

SUSTENTABILIDADE NO SETOR AÉREO BRASILEIROAmanda Butenas¹Ana Paula Lang Martins Madi²**RESUMO**

A aviação exerce um importante papel nas relações sociais, econômicas e políticas dentro de um país, portanto, é crucial que esteja atenta às demandas do mercado e à importância do desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, estabelecer metodologias que sejam capazes de atingir as metas nacionais e globais que envolvem este ramo não só diz respeito à cooperação para com a sociedade e o meio em que ela está inserida, mas também ao desenvolvimento do setor aéreo brasileiro. Neste trabalho, buscou-se realizar um estudo exploratório, com base nas principais fontes de dados para pesquisas acadêmicas, a respeito das alternativas que mais se destacam dentro da perspectiva brasileira. A principal conclusão da busca, diz respeito à utilização de biocombustíveis e a aplicação de motores híbridos elétricos em voos de longas distâncias, isso porque seus estágios de desenvolvimento se encontram avançados, reflexo tanto do progresso de pesquisas na área, quanto de uma visível inclinação que envolve características naturais nacionais. Ao longo do processo de construção da pesquisa, verificou-se a importância de dar continuidade aos estudos, uma vez que promove o amadurecimento das ideias inicialmente propostas. Dessa forma, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), a Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) devem continuar promovendo projetos para garantir a efetivação das metas sustentáveis propostas pela ONU, Airbus e OACI, as quais têm como objetivo reduzir os impactos ambientais causados pela aviação brasileira desde a construção da aeronave até o momento em que sobrevoa os céus do mundo todo.

Palavras-chave: Desenvolvimento. Setor aéreo brasileiro. Impactos ambientais. Biocombustíveis. Metas sustentáveis.

¹ Estudante do Ensino Médio do Colégio Bom Jesus Nossa Senhora de Lourdes. <https://orcid.org/0009-0004-1946-9711> E-mail: butenasamanda@gmail.com

² Doutora em Ecologia e Conservação pela Universidade Federal do Paraná (2013). Possui Mestrado em Ciências do Solo pela Universidade Federal do Paraná (2005) e Graduação em Tecnologia em Química Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2002). Atualmente é professora do Centro Universitário Franciscano do Paraná (FAE), onde atua como professora do Programa de Apoio à Iniciação Científica - PAIC e da Associação Franciscana de Ensino Senhor Bom Jesus, onde atua como Professora de Química e de Iniciação Científica do Ensino Médio. Tem experiência na área de Química Ambiental, com ênfase em Conservação da Natureza, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão ambiental e sustentabilidade. <http://lattes.cnpq.br/8915477813175208>. E-mail: ana.madi@bomjesus.br

SUSTAINABILITY IN THE BRAZILIAN AIRLINE SECTOR

ABSTRACT

Aviation plays an important role in social, economic and political relations within a country, therefore, it is crucial that it is attentive to market demands and the importance of sustainable development. From this perspective, establishing methodologies that are capable of achieving national and global goals involving this sector not only concerns cooperation for society and the environment in which it operates, but also the development of the Brazilian airline sector. In this work, we sought to carry out an exploratory study, based on the main sources of data for academic research, regarding the alternatives that stand out most from the Brazilian perspective. The main conclusion of the search concerns the use of biofuels and the application of electric hybrid engines in long-distance flights, this is because their development stages are advanced, a reflection of both the progress of research in the area and a visible inclination that involves national natural features. Throughout the research construction process, the importance of continuing the studies was verified, as it promotes the maturation of the initially proposed ideas. Therefore, the International Civil Aviation Organization (ICAO), the Brazilian Association of Airlines (ABEAR) and the National Civil Aviation Agency (ANAC) must continue promoting projects to ensure the achievement of the sustainable goals proposed by the UN, Airbus and ICAO, which aims to reduce the environmental impacts caused by Brazilian aviation from the construction of the aircraft until the moment it flies over the skies around the world.

Keywords: *Development. Brazilian airline sector. Environmental impacts. Biofuels. Sustainable goals.*

1 INTRODUÇÃO

Durante o final do século XX e início do século XXI, a crescente demanda por alternativas sustentáveis que venham mitigar os dilemas socioambientais enfrentados, tem se apresentado cada vez mais recorrente. De certa forma, esse posicionamento é visto com bons olhos, entretanto, a premência de resultados é reflexo da negligência de séculos passados.

Portanto, em meio aos avanços tecnológicos do setor aéreo e sua inestimável importância ao mundo atual e às relações que nos envolvem, é evidente que durante essa construção houve a necessidade de utilizar metodologias que se mostraram, em um primeiro momento, promissoras para o desenvolvimento da aviação, mas que a longo prazo trariam danos irremediáveis para o ecossistema nacional e mundial.

Resumidamente, a proposta da sustentabilidade, nos dias atuais, corresponde a “Manter um equilíbrio entre as necessidades humanas e as demandas ambientais”. Assim sendo, buscar não somente o bem-estar da sociedade como também a preservação dos recursos naturais é essencial, uma vez que sugere o equilíbrio entre os contextos. “[...] Temos que deixar de ser uma economia emissora de carbono, para ser uma de absorção de carbono” (FLANNERY, 2019).

Conforme ANAC (2019), a meta global envolvendo desde a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) até a Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR) é reduzir pela metade as emissões de CO₂ até 2050, em relação ao volume registrado em 2005. Entretanto, atuações visando o desenvolvimento aéreo, de forma que não haja impactos na natureza são sempre fundamentais para atender as necessidades das futuras gerações.

Segundo a União Nacional da Bioenergia (2022), o combustível sustentável de aviação (SAF, na sigla em inglês) é essencial para a descarbonização e desenvolvimento sustentável. Apesar de haver dúvidas sobre a longevidade dos motores com a aplicação e mistura do novo combustível com o tradicional, o Brasil, em específico, é um país com alto potencial para a produção de biocombustíveis.

O problema é que esses avanços tecnológicos nem sempre acompanham a crescente demanda da sociedade por mudanças (UDOP, 2022).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

Realizar um levantamento bibliográfico sobre a história e evolução do setor aéreo brasileiro, permitindo assim, a identificação dos resultados já alcançados e a compreensão de quais são os limitadores enfrentados pelo Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar quais opções sustentáveis o setor aéreo brasileiro tem à disposição, assim como analisar de maneira específica os principais motores aeronáuticos. E por fim propor a utilização da alternativa que mais for adequada para a realidade brasileira.

2 REVISÃO TEÓRICA

Enfrentar desafios, vencer obstáculos e superar descrenças são alguns aspectos com os quais os homens convivem durante sua jornada repleta de idealizações. Há quem os declaram loucos, inovadores ou mesmo pessoas de fé extremada (MENDONÇA, 2016). No início do século XX, por exemplo, suas ambições não se mostravam tão reais para a época vigente, no entanto, ao final deste mesmo século e início do subsequente, XXI, esses anseios passaram a ser considerados essenciais para a crescente demanda da sociedade por mudanças e avanços a respeito dos dilemas socioambientais da contemporaneidade.

É relevante abordar que diversos fatores históricos contribuíram para o desenvolvimento e aprimoramento da indústria aérea, sendo muitos deles de natureza positiva (moralmente falando), e outros que marcaram a história tragicamente, mas que apesar disso, trouxeram questionamentos e posicionamentos que direcionam à uma nova realidade.

Em conformidade com o cenário identificado, a frase do físico alemão Albert Einstein “[...] toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil

- e ainda assim é a coisa mais preciosa que temos" reforça a importância das experiências e descobertas científicas para a construção do conhecimento que constantemente colocamos em prática.

