, 2020).

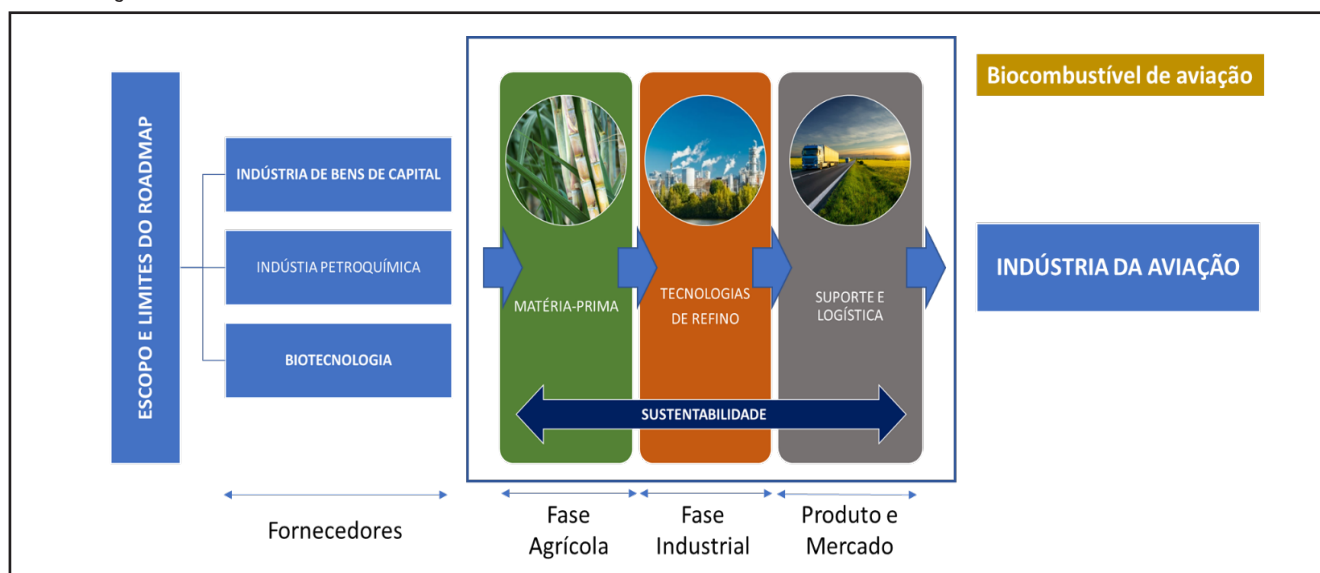
No caso brasileiro, o RenovaBio é uma iniciativa do Ministério de Minas e Energia (MME), de dezembro de 2016, e que visa expandir a produção de biocombustíveis, fundamentada na previsibilidade e sustentabilidade ambiental, econômica e social. Conta com metas de descarbonização para um período de dez anos com metas individuais para tipos de combustível fóssil (EPE, 2017). No processo são gerados Créditos de Descarbonização (CBIO) que podem ser negociados em bolsa de valores com a possibilidade de aquisição por distribuidoras a fim de que possam ser alcançadas as metas individuais compulsórias. Para esse fim, cada produtor e importador credenciado recebe uma nota inversamente proporcional à intensidade de CO₂ produzido.

Dentre as dificuldades em tornar o uso do bioquerosene uma realidade presente na aviação brasileira capaz de ser uma opção viável além do combustível tradicional, encontramos alguns desafios técnicos, econômicos e governamentais. Um outro requisito para utilização desse biocombustível é que ele precisa ser drop-in, isto é, é necessário que ele seja miscível com o querosene tradicional, sem que demande uma adaptação dos motores para o funcionamento do novo combustível, além de atender também às suas especificações técnicas. O que justifica esse requisito do biocombustível é o fato de uma única aeronave ter uma vida útil em torno de 35 a 50 anos e ainda possuir um custo de produção elevado, inviabilizando a substituição de toda a frota existente no mundo para utilização do biocombustível (Yoshinaga *et al*, 2020).

Ademais, outro desafio de implementação do biocombustível é o seu preço ainda ser mais alto que o do combustível fóssil, não tendo ainda a competitividade necessária no mercado. Para que o Brasil implemente o bioquerosene no setor aéreo é fundamental que haja investimentos por parte do governo, com a mediação de políticas públicas, a fim de desenvolver tecnologias de refino, logística de produção e distribuição em larga escala. Em relação às tecnologias identificadas até o momento como promissoras, é fato que exigirão um longo prazo até que seu preço se torne oportuno para produção em grande escala e, enfim, competir de igual com os combustíveis fósseis (Ribeiro; Ribeiro, 2019).

