

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS**

**PERSPECTIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICO-HÍBRIDOS
NA AVIAÇÃO COMERCIAL BRASILEIRA**

GOIÂNIA
2022

ELIZABETH MATEUS FRANCA DO NASCIMENTO

**PERSPECTIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICO-HÍBRIDOS
NA AVIAÇÃO COMERCIAL BRASILEIRA**

Artigo científico apresentado à Pontifícia
Universidade Católica de Goiás como exigência
parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências Aeronáuticas.

Professora Orientadora: Esp. Tammyse Araújo da
Silva.

GOIÂNIA
2022

ELIZABETH MATEUS FRANCA DO NASCIMENTO

**PERSPECTIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICO-HÍBRIDOS
NA AVIAÇÃO COMERCIAL BRASILEIRA**

GOIÂNIA-GO, 7/6/2022.

BANCA EXAMINADORA

Esp. Tammyse Araújo da Silva _____ CAER/PUC-GO _____
Assinatura Nota

Me. Raul Francé Monteiro _____ CAER/PUC-GO _____
Assinatura Nota

Esp. Andreluiz da Silva Fernandes _____ CAER/PUC-GO _____
Assinatura Nota

PERSPECTIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICO-HÍBRIDOS NA AVIAÇÃO COMERCIAL BRASILEIRA

PERSPECTIVES FOR HYBRID-ELECTRIC ENGINES USE IN BRAZILIAN COMMERCIAL AVIATION

Elizabeth Mateus Franca do Nascimento¹
Tammyse Araújo da Silva²

RESUMO

A utilização de motores elétrico-híbridos tem como base duas fontes de energia para gerar empuxo ou tração, quais sejam, a fonte elétrica e a turbina a gás, possibilitando operações mais sustentáveis e com menos custos. Na outra ponta, operadores aéreos, principalmente os das linhas aéreas, buscam alternativas de aeronaves eficazes que permitam a diminuição dos custos operacionais e que reduzam ruídos e gases poluentes. Diante desse cenário, deu-se início ao desenvolvimento de motores aeronáuticos alternativos dotados de tecnologia sustentável pelas gigantes do setor Boeing, Airbus e Cessna, resultando em protótipos com inserção no mercado entre 2024 até 2050. Assim, o objetivo desta pesquisa é verificar a viabilidade de utilização de motores elétrico-híbridos no transporte aéreo comercial brasileiro, analisando e comparando os impactos ambientais e econômicos com os motores convencionais. Como metodologia, optou-se por uma abordagem descritiva, utilizando-se de procedimentos bibliográficos e documentais. Como resultado, foram obtidos dados das empresas de transporte aéreo comercial nacionais Gol, Azul e Latam, os quais apresentaram elevados custos operacionais das aeronaves convencionais utilizadas por estas companhias. Em média, 25,1% dos gastos referem-se a combustível e lubrificantes e 16,18% a manutenção dos motores convencionais, e tais valores se elevam a cada ano. Desse modo, evidencia-se a necessidade de adoção de outras tecnologias capazes de reduzir tais custos. Com vistas a identificar soluções viáveis para a questão, realizou-se uma análise dos novos modelos de aeronaves elétricas e híbridas, tendo como foco principal a diminuição do consumo de combustível. A pesquisa evidenciou que a possibilidade dessa redução é real a partir do desenvolvimento do *E-Fan X*, da Airbus, do *SUGAR Volt*, da Boeing, e do Grand Caravan de motor híbrido, da Cessna. Entretanto, a tecnologia das baterias atuais no modelo da Airbus dificulta uma operação a longa distância, levando ao aumento de escalas em um único voo. Além disso, esta aeronave também apresentou demanda por mais frequência de manutenção. Sobre o protótipo da Boeing, ainda em fase de testes, não há resultados operacionais divulgados. A Cessna, de sua feita, divulgou que os modelos Caravan híbridos podem ter seu custo operacional reduzido em até 25%, devendo operar já em 2024. Trata-se, portanto, de uma possibilidade para a Azul Conecta, operadora destas aeronaves. De todo modo, maiores aviões, como os da família da Airbus e Boeing, já vem sendo substituídos por aeronaves mais econômicas e menos poluentes, como o A320 Neo, já operado no Brasil pela Latam, e o Boeing 737 Max 8, utilizado pela Gol, o que possibilita a troca de suas frotas por estes modelos, na ordem de 70 e 23 aviões, respectivamente. Apesar das mudanças nas frotas para

¹ Graduanda em Ciências Aeronáuticas. Piloto Privado. Endereço eletrônico: elizabethmateus2018@gmail.com.

² Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica de Goiás. Graduanda em Ciências Aeronáuticas pela UnisulVirtual. Professora da Escola Politécnica no curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. EC-PREV pelo CENIPA. Credenciada no SGSO pela ANAC e pela Infraero. Endereços eletrônicos: tammyse@hotmail.com/tammyse@pucgoias.edu.br.

aeronaves mais sustentáveis, Latam e Gol ainda não manifestaram interesse em aeronaves híbridas, mesmo porque ainda não estão disponíveis no mercado. Em suma, inferiu-se, a partir dos achados do estudo, que os maiores desafios para a inserção e consolidação das aeronaves elétrico-híbridas no mercado decorrem da frequência de manutenção e das limitações das baterias, que não comportam longas distâncias. Por outro lado, há possibilidade de inserção do modelo híbrido Gran Caravan da Cessna na regional da Azul, a Azul Conecta, prevista para o mercado em 2024.

Palavras-Chaves: Custos, Motores elétrico-híbridos, Aviação comercial.

ABSTRACT

The use of hybrid-electric motors is supported on two sources of energy to generate thrust or traction, the electric source and the gas turbine, enabling more sustainable operations at lower costs. At the other end, air operators, especially airlines, are looking for efficient aircraft alternatives that allow a reduction in operating costs and reduce noise and polluting gases. Considering this context, the development of alternative aeronautical engines equipped with sustainable technology has started by the giants Boeing, Airbus and Cessna, which resulted in prototypes with market insertion between 2024 and 2050. Thus, the objective of this research is to verify the feasibility hybrid-electric motors' using in Brazilian commercial air transport, analyzing and comparing the environmental and economic impacts with conventional motors. As a methodology, a descriptive approach was adopted, with bibliographic and documentary procedures. As a result, data from national commercial air transport companies Gol, Azul and Latam were obtained, which presented high operating costs of conventional aircraft. On average, 25.1% of expenses refer to fuel and lubricants and 16.18% to the maintenance of conventional engines, and these amounts increase every year, which points to the need to adopt other technologies capable of reducing such costs. In order to identify viable solutions to the question, an analysis of the new models of electric and hybrid aircraft was carried out, with the main focus on reducing fuel consumption. The research pointed that this reduction possibility is real with the development of E-Fan X, by Airbus, SUGAR Volt, by Boeing, and Grand Caravan with hybrid engine, by Cessna. However, the current battery technology in the Airbus model makes long-distance operation difficult, increasing stopovers on a single flight. In addition, this aircraft also demands more frequent maintenance. Concerning to Boeing prototype, still in testing phase, there are no operational results released. Cessna, in its turn, announced that hybrid Caravan models can have operating cost reduced by up to 25%, and should operate as early as 2024. This is a possibility for Azul Conecta, that operates these aircraft. In any case, larger planes, such as those of the Airbus and Boeing family, are already being replaced by more economical and less polluting, such as the A320 Neo, already operated in Brazil by Latam, and the Boeing 737 Max 8, used by Gol, which makes it possible to exchange their fleets for these models in the order of 70 and 23 planes, respectively. Despite changes towards more sustainable aircraft, Latam and Gol have not yet expressed interest in hybrid aircraft, even because they are not yet available on the market. In summary, it was inferred that the biggest challenges for hybrid-electric aircraft's insertion and consolidation result from the frequency of maintenance and the limitations of the batteries, which, as said, do not support long distances. On the other hand, there is the possibility of inserting Cessna's hybrid Gran Caravan model in Azul's regional unit, Azul Conecta, scheduled for the market in 2024.