Exemplificativamente, no início do século XV, o artista renascentista Leonardo Da Vinci, inspirado no voo dos pássaros, desenhou uma máquina voadora. Três séculos adiante, em 1716, o primeiro estudo de aviação foi publicado, "*Sketch of a Machine for Flying in the Air*" (Rascunho de uma Máquina para Voar) escrito por Emanuel Swedenborg (BOTHAM, 1910). E sucessivamente a esse ensaio, em 1783, a invenção dos Irmãos Montgolfier, o primeiro balão de ar quente e tripulado levanta voo (DAVIDSON, 2022).

As diversas guerras que ocorreram durante o passar dos anos foram determinantes para o desenvolvimento da aviação, como por exemplo nas Guerras Napoleônicas, onde uma pipa marcou a primeira utilização de um dispositivo aéreo em uma guerra marítima, ou também nas guerras Civil-Americana e Franco-Prussiana, que utilizaram balões como forma de espionagem e transporte, respectivamente (VINHOLES, 2016)

O século XIX foi marcado pela invenção do dirigível, uma máquina mais leve que o ar que poderia ter seu curso controlado. Posteriormente, as mentes idealizadoras da época se viram na busca por meios mais pesados que o ar que pudessem voar de maneira "independente" (PEREIRA, 2018).

A partir do século XX, um período de mudanças, com recentes invenções, Scott e Shackleton realizam o primeiro voo de balão na Antártida, mostrando que avanços associados à resistência estrutural e mecânica estavam sendo realizados, e então o brasileiro Alberto Santos-Dumont realiza, em 1906, o primeiro voo do avião denominado 14-Bis com impulsão própria na cidade de Paris. Analogamente a isso, o modelo Libellule (ou Demoiselle), criado pelo aviador Dumont, é o primeiro modelo de avião a ser produzido em série (FERREIRA, 2021); e em 1919 é fundada a primeira companhia aérea do mundo, KLM (Royal Dutch Airlines).

Em meio ao século XX, período em que ocorreram as duas guerras mundiais, a aviação se mostrou de extrema importância, atuando no transporte de armamento e longos bombardeios. Mais tarde, com o advento das turbinas a jato,

a possibilidade de alcance a longas distâncias com potência elevada foi determinante para o sucesso dos países vencedores do conflito.

Com o pós-guerra, a aviação civil tomou conta do setor, primeiro as pistas de pouso e decolagem, depois os terminais de passageiros e então, as companhias aéreas. As facilidades ofertadas consagraram o transporte aéreo como o meio de transporte destaque do século XXI, o de maior agilidade e segurança (ROSA et al., 2015 apud PEREIRA, 2018, p. 2).

Por fim, em 11 de setembro de 2001, ocorre um dos maiores atentados da história da humanidade, onde quatro aviões são sequestrados pelos terroristas da Al-Qaeda e colidem contra as torres do World Trade Center, Pentágono e no interior do estado da Pensilvânia. Como consequência, medidas de segurança foram implementadas imediatamente, como a blindagem de portas do cockpit, proibição de visitas à cabine antes ou depois das viagens, aumento no rigor das fiscalizações aeroportuárias, entre outros critérios com propósitos de identificar possíveis terroristas (SANTOS, 2022).

Com base na cronologia da aviação, seu estágio inicial é caracterizado pela preocupação de se construir aeronaves funcionais - capazes de voar mais rápido, mais alto e que tivessem maior capacidade de carga possível.

Com a conquista desses objetivos, o tráfego aéreo foi crescendo de forma gigantesca em virtude da comodidade, rapidez e segurança proporcionadas por esse tipo de transporte. [...] Assim sendo, cresceu também a quantidade de gases nocivos emitidos pelas aeronaves, resultantes da queima de combustíveis fósseis por seus motores (JÚNIOR, 2019, p. 8)

Em síntese, nos primórdios, “na época do desenvolvimento dos primeiros voadores”, a preocupação com o impacto da emissão de poluentes era inexistente, e isso porque existia uma ínfima quantidade de aviões existentes e os mesmos apresentavam baixas potências em seus motores. O que fazia com que a quantidade de gases nocivos ao meio ambiente fosse insignificante e não provocasse um olhar consciente como temos nos dias atuais. (JÚNIOR, 2019, p. 11)

Anexadas a esse cenário, iniciativas conservacionistas cresceram exponencialmente visando a economia de custos, bem como os parâmetros

estipulados para a redução de CO₂. As buscas por soluções resultaram em um vasto acervo de teorias e métodos capazes de satisfazer as metas, como as propostas pela ONU (2015) no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 – energia limpa e acessível; 8 – trabalho decente e crescimento econômico e 12 – consumo e produção sustentáveis.

3 METODOLOGIA

Este é um trabalho bibliográfico de caráter qualitativo, o qual utiliza documentos inerentes aos novos projetos de motores elétricos e suas aplicações em modelos de aeronaves atuais, livros de natureza científica, matérias jornalísticas relativas ao progresso da indústria e artigos acadêmicos, reconhecidos majoritariamente por sua natureza exploratória, tendo como principais objetivos o aumento da familiaridade do pesquisador com o cenário estudado e a classificação de conceitos, a fim de alcançar um êxito como ou além do esperado.

Neste artigo a dissertação a respeito do uso dos principais combustíveis sustentáveis - o hidrogênio, o qual, por apresentar um elevado número de desvantagens me direcionou para a aplicação das células a combustível de hidrogênio, o etanol e bioquerosene (biocombustíveis) - e identificação das suas principais vantagens, dificuldades e avanço, assim como a análise dos motores que representam os avanços tecnológicos que a humanidade viabilizou com o passar do tempo, possibilitando uma maior flexibilidade nas operações aeronáuticas e contribuindo com constantes melhorias do sistema aeronáutico como um todo, é vista como um ponto crucial para a compreensão da eficácia dos respectivos modelos. O procedimento documental tem o objetivo de descrever e registrar dados - características da realidade do presente e do passado e evoluções das circunstâncias envolvidas - desde um período histórico ao momento atual (MARTINS, 2021).

4 DESENVOLVIMENTO

Igualmente à preocupação das poluições atmosférica, sonora e térmica, a negligência aos danos causados durante o processo de produção de aeronaves é outro fator que agrava a problemática. Por meio de questionários e estudos, identificou-se a probabilidade dos resíduos industriais da construção civil e da engenharia de produção se tornarem um novo combustível para o setor aeronáutico.

4.1 SUSTENTABILIDADE DURANTE A CONSTRUÇÃO DAS AERONAVES

No Brasil, em média 50% de todo o material desperdiçado, o que representa por volta de 850 mil toneladas de entulho por mês, é depositado sem critério em lixões ou aterros sanitários (MELLO, 2010). Essa proposta, apesar de totalmente viável, considerando o volume de materiais que tem disponível, não condiz com o conceito desse projeto, uma vez que a queima desses rejeitos libera monóxido e dióxido de carbono, logo, a sustentabilidade não seria empregada, e é o que justamente esse trabalho sugere, o crescente desenvolvimento sustentável na aviação brasileira.

Uma alternativa interessante é o reuso e reciclagem, onde apesar de ser uma peça descartável e sem utilização para as grandes indústrias, há a possibilidade de outra empresa utilizá-la. Segundo Mello (2010), outra destinação é servir de sub-base para pavimentos de vias de menor tráfego e em aterros sanitários para a conservação das estradas. Já existem iniciativas de usinas de reciclagem desses materiais nos estados de São Paulo e Minas Gerais (MELLO, 2010).

4.2 SUSTENTABILIDADE DURANTE O VOO

Seguindo a ordem das ideias apresentadas temos a propulsão com hidrogênio em aviões, a qual apresenta algumas desvantagens, como o alto

potencial inflamável desse elemento químico (H) e, uma vez aplicado, sua detecção é extremamente difícil, assim como a fuga do ambiente incendiado, visto que é inodoro, incolor e insípido, dificultando assim na sua identificação. Outro fator agravante é a condição do hidrogênio se encontrado em estado líquido (o ideal para ser utilizado como combustível); nesta forma, apresentará baixíssimas temperaturas, e caso este componente escape de seu tanque e entre em contato com a pele dos indivíduos a bordo há uma alta possibilidade de causar fortes queimaduras por congelamento. Desse modo, como afirma o Escritório de Tecnologias de Hidrogênio e Células de Combustível, algumas das propriedades do hidrogênio requerem controles de engenharia adicionais para permitir seu uso seguro, a ventilação adequada e detecção de vazamentos, por exemplo, são elementos importantes no projeto de sistemas de hidrogênio invulnerado.