Para se ter uma ideia dos componentes do processo de produção do biocombustível até a entrega para o setor aeronáutico, a Figura 2 ilustra a linha de desenvolvimento, causa que justifica a grande parte do seu preço no mercado.

Figura 2 - Limites, componentes e principais fornecedores de biocombustíveis para a indústria da aviação.



Fonte: Adaptado de Cortez *et al.* (2014).

2.1 Testes em voo

Testes realizados tanto em solo quanto em voo demonstram que os biocombustíveis são preparados para oferecer desempenho igual ou até melhor que o combustível fóssil atual. Estudos mostram que os biocombustíveis em seu ciclo de vida são capazes de emitir em torno de 50% a 80% menos carbono em comparação ao combustível tradicional (Ribeiro; Ribeiro, 2019).

Muitas companhias aéreas têm feito voos de demonstração com o biocombustível sustentável, tanto no Brasil quanto no âmbito internacional. Em junho de 2012 a Companhia AZUL Linhas Aéreas fez um voo da aeronave Embraer E195 partindo de Campinas para o Rio de Janeiro utilizando biocombustível à base de cana-de-açúcar com uma mistura de 50% de Querosene comum. O combustível possui rendimento equivalente com o do tradicional, porém emitindo 82% menos carbono (Folhapress, 2012).

Além disso, a Qantas Airlines realizou o primeiro voo transatlântico abastecido com biocombustível sustentável na história em fevereiro de 2018, tendo duração de 15 horas e carregou 24 toneladas de combustível combinado, numa aeronave 787-9 Dreamliner. A empresa utilizou Brassica Carina como matéria-prima do combustível, espécie de semente de mostarda industrial desenvolvida pela Agrisoma Biosciences (Ramos, 2018).

Outrossim, a National Aeronautics and Space Administration – NASA também executou testes de eficiência dos biocombustíveis em diversas aeronaves, a exemplo do teste com um DC-8 e outras aeronaves que voaram acima de 40.000 pés no deserto da Califórnia, Estados Unidos no ano de 2013, com objetivo de analisar os efeitos de emissões de poluentes. A pesquisa comprovou uma redução de 52% de emissões de CO₂ quando utilizando um óleo biocombustível na proporção 50-50 com o jp-8 em relação à sua versão pura (Ribeiro; Ribeiro, 2019).

Desse modo, é possível constatar os resultados positivos, com desempenhos similares ao combustível tradicional e a plena possibilidade de substituir o querosene de origem fóssil de forma segura, contudo, para implementação do biocombustível é necessário superar seus desafios atuais para o setor da aviação.

3 ENERGIA ELÉTRICA

A aeronave com propulsão elétrica é um projeto totalmente diferente de uma aeronave movida à combustão interna, que utiliza combustível de origem fóssil. Os tanques de combustíveis agora são substituídos por conjuntos de células de baterias, fornecendo eletricidade para o motor atuar na propulsão do avião. O conjunto da hélice continua tendo o projeto similar, não sendo necessário alterações significativas. A energia utilizada para carregar as baterias podem ser fornecidas de diversas fontes: um gerador Eólico, uma usina fotovoltaica, uma rede usual de energia elétrica ou uma pequena estação hidroelétrica (Baharozu *et al.*, 2017).

Ressalta-se que

Os aviões a propulsão elétrica, disponíveis em 2018, e com certificações podem voar a uma velocidade de cruzeiro de 160 km/h e alcançar até 220 km/h. A propulsão elétrica é mais adequada em processos de decolagem e pouso, com maior torque e melhor controle de velocidade. Uma vez que não tem de levar combustível, conserva uma massa constante. Os aviões mencionados, no mercado atual são adequados às necessidades das escolas de aviação, com pouca pista para decolagem e pouso, pode ter uma razão de subida de 1.000 fpm e com a autonomia suficiente para uma hora de voo, além de 30 minutos de reserva de energia nas baterias (Aquino, 2018, p. 17).

No geral, a autonomia da aeronave depende, em grande parte, do quanto o conjunto de células de baterias consegue armazenar. Nesse caso, podendo ser abastecida somente em alguma estação de carregamento de energia elétrica. Isso significa que, quanto maior a capacidade da bateria de armazenamento de energia, maior será a autonomia, entretanto, quanto maior a capacidade, maior será o peso da bateria, conseqüentemente será mais exigida força de tração do motor para alçar voo. Nesse sentido, a característica que melhor transfigura essa relação é a densidade energética que, para considerar qual tipo de bateria seria melhor para se utilizar em uma aeronave elétrica, estabelece a relação de quantidade de energia possível de se armazenar pela massa do corpo da bateria.