Keywords: Costs, Hybrid-electric, Hybrid aircraft, Commercial aviation.

INTRODUÇÃO

A aviação civil, considerando a indústria de aeronaves e as empresas aéreas, é um ambiente altamente tecnológico e muito sensível a mudanças no cenário mundial ou a ajustes econômicos. Isto significa que o setor aéreo (tecnologias e operações) vem sendo moldado conforme situações e acontecimentos globais, a exemplo do desenvolvimento dos motores aeronáuticos pós-Segunda Guerra Mundial que evoluíram do convencional a pistão para os a jato.

À vista disso, o desenvolvimento dos motores aeronáuticos pauta-se em questões muitas vezes condicionadas à operação da aeronave ou ao custo dela. Ao longo de décadas, a indústria do setor se empenha em desenvolver aviões melhores, mais eficientes e menos poluentes e ruidosos, enquanto as operadoras aéreas buscam formas de mitigar problemas operacionais e custos relacionados à configuração de aeronaves convencionais. Como resultado desse processo, originam-se estudos sobre motores alternativos, como os elétrico-híbridos e os elétricos, entre outros.

Considerado esse contexto, o objetivo da pesquisa é verificar a viabilidade de utilizar motores elétrico-híbridos no transporte aéreo comercial brasileiro. Para alcançar os resultados pretendidos, foi empregada a metodologia de natureza básica, com objetivos descritivos e abordagem qualitativa, cujos procedimentos resultam de levantamento de dados bibliográficos e documentais. Desta forma, adotaram-se documentos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), da Agência Nacional do Petróleo (ANP), além de informações oriundas da Airbus e da Boeing, das companhias aéreas brasileiras e de autores como Alrashed, Isikveren, Mengistu, Bravo e Betancourt, entre outros, como suporte de estudo e análise.

Estruturalmente, a pesquisa é distribuída em três seções. A primeira descreve os desafios da utilização de motores térmicos em aeronaves, considerando seus custos, sustentabilidade e eficiência, avançando para a descrição de tecnologias alternativas. A segunda seção é dedicada à análise da viabilidade da utilização de motores elétrico-híbridos na aviação comercial brasileira, pontuando suas vantagens e desvantagens e a tendência do setor. Por fim, na terceira seção, as considerações finais são tecidas.

A pesquisa se justifica diante da problemática que envolve os gastos operacionais relacionados às aeronaves convencionais, e como a evolução tecnológica dos motores dos aviões poderia minimizar esses problemas. Optando-se pela utilização das aeronaves elétricas-híbridas, é possível a redução de tais custos, sendo ainda provável que seu uso diminua a emissão de gases poluentes e os ruídos.

Assim, por meio deste estudo, espera-se constatar a viabilidade do emprego de motores elétrico-híbridos nas aeronaves brasileiras em médio e longo prazos, diminuindo os custos gerados com a operação das novas aeronaves convencionais.

1 OS DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES TÉRMICOS EM AERONAVES CIVIS

1.1 Custos operacionais do motor térmicos de aeronaves

De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2019), as empresas, para se manterem em pleno funcionamento, levam em conta os custos necessários para a produção e oferta de bens e serviços. À vista disso, o Sebrae ressalta dois tipos de custos³: fixos e variáveis. Os fixos consideram os gastos permanentes, compõem a estrutura do negócio e independem de vendas ou produções, por exemplo, contas de água, aluguel, salários, entre outros. Já os variáveis dependem da quantidade de bens ou serviços produzida ou vendida. Segundo o Dicionário Financeiro (2022), custos variáveis são aqueles que podem se alterar, aumentando ou diminuindo de forma proporcional ao nível de atividade, como custo com logística e com matéria-prima.

Em se tratando do transporte aéreo, existem custos diretamente associados às operações de aeronaves, os chamados custos operacionais, que também consideram o custo fixo e a variável. Cabe pontuar que em alguns casos o custo operacional das aeronaves abrange os dois tipos. Por exemplo, nos motores Ciclo Otto⁴ e Ciclo Brayton⁵, o custo fixo está relacionado à manutenção periódica, enquanto o variável trata dos gastos com combustível e lubrificante (TEIXEIRA, 2020).

Dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2021a) apontam que em 2021, dos custos relacionados às operações das aeronaves, em média, 25,1% referem-se ao combustível e lubrificantes e 16,18% à manutenção dos motores. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), o Brasil é um dos maiores

³ “Custos [...] são todos os fatores aplicados no processo de produção. Assim, são considerados custos os dispêndios efetuados para possibilitar a produção ou operação, como matérias-primas, embalagens e pessoal da linha de produção” (PADOVEZE, 2006 apud COELHO, 2020, p. 11).

⁴ *Ciclo Otto* -- Motor a pistão, nesse tipo de motor, são requeridos quatro tempos e seis fases para completar a série de eventos ou ciclos de operação de cada cilindro (REIS, 2015).

⁵ *Ciclo Brayton* – Motor a Jato, um ciclo fechado, o fluido circula exercendo um trabalho, o ar expelido da turbina é reintroduzido no compressor, este ciclo utiliza um permutador de calor para aquecer o fluido de trabalho em vez de uma câmara de Combustão interna (REIS, 2015).

consumidores de combustíveis da América Latina, sendo utilizados quatro tipos de combustíveis certificados para aeronaves no país: o AVGAS⁶, o JET-A1⁷, o JET-A1⁸ alternativo e o Etanol⁹.

Ainda sobre custos variáveis, a ANAC (2021b) considera que o crescimento da aviação decorre do aumento do Produto Interno Bruto (PIB) e da economia e, desta forma, torna-se dependente das condições econômicas nacionais e globais, sujeitando-se à variação do preço do combustível de origem petrolífera. Ademais, conforme o Plano Aeroviário Nacional (ANAC, 2021b), o custo do combustível, em especial o JET-A1, é fortemente impactado pelos impostos e tributações, como o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) que chegou, em 2018, à casa de 25% em alguns estados brasileiros. Acrescenta-se que o ICMS e outras tributações são responsáveis por 40,7% do preço do combustível.