Caso, apesar de todos esses fatores, ainda existir interesse na aplicação concreta, teremos que considerar que este tipo de material deve ser armazenado em tanques no formato cilíndrico ou esférico, ou seja, não pode ser acondicionado nas asas ou na parte central de um avião convencional, em função da necessidade de receber grande pressão para em condições de temperatura atmosférica se manter em estado líquido. Por esse motivo, há atualmente alguns modelos testes da Airbus que assumem perfis e maior otimização aerodinâmica. A Figura 1 apresenta um dos modelos sugeridos pela empresa aérea.

Figura 1 – Conceito de Avião-asa da Airbus



Fonte: Viana, 2020.

O protótipo do avião-asa se mostrou consideravelmente eficiente, no qual, pelo espaço aproveitado de uma melhor maneira, há uma estimativa de redução

de peso da aeronave, que também resulta em menor consumo de combustível, e menor potência máxima nos motores (consequentemente menor tamanho e menor arrasto). Por mais otimista que esse exemplar possa parecer, as preocupações iniciais referentes à segurança social ainda estão em vigor, aliadas ao desafio de incorporar aviões com formatos diferentes, e assim, demandar um período mais extenso de desenvolvimento.

Além disso, os motores das aeronaves, principalmente aqueles localizados na câmara de combustão e na turbina, precisarão obter tecnologias avançadas a fim de obter maior resistência à elevadas temperaturas. Ainda a respeito das desvantagens, podemos identificar dois outros impasses, os quais tornam essa proposta gradativamente mais inviável:

- Fabricação de hidrogênio líquido em larga escala;
- Distribuição e armazenamento em solo.

O meio aéreo realmente deseja migrar de combustíveis derivados do petróleo, proveniente de origens fósseis e considerados fontes não renováveis de energia, que tem como desvantagem a emissão de gases poluentes, bem como o alto preço e suas variações. Porém, os processos logísticos para criar o hidrogênio líquido e transportar o mesmo até a aeronave podem resultar em um produto final bastante caro (VIANA, 2020).

Similarmente a essa proposta, a adesão das aplicações da célula a combustível de hidrogênio no setor aéreo revela-se uma preferência da Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A (Embraer). Designada a converter a energia química contida no hidrogênio em energia elétrica e água ($2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{energia}$), de maneira que não haja qualquer impacto ao meio ambiente, pode-se assim, ser classificado como sendo um processo limpo de geração de energia, entretanto, é necessário analisar se a energia e matéria prima para a obtenção do hidrogênio puro provém de meios renováveis ou não renováveis, visto que, as principais fontes de H são as fósseis, gerando então a combustão. Sendo assim, a eletrólise da água é considerada o método mais viável para a produção de hidrogênio verde de modo a ser considerada um meio versátil de armazenamento e transporte de longo alcance (AZEVEDO; CAMPELLO, 2021 *apud* ABREU *et al.*, 2022).

Sob esse viés, pode-se destacar três principais aspectos positivos, dentre eles: sua elevada eficiência (conversão elétrica e conversão com cogeração), ausência de poluição química e sonora e longevidade de sua vida útil. Surge em contraposição seu alto custo, determinado pela condição de ser uma novidade no mercado e por ainda apresentar resistência na produção em grande escala (AZEVEDO; CAMPELLO, 2021 *apud* ABREU *et al.*, 2022).

Segundo estudos, o Brasil tem uma ótima base para a criação de uma infraestrutura baseada em energias renováveis e células de hidrogênio, bastando apenas investir e pesquisar mais sobre essa revolucionária tecnologia. Um acontecimento que marcou significativamente o avanço desse recurso foi a instalação de três grandes células de hidrogênio no município de Curitiba, PR, graças à parceria da LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) com a COPEL (Companhia Paranaense de Energia). Posteriormente, uma quarta célula de hidrogênio foi instalada no Centro de Pesquisa da Petrobras, no Rio de Janeiro (LACTEC, 2018)

Na medida em que os conceitos vão sendo esclarecidos algumas alternativas vão sendo descartadas, e novas tecnologias são apresentadas para o mercado industrial. Assim, temos etanol e bioquerosene (biocombustíveis) como um dos métodos sustentáveis mais comentados no Brasil. Dentre as características técnicas que o biocombustível deve apresentar, estão inclusas a necessidade de:

alta densidade energética, boa atomização, evaporação rápida, viscosidade adequada, ponto de congelamento baixo, boa estabilidade química, ser não tóxico, além de ser amplamente disponível e capaz de competir com os combustíveis atuais em termos de custos e disponibilidade (KALLIO, 2014 *apud* SILVA; OLIVEIRA, 2019, p. 22).

A proposta inicial não necessariamente diz respeito à extinção das emissões de gases poluentes, pois a inserção de combustíveis renováveis em misturas com os produtos já tradicionais pode apenas gerar uma redução da poluição, o que em amplas perspectivas já se mostra bastante significativo.

O Brasil conta com grande experiência no setor de biocombustíveis, especialmente com o etanol e o biodiesel. As características climáticas e

territoriais favoráveis tornam o desenvolvimento dessa cadeia produtiva um importante pilar socioeconômico para o país.

No setor de transportes, a necessidade de ganhos de eficiência conjuga-se com os objetivos de segurança energética e de redução das emissões, gerando incentivos substanciais à substituição de fontes de energia (ANAC, 2019, p. 9).

Com a entrada em vigor do CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) no Brasil, estima-se que mais de 9 milhões de toneladas de CO₂ serão compensadas pelas empresas aéreas brasileiras até 2035. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE) as metas globais relacionadas à redução dos impactos ambientais causados pelos gases poluentes, só serão atingidas com aumento expressivo do consumo de biocombustíveis, e para isso é necessário que seu custo de produção seja reduzido drasticamente. A Agência também ressalta que, a menos que a curva de aprendizado tecnológico seja superada e a produção escalone, esses biocombustíveis continuarão a custar mais caro que os combustíveis fósseis (ANAC, 2019).

Pedro Scorza, diretor de Biocombustíveis para Aviação da União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (Ubrabio) explica que o bioquerosene no Brasil é tecnicamente uma realidade. “Já existe uma planta certificada para produção de bioquerosene em Brotas (SP), que exporta para Europa, e outras plantas industriais (biodiesel, etanol ou químicas) que podem, com menores adaptações, se tornar produtoras de bioquerosene.” Entretanto, ainda não há viabilidade econômica. (MARINHO, 2017, p. 14)

O território brasileiro, por certo, é considerável promissor na produção de biocombustíveis, tornando-o assim um país reconhecido internacionalmente pela sua grande experiência no uso de biomassa como o etanol de cana-de-açúcar, o óleo de soja para o biodiesel e o eucalipto para a polpa de papel. O engenheiro de Desenvolvimento de Produtos da Embraer, Marcelo Gonçalves, explica que:

Por causa destes fatores, acreditamos que podemos liderar o processo de substituição dos combustíveis fósseis na aviação por biocombustíveis, todavia, ainda não há produção em escala suficiente para tornar o produto economicamente atrativo. (MARINHO, 2017, p. 14)

Outra característica privilegiada é a inexistência da escassez de matéria-prima, tendo o suficiente para atender a demanda dos próximos anos, fator este proveniente de terras férteis, clima adequado e corpos d'água. O mercado de bioquerosene brasileiro é um dos mais fortes do mundo e tem alto potencial para se tornar um líder internacional. Scorza ainda comenta que