Atualmente possuímos baterias capazes de apresentar uma densidade energética que varia de 250 a 700 Wh/kg, a exemplo das baterias de lítio, lítio-polímero e sulfato de lítio, entretanto ainda é insuficiente se comparada com os combustíveis fósseis como a gasolina de 13.000 Wh/kg (Safyanu *et al.*, 2019). Apesar do problema de insuficiência, ainda há perspectivas para o futuro das aeronaves elétricas: a utilização da bateria lítio-ar, que apresenta uma grande densidade energética teórica de 11.680 Wh/kg, o que chega a ser bem mais próximo da densidade energética dos combustíveis fósseis e consegue chegar mais próximo da capacidade da aviação existente. Atualmente a tecnologia ainda está em desenvolvimento para ser viável a aplicação na em veículos de passeio, porém é uma grande promessa de solução não somente limitada à aviação elétrica, mas também a diversas outras tecnologias elétricas do futuro (Safyanu *et al.*, 2019).



Um motor elétrico de alto rendimento consegue transmitir a mesma potência de saída que um motor convencional, entretanto utilizando uma potência de entrada menor, economizando mais energia. Dessa forma, a autonomia da aeronave elétrica é aumentada por consumir menos energia armazenada nas células de baterias, sendo possível realizar voos mais extensos ou gerar um custo de operação menor (Cleto *et al.*, 2012).

Liang (2015) apud Zanoni (2018) ressalta como vantajoso o uso dos motores elétricos de alto rendimento por: i) possuem um consumo menor de energia elétrica; ii) há maior fator de potência; iii) operam em temperaturas mais baixas; iv) evitam o sobre dimensionamento, entrega mais potência com menos espaço. Entre as vantagens econômicas, destaca-se que o motor de alto rendimento ter um preço de fabricação maior que o convencional, mas no longo prazo, devido à economia de eletricidade alcançada pelo tempo de operação, o investimento é recuperado.

3.1 Projetos de aeronaves elétricas

3.1.1 NASA X-57 Maxwell

A X-57 Maxwell é uma aeronave 100% elétrica e de tração por motores a hélice, ainda em desenvolvimento pela NASA (ver Figura 3). O projeto é baseado no avião Tecnam P2006T, um bimotor convencional movido à gasolina, de asa alta e para quatro ocupantes, no entanto a diferença é a substituição de seus dois motores por 14 motores elétricos, dentre esses, 2 motores são principais e localizados nas pontas das asas e os 12 restantes distribuídos ao longo das asas (NASA, 2020).

Os motores principais são capazes, cada um, de gerar 115 HP de potência e tem como grande objetivo operar a aeronave em voo de cruzeiro e interagir com o vórtex da asa. Os outros motores menores têm a função de acelerar o fluxo de ar nas asas melhorando a performance da aeronave a baixas velocidades (NASA, 2019).

O maior desafio do projeto são as baterias que alimentam e permitem aos motores elétricos da aeronave funcionarem. Neste sentido, a performance de uma bateria varia conforme o seu tamanho e temperatura. O processo de decolagem e arremetida exige a maior quantidade de potência dos motores, nesse caso as baterias aquecem bastante e, conseqüentemente, diminui sua eficiência com reflexo na autonomia da aeronave (NASA, 2020).

O tipo de bateria que se pretende utilizar na aeronave é uma Li-Ion agrupada em uma única estrutura com formato semelhante a uma torre, porém os seus detalhes de tamanho e quantidade de células ainda estão sendo estudados. Por conta da sua variação de eficiência não é possível precisar a sua autonomia média (NASA, 2020).



Figura 3 - Conceito da aeronave X-57 Maxwell.



Fonte: (NASA, 2020).

3.1.2 Projeto eCaravan

O projeto eCaravan, consiste em adaptar a aeronave Cessna Grand-Caravan, um monomotor turbo hélice, de asa alta e capaz de transportar 9 passageiros (Figura 4), para substituir seu atual motor por um motor elétrico (Baraniuk, 2020).

Figura 4 - Cessna 108B Grand Caravan elétrico em voo.



Fonte: Viana (2020).



Seu motor elétrico foi desenvolvido pela Magnix. As especificações do fabricante relatam que o motor Magnix Magni500 de 133 quilos é capaz de apresentar uma potência de 750 HP, cerca de 93% de eficiência com relação ao PT6A-114, motor original do Cessna Grand-Caravan (Dal Ponte, 2021).

No dia 28 de maio de 2020 o protótipo do eCaravan decolou de Moses Lake, em Washington, e executou um voo por 30 minutos. Roei Ganzarski, chefe executivo da Magnix, salientou que o custo do voo feito no tempo de meia hora foi de apenas \$6 (£4.80). Além disso, caso o voo tenha sido realizado com combustível convencional o custo da operação subiria para \$300-400 (£240-320) (Baraniuk, 2020).