Considerando os gastos com tributação e despesas operacionais, os gestores das empresas aéreas buscam formas de reduzir custos. Como exemplo, em uma análise do primeiro trimestre de 2021, comparando-o ao mesmo período de 2019, a Latam (2021) apresentou um total de 1,8 bilhão de dólares relacionados às despesas¹⁰ operacionais, valor este 25,2% menor do que em 2019, consequência dos esforços do grupo para a redução de vários de seus custos. O grupo também obteve em 2021 mais reduções estruturais na sua linha de despesas, como salários e benefícios, na ordem de 43,5%.

Ainda a respeito dos resultados da Latam relativos ao primeiro trimestre de 2021, devido à diminuição das operações aéreas da companhia em 44,6%, os custos com combustíveis caíram 45,2% quando comparado ao mesmo período de 2019. Apesar disso, o preço do combustível em 2021 elevou-se exponencialmente, sendo mais caro em 1,2% do que o praticado em 2019 e 57,2% mais alto do que o adotado em 2020 (LATAM, 2021).

Conforme o plano quinquenal da empresa, as despesas com manutenção tiveram um aumento de 97,3% se comparado a 2019, atingindo 206,3 milhões de dólares. A empresa estima ainda que, durante parte de 2022, tais despesas sigam em crescimento. O aumento esperado se deve tanto ao fato de que as operações retornem à normalidade, como à

⁶ AVGAS, Gasolina de avião, usadas em aeronaves a pistão (ANAC, 2019b).

⁷ JET-A1 Querosene, combustível para aeronave a jato (ANP, 2020).

⁸ JET-A1 Alternativo, Querosene obtido de fontes alternativas, como carvão e gás natural (ANP, 2020).

⁹ O Etanol para a aviação é comum no uso de aeronaves agrícolas (ANAC, 2019b).

¹⁰ As despesas são bens ou serviços consumidos direta ou indiretamente para obtenção de receita. São gastos relativos aos bens e serviços consumidos no processo de geração de receitas e manutenção dos negócios da empresa, ou seja, em atividades meio. As empresas têm despesa para gerar receitas e não para produzir seus bens e serviços (CREPALDI, 2002; LEONE, 1997 apud COELHO, 2020, p. 10).

necessidade de reparação de componentes dos motores que ficaram parados durante os anos pandêmicos (LATAM, 2021).

Além da Latam, a empresa aérea Gol (2021) registrou crescimento de seus custos operacionais em comparação ao ano de 2020. A despesa com combustível aumentou em 44,7% devido à alta do preço médio do JET-A1. Em relação aos custos fixos com manutenção e materiais de reparo, estes giraram em torno de 74,6% em comparação ao terceiro trimestre de 2020.

Outra nacional que divulgou seus resultados financeiros do primeiro trimestre de 2021 foi a Azul. Entre os valores apresentados e, comparando-os aos do mesmo período de 2019, a empresa contabilizou um aumento de 4,1% com despesas operacionais, significando cerca de R\$ 102,1 milhões, resultado da alta de 28,6% do preço do combustível somado à depreciação do Real, que foi de 31,6%. Todavia, segundo a Azul, os custos foram parcialmente compensados pela redução da capacidade em 10,8% e redução de 5,5% na queima de combustível por Assentos-quilômetros oferecidos (ASK)¹¹, como resultado da nova frota de aeronaves mais eficientes (AZUL, 2021).

Observa-se, a partir do breve resultado financeiro das três companhias aéreas brasileiras, que os custos operacionais, sobretudo os relacionados aos combustíveis, oscilam conforme a economia e o mercado (LATAM, 2021; GOL, 2021; AZUL, 2021). Entretanto, como evidenciado pela Azul, uma frota composta de aeronaves mais eficientes resulta em menos gastos com combustíveis (AZUL, 2021). A partir desta constatação, abordam-se, no próximo item, a sustentabilidade e a eficiência dos motores convencionais utilizados nas aeronaves.

1.2 Sustentabilidade e eficiência em relação aos motores a Pistão e a Jato

Em princípio, todos os motores devem obedecer a exigências de economia e eficiência. A economia abrange o consumo de combustível, o custo para obtê-lo em sua origem e o custo para manter o motor em operação. Além disso, ele deve ser eficiente e potente. A eficiência de um motor aeronáutico varia conforme o tipo de aeronave e está relacionada à sua autonomia de voo (alcance) (REIS, 2015).

Um motor térmico de forma síncrona queima combustível e expande ou acelera gases, resultando em energia calorífica e mecânica que promove tração ou empuxo. Todavia, esse

¹¹ *Available Seat Kilometer*: Refere-se ao volume de Assentos Quilômetros Oferecidos, ou seja, a soma do produto entre o número de assentos oferecidos e a distância das etapas (ANAC, 2019a).

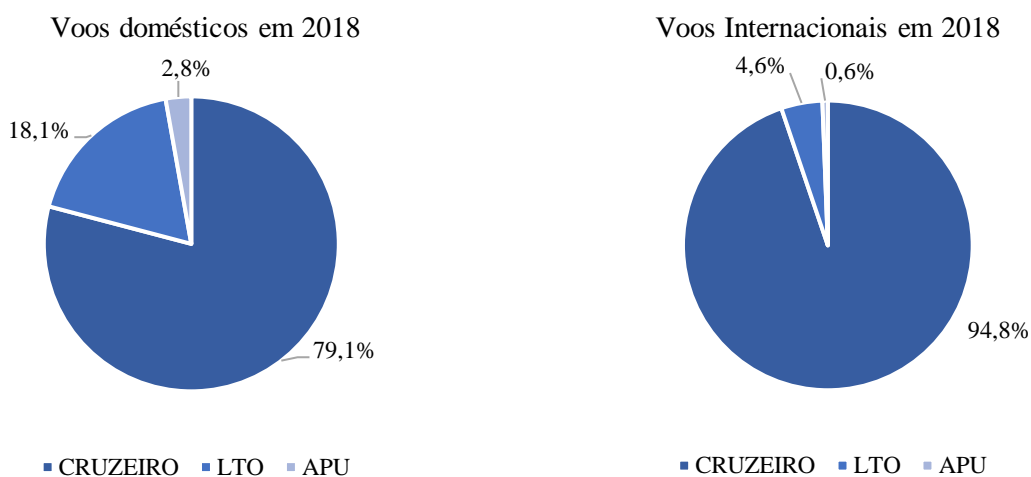
processo de queima também libera gases poluentes na atmosfera terrestre, sendo, portanto, uma fonte de poluição atmosférica. Embora as políticas de substituição parcial de combustíveis fósseis predominem na frota automotiva de transporte terrestre, o setor aeronáutico não está alheio a essa situação (BETANCOURTET et al., 2019).