“[...] as diversas tecnologias permitem o uso de matérias-primas não tradicionais como os resíduos municipais sólidos (lixo urbano) e alternativas como culturas perenes para energia (floresta), elencando um extenso leque de potenciais que podem ser desenvolvidas a médio e longo prazo.” (MARINHO, 2017, p. 14)

Em convergência com os dados de 2018 da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), onde o principal biocombustível produzido e consumido nacionalmente é o etanol, temos um exemplar de uso agrícola muito estudado para análises de consumo e potência de motores. Apesar de haver iniciativas para a utilização de bioquerosene no avião agrícola Ipanema, as pesquisas mostraram que não há necessidade de modificação do motor que utiliza o querosene produzido a partir do petróleo. Dessa forma, podemos caracterizar os biocombustíveis apresentados com o termo “*drop in*”, ou seja, podem ser transportados e misturados ao produto fóssil na estrutura atualmente existente - dutos, tanques e bombas - sem nenhum problema de compatibilidade, nem modificação na engenharia das aeronaves já em operação (MACHADO, 2023)

A comparação das características dos principais modelos de motores e propulsores utilizados na aviação (Pistão a quatro tempos, Turbofan, Turboélice, Elétrico, Híbrido-Elétrico paralelo e Células a combustível) é apresentada na Tabela 1, para que assim possamos conduzir uma conclusão com base no cenário brasileiro, respeitando e adequando às suas necessidades e limitações. Acrescentando-se a essa análise, temos o estudo sobre motores aeronáuticos, representados por uma peça ou conjunto que produz força para realização de trabalho, com intuito de propelir uma aeronave.

Tabela 1 – Comparativo entre motores e propulsores

Tipo de motor/ Características	Pistão	Turbofan	Turboélic e	Elétrico	Híbrido-Elétrico	Célula a combustível
Construção	Simple	Complexa	Complexa	Simple	Complexa	Simple
Partes móveis	Várias	Várias	Várias	Apenas uma	Algumas	Nenhuma
Lubrificação	Complexa	Complexa	Complexa	Simple	Simple	Simple
Manutenção	Complexa	Complexa	Complexa	Simple	Complexa	Simple
Tempo de resposta	Moderado	Lento	Lento	Rápido	Rápido	Rápido
Barulho gerado	Moderado	Muito	Muito	“Mudo”	Moderado	“Mudo”
Poluição	Gera CO ₂	Gera CO ₂	Gera CO ₂	“Zero”	Gera CO ₂	“Zero”
Tipo de operação	Baixa velocidade e altitude	Alta velocidade e altitude	Baixa velocidade e altitude	Baixa velocidade e altitude	Alta velocidade e altitude	Baixa velocidade e altitude
Pista necessária na decolagem	Curta	Comprida	Curta	Curta	Curta	Curta
Combustível utilizado	Gasolina	Querosene	Querosene	Eletricidade	Óleos de origem orgânica e resíduos agrícolas e florestais + baterias	Átomos de hidrogênio

Fonte: Martins, 2021.

É importante ressaltar que não existe um motor melhor que o outro, mas sim particularidades e adequações a cada tipo de operação. Um motor Turbofan, embora seja capaz de atingir velocidades impressionantes quando no ar, em terra necessita uma grande quantidade de pista para decolar, o que pode tornar sua operação inviável em muitos aeroportos (MARTINS, 2021).

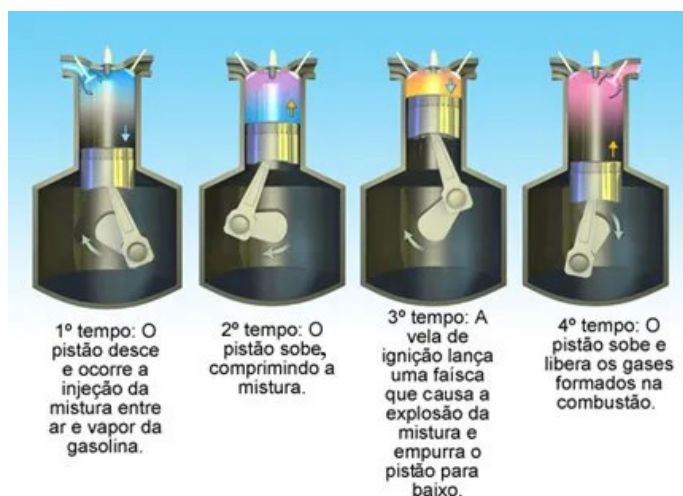
a. MOTOR A PISTÃO:

Dentre os motores aeronáuticos, o motor a pistão é certamente o mais simples de todos, além de ser um dos mais versáteis, confiáveis, robustos e de fácil manutenção (tendo grande disponibilidade de mão de obra qualificada nesse setor), que aliada a utilização de gasolina de aviação (AVGAS), a qual apresenta um custo/litro menor em relação ao querosene de aviação (QAV ou JET-A1), acarreta uma redução do custo de voo. Esses motores são comumente comparados aos utilizados no Volkswagen Fusca justamente por apresentarem características similares (MALICKI, 2020).

No entanto, diante dos requisitos necessários para considerarmos viável a utilização aeronáutica de um determinado motor, o motor a pistão está longe de ser considerado uma máquina eficiente, isso porque raramente consegue converter mais de 25% da energia contida no combustível em energia mecânica, enquanto um motor elétrico, apesar de ser extremamente pesado, consegue converter quase 90% da energia elétrica em mecânica. (AIRCRAFT MAINTENANCE TECHNICIANS, 2014).

A performance de um motor pistão a quatro tempos é explicada na Figura 2. A partir de sua compreensão é possível dar continuidade às futuras sugestões propostas para minimizar os desperdícios de energia, bem como seus impactos.

Figura 2 - Funcionamento de um motor pistão a quatro tempos



Fonte: Mundo Educação, 2014.

Uma vez compreendido o funcionamento do modelo ilustrado, podemos afirmar que a conversão de energia química → energia térmica ocorre devido a combustão do combustível, e a conversão de energia térmica → energia mecânica é resultado da expansão dos gases.

Como a utopia de um aproveitamento integral de todo combustível está bem distante da realidade das propriedades desse maquinário, devemos trazer alguns motivos explicando a impraticabilidade da potência teórica (potência que poderia ser obtida sem nenhuma perda do combustível), e se possível, soluções para torná-la viável.

Primeiramente, é importante ter em mente que nenhuma combustão será realmente completa, assim como grande parte da energia térmica simplesmente não será transformada em energia mecânica e grande parte da energia mecânica produzida vai ser novamente convertida em energia térmica pelo atrito interno no motor, ou consumida pelo próprio motor para acionar diversos acessórios, indispensáveis ao seu funcionamento, como por exemplo para acionar comandos de válvulas, bombas de óleo e de combustível, magnetos, geradores e outros dispositivos. Nesse sentido, a potência desenvolvida pelos gases queimados sobre o pistão é denominada potência indicada. A limitação da taxa de compressão¹ é considerada um agravante, uma vez que promove a redução dessa grandeza (AIRCRAFT MAINTENANCE TECHNICIANS, 2014).

A potência frequentemente medida por dinamômetros é caracterizada por ser aquela que se consegue obter no eixo da hélice, ou seja, a potência efetiva. Durante o seu cálculo, se obtém o torque (τ)², fundamental para reconhecer a capacidade do motor em análise. Neste cenário, se pensar em alternativas que visam ampliar o potencial dos motores aéreos, na maioria dos casos, teremos como resultado o maior consumo de combustível, o que de maneira alguma é favorável para a situação, uma vez que gera mais gases poluentes assim como

¹ É muito importante que durante o segundo estágio o combustível aguarde bem a compressão, não explodindo antes do 3º tempo. Caso o combustível explodir prematuramente, a potência do motor diminuirá.

² Tendência que uma força tem de rotacionar um corpo sobre o qual ela é aplicada.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

inviabiliza o investimento econômico do setor (AIRCRAFT MAINTENANCE TECHNICIANS, 2014).