3.1.3 Ipanema EMB-203 elétrico

A Embraer, em parceria com a WEG S.A. de Santa Catarina, está atuando no desenvolvimento de uma aeronave EMB-203 Ipanema, aeronave de pequeno porte monomotor e convencional, mostrada na Figura 5, muito utilizada em pulverizações agrícolas, com motor elétrico em substituição ao motor convencional. O que a Embraer está propondo é testar uma aeronave que os engenheiros já conhecem muito bem com a tecnologia de propulsão elétrica e um sistema de baterias de lítio. Com a experiência aprendida, será utilizada no desenvolvimento dos EVTOLs da Embraer, que são helicópteros totalmente elétricos capazes de decolar na vertical, de baixo custo operacional (Viana, 2021).

Figura 5 - Imagem do protótipo Ipanema 203.



Fonte: Viana (2021).

No dia 13 de agosto de 2021, a Embraer publicou um vídeo a respeito da aeronave, porém com cortes no voo teste da aeronave. O que se sabe é que em tal voo foram analisadas características primárias do desempenho, controle, gerenciamento térmico e segurança da aeronave, tudo isso visando comparar com simulações computacionais (Viana, 2021).

4 ENERGIA SOLAR

Entende-se que uma aeronave tem propulsão através de energia solar quando consegue captar a incidência de luz solar através de painéis solares estruturados na própria aeronave, a converte em eletricidade e armazena nas células de baterias do avião, e, de forma semelhante a uma aeronave elétrica, essa energia armazenada é transferida para o sistema propulsor da aeronave.

Essa captação de energia ocorre devido ao efeito fotovoltaico, que segundo Wald (2009) apud Aquino (2018, p. 20): “é formado por duas camadas de material semicondutor, uma com elétrons livres e outra com lacunas. Quando o material absorve a luz solar, os elétrons livres movem-se de uma camada condutora carregada negativamente, para a outra, de menor resistência, resultando em uma corrente elétrica”.

A utilização da energia proveniente dos raios solares é vantajosa no Brasil devido à maior exposição solar ao longo do ano. Entretanto, algumas desvantagens a serem consideradas são os elevados investimentos, produção limitada ao período de exposição solar (média de 12 horas ao longo do ano) e inviabilidade de armazenamento de energia excedente. Atualmente, o excedente gerado pode ser inserido no sistema de distribuição e gerar créditos para o produtor em sua conta de energia elétrica que estará integrada no sistema. Não obstante, nos últimos anos, o governo brasileiro tem realizado esforço no sentido de incentivar a aquisição de painéis solares com incentivos fiscais.

[...] equipamentos de energia solar terão os impostos de importação zerados até o final de 2021. Entre eles, bombas para líquidos, para uso em sistema de energia solar fotovoltaico que funciona com painéis solares que captam a luz e geram energia elétrica. Também entram na lista de produtos que passam a ter as tarifas de importação zeradas os rastreadores solares, que são aproveitados em grandes usinas para acompanhar a posição do sol ao longo do dia, o que aumenta a produtividade da unidade (Brasil, 2020).

Outra vantagem evidente é o recarregamento constante das baterias em voo, no caso de haver incidência de luz solar, e com isso aumenta a autonomia do voo, que é um problema para o avião totalmente elétrico de passageiros por sua autonomia ser bastante limitada. Porém, a utilização de painéis fotovoltaicos na aviação é bastante limitada por se exigir algumas capacidades mais específicas, como: eficiência de transformação de energia, o custo da implantação, cumprimento da legislação ambiental, o peso do material, a flexibilidade e sua consistência. Atualmente, a célula fotovoltaica de silício é a mais utilizada em aeronaves movidas a energia solar (Safyanu; Abdullah; Omar, 2019).