Para Betancourt et al. (2019), a aviação mundial, em 2018, consumia cerca de 5 milhões de barris de petróleo por dia, o que representou 5,8% do consumo mundial desse produto total à época. Em termos de combustível convencional, este representou no mesmo período entre 1,5 e 1,7 bilhões de barris por ano. Projeta-se que a demanda por querosene de aviação terá crescido 38%, tomando como recorte o ano de 2008 até 2025, o que implica um crescimento anual médio 2,0%.

Significa dizer que na indústria de aviação global há importantes desafios relacionados ao preço do petróleo, impacto ambiental e sustentabilidade, fatores que para serem vencidos demandam orçamento operacional alto para as empresas do setor. Cabe anotar, quanto ao impacto ambiental mencionado, que o setor aéreo é hoje responsável por cerca de 2% da emissão total de CO₂, estimando-se que atinja 3% até 2050 (BETANCOURTET et al., 2019).

Para se ter uma ideia do que representa o consumo horário de combustível para uma empresa aérea, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2019b) elaborou um comparativo. Tendo como base o JET-A1 e considerando as fases de cruzeiro e o tipo de voo, foi constatado que o maior consumo querosene se dá na fase de cruzeiro do voo e que esse combustível foi responsável, em 2018, por 86,9% do consumo de combustível total por fase. O Gráfico 1 demonstra a distribuição do consumo de querosene nas fases do voo:

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de querosene por fases de voo em 2018



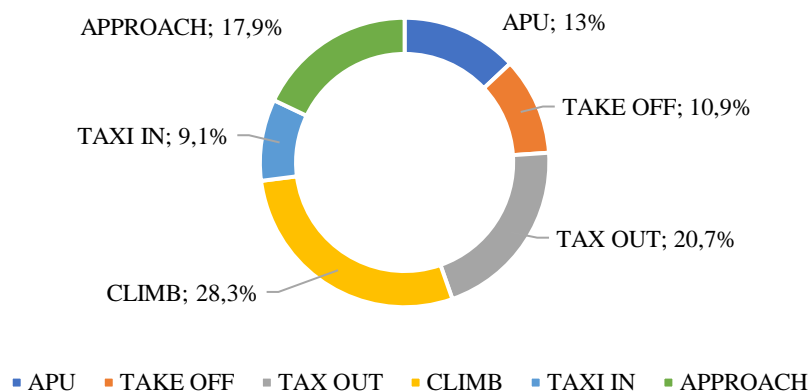
Fonte: adaptado de ANAC (2019b).

Observa-se, assim, que o maior consumo de combustível em voos domésticos ocorre em cruzeiro, responsável por 79,1% do total, seguido do ciclo LTO¹², correspondendo a 18,1%, e da utilização da APU¹³, com 2,8%. Já para os voos internacionais, os valores de consumo de combustível por etapas correspondem para o cruzeiro, o ciclo LTO¹⁴ e o APU¹⁵, respectivamente, a 94,8%, 4,6% e 0,6% (ANAC, 2019b).

Ao verificar o consumo de combustível do ciclo LTO em conjunto ao uso das APU em outras fases de gasto de combustível do motor aeronáutico, tais como no acionamento da APU, durante a partida (antes da decolagem – *taxi-out*), decolagem (*take-off*), subida (*climb*), aproximação (*approach*) e chegada (após o pouso – *taxi-in*), foi constatado que o maior consumo ocorreu na fase de subida, com 28,3% do total consumido nestas etapas (ANAC, 2019b).

O Gráfico 2 detalha as participações do uso das APUs em solo e de cada fase do ciclo LTO no consumo de combustível:

Gráfico 2 – Participação das fases do ciclo LTO e do uso das APUs em solo no consumo de combustível em 2018



Fonte: adaptado de ANAC (2019b).

O Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil de 2019, da ANAC (2019b), por sua vez, apresenta dados coletados em 2018 sobre as emissões de poluentes na atmosfera local, responsáveis pelos impactos negativos na qualidade do ar. Dos diversos elementos encontrados, o verificado em maiores quantidades foi o monóxido de carbono (CO), proveniente das movimentações das aeronaves em aeródromos nacionais, decorrentes

¹² LTO – Landing and Take Off ou pouso e decolagem (ANAC, 2019b).

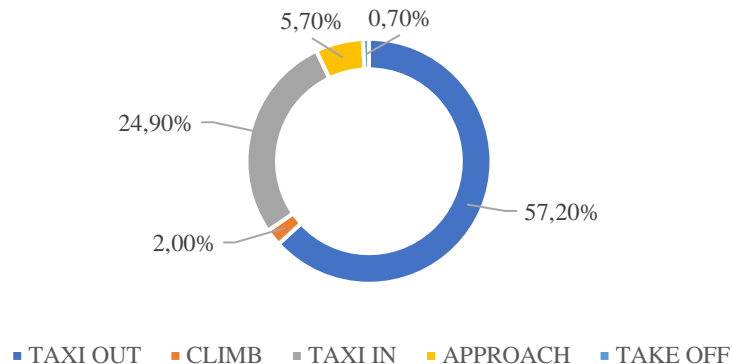
¹³ APU – Auxiliary Power Unit ou Unidade Auxiliar de Potência (ANAC, 2019b).

¹⁴ LTO – Landing and Take Off ou pouso e decolagem (ANAC, 2019b).

¹⁵ APU – Auxiliary Power Unit ou Unidade Auxiliar de Potência (ANAC, 2019b).

dos consumos nos ciclos LTO e no uso das APUs. Por outro lado, uma vez que as emissões resultantes da fase cruzeiro do voo ocorre em uma altitude muito elevada, é considerado desprezível o seu impacto na qualidade do ar local (ANAC, 2019b). O Gráfico 3 a seguir apresenta as emissões de CO por fase do voo, descartando a de cruzeiro.

Gráfico 3 – Emissões de CO por fase em 2018



Fonte: adaptado de ANAC (2019b).

À vista disso, a evolução estimada de emissão de CO apresenta diferenças consideráveis em relação às tendências observadas para o consumo de combustível estimado e o número de movimentos, apesar de ambas influenciarem nas emissões desse mesmo gás. Neste período, o aumento estimado das emissões de CO foi de 29,6% contra os crescimentos de 54,3% do número movimentados e 50,1% do consumo de combustível. Isso ocorre porque as emissões de CO são, de forma majoritária, geradas pelas fases em que motores estão em *idle* (*taxi-in* e *taxi-out*, isto é, com baixa RPM) no ciclo LTO (ANAC, 2019b).

Após analisar os principais aeroportos do Brasil em 2014, foi verificada a evolução do nível estimado de emissão de CO, sobretudo no aeroporto de Guarulhos, registrando-se picos de emissão significativos. Naquele ano, Guarulhos respondia sozinho por 22,5% das estimadas emissões de CO. Ademais, de 2005 a 2018, as emissões em Guarulhos cresceram 19%, acompanhando o aumento exibido pelo total do setor no período. Isto é reflexo da demora nos táxi das aeronaves que operam neste aeroporto, o mais movimentado do país (ANAC, 2019b).

