

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



A VIABILIDADE DE MOTORES ALTERNATIVOS NA AVIAÇÃO DE INSTRUÇÃO

CELSO ANTONIO STARLING CAVALCANTI MATOS

GOIÂNIA

2025

CELSO ANTONIO STARLING CAVALCANTI MATOS

A VIABILIDADE DE MOTORES ALTERNATIVOS NA AVIAÇÃO DE INSTRUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia
Universidade Católica de Goiás, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Bacharel em
Ciências Aeronáuticas.

Orientador:

Prof. Esp. Andréluiz da Silva Fernandes

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Humberto César Machado

Prof. Ms C. Lucas Pereira Furtado

GOIÂNIA
2025

RESUMO

Este trabalho investiga a viabilidade da utilização de motores alternativos — elétricos, híbridos e a hidrogênio — na aviação de instrução no Brasil, comparando-os aos motores convencionais a combustão. A pesquisa aborda aspectos técnicos, operacionais, econômicos e ambientais, com foco em eficiência energética, custo operacional, manutenção e impacto ambiental. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica e análise comparativa de dados técnicos de aeronaves, incluindo estudos de caso como o da Green Flight Academy, na Suécia. Os resultados indicam que os motores elétricos apresentam vantagens significativas, como alta eficiência (cerca de 90%), menor custo operacional e redução de emissões, embora a autonomia limitada das baterias ainda seja um obstáculo para sua adoção exclusiva. Sistemas híbridos e a hidrogênio surgem como alternativas promissoras, mas permanecem em estágio experimental, com desafios relacionados ao peso, complexidade e infraestrutura. Conclui-se que, apesar das barreiras tecnológicas, a transição para tecnologias mais limpas é essencial para promover a sustentabilidade e a modernização na formação de pilotos.

PALAVRAS-CHAVE: Aviação de instrução. Motores elétricos. Motores híbridos. Motores a hidrogênio. Sustentabilidade aeronáutica.

ABSTRACT

This study investigates the feasibility of using alternative engines—electric, hybrid, and hydrogen—in flight training in Brazil, comparing them to conventional combustion engines. The research addresses technical, operational, economic, and environmental aspects, focusing on energy efficiency, operating costs, maintenance, and environmental impact. To this end, a literature review and comparative analysis of aircraft technical data were conducted, including case studies such as that of the Green Flight Academy in Sweden. The results indicate that electric engines offer significant advantages, such as high efficiency (approximately 90%), lower operating costs, and reduced emissions, although the limited range of batteries remains an obstacle to their exclusive adoption. Hybrid and hydrogen systems emerge as promising alternatives, but remain in an experimental stage, with challenges related to weight, complexity, and infrastructure. It concludes that, despite technological barriers, the transition to cleaner technologies is essential to promote sustainability and modernization in pilot training.

KEYWORDS: Flight training aviation. Electric engines. Hybrid engines. Hydrogen engines. Aeronautical sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A aviação é um setor estratégico, que desempenha papel fundamental no desenvolvimento econômico, na conectividade regional e na formação de profissionais altamente qualificados. No Brasil, a aviação de instrução representa a iniciação de novos pilotos, e é, tradicionalmente, realizada com aeronaves equipadas com motores a combustão interna, como os populares Cessna 152 e 172 (Lima; Henkes, 2022).

No entanto, com o avanço das tecnologias sustentáveis e o aumento da preocupação ambiental, surgem alternativas de propulsão, motores elétricos, híbridos e a hidrogênio, que prometem maior eficiência energética, menor emissão de poluentes e redução dos custos operacionais. O uso de motores alternativos na aviação ainda é incipiente, mas pode começar a ganhar espaço em operações de curta duração, como as realizadas em aeroclubes e escolas de formação de pilotos. Embora existam vantagens, a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta barreiras significativas, tais como o uso de baterias, por exemplo (Kim *et al.*, 2018; Lima; Henkes, 2022).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo investigar e comparar os motores a combustão e os motores alternativos aplicados à aviação de instrução, com destaque para as suas vantagens, desvantagens e viabilidade operacional no cenário brasileiro. A partir dessa análise, busca-se contribuir para a discussão sobre inovação e sustentabilidade na formação de pilotos, a fim de proporcionar subsídios para instituições de ensino e operadores aeronáuticos que consideram a transição para tecnologias mais limpas e a todos os que fazem parte do sistema de instrução de voo. Além disso, os alunos terão acesso a informações acerca da viabilidade da motorização elétrica, inclusive suas vantagens e limitações. A pesquisa procura contribuir com informações úteis sobre a modernização e sustentabilidade na formação de pilotos, tema de grande relevância atual do setor aeronáutico.