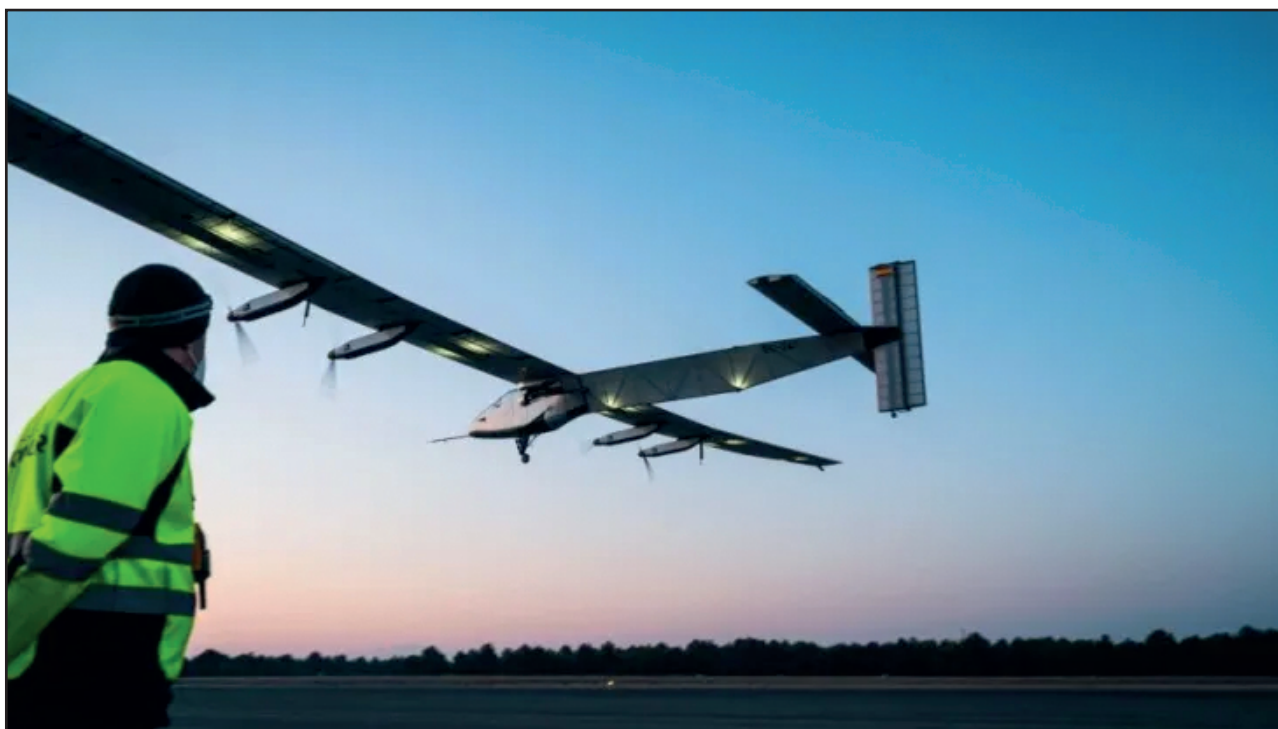


Outrossim, na área da tecnologia solar da aviação, diversas inovações estão emergindo e logo poderão ser aplicadas no cotidiano da sociedade, a maioria ainda está em processo de pesquisa e, algumas outras, estão no estágio de desenvolvimento de protótipos. As principais tecnologias como o filme fino, as células multi-junções o ponto quântico e os nanomateriais representam as grandes apostas para o avanço na tecnologia da aviação movida à energia solar (Safyanu *et al.*, 2019).

4.1 Solar Impulse II

Um dos projetos de maior destaque atualmente no que tange à aviação sustentável é o Solar Impulse, desenvolvido no Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausanne (EPFL) desde 2003 (ver Figura 6). Em 2006, o primeiro protótipo foi apresentado e realizaram-se seus primeiros voos. A aeronave utiliza os conceitos de planadores, uma grande área de asa e uma estrutura muito leve, além de permitir baixa carga alar, proporcionando assim, uma ampla superfície para a instalação de painéis fotovoltaicos (Solar Impulse Foundation, 2016 *apud* Duarte Júnior, 2019).

Figura 6 - Decolagem do Solar Impulse II em teste realizado em abril de 2021.



Fonte: Skydweller (2021).

A aeronave *monoplace*, cuja envergadura chega a ser comparável à de um Boeing 747, ainda está um pouco distante de ser utilizada em voos comerciais. Podendo alcançar velocidades que variam entre 50 e 100 km/h, o Solar Impulse II completou em julho de 2016 seu voo ao redor do planeta, iniciado em março de 2015 e interrompido durante 10 meses no Havaí, em virtude de problemas técnicos em suas baterias que superaqueceram (Duarte Júnior, 2019).

A navegação do Solar Impulse II teve início e término em Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos, e foi pilotado por André Borschberg e Bertrand Piccard, um dos idealizadores do projeto, juntos revezaram o trajeto em 17 etapas, totalizando 42.000km. Na parte mais longa, entre Nagoya, no Japão e o Havaí, nos EUA, quebraram o recorde mundial absoluto de mais longa duração de voo ininterrupto - foram quase 118 horas. Ademais, outros 18 recordes foram quebrados oficialmente. O Solar Impulse II é capaz de armazenar energia suficiente nas suas baterias durante o dia para voar toda a noite (Duarte Júnior, 2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As emissões de CO₂ na atmosfera geradas pelo efeito antrópico contribui para o aumento do efeito estufa acarretando diversas consequências negativas, tais como o aumento do nível do mar e da temperatura média no planeta. O declínio de jazidas não renováveis de energia é crescente. Em ambas as situações fica evidente a necessidade do uso de fontes alternativas de energia para permitir o crescimento econômico sustentável.