1.3 Tecnologias que substituem motores térmicos: um panorama sobre os elétricos-híbridos

Tendo em vista a preocupação com os gastos elevados de combustível e o alto índice de emissão de gases poluentes, iniciaram-se discussões sobre meios alternativos para substituir motores e combustíveis fósseis por novas tecnologias dotadas de melhor custo-benefício e que fosse eco eficientes. Dentre os apresentados, destacam-se os motores alternativos – os elétricos e os elétrico-híbridos – responsáveis, no futuro, pelo avanço tecnológico sustentável na aviação (NASA, 2015).

Para Mengistu (2011), uma aeronave híbrida é aquela que tem em seu funcionamento a combinação de dois ou mais geradores de potência em um único sistema de propulsão. O termo comumente utilizado é “elétrica-híbrida”, que descreve o sistema que utiliza um ou mais motores convencionais ou térmicos, com um ou mais motores elétricos em uma configuração específica. No entanto, Alrashed et al. (2021) consideram que para a utilização de aeronaves híbridas é necessário adotar geradores alternativos de energias nos motores para que estes possam suportar a integração entre a turbina a gás e a energia elétrica. Esse tipo de integração alternativa de energia mecânica e elétrica é considerada fonte de energia de propulsão inteligente.

Neste sentido, Isikveren (2014) explica que o uso de fontes de energia elétrica para a propulsão de um motor aeronáutico pode se originar de baterias ou de fornecimento de energia elétrica em fase de voo específicas. Desta forma, baterias podem ser usadas como fonte de energia, assim como o combustível a base de petróleo.

Tem-se ainda, segundo Alrashed et al. (2021), que para o desenvolvimento de projetos de uma aeronave híbrida, leva-se também em consideração as configurações de motores elétrico-híbridos, sendo estes divididos nas seguintes categorias: *h-Fan*, como *Fan* elétrico-híbrido, e *e-Fan*, como *Fan* totalmente elétrico. A depender da finalidade da aeronave para que foram desenvolvidos, trabalharão em arquiteturas diferentes.

Estes motores híbridos de última geração são voltados para MEAs¹⁶, constituindo-se, em motores de linha cujas bases são turbinas a gás convencionais e motores com gerador elétrico. Este conceito foi introduzido em vários tipos de projetos, com base na relação entre massa potência (leveza). Ressalta-se a importância de se reduzir o peso dos materiais necessários para a aeronave gerar mais economia de potência; em consequência, esta redução melhorará a eficiência do combustível (ALRASHED et al., 2021).

À vista disso, e considerando a busca por maior eficiência, o motor adotado para o desenvolvimento da aeronave *E-Fan X* da Airbus foi o *e-Fan*. Este motor apresenta algumas

¹⁶ *More Electric Aircraft* – MEAs (ALRASHED et al., 2021).

particularidades: sua propulsão é totalmente elétrica e, dependendo da aeronave, ele pode ser acoplado em um *Fan* de *high by-pass*¹⁷, que, de sua feita, pode ser conectado a uma caixa de engrenagem. Seu funcionamento depende de fonte de energia externa, podendo ser uma bateria ou uma unidade elétrica. Desta forma, a configuração do *e-Fan* é totalmente elétrica, tendo 100% na eficiência de zero emissão de gases poluentes, com base no CFM56¹⁸ (ALRASHED et al., 2021).

O motor *Fan* elétrico-híbrido, ou *h-Fan*, é uma versão avançada de um motor turbina a gás. Seu menor empuxo pode ser atribuído a uma maior porcentagem de compartilhamento de energia entre o gerador e a turbina. Com base em estudos do SUGAR Volt da Boeing, o *h-Fan* terá uma redução do consumo específico de combustível de 28% em seu modo turbina a gás e de 100% em seu modo totalmente elétrico e, em relação ao seu índice de emissão de gases poluentes, uma redução estimada de 72% (ALRASHED et al., 2021).

Sendo um motor versátil, o *h-Fan* pode operar de três diferentes modos: modo turbina gás completo, no qual a potência é produzida de modo semelhante ao um motor turbofan, em que o empuxo é derivado apenas da combustão; modo híbrido, no qual combustível e eletricidade poderão ser usados como fontes para empuxo; e totalmente elétrico, em que é necessária somente a energia elétrica como fonte para o empuxo e funcionamento do motor, havendo apenas a necessidade de uma fonte externa para o acionamento da aeronave (ALRASHED et al., 2021).

2 VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO MOTORES ELÉTRICO-HÍBRIDOS NA AVIAÇÃO COMERCIAL BRASILEIRA

2.1 O modelo elétrico-híbrido aplicado na aviação de médio e grande portes

Em termos de pesquisas voltadas para um motor alternativo, entre 2009 e 2010 iniciou-se uma parceria de estudo entre a Boeing e a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA)¹⁹ com o propósito de buscar tecnologias capazes de produzir novas aeronaves que consumissem menos combustíveis e reduzissem a emissão de gases poluentes e de ruídos (NASA, 2015).

¹⁷ *High by-pass* – Alta razão entre o fluxo de massa de ar que passa pelo duto e o fluxo de massa de ar que passa pelo centro do motor (ALRASHED et al., 2021).

¹⁸ *CFM56* – Família de motores aeronáuticos produzidas pela CFM International, utilizados em modelos como B737 e A320 (ALRASHED et al., 2021).

¹⁹ *National Aeronautics and Space Administration*.

Esta união deu início a um projeto dividido em quatro fases, sendo a fase dois subdividida em três volumes: I – Exploração de projeto Elétrico-Híbrido; II – Exploração de *design* de asa com armação de treliça; e III – Relatórios de testes aeroelásticos de asa reforçada com treliça. O projeto segue, atualmente, para a terceira fase com a apresentação dos resultados para, em seguida, atingir a fase quatro, com a introdução da aeronave no mercado (BOEING, 2021).

Com essa parceria e as inovações em estudo, a Boeing planeja incorporar aos novos modelos de aeronaves, entre os anos de 2030 e 2050, tais tecnologias. Além dos estudos voltados para combustíveis alternativos mais limpos e outros afetos à aerodinâmica, está em desenvolvimento o uso de motores híbridos ou de elétrico-híbridos, entre eles o *SUGAR Volt* (BOEING, 2022).

O projeto *SUGAR Volt* visa utilizar-se do conceito híbrido de propulsão e garantir uma redução de 71db abaixo dos atuais padrões de ruído estipulados pela Administração Federal de Aviação (FAA)²⁰, agência estadunidense. Calcula-se também redução de 75% de gases poluentes e de 70% no consumo de combustível. O projeto busca uma configuração mista, estimando a composição de motores elétricos-híbridos turbina a gás, ou *h-Fan* – reduzindo até 28% do consumo total de combustível –, localizados um em cada asa (BOEING, 2021).