O objetivo geral é analisar as principais características, vantagens e desvantagens dos motores elétricos e a combustão na aviação de instrução, a fim de avaliar aspectos como custo operacional, manutenção, impacto ambiental e infraestrutura. Os objetivos específicos são: 1) entender a trajetória histórica da aviação; 2) conhecer a aviação de instrução; 3) compreender as opções de motores de aviação mais saudáveis e sustentáveis.

1.1 Procedimentos metodológicos

Este estudo é qualitativo e exploratório, com o objetivo de entender e comparar as características técnicas, operacionais, econômicas e ambientais de motores alternativos e motores de combustão usados na instrução de voo e sua viabilidade. A pesquisa consiste nas seguintes fases: revisão de literatura — por meio de levantamentos de artigos científicos, livros técnicos, manuais de fabricantes, regulamentos da Anac e estudos de caso sobre motores aeronáuticos e seus usuários atuais, com ênfase em aeronaves de instrução —; e análise documental — por meio da análise de dados e relatórios técnicos, a fim de comparar indicadores como custo operacional, consumo de energia, manutenção e emissões.

Com vistas a atender aos objetivos propostos, procedeu-se à revisão bibliográfica mediante a busca de pesquisas e artigos indexados que abordam os conceitos pertinentes ao tema em estudo. As fontes consultadas foram: o Google Acadêmico, o Repositório Acadêmico de Graduação (RAG) da PUC-GO e livros físicos.

A pesquisa foi realizada entre os dias 19 e 28 de março de 2025, e utilizou os seguintes descritores: aviação de instrução; motores de aviação alternativos; motores a combustão para aeronaves; motores a hidrogênio para aeronaves; motores elétricos para aeronaves; motores híbridos para aeronaves. Foram consideradas as publicações entre 2008 e 2025, em português e inglês.

A busca resultou em 51 trabalhos, dos quais foram selecionados 18, inclusive artigos e trabalhos de conclusão de curso, com base na pertinência temática e na relevância do conteúdo para os objetivos da pesquisa. Os materiais selecionados foram analisados integralmente e sintetizados, e assim, contribuíram para a base teórica deste estudo, que são: Franchi (2008); Kotay e Das (2008); Silva e Santos (2009); Sena, 2010; Sales, 2012; Rocha, Sousa e Campos (2016); Silva (2016); Fay e Fontes (2017); Kim, Perry e Ansell (2018); Voskuijl, Van Bogaert e Rao (2018); Barriga (2021); Martins (2021); Milanez *et al.* (2021); Strassburger (2021); Lima e Henkes (2022); Fante (2023); Guimarães e Henkes (2023); e Homa (2023).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, apresentam-se os contextos relacionados à trajetória histórica da aviação e aos motores utilizados na aviação de instrução, com as possibilidades de uso de motores sustentáveis.

2.1 Trajetória histórica da aviação

Para entender o contexto histórico da aviação, especialmente da instrução, apresenta-se, em seguida, um breve histórico relacionado ao tema.

2.1.1 Primórdios da aviação e da instrução

Segundo Palhares (2002), pode-se tomar a frustrada tentativa de Ícaro como o primeiro grande marco do sonho alado da humanidade. Já no século XV, o célebre Leonardo Da Vinci, havia planejado um artefato para voar. A etapa inicial da consolidação da capacidade de cruzar os ares ocorreu por meio dos primeiros balões com Santos Dumont, um dos primeiros a utilizar motores de motocicletas e automóveis em seus dirigíveis. A partir disso, ele construiu um aeroplano que se tornou o pioneiro em alçar voo por meios próprios, em 1906, e assim, deu início à aviação mundial (Silva; Santos, 2009).

A história da atividade aérea no Brasil se confunde com a história da formação de pilotos e mostra que os primeiros aviadores eram, com poucas exceções, os próprios projetistas e construtores das aeronaves que pilotavam, e com isso, arriscaram as suas vidas em cada voo, conforme demonstra o relato de um aviador da época (Silva; Santos, 2009) (Santo, 1944, p. 26 *apud* Sales, 2012, p. 85):

O vento era para nós um terror, pois o nosso campo media poucas centenas de metros de extensão. Esperávamos a calma da tarde para fazer nossas experiências. Antes de subirmos no aparelho construído por nós, verificávamos todas as peças, tão frágeis, amarradas com corda de piano; o aparelho balançava como um “manjar”. A partida feita pelo lançamento da hélice, tornava-se extremamente perigosa. O mecânico lançador da hélice era um candidato à morte. Um verdadeiro rosário, como já dissemos [...]