O biocombustível representa a opção mais acessível como substituto direto ao combustível fóssil, devido às suas características físico-químicas serem semelhantes e não exigirem maiores adaptações aos motores já existentes, gerando eficiência e operacionalidade nos setores que aderem à substituição. No setor de aviação, há diversos ensaios em voo bem-sucedidos com a substituição (mistura) parcial ou total pelo combustível renovável.

Apesar de existirem esforços de incentivo à fabricação e utilização em escala global (ex. CORSIA e Renovabio) verifica-se a necessidade de maior interação entre a indústria (setor privado), instituições de pesquisa e universidades e o governo (setor público) de forma a diminuir as barreiras em prol da adaptação e consequente adoção em escala comercial.

As aeronaves com motores elétricos estão em um patamar mais longínquo de adoção se comparadas ao uso do biocombustível quanto alternativa devido às limitações principalmente na capacidade de transporte de carga e de passageiros. Entretanto, torna-se viável para aviões de pequeno porte.

A energia solar utilizada de forma plena, isto é, sem a necessidade de bateria, mostra-se como a opção mais distante. Isto deve-se ao fato de que há elevado custo de instalação dos painéis que devem ser adaptados para resistir às intempéries que atuam na aeronave.

Apesar dos aspectos interessantes a respeito do Solar Impulse II sua capacidade de operação ainda é limitada e depende de avanços na eficiência de transformação de energias dos painéis solares.

Ainda há diversos desafios para que todas as tecnologias abordadas se tornem acessíveis para utilização em escala comercial. Não obstante, passos importantes têm sido realizados, permitindo o surgimento de um maior número de inovações tecnológicas com vistas a um futuro com menor dependência do petróleo e de seus derivados.

Sugerem-se estudos com base na metodologia de análise de trajetórias tecnológicas em conjunto com o referencial proposto neste artigo de forma que lacunas possam ser preenchidas entre o estado-da-arte, aplicação e possível adoção.



Informações sobre os autores:

Breno Ferreira Pereira

<https://orcid.org/0009-0001-5323-0703>

<http://lattes.cnpq.br/3557243995907006>

brenoferreira63@gmail.com

Bacharel em Ciências Aeronáuticas e Administração Pública pela Academia da Força Aérea - AFA (2022). Atualmente é 2º Tenente Aviador da Força Aérea Brasileira. Tem experiência na área de Ciências Aeronáuticas e Administração Pública.

Luiz Gustavo Antonio de Souza

<https://orcid.org/0000-0002-6937-8576>

<http://lattes.cnpq.br/7381707035350438>

lgasouza@id.uff.br

Pós-Doutorado pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP (2014, 2017). Doutor em Economia Aplicada pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP (2013). Bacharel em Ciências Econômicas pela Universidade Estadual de Londrina - UEL (2007). Professor do Departamento de Economia do Instituto de Ciências da Sociedade e Desenvolvimento Regional – ESR, Universidade Federal Fluminense - UFF. Professor do Magistério Superior da Universidade Federal Fluminense (UFF) - Campos dos Goytacazes no Curso de Graduação em Ciências Econômicas. Membro do Conselho Fiscal da Sociedade Brasileira de Bioenergia (SBE). Doutor em Economia Aplicada pela Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) (2013). Economista registrado no CORECON-SP e formado pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) (2007). Pesquisador do Núcleo em Estudos do Agronegócio (NEAGRO) e do Núcleo de Estudos em Economia Aplicada (NEAA) da UFF. Realizou dois Pós-doutoramentos na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) entre 2014 e 2017. Atuou na Academia da Força Aérea como Professor Militar e como Coordenador da Coordenadoria de Produção Científica (CPC) e Adjunto da Subdivisão de Pesquisa e Produção Científica (SPPC) da Divisão de Ensino da AFA. As principais áreas de pesquisa são: Economia da Energia, Economia da Inovação e Logística. As principais linhas de pesquisa são: Bioenergia & Etanol Lignocelulósico (Segunda Geração), Logística e Cadeias Agroindustriais, Competitividade, Análise de Insumo-Produto, Análise de Redes Sociais e Econometria de Séries Temporais.