Além da Boeing, outras indústrias do setor buscam alternativas ao motor a QAV, é o caso da Airbus e da Cessna. A Airbus, por exemplo, realizou em 2020 os primeiros testes de voo da sua aeronave de propulsão híbrida, o *E-Fan X*, em parceria com a *Rolls-Royce* e Siemens. O avião utiliza propulsão com três motores turbina a gás e um motor *e-Fan* de dois megawatts da Siemens, de aproximadamente 2680 cavalos-vapor. A aeronave poderá operar com motor turbina a gás reduzido (sem perda de performance), com capacidade de apenas dois passageiros e uma autonomia de 45 minutos de voo, usando somente a propulsão elétrica (AIRBUS, 2022).

Dessa forma, o sistema de propulsão elétrica do *E-Fan X* utilizará uma alimentação de sistema de geradores de energia e baterias de alta potência, em razão da necessidade de total potência durante a decolagem. A bateria utilizada é a de íons de lítio de 700kW, eficiente o suficiente tanto para suportar a decolagem quanto a subida, energia essa fornecida por meio de um conversor de 3.000V DC (AEROSPACE, 2022).

De acordo com a Forbes (2021), a fabricante Cessna também busca o desenvolvimento de aeronaves mais sustentáveis, em especial o Grand Caravan, substituindo o popular motor

²⁰ *Federal Aviation Administration.*

turboélice do avião por um sistema de propulsão elétrica-híbrida, sem prejudicar seu desempenho. Esse motor será fornecido pela *Surf Air Mobility*, podendo ser a primeira implantação de tecnologia híbrida por uma fabricante de aeronaves.

Acrescenta-se que *Surf Air*, uma provedora de viagens aéreas regionais, fechou acordo, em fevereiro de 2021, para comprar a desenvolvedora de motores de aeronaves híbridas *Ampaire*. Segundo a *Surf Air*, a tecnologia híbrida cortará emissões e custos operacionais do Grand Caravan EX em até 25%. A empresa pretende ser a primeira a introduzir este tipo de tecnologia no mercado de passageiros, e os Caravans híbridos estarão configurados para transportar nove passageiros. O CEO da *Surf Air* estima que os custos operacionais serão mais baixos na versão elétrica-híbrida, o que permitirá uma expansão nacional do serviço regular de passageiros da *Surf Air* de modo a atuar em todos os aeroportos dos EUA. A empresa espera obter a aprovação da FAA para equipar os Grand Caravans com um sistema de propulsão híbrida até 2024 (FORBES, 2021).

2.2 Vantagens e desvantagens do uso da tecnologia elétrica-híbrida e o processo de adaptação das aeronaves de aviação comercial

A indústria aeronáutica ainda está nos estágios iniciais de desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica pura, tendo como principal preocupação as massas significativas de baterias, demasiado pesadas. Os sistemas elétrico-híbridos, assim, ganharam atenção de algumas fabricantes nos últimos anos. Com efeito, o interesse nesses sistemas de propulsão alternativa é crescente, devido à melhoria da eficiência aerodinâmica em relação às configurações convencionais (BRAVO et al., 2020).

Para Bravo et. al (2020), embora as principais discussões pelo mundo apontem problemas ambientais relacionados às emissões de gases por aeronaves, é necessário também observar os extensos custos associados ao consumo de combustível. Espera-se que o desenvolvimento de sistemas híbridos para uso aeronáutico melhore a relação de consumo específico²¹ e torne o voo cada vez mais barato em escala global. Além disso, o ruído produzido por turbinas a gás poderia ser eliminado ou consideravelmente reduzido.

Alrashed et al. (2021) ressaltam que a implementação de um sistema elétrico-híbrido tem vantagens e desvantagens significativas em relação à tecnologia de conservação e transporte de alimentação para os sistemas. Para Iskveren (2014), embora os projetos das

²¹ *Consumo específico* -- O consumo específico de combustível é o fluxo de combustível (Lbs.h), dividido pelo empuxo (Lbs) (REIS, 2015)

novas aeronaves visem uma operação mais evoluída tecnologicamente, as baterias não evoluíram na mesma proporção no que tange à propulsão e à quantidade de energia necessária, se comparada com a alta energia entregue do combustível de aviação convencional.

De acordo com Iskveren (2014), uma bateria de última geração gera de 100-200 Wh/kg ao nível da célula, ao passo que a gasolina tem energia específica de aproximadamente de 13.000Wh/kg. Por outro lado, as baterias de lítio produzem uma energia específica de 11.680 Wh/kg.

Apesar de as baterias representarem as desvantagens destes projetos, outros fatores devem ser considerados na operação destas aeronaves elétricas-híbridas, como: a redução da autonomia de voo devido à baixa energia específica dos sistemas de baterias disponível; a redução de potência necessária; o excessivo tamanho das baterias; e um alto valor nos custos das manutenções das aeronaves (BRAVO et al., 2020).

Diante estas desvantagens, a indústria do setor busca formas de minimizar tais aspectos negativos. Exemplo disso são a redução do peso dos materiais necessários para a produção da aeronave e a geração de mais economia de potência, possibilitando, assim, melhora na eficiência do combustível (ALRASHED et al., 2021).

No projeto de desenvolvimento do *SUGAR Volt*, as empresas optaram pela adição de pontos rígidos à asa para comportar as cápsulas de bateria. Para minimizar os esforços, a aeronave carregaria seus *pods* de bateria como componentes externos, rapidamente trocáveis, permitindo taxas de carga lentas e aumentando a vida útil da bateria, sem interferir nas operações convencionais de manutenção em solo ou aumentar o tempo de operação da aeronave (NASA, 2015).

2.3 Tendência da adoção de aeronaves menos poluentes e elétricas-híbridas no Brasil

À vista da preocupação com os custos relacionados ao consumo de combustível, com os índices de emissão de gases poluentes e com a taxa de ruído emitidas pelas aeronaves atuais nos aeródromos, as empresas de aviação comercial brasileiras vêm tomando medidas para redução destes problemas, renovando suas frotas de aeronaves. De acordo com dados do plano de frota Latam, a companhia está atualmente avaliando a necessidade de novas frotas nos próximos anos (LATAM, 2021).

A empresa celebrou acordos com a Boeing para dois aviões *787 Dreamliner* e com a Airbus, para um total de 70 aviões da família A320-Neo, 20% mais eficientes em termos de

consumo de combustível, afirmando, desse modo, seu compromisso com a sustentabilidade de longo prazo. Espera-se que até 2028 estas aeronaves sejam entregues, embora o projeto possa sofrer modificações a partir dos resultados das discussões em andamento, travadas pelas fabricantes das aeronaves atuais (LATAM, 2021).

De acordo com a divulgação dos resultados do terceiro trimestre de 2021 (3T21) da Azul, em 2021 a companhia possuía uma frota operacional de 160 aeronaves de passageiros e uma frota contratual de 179 aeronaves de passageiros, com idade média de 6,8 anos. No final do 3T21, 19 aeronaves regionais foram incluídas no programa Azul Conecta (AZUL, 2021).