A Figura 3, a seguir, mostra o avião agrícola Ipanema.

Figura 3 - Modelos de aviões EMB - 202 Ipanema



Fonte: Embraer, [20-].

Esta aeronave utiliza o motor Lycoming IO-540-K1F 5D de 300 hp, 6 cilindros horizontais opostos, que por utilizar combustível de origem vegetal teve um ganho de 20 hp em relação a mesma aeronave a gasolina, ou seja, (320 hp contra 300 hp) (ARAÚJO, 2014).

b. TURBOFAN:

O motor turbofan apresenta este nome devido a presença de um enorme “fan - peça responsável por gerar o empuxo no avião, sendo comumente conhecido por ser o motor a jato presente nos aviões comerciais, como o Airbus A320, Boeing 737 e Embraer 195” (MARTINS, 2021, p. 15).

Em um primeiro momento, para a combustão no motor ser um processo viável, o ar dentro dele precisa atingir uma pressão e temperatura elevada, e isso ocorre durante a passagem do ar pelos compressores de baixa e alta pressão³. Logo em seguida, ocorre a etapa da combustão, onde o combustível⁴ se mistura

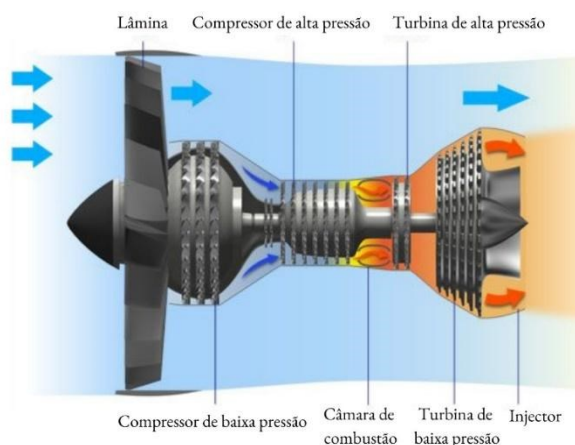
³ O compressor de alta pressão gira mais rápido do que o de baixa pressão.

⁴ O JET-A1 ou QAV são transportados do tanque até a câmara de combustão com o auxílio de válvulas, tubos e bombas.

ao ar e uma faísca elétrica inicia a reação química. Os gases formados se direcionam para as turbinas de alta e baixa pressão, as quais vão ser responsáveis por utilizar a energia cinética para rotacionar os compressores e a hélice, uma vez que estão ligadas ao mesmo eixo. Por fim, essa mistura será expelida por um bocal, aqui a aplicação da terceira lei de Newton é altamente perceptível, visto que à medida que o ar quente é expelido pelo bocal a uma alta velocidade, uma força é produzida. O ar gera uma força de reação que produz empuxo para o avião (STROSKI, 2021).

A Figura 4 demonstra exatamente o funcionamento dele.

Figura 4 - Trajetória e elementos dentro de um motor *turbofan*



Fonte: Martins, 2021.

O motivo pelo qual o motor turbofan é o mais silencioso e econômico dos motores a jato, é resultado da otimização da saída de ar frio (azul) e ar quente (laranja) (MARTINS, 2021, p. 15).

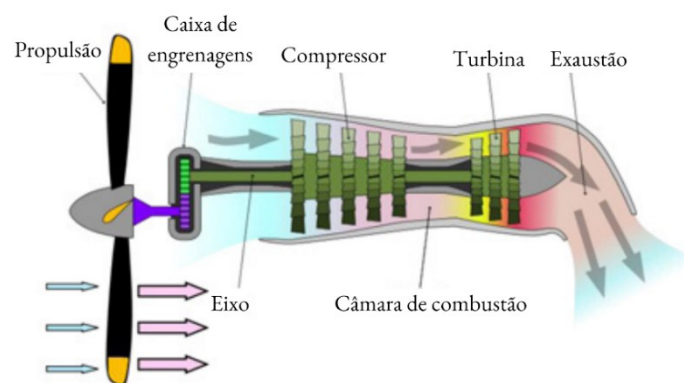
c. TURBOÉLICE:

O principal diferencial do motor turboélice em relação ao motor turbofan é a presença de uma grande hélice ao invés de um *fan* em seu eixo, essa característica permite que o sistema de reversor de empuxo⁵ dos motores

⁵ A utilização do reverse Thrust (ou reverso) é fundamental para reduzir a força que os freios devem fazer para parar a aeronave, impedindo então que eles superaqueçam e também para cortar a ação de propulsão dos motores.

mencionados também atue de maneira diferente – enquanto nos motores a jato o reverso consiste em formar uma parede em formato de concha (em aviões executivos) ou o sistema de *blocker door* (em aviões comerciais), a qual será responsável por redirecionar a direção e sentido dos gases expelidos, formando assim os ruídos que escutamos durante o pouso⁶, nos motores turboélice o reverso nada mais é do que a mudança no ângulo das pás da hélice, podendo ocorrer de maneira manual ou automática. A figura 5 retrata a estrutura do modelo comentado acima. (MALICKI, 20–).

Figura 5 - Elementos de um motor turboélice



Fonte: Redacción, 2012.

Outro fator que os distingue é a flexibilidade do turboélice, a qual de certa forma representa maior eficiência e conseqüentemente menor consumo de combustível, podendo ser até duas vezes menor que o consumo de JET-A1 e QAV em aeronaves com motores *turbofan*.

d. ELÉTRICO:

Os motores elétricos são majoritariamente conhecidos por apresentarem uma vida útil maior que os motores tradicionais (a combustão). Segundo Martins (2021), outro fator promissor é a sua forte participação em aviões de pequeno porte, de forma que pistas extensas para decolagem e pouso sejam desnecessárias, assim,

⁶ No aeroporto de Santos Dumont, por exemplo, é necessário a utilização do full-reverse, ou seja, potência máxima desse mecanismo, em razão das limitações de comprimento da pista.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

investimentos monetários são reduzidos em vista do baixo custo de operação das aeronaves, bem como devido a diminuição de área requerida para a construção das pistas aéreas.

Em relação a aplicação dessa tecnologia, são consideradas duas principais metodologias, a primeira refere-se à utilização integral de baterias elétricas a fim de obter energia para mover as hélices do avião⁷ e a segunda corresponde à instalação de geradores para fornecer potência elétrica às aeronaves em determinadas fases do voo, principalmente nos períodos de transição, e do emprego de novas configurações motrizes para as aeronaves (GUIMARÃES; HENKES, 2023).

Entretanto, apesar dos benefícios, a inserção dos propulsores elétricos encontra muitos desafios (GUIMARÃES; HENKES, 2023). A título de exemplo, podemos dizer que embora esse modelo tenha um futuro promissor em viagens de curtas distâncias (voos regionais), suas características intrínsecas não permitem, até o momento, realizarmos voos de longas distâncias em razão das dimensões e peso das baterias apresentadas, como efeito, a autonomia do voo é reduzida, impactando assim na realização de voos mais longos. Consequentemente, as viagens teriam que ser mais curtas para poder sustentar o peso de todas as baterias dentro da aeronave, reduzindo seu alcance de voo para um máximo entre 160 e 400 quilômetros (OLIVEIRA; HENKES, 2021 *apud* GUIMARÃES; HENKES, 2023).

Analogamente a isso, o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) está desenvolvendo um motor elétrico de 1 megawatt (MG), visto que a aviação comercial exige tal potência em razão das medidas das aeronaves.

Para evitar os piores impactos das alterações climáticas induzidas pelo homem, os cientistas determinaram que as emissões globais de dióxido de carbono devem atingir zero até 2050. Cumprir esta meta para a aviação, exigirá conquistas de mudança radical na concepção de sistemas não convencionais (CHU, 2023).