Camila Bezerra Calherani Cavalcante

<https://orcid.org/0009-0005-2810-7509>

<http://lattes.cnpq.br/7996985448777127>

camila.cavalcante2204@gmail.com

Mestre em Administração pela Universidade de São Paulo – FZEA/USP (2023). Especialista em Gestão do Ensino Superior – UNIAG/Anhanguera (2010). Especialista em Gestão Estratégica de Pessoas – FATECE (2007). Bacharel em Administração – Anhanguera (2006). Atualmente é 1º Tenente QOCON ADM na Academia da Força Aérea. Mestre em

Administração do programa de Mestrado Profissional em Gestão e Inovação na Indústria Animal da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo – FZEA/USP (2023). Graduada em Administração pelo Centro Universitário Anhanguera. Foi Diretora Assistente da Faculdade Anhanguera de Campinas (2014-2019). Especialista em Gestão do Ensino Superior - UNIAG/Anhanguera Educacional - (2010). Especialista em Gestão Estratégica de Pessoas - FATECE/Pirassununga - (2007). Tem experiência em administração escolar e ministra disciplinas relacionadas à administração mercadológica, comunicação social e políticas públicas.

Contribuições dos autores:

Os autores Breno Ferreira Pereira, Luiz Gustavo Antonio de Souza e Camila Bezerra Calherani Cavalcante colaboraram ao longo do processo, desde a concepção, delineamento e interpretação dos dados. Todos os autores aprovaram o manuscrito final para publicação.

Como citar este artigo:

ABNT

PEREIRA, B. F.; SOUZA, L. G. A.; CAVALCANTE, C. B. C. Energia alternativa na aviação: panorama e desafios. Revista da UNIFA, Rio de Janeiro, v. 36, p. 1-19, 2023.

APA

PEREIRA, B. F., SOUZA, L. G. A., & CAVALCANTE, C. B. C. (2023, outubro). Energia alternativa na aviação: panorama e desafios. Revista da UNIFA, 36, p. 1-19.

REFERÊNCIAS

AIAB – ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS DO BRASIL. **Inserção do Brasil nos biocombustíveis aeronáuticos**. Parcerias Estratégicas, v. 16, n. 32, p. 59-64, 2012.

ANAC– Agência Nacional de Aviação Civil. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. volume único, 1ª ed., 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.

APROBIO – ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL. 2019. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/>>. Acesso em: 20 de dez. 2020.

AQUINO, Ana Carolina Rocha de. **Avião elétrico**: energia renovável fotovoltaica x combustível aeronáutico. 2018.

ARTAXO, Paulo. Mudanças climáticas e o Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 8-12, 2014.

BAHAROZU, E.; SOYKAN, G.; OZERDEM, M. B. Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors. **Energy**, Peru, v. 140, part 2, 2017, p. 1368-1377.

BARANIUK, Chris. **The largest electric plane ever to fly**. 2020. Disponível em <<https://www.bbc.com/future/article/20200617-the-largest-electric-plane-ever-to-fly>>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

BETIOLO, Camila R.; ROCHA, Guilherme C.; MACHADO, PR de C. Iniciativas da aviação para redução das emissões de CO₂. **Simpósio de Transporte Aéreo**, v. 8, n. 2009, p. 401-409, 2009.

BONASSA, Gabriela *et al.* Bioquerosene: Um Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 2, 2014.

BRASIL. **Governo zera imposto de importação de equipamentos de energia solar**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostose-gestao-publica/2020/07/governo-zera-imposto-de-importacao-deequipamentos-de-energia-solar>>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

BRASIL. LEI Nº 9.478, DE 6 DE AGOSTO DE 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm>. Acesso em: 19 de set de 2021.

CLETO, Alberto Carlos da Costa *et al.* **Motores elétricos de alto rendimento**. 2012.

CLIMATE WATCH. 2020. **Washington, DC**: World Resources Institute. Disponível em: <<https://www.climatewatchdata.org>>. Acesso em: 28 maio 2021.

CONNER, Monroe. NASA. **NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell**, [S. l.], p. 1, 13 set. 2018. Disponível em: <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>. Acesso em: 01 jun de 2022.



CORTEZ, Luís Augusto Barbosa, *et al.* (Ed.). **Roadmap for sustainable aviation Biofuels for Brazil: a Flightpath to aviation biofuels in Brazil.** São Paulo: Blucher, 2014.

DAL PONTE, Luccas. **O futuro dos motores elétricos na aviação comercial.** 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/av-en-1.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

DUARTE JÚNIOR, Fernando Heleno. **Aviação sustentável: avanços e barreiras.** Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual, 2019.

FAPESP – FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: plano de ação.** 2013. Disponível em: <<https://fapesp.br/publicacoes/plano-de-voo-biocombustiveis-brasil-pt.pdf>>. Acesso em: 20 de mar. 2021.

FOLHAPRESS (.org). **Azul faz primeiro voo experimental com biocombustível**, [s. l.], 20 jun. 2012. Disponível em: <https://tribunapr.uol.com.br/noticias/economia/azul-faz-primeiro-voo-experimental-com-biocombustivel/>. Acesso em: 10 maio 2022.