A Azul recebeu, em dezembro de 2021, novas aeronaves ATR e Airbus A320-Neo em sua nova frota. Pode-se afirmar, assim, que a empresa busca avançar com a renovação das suas aeronaves e, de efeito, reduzir os custos com combustível. Nesta linha, a companhia espera concluir até 2026 a renovação 100% de sua frota, no entanto, ainda não apresentou um plano concreto contendo cronograma do processo (FAVARO, 2021).

De acordo com o relatório de resultados do segundo trimestre de 2021 da Gol Linhas aéreas, a empresa busca uma aceleração da transição para novas aeronaves mais sustentáveis. A empresa fechou acordos para a compra de 28 aeronaves adicionais Boeing 737 MAX-8, substituindo 23 B737-800 NGs até o final de 2022. Segundo a Gol, esta substituição reduzirá os custos unitários da companhia em 8% em 2022. Esperando atingir a neutralidade de carbono até 2050, o 737 MAX revela ser 15% mais econômico no consumo de combustível, gera até 16% menos emissões de gases poluentes, possui mais autonomia de voo e é 40% mais silencioso em relação ao 737-800 NG (GOL, 2021).

Tendo em vista a movimentação das empresas aéreas para operações mais sustentáveis e com baixo custo, as companhias iniciaram um investimento em aeronaves totalmente elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOL) para voos locais, podendo operar dentro e fora da cidade e em locais confinados, sendo 100 vezes mais silenciosas que um helicóptero, por exemplo (GOL, 2021).

Apesar de as aeronaves de pequeno porte eVTOL serem um grande avanço para novas operações no que tange à mobilidade, à sustentabilidade e aos custos variáveis, voos longos totalmente elétricos ainda não são possíveis devido às tecnologias hoje existentes. De acordo com a *Rolls-Royce*, a partir deste desafio, iniciaram-se as discussões e os testes sobre o uso de aeronaves híbridas (*E-Fan X*), como já mencionado, o que abre um caminho futuro para as 100% elétricas, sustentáveis e de baixo custo (ROLLS-ROYCE, 2020).

Alrashed et al. (2021) reforçam que, apesar de a utilização de energia elétrica em aeronaves estar revolucionando a indústria, o crescimento do uso de sistemas elétricos apresenta, como já dito, desafios significativos para alcançar resultados desejados com a tecnologia hoje existente. Estudos na área focam em trazer um aumento à eficiência das configurações atuais, principalmente na integração dos sistemas elétrico-híbridos com fontes eficazes, para que futuramente motores totalmente elétricos possam ser implementados no setor de aviação.

Porém, apesar das tecnologias atuais postergarem a possibilidade de voos longos com aeronaves híbridas de grande porte, para *Surf Air*, os voos comerciais regionais com aeronaves híbridas já são uma possibilidade. Com Grand Caravans Híbridos de nove lugares, é possível a realização destas operações, pois, uma vez adaptado com um motor totalmente elétrico, poderia transportar uma carga a uma distância de 160 km, cortando índice de emissão de gases e custos operacionais em até 25% e tornando-se, desse modo, atraente para algumas operadoras (FORBES, 2021).

Sobre a adoção no Brasil de aeronaves híbridas de médio e grande portes, entende-se que esta perspectiva não se desenha no horizonte. Todavia, observa-se a inclusão de aeronaves mais sustentáveis e menos poluentes, tais como o Airbus A320-Neo e o Boeing 737 MAX-8 (LATAM, 2021; GOL, 2021). Por outro lado, o Grupo Azul, por meio de sua empresa aérea regional, a Azul Conecta, opera com Cessna Grand Caravan C208 (AZUL, 2020) e, à vista do que foi pensado pela *Surf Air* (FORBES, 2021), cria-se uma possibilidade para a substituição das aeronaves da Conecta pelos Grand Caravans Híbridos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou alguns dos custos suportados pelas empresas aéreas extraídos de documentos das companhias nacionais, apontando, em especial, os gastos com manutenção e, principalmente, com combustível fóssil. Também tratou da eficiência e da sustentabilidade de motores térmicos, considerando o índice de emissão de gases por fases de voo e abordou tecnologias mais sustentáveis para o grupo motopropulsor. Assim, a pesquisa identificou as medidas adotadas pela indústria aeronáutica no sentido de reduzir ou mitigar problemas relacionados à poluição e ao consumo dos motores aeronáuticos, abordando, nesse sentido, o uso de motores elétrico-híbridos e sua viabilidade para a aviação comercial brasileira.

Destarte, e levando em consideração o contexto mundial, a partir dos resultados da pesquisa identificou-se uma tendência à substituição de motores Ciclo Otto e Ciclo Brayton

por motores alternativos. Entretanto, essa transformação será a longo prazo: em alguns casos, a expectativa é para 2050. A princípio, o modelo de maior interesse é o elétrico-híbrido, pois é apto a promover a redução das emissões de gases poluentes, como CO₂, bem como dos ruídos das aeronaves e de gastos com combustível. Todavia, esse modelo ainda está em estudo, envolvendo especialmente o *SUGAR Volt* da Boeing e o *E-Fan X* da Airbus, ainda que testes de voo da Airbus já tenham ocorrido em 2020. Acrescenta-se que o motor dos Grand Caravans híbridos, desenvolvidos pela *Surf Air Mobility*, apresenta-se mais promissor, com tendência de inserção no mercado até 2024.

Para o cenário nacional, as três maiores empresas aéreas buscam modificar suas frotas adquirindo aeronaves mais sustentáveis e eficientes no consumo de combustível. É o caso da Latam e da Azul, com a utilização dos A320-Neo da Airbus, cujos motores são 20% mais eficientes, e da Gol, que está passando a adotar o Boeing 737 MAX-8, 15% mais econômico e 16% menos poluente.

Em virtude de os motores elétrico-híbridos ainda estarem em desenvolvimento e testes, com enfoque na superação das desvantagens do motor em termos de bateria (peso) e autonomia, fica evidente que sua utilização pelas companhias aéreas, inclusive as brasileiras, deve demorar. No entanto, desenha-se mais viável a adoção de aeronaves de menor porte, como os Grand Caravans, cujo motor híbrido já tem previsão mercadológica para 2024. Isto significa uma oportunidade para as empresas regionais que operam com estes aviões, como a Azul Conecta, com uma frota de Grand Caravans em suas operações.

À vista disso, a hipótese deste estudo se confirma parcialmente, pois motores aeronáuticos elétrico-híbridos já estão em fase de testes e são mais eficientes e sustentáveis que os térmicos. Por outro lado, a sua adoção pelas empresas aéreas, inclusive as nacionais, ainda demandará muito tempo, haja vista que as desvantagens desse motor precisam ser superadas para que estes entrem em operação. De todo modo, as companhias aéreas brasileiras buscam formas de reduzir o consumo de combustível e ser mais sustentáveis, adotando aeronaves mais eficientes que as atualmente disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

ALRASHED, M. et al. **Utilization of turboelectric distribution propulsion in commercial aviation: A review on NASA's TeDP concept.** 2021. p 48-55 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936121001059>. Acesso em: 9 abr. 2022.