O Aero Club Brasileiro foi fundado no atual aeródromo militar de Campo dos Afonsos, no Rio de Janeiro, onde atualmente se localizam a Base Aérea dos Afonsos e o Museu Aeroespacial (MUSAL). Nesse espaço, estabeleceu-se a primeira escola de aviação do Brasil e sétima no mundo, e assim, consolidou a data de outubro de 1911 como marco inaugural da aviação brasileira (Fay; Fontes, 2017).

De acordo com Fay e Fontes (2017), em 1918, foi efetivada a filiação do Aero Club junto a Fédération Aéronautique Internationale (FAI), organização criada em 1905, com vistas a reunir e organizar os aeronautas. Tal ato permitiu ao Aero Club emitir licenças de piloto em nome da FAI. O primeiro brevê (maneira pela qual eram chamadas as licenças de piloto, à época) foi concedido para o Primeiro Tenente do Exército Raul Vieira de Mello, em 21 de agosto de 1919.

Apenas após os anos de 1930, o governo passou a estruturar a aviação civil, já que a aviação comercial havia se consolidado e constituía uma realidade no país. Assim, em 1931, o governo brasileiro criou o DAC, de acordo com Silva e Santos (2009):

O Departamento de Aeronáutica Civil, órgão brasileiro criado para estudar, orientar, planejar, controlar, incentivar e apoiar as atividades de aviação civil pública e privada, surgiu no dia 22 de abril de 1931, através do decreto nº 19.902, assinado pelo Presidente da República Getúlio Vargas. Com sede no Rio de Janeiro, o DAC era subordinado ao Ministério da Viação e Obras Públicas, em 1941 passou para o Ministério da Aeronáutica e, mais tarde em 1969, seu nome foi modificado para Departamento de Aviação Civil – DAC.

Porém, anos depois, em um esforço para desvincular atribuições e responsabilidades militares e civis, o DAC foi separado em dois órgãos: Agência Nacional de Aviação Civil — Anac — e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo — DECEA (Sena, 2010). A Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) foi instituída em 2005, com o objetivo de regular e fiscalizar as atividades da aviação civil e a infraestrutura aeronáutica e aeroportuária no Brasil (Anac, 2025).

Rocha, Sousa e Campos (2016, p. 35 *apud* Anac, 2014) apontam que a indústria brasileira de aviação civil conta, com 12 empresas privadas que encerraram o ano de 2013 com cerca de 90 milhões de passageiro-quilômetros pagos (RPK) e com, aproximadamente, 60 mil empregos diretos.

2.1.2 Instrução do piloto no Brasil

Com a aviação em evolução, há uma crescente demanda por pilotos capazes de atender as demandas dessa indústria. As escolas e os clubes de aviação são os encarregados de desempenhar esse papel essencial, enquanto a Anac, por meio dos Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil (RBAC) realiza a regulamentação e fiscalização desse processo (Anac, 2025).

De acordo com o RBAC 61, publicado pela Anac (2025), a instrução no Brasil ocorre em duas etapas principais: o treinamento teórico, em que o aluno recebe conhecimentos técnicos, teoria de voo, navegação aérea, meteorologia e regulamentação aeronáutica; também uma prova, aplicada pela Anac, para comprovar a sua aptidão teórica.

O treinamento prático para a obtenção da licença de piloto privado estabelece que um candidato deve ter completado 18 anos e ter finalizado o Ensino Médio, antes de começar a realizar os voos. Quando forem iniciados, o aluno deve ser capaz de reconhecer e gerenciar ameaças e erros; realizar manobras para aumentar a proficiência em situações adversas;

dominar a fraseologia padrão; entender sobre: a navegação aérea, operação noturna, peso e balanceamento, operação normal da aeronave, entre outras proficiências. Por fim, deve realizar um total de 40 horas de voo para a obtenção da licença, concedida mediante voo de cheque, avaliado por um profissional licenciado pela a Anac, de acordo com a RBAC 61 (Anac, 2024).

Caso o aluno deseje se tornar um piloto em nível profissional, autorizado a trabalhar como tal, deve se submeter a mais treinamentos. A Anac exige um mínimo de 150 horas de voo para a concessão da licença de piloto comercial, que após ser licenciado, pode ser contratado por empresas aéreas, táxis aéreos, como piloto executivo mediante o voo de cheque, conforme a RBAC 61 (Anac, 2024).