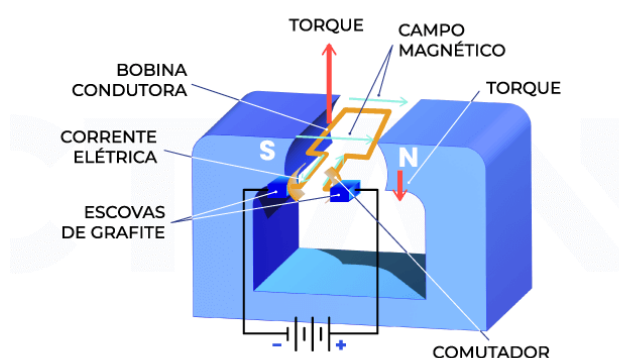
⁷ Evidentemente será preciso transformar a energia elétrica em trabalho mecânico para assim alimentar o maquinário.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

Em termos gerais, os motores elétricos utilizam forças eletromagnéticas para gerar movimento. Ou seja, por meio da energia elétrica originada de baterias, forma-se um campo magnético, esse fenômeno pode ser relacionado à Lei de Ampère, a qual estabelece que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável (CABRAL, 20–)

Logo, a aproximação de um ímã a bobina (utilizada anteriormente para produzir o campo magnético) produz movimentos rotacionais (torque) na direção do campo gerado, podendo assim acionar a hélice do avião. Esse fenômeno pode ser descrito como indução eletromagnética, a qual ocorre quando a variação de um campo magnético nas proximidades de um condutor causa-lhe o surgimento de uma força eletromotriz induzida⁸, definindo-se desse modo a Lei de Faraday (CABRAL, 20–). A Figura 6 indica os processos, grandezas físicas e vetores presentes em um motor elétrico.

Figura 6 - Mecanismos que englobam um motor elétrico

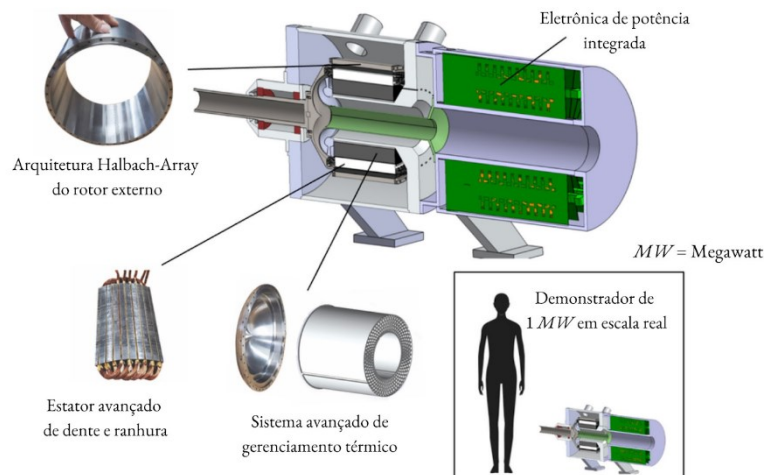


Fonte: ALMEIDA, [20--].

De sua parte a Figura 7 é o projeto do motor desenvolvido por alunos do MIT, cujo tamanho é semelhante a uma mala despachada e peso inferior à média de um passageiro adulto.

⁸ Tensão elétrica que surge durante a variação de fluxo de campo magnético em um circuito condutor.

Figura 7 - Motor elétrico de MW projetado por engenheiros do MIT



Fonte: CHU, 2023.

É importante ter em mente que quanto maior for o maquinário – e neste caso estamos nos referindo a um avião – maior terá que ser a bobina de cobre e o rotor magnético, e quanto mais energia a máquina elétrica gerar, mais calor produzirá, tornando-se necessário a implementação de elementos adicionais para manter os componentes resfriados – e tudo isso pode ocupar espaço e adicionar peso significativo ao sistema, tornando-o um desafio para aplicações em aviões (CHU, 2023).

e. HÍBRIDO ELÉTRICO-PARALELO:

Surge em contraposição ao modelo integralmente elétrico, o motor híbrido-elétrico ou turbo elétrico, cuja proposta é consonante com as demais apresentadas. Nessa perspectiva, engenheiros do MIT elaboraram um conceito onde o índice de mortes prematuras (16.000 mortes anuais), ocasionadas pelas emissões de NOx⁹ será reduzido em 92%, assim como a estima-se amenizar 95% da circulação de óxidos de nitrogênio na atmosfera (CHU, 2021)

Na proposta no novo design, a fonte de energia ainda seria a turbina de gás convencional, porém ao invés de alimentar diretamente as hélices ou ventiladores,

⁹ Óxidos de nitrogênio, os quais na maioria das vezes referem-se a vários compostos químicos gasosos, formados pela combinação de oxigênio (O) e nitrogênio (N).

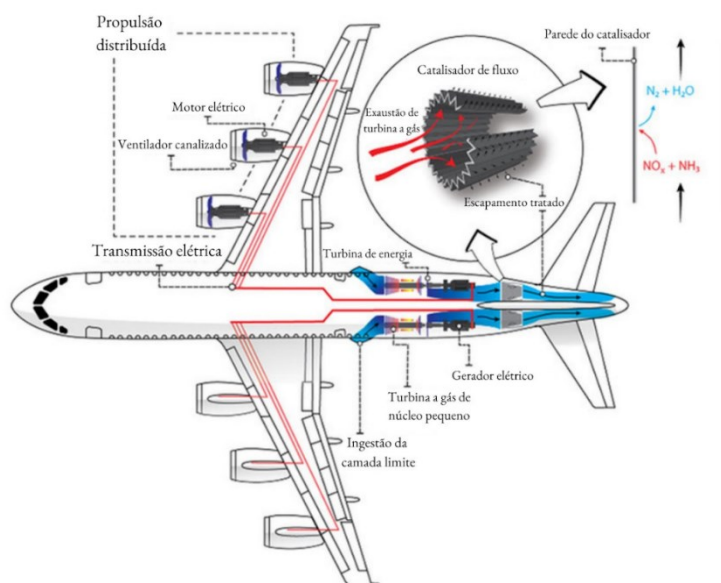
R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

ela teria a função de acionar um gerador, tendo então eletricidade, as pás ou fan do voador seriam alimentadas eletricamente. As emissões produzidas pela turbina a gás seriam alimentadas num sistema de controle de emissões, muito semelhante ao dos veículos a diesel, que limparia os gases de escape antes de os lançar na atmosfera (CHU, 2021).

Segundo Chu (2021) isso ainda seria um tremendo desafio de engenharia, mas não existem limitações físicas fundamentais. Em um primeiro momento, foi considerado a possibilidade de implementar um sistema bastante similar ao proposto, entretanto na parte traseira dos motores a jato, modelo este que impossibilitaria qualquer fluxo de empuxo. Portanto, é fundamental que a estrutura planejada pelos engenheiros esteja montada no porão de carga do avião - onde pode haver amplo espaço em muitas aeronaves comerciais.

A Figura 8 exemplifica o modelo desenvolvido pelos participantes do projeto.

Figura 8 - Conceito de um avião híbrido-elétrico



Fonte: Chu, 2021.

Conforme Chu (2021), com o propósito de aprofundar ainda mais seu trabalho, o professor de aeronáutica e astronáutica do MIT, Steven Barrett, comenta em seu novo artigo a respeito da porcentagem de combustível a ser acrescentada para suportar a estrutura desse planejamento, a qual diz respeito a

0,6% a mais do que o estabelecido para a aviação comercial atual. Isso seria muitas, muitas vezes mais viável do que o que foi proposto para aeronaves totalmente elétricas. Este projeto acrescentaria algumas centenas de quilogramas a um avião, em vez de adicionar muitas toneladas de baterias, o que representaria uma magnitude de peso extra (CHU, 2021).

f. CÉLULA A HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL:

A empresa aeroespacial Airbus, vem desenvolvendo nos últimos anos quatro principais aeronaves movidas a hidrogênio – combustão direta de hidrogênio ou células de combustível híbridas de hidrogênio e eletricidade. A Figura 9 corresponde a uma breve análise dos fatores promissores e agravantes dessa idealização, cuja dimensão estende-se a rumos globais.