AIRBUS. **E-Fan X, A giant leap towards zero-emission flight.** 2022. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x>. Acesso em: 14 mar. 2022.

AEROSPACE TECHNOLOGY. **E-Fan X hybrid electric aircraft.** 2022. Disponível em: <https://www.aerospace-technology.com/projects/e-fan-x-hybrid-electric-aircraft/>. Acesso em: 2 abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Metadados do conjunto de dados: **Dados estatísticos do transporte aéreo.** 2019a. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/dados-estatisticos-do-transporte-aereo/48-dados-estatisticos-do-transporte-aereo>. Acesso em: 6 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil – 2019.** Brasília: ANAC, 2019b. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf. Acesso em: 26 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Empresas aéreas brasileiras têm prejuízo líquido de R\$ 5,7 bilhões no 3º tri de 2021,** 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2021/aereas-brasileiras-tem-prejuizo-liquido-de-r-5-7-bilhoes-no-3o-tri-de-2021>. Acesso em: 31 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC) Características do mercado de transporte aéreo público: **Uma visão do mercado no Brasil e comparação dos níveis de concentração com outros países,** n. 1, v. 1. ANAC. Brasília-DF, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/textos-para-discussao/textos/td-01-caracteristicas-do-mercado-de-transporte-aereo-publico-v201911.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Combustível de Avião.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>. Acesso em: 26 fev. 2022

AZUL. **Azul divulga resultados do terceiro trimestre com receita líquida de R\$ 2,7 bilhões e margem EBITDA de 17,9%.** Barueri-SP, 2021. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/ed78542a-4e01-429a-8926-03d69ccfa307/00aec792-427d-02af-139e-84cc13b004e1?origin=2>. Acesso em: 24 mar. 2022.

AZUL. **Azul Conecta é a nova empresa sub-regional da Azul.** Barueri-SP, 2020. Disponível em: <https://revistaazul.voeazul.com.br/universo-azul/azul-conecta-e-a-nova-empresa-sub-regional-da-azul/>. Acesso em: 17 abr. 2022.

BRAVO, G. M. et al. Elsevier. **Performance analysis of hybrid electric and distributed propulsion system applied on a light aircraft.** Barcelona: v. 214, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220319307>. Acesso em: 1 mar. 2022.

BETANCOURTET, M. A. M. et al. Tecciencia. **Use of biofuels in the aeronautical industry**, v. 14, n. 26, p. 53-63, 2019. Disponível em: <https://revistas.ecci.edu.co/index.php/TECCIENCIA/article/view/514>. Acesso em: 28 fev. 2022.

BOEING. **How sweet the future of aviation?** Washington-USA. 2021. Disponível em: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2017/feature-technical-sugar.page>. Acesso em: 14 mar. 2022.

BOEING. **No futuro não somente os carros serão elétricos**. 2022. Disponível em: <https://www.boeing.com.br/ino%C3%A7a%C3%A3o/avi%C3%B5es-el%C3%A9tricos.page>. Acesso em: 1 mar. 2022.

COELHO, T. S. **Gestão de custos e preços [livro didático]**. Palhoça: UnisulVirtual, 2020.

DICIONÁRIO FINANCEIRO. **O que são custos fixos e custos variáveis?** 2022. Disponível em: <https://www.dicionariofinanceiro.com/custos-fixos-e-variaveis/>. Acesso em: 9 mar. 2022.

FAVARO, C. **Azul recebe quatro novas aeronaves nesta semana e reforça frota**. São Paulo-SP 2021. Disponível em: <https://valorinveste.globo.com/mercados/renda-variavel/empresas/noticia/2021/12/27/azul-recebe-quatro-novas-aeronaves-nesta-semana-e-refora-frota.ghtml>. Acesso em: 15 abr. 2022.

FORBES. **Cessna fecha acordo para oferecer versão elétrica híbrida do avião utilitário Caravan**. 2021. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesesg/2021/07/cessna-fecha-acordo-para-oferecer-versao-eletrica-hibrida-do-aviao-utilitario-caravan/>. Acesso em: 7 abr. 2022.

GOL. **Relatório de resultados terceiro trimestre de 2021**. Rio de Janeiro-RJ 2021. Disponível em: https://ri.voegol.com.br/download_arquivos.asp?id_arquivo=3D5B6060-7B61-4816-BA88-CF29382035FD. Acesso em: 24 mar. 2022.

GOL. **GOL lançará malha aérea com 250 aeronaves eVTOL no Brasil**. Rio de Janeiro- RJ 2021. Disponível em: file:///C:/Users/bethm/Downloads/GOL-%20Malha%20eVTOL%20-%202021Set2021_vf.pdf. Acesso em: 15 abr. 2022.

LATAM. **Latam anuncia melhoras contínuas na receita e espera terminar o ano operando mais de 65% da capacidade de 2019**. Santiago-Chile, 2021. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2021/11/Latam-3-T21.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ISIKVEREN, A. T. et al. Pre-design strategies and sizing techniques for dual-energy aircraft, **Aircraft engineering and aerospace technology**, n. 86, v.1, p. 525-542, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274389634_Pre-design_Strategies_and_Sizing_Techniques_for_Dual-Energy_Aircraft. Acesso em: 3 mar. 2022.

MENGISTU, I. H. **Small internal combustion engine testing for a hybrid-electric remotely-piloted aircraft**. Air force institute of technology. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: 2011. Disponível em:

<https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2344&context=etd>. Acesso em: 3 mar. 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Subsonic ultra green aircraft research: phase II – volume II – hybrid electric design exploration, v 2.** Washington, D. C., EUA, 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/42706577.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.

REIS, V. **Teoria e construção de motores de aeronaves: AEROTD**, v. 1, p 7-8. 2015. Disponível em: <https://aerotd.com.br/decoleseufuturo/wp-content/uploads/2015/05/TEORIA-E-CONSTRU%C3%87%C3%83O-DE-MOTORES-DE-AERONAVES.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2022.

ROLLS-ROYCE. **The E-Fan X programme.** 2020. Disponível em: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/insights/2018/paul-stein-talks-about-e-fan-x.aspx>. Acesso em: 15 abr. 2022.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Saiba o que são custos fixo e custos variáveis.** 2019. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/ap/artigos/saiba-o-que-sao-custos-fixos-e-custos-variaveis,7cf697daf5c55610VgnVCM1000004c00210aRCRD>. Acesso em: 9 mar. 2022.

TEIXEIRA, R. dos R. **Gestão financeira de aeronaves.** Goiânia: Lift Aviation, 2020. Disponível em: <https://plataforma.liftaviation.com.br/curso/19911/867676>. Acesso em: 26 fev. 2022.