GARBIN, Rafael Borne; HENKES, Jairo Afonso. **A sustentabilidade na produção de biocombustíveis de aviação no Brasil.** 2018.

GOLDEMBERG, José. Mudanças climáticas e desenvolvimento. **Estudos avançados**, v. 14, p. 77-83, 2000.

GUPTA, Anil. Climate change and Kyoto protocol: An overview. **Handbook of environmental and sustainable finance**, p. 3-23, 2016.

-IATA. International Air Transport Association. 2019. **Economic performance of the airline industry.** Disponível em: <<https://www.iata.org/en/publications/economics/>>. Acesso em: 05 jan. de 2021.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy balances 2020: Overview.** Paris, France: IEA, 2020.

IPCC (1999) Intergovernmental Panel on Climate Change. **Aviation and the Global Atmosphere.**

LEAL, Alessandro Araujo. **Biocombustível na aviação: progressos e desafios.** Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual, 2016.

MATHYS, F.; WILD, P.; WANG, J. (2021). CO2 Reduction Measures in the Aviation Industry: Current Measures and Outlook. **International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace**, vol. 8, ed. 2, 2021.



MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Reflexões sobre o Efeito-Estufa**. Disponível em: <https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/REFLEX%C3%95ES_EFEITO-ESTUFA_V2.pdf>. Acesso em: 07 de jun. 2023.

MONTZKA, S.; DLUGOKENCKY, E.; BUTLER, J. Non-CO2 greenhouse gases and climate change. **Nature** 476, 43–50, 2011.

NASA. **Battery Evaluation Profiles for X-57 and Future Urban Electric Aircraft**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005267/downloads/EATS_jcc.pdf>. Acesso em: 28 maio 2022.

NASLAUSKI, Matteo Grimberg; HENKES, Jairo Afonso. Fontes alternativas de energia para a aviação: uma análise sobre o uso de energias renováveis. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, v. 1, n. 1, p. 103-126, 2021.

OLIVEIRA, Rafael Schafhauser; HENKES, Jairo Afonso. Uma análise sobre a possibilidade de uso dos motores elétricos em aeronaves comerciais. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, v. 1, n. 2, p. 112-141, 2021.

PACHECO, Fabiana. **Energias Renováveis**: breves conceitos. Salvador: Conjuntura Econômica n. 149, 2006.

RAMOS, Leonardo. **Qantas**: 1º voo Transpacífico com biocombustível da história. **Aviação**, [S. l.], p. 1, 1 fev. 2018. Disponível em: <https://www.panrotas.com.br/noticia-turismo/aviacao/2018/02/qantas-1o-voo-transpacifico-com-biocombustivel-da-historia_152943.html>. Acesso em: 10 maio 2022.

RIBEIRO, Nathan Fraga; RIBEIRO, Elones Fernando. Redução na emissão de dióxido de carbono (CO2) através da implementação de biocombustíveis na aviação comercial brasileira. **Revista Conexão SIPAER**, v. 10, n. 1, p. 45-55, 2019.

SAFYANU, Bashir Danjuma; ABDULLAH, Mohd Noor; OMAR, Zamri. Review of power device for solar-powered aircraft applications. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 11, 2019.

SILVA, BEUERMAN GABRIEL DA. **Os reflexos da aviação civil no meio ambiente**. Palhoça: [s. n.], 2016. Disponível em: <<https://www.riuni.unisul.br/handle/12345/3094>>. Acesso em: 27 maio 2021.



SOARES, P.; CENAMO, M. C. **Esquema de redução de emissões da Aviação Civil Internacional (CORSA/ICO): desafios e oportunidades.** São Paulo: IDESAM, 2018. Disponível em: <<https://idesam.org/publicacao/corsia-oportunidades-para-o-brasil-v2.pdf>> Acesso em: 28 maio 2021.

VIANA, Pedro. **Veja este Cessna Grand Caravan de propulsão elétrica, que fez seu primeiro voo.** Aeroflap. 2020. Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/veja-este-cessna-grand-caravan-de-propulsao-eletrica-que-fez-seu-primeiro-voo/>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

VIANA, Pedro. **Embraer mostra em vídeo o seu Ipanema Elétrico voando.** , [s. l.], 13 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/embraer-mostra-em-video-o-seu-ipanema-eletrico/>>. Acesso em: 29 maio 2022.

YOSHINAGA, Fabiana *et al.* Bioquerosene para aviação: cenário atual e perspectivas futuras. **Bioenergia em Revista: Diálogos** (ISSN: 2236-9171), v. 10, n. 1, 2020.

ZANONI, Marcos Pavão. **O uso de motores elétricos na aviação comercial para a redução da emissão de poluentes na atmosfera.** Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual, 2018.

Recebido: 13 Jan 2023

Aceito: 19 Jul 2023