Figura 9 - Análise dos fatores promissores da célula a combustível de H₂ (gasoso e líquido) e combustão de H₂ (gasoso e líquido)

	Emissões de CO ₂	Emissões de NO _x	Rastros	Volume de combustível	Combustível + massa do sistema de propulsão	Cadeia de suprimentos + infraestrutura
<p><i>Célula de combustível H₂ líquida</i></p> <p><i>H₂ gera eletricidade por meio de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio, usada para impulso.</i></p>						
<p><i>Combustão de H₂ Líquido</i></p> <p><i>O H₂ é queimado em um motor de turbina a gás modificado para gerar empuxo.</i></p>						
<p><i>Célula de combustível H₂ gasoso</i></p> <p><i>H₂ gera eletricidade através de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio, usada para impulso.</i></p>						
<p><i>Combustão gasosa de H₂</i></p> <p><i>H₂ é queimado em um motor de turbina a gás modificado para gerar empuxo.</i></p>						

Legenda: O verde indica benefício elevado, o amarelo indica benefício moderado e o vermelho indica benefício insuficiente nesta fase.

Fonte: EASA, [20--].

Acresce que, apesar de possuir grande disponibilidade, fator vantajoso na perspectiva do mercado de combustíveis, há alguns entraves que devemos

considerar durante o estudo, muitos dos quais já abordamos anteriormente. Por conseguinte, à medida que colaborações são construídas, as problemáticas encontradas vão sendo diluídas – como por exemplo, a resistência de mecanismos eficientes para produzir hidrogênio verde, transportes funcionais, estrutura aeroportuária... - citando caso análogo, o processo de desenvolvimento e construção dos tanques de armazenamento do hidrogênio é um componente crucial para a aplicação do projeto ZEROe, portanto, em decorrência de sua importância foram estabelecidos Centros de Desenvolvimento de Emissões Zero (ZEDCs) em Nantes na França e em Bremen na Alemanha. Segundo AIRBUS SE, este cenário no qual a empresa e demais parceiros encontram, evidencia mais do que nunca a importância do trabalho em equipe e não apenas para aplicarmos este novo progresso de maneira mais rápida e eficiente, como também para introduzi-lo em contexto internacional.

No momento, a aeronave de teste da Airbus A380 MSN1 está assumindo a liderança nos testes dessas tecnologias que serão vitais para levar ao mercado uma aeronave comercial movida a hidrogênio (AIRBUS, 2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mediante o exposto, é válido ressaltar as principais opções, dentre as descritas no trabalho, que apresentam grande viabilidade a curto e a longo prazo, ou seja, a utilização do etanol e bioquerosene, assim como a utilização de motores híbridos elétricos. No entanto, ambas as preferências dispõem de elementos que necessitam de aprimoramentos, para que assim seja possível implementá-las com sucesso no setor aéreo nacional.

Indo além, há atualmente uma constante demanda social, acadêmica e profissional para estarmos sempre atualizados quanto às propostas sugeridas pelo ramo industrial e também flexíveis quanto às necessárias adaptações visando a sustentabilidade do nosso ecossistema. Dessa forma, é essencial que alternativas sejam criadas gradualmente para que então seja possível formularmos

um abrangente conjunto de ideias que tenham como objetivo a redução dos impactos ambientais na aviação brasileira.

Segundo Guimarães e Henkes,

O setor aéreo vem passando por mudanças no intuito de manter a sua viabilidade financeira por meio do corte de custos e um dos mais importantes está relacionado à força propulsora das aeronaves. Os resultados de pesquisas relacionadas desde o final do século passado já estão sendo postos em prática, a exemplo da adição de biocombustíveis aos seus homólogos não renováveis e os sistemas de propulsão puramente elétricos ou híbridos (GUIMARÃES; HENKES, 2023, p. 22).

Nessa perspectiva, durante um diálogo acadêmico, surgiu a sugestão de estudar componentes cuja densidade seja maior se comparada a dos elementos consumidos atualmente, visto que quanto maior for a densidade do combustível utilizado, maior será a quantidade de energia gerada no momento da combustão, além disso, a aeronave possuirá maior rendimento, já que o veículo não irá precisar consumir tanto combustível por Km ou milha náutica (NM), ou seja, mais energia e menos consumo, resultando portanto em um menor custo final do combustível.

Assim sendo, define-se como pretensões futuras, o aprofundamento em componentes que apresentam alta massa específica, assim como a realização de cálculos que fundamentam matematicamente as escolhas indicadas.

6 CONCLUSÕES

Conclui-se que a adoção de biocombustíveis e aeronaves híbridas ou puramente elétricas têm impacto positivo no tema “desenvolvimento sustentável”, e também na questão financeira. Atualmente a preferência se concentra nas aeronaves híbridas - uma vez que apresentam maior autonomia, podendo realizar voos de curta e longas distâncias, em contraste com as aeronaves puramente elétricas, restringidas aos voos de curta/média duração – assim como na utilização de biocombustíveis. Dessa forma, o objetivo central dos pesquisadores deve focar no aumento da autonomia das baterias por meio de sistemas de armazenamento mais eficientes (maior carga e menor peso), maior eficiência de hibridização e descoberta de novos componentes que podem ser utilizados juntos aos combustíveis fósseis, etanol e bioquerosene ou de maneira independente.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

O propósito deste trabalho foi apresentar à sociedade acadêmica as diversas possibilidades que o setor aéreo tem para o processo de construção de um país em desenvolvimento, que busca soluções sustentáveis para os dilemas modernos, sendo necessário analisar a situação brasileira e então adequar as respostas do mercado para as dificuldades da sociedade.

REFERÊNCIAS

ABREU, T. *et al.*. **DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA ANÁLISE SWOT**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/366918854_DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES_PARA_O_MERCADO_DE_HIDROGENIO_VERDE_NO_BRASIL_UMA_ANALISE_SWOT>. Acesso em: 15 abr. 2023.

AERO POR TRÁS DA AVIAÇÃO. **O que ajuda o avião a parar? Veja como funciona o REVERSO**. **Fernando de Borthole**, 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bWypKA3yHzE>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

AIRBUS. **ZEROe**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>>. Acesso em 17 dez. 2023.

AIRCRAFT MAINTENANCE TECHNICIANS. **Motores a Pistão**. Disponível em: <<https://aeronaves2014.blogspot.com/p/motores-pistao.html>>. Acesso em: 11 dez. 2023.

ALMEIDA, D. **Como funcionam os motores elétricos?** Disponível em: <<https://tractian.com/blog/motores-eletricos-entenda-a-funcionalidade-desse-ativo>>. Acesso em: 11 maio. 2023

ANAC. **Plano de Ação para a Redução das Emissões de CO2 da Aviação Civil Brasileira**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/PlanodeAo2019ptbr.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2023

ARAÚJO, D. **MOTORES A PISTÃO AERONÁUTICOS, UM PANORAMA**. Disponível em: <<https://autoentusiastas.com.br/2014/08/motores-a-pistao-aeronauticos-um-panorama/>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

AZEVEDO, J. **Célula de hidrogênio: o que é e como funciona**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/celula-de-hidrogenio/>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

BOTHAM, C. Emanuel Swedenborg's Glider Sketch. Disponível em: <<https://www.onverticality.com/blog/emanuel-swedenborg-glider>>. Acesso em: 19 mar. 2023

BRITO, R. de; HENKES, J. A. UM ESTUDO SOBRE COMBUSTÍVEIS PARA AVIAÇÃO: HIDROGÊNIO E CÉLULA A COMBUSTÍVEL: A STUDY ON AVIATION FUELS: HYDROGEN AND FUEL CELLS. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 159–182, 2023. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/134>. Acesso em: 25 set. 2023.