A instrução de voo, na atualidade, ocorre em CIACs (Centro de Instrução de Aviação Civil) regidos pelo RBAC 141, a qual constitui uma “[...] organização certificada, cuja finalidade é formar recursos humanos para a aviação civil, conduzindo seus alunos para a obtenção das licenças, habilitações e certificados requeridos pela ANAC” (Anac, 2023).

Atualmente, existem 162 CIACs que oferecem instrução prática no Brasil (Anac, 2025). A maioria desses centros optam por aeronaves mais antigas e consolidadas — como Paulistinha, Cessna 152, Cessna 172, Aero Boero e Piper Cherokee —, equipadas com motores convencionais movidos a gasolina de aviação, também há interesse em aeronaves mais modernas, porém ainda com motores a combustão — como o Colt 100 da Impaer e o MC01 da Montaer (Menocin, 2023).

2.1.3 O avião de instrução

A aeronave mais utilizada atualmente para instrução, em nível mundial, é o Cessna 172 e suas variações. O avião possui uma estrutura semi-monocoque de asas altas semi-cantilever, com capacidade para quatro pessoas, a um peso máximo de decolagem e pouso de 1088 kg (2400 lb). Geralmente, é equipado com um motor capaz de produzir, em média, 160 BHP a 2700 RPM, com uma autonomia de 5 horas, em condições ideais a 100 KIAS de velocidade (Cessna Aircraft Company, 1980).

Segundo Souza (2018, p. 5 *apud* Homa, 2010), “O motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia calorífica da queima do combustível em energia mecânica. Essa energia obtida é utilizada para fornecer a tração necessária ao voo”. Os motores a combustão interna utilizados nos aviões, geralmente, funcionam segundo o Ciclo Otto.

Na aviação de pequeno porte, esse motor tem sido o mais utilizado, devido ao seu baixo custo e boa eficiência em baixas altitudes, e assim, enquadra-se nas necessidades do setor de instrução aeronáutica. A eficiência térmica desses motores varia de 25% a 30%, o que significa que, cerca de 70% da energia liberada durante a combustão não é convertida em tração. Em razão dessa limitação, são considerados de baixa eficiência, quando comparados aos motores elétricos, cuja eficiência alcança cerca de 90% (Souza, 2018).

Essa aeronave é a favorita de muitas escolas, devido a sua alta confiabilidade, de mais de 50 anos de mercado, com 71 ocorrências registradas pelo CENIPA, desde 2015, e com quatro fatalidades (Sipaer, 2025). Além disso, foi considerada a aeronave mais vendida no mundo, com mais de 450 registradas apenas no Brasil (Anac, 2025b).

A partir da aceitação e da credibilidade dos modelos Cessna 120 e 140, foi lançado o design da Cessna 170, em 1947, que, apesar de ter sido fabricado por apenas um ano, registrou mais de 700 unidades vendidas. A partir dessa experiência, desenvolveu-se o Cessna 172, concebido com a proposta de oferecer eficiência em múltiplos aspectos, em vez de atender a um único critério específico. Essa característica fez do modelo uma aeronave amplamente adotada nos programas de treinamento civil no período pós-guerra nos Estados Unidos (Smith, 2013).

Apesar de sua popularidade e excelência, o Cessna 172 passou a apresentar obsolescência quando comparado a aviões mais modernos do mesmo porte, devido ao alto consumo de 30L/h e baixa autonomia; além disso, há crescente busca por inovação e tecnologias mais limpas, e por isso, torna-se necessário buscar alternativas (Cessna Aircraft Company, 1980).

A também crescente conscientização ambiental e a busca por sustentabilidade estão cada vez mais presentes nas discussões na área aeronáutica e, inevitavelmente, na instrução de voo, conforme o texto da Anac (2021):

A mudança climática é a grande questão ambiental do século XXI, de acordo com a Organização das Nações Unidas. O impacto exato da aviação na mudança do clima é difícil de mensurar. Contudo, no que compete ao volume de emissões de CO₂ - o principal gás de efeito estufa - a aviação responde por cerca de 2% do total mundial. Embora a participação atual não seja elevada, o setor busca reduzir sua contribuição devido ao crescimento acelerado esperado para o futuro: em 2016 o relatório ambiental da OACI projetou um crescimento da aviação internacional em 5,3% ao ano até 2030.

É cada vez mais consensual a necessidade de abandonar uma economia baseada na emissão de gases de efeito estufa (GEE) e adotar uma economia de baixos níveis de emissões. Objetivamente, desde a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações

Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), realizada em Paris, dezenas de países formalizaram