CABRAL, M. **As Equações de Maxwell**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/as-equacoes-maxwell.htm>>. Acesso em: 7 dez. 2023.

CHU, J. **Concept for a hybrid-electric plane may reduce aviation's air pollution problem**. Disponível em: <<https://news.mit.edu/2021/hybrid-electric-plane-pollution-0114>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

CHU, J. **Megawatt electrical motor designed by MIT engineers could help electrify aviation**. Disponível em: <<https://news.mit.edu/2023/megawatt-motor-could-help-electrify-aviation-0608>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

CORDEIRO, R. B. **Desenvolvimento Sustentável é sinônimo de lucro - INBS**. Disponível em: <<https://inbs.com.br/desenvolvimento-sustentavel-e-sinonimo-de-lucro/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

DAVIDSON, L. **How the Montgolfier Brothers Helped Pioneer Aviation**. Disponível em: <<https://www.historyhit.com/how-the-montgolfier-brothers-helped-pioneer-aviation/>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

EASA. **O hidrogênio e o seu potencial na aviação**. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/pt/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

EMBRAER. **Ipanema 2 líder de mercado**., [s.d.]. Disponível em: <<https://embraer.com/br/pt/galeria-de-midia>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

ENERGY.GOV. **safe use of hydrogen**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen#:~:text=Specifically%2C%20hydrogen%20has%20a%20wid>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

FERREIRA, L. **Primeiro voo há 115 anos: Santos Dumont aliou invenções à ciência**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-10/primeiro-voo-ha-115-anos-santos-dumont-aliou-invencoes-ciencia>>. Acesso em: 3 abr. 2023.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 101-131, jan/mar. 2024.

FLANNERY, T. **Can seaweed help curb global warming?** Disponível em: <https://www.ted.com/talks/tim_flannery_can_seaweed_help_curb_global_warming>. Acesso em: 27 mar. 2023.

GUIMARÃES, N. de M.; HENKES, J. A. UM ESTUDO SOBRE O USO DE AERONAVES ELÉTRICAS E HÍBRIDAS NA AVIAÇÃO DE MÉDIO PORTE E SEUS IMPACTOS NO AMBIENTE: A STUDY ON THE USE OF ELECTRIC AND HYBRID AIRCRAFT IN MID-SIZE AVIATION AND ITS IMPACTS ON THE ENVIRONMENT. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 170–196, 2023. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/124>. Acesso em: 25 out. 2023.

JÚNIOR, D. **UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL: AVANÇOS E BARREIRAS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/8341/1/TCC_FERNANDO_HELENO_DUARTE_JUNIOR_final.pdf>. Acesso em: 23 set. 2023.

LACTEC. **Com participação do Lactec, maior eletrovia do Brasil é inaugurada no Paraná**. Disponível em: <<https://lactec.com.br/com-participacao-do-lactec-maior-eletrovia-do-brasil-e-inaugurada-no-parana/>>. Acesso em: 23 maio 2023

LIMA, P. S. **Como a Toyota, Airbus aposta em motor a hidrogênio para reduzir emissões**. Disponível em: <<https://garagem360.com.br/como-toyota-airbus-aposta-motor-hidrogenio-reduzir-emissoes/>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

MACHADO, N. **O que é SAF? Conheça as diferentes rotas de combustível sustentável de aviação**. Disponível em: <<https://epbr.com.br/o-que-e-saf-conheca-as-diferentes-rotas-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

MALICKI, P. **Pistão, Turbo-Hélice ou Jato: Quais São As Diferenças Entre Os Principais Tipos De Motores De Aeronaves Executivas?** Disponível em: <<https://flyflapper.com/stories/pt-br/quais-sao-as-diferencas-entre-os-principais-tipos-de-motores-de-aeronaves-executivas/>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

MARINHO, A. F. Novos voos para o bioquerosene. **CANAL**, v. 123, p. 12–17, [s.d.].

MARTINS, G. **A VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS EM AVIÕES COMERCIAIS**. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/17696/1/GIOVANE%20MARTINS%2C%20A%20VIABILIDADE%20DA%20UTILIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20MOTORES%20EL%C3%89TRICOS%20EM%20AVI%C3%95ES%20COMERCIAIS.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

MELLO, M. **Reutilização de materiais na construção**. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/reutilizacao-de-materiais-na-construcao/>>. Acesso em: 03 maio. 2023.

MENDONÇA, T. **Construção Aeronáutica no Brasil**. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/incaer/images/eventgallery/instituto/Opusculos/Textos/opusculo_construcao_aeronautica.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Esquema de funcionamento de um motor a explosão de quatro tempos**, [s.d.]. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2023.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

PÁDUA, A; HENKES, J. **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA AVIAÇÃO BRASILEIRA**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321810394_DESENVOLVIMENTO_SUSTENTAVEL_NA_AVIACAO_BRASILEIRA>. Acesso em: 29 mar. 2023

PEREIRA, M. *et al.* **UM RELATO SOBRE A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA AVIAÇÃO A report on the historical evolution of aviation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://home.unicruz.edu.br/seminario/anais/anais-2018/XXIII%20SEMINARIO%20INTERINSTITUCIONAL/Ciencias%20Sociais%20e%20Humanidades/Mostra%20de%20Iniciacao%20Cientifica%20-%20TRABALHO%20COMPLETO/UM%20RELATO%20SOBRE%20A%20EVOLUCAO%20HISTORICA%20DA%20AVIACAO.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

RAMOS, I.; DAS DORES, J. **Análise de um motor aeronáutico: um estudo de caso de cliente da CEPROM**. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5361/1/Igor%20L.%20da%20Costa%20Ramos%20e%20Julia%20T.%20R.%20das%20Dores.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

REDACCIÓN. **Motores de Aviación-Reactores**. Disponível em: <<https://www.pasionporvolar.com/motores-de-aviacion-reactores/>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

SANTOS, G. **20 anos do atentado de 11 de setembro: como esse episódio mudou a aviação mundial**. Disponível em: <<https://www.aerotd.com.br/decoleseufuturo/atentado-de-11-de-setembro/#:~:text=Ap%C3%B3s%20esta%20trag%C3%A9dia%2C%20novas%20regras>>. Acesso em: 11 maio. 2023.

SILVA, G. **BIOCOMBUSTÍVEIS NA AVIAÇÃO**. Disponível em: <GUSTAVO_HENRIQUE_DE_OLIVEIRA_SILVA-[57705-685-5-835155]GUSTAVO_HENRIQUE_DE_OLIVEIRA_SILVA-57705-685-2-835155GUSTAVOVF_1_1 (2).pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SOARES, C. **O futuro do combustível na aviação**. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/8384>>. Acesso em: 21 maio. 2023.

STROSKI, P. N. **Motor a jato turbofan: como funciona?** Disponível em: <<https://www.electricalibrary.com/2021/12/03/motor-a-jato-turbofan-como-funciona/>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

UDOP - União Nacional da Bioenergia. Disponível em: <<http://www.portaludop.com.br/noticia/2022/09/29/combustivel-sustentavel-e-crucial-para-aviacao-mas-aindatraz-duvidas.html>>. Acesso em: 29 mar. 2023.

VIANA, P. **Como funciona a propulsão com hidrogênio em aviões?** Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/propulsao-com-hidrogenio-em-avioes/>>. Acesso em: 09 maio. 2023.

VINHOLES, T. **“Ballon Kanone”, a primeira arma anti-aérea da história**. Disponível em: <<https://www.airway.com.br/ballon-kanone-primeira-arma-anti-aerea/>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

VINHOLES, T. **Embraer foca em aviões sustentáveis com propulsão híbrida e a hidrogênio**. Disponível em: <<https://www.airway.com.br/embraer-foca-em-avioes-sustentaveis-com-propulsao-hibrida-e-a-hidrogenio>>. Acesso em: 25 mar. 2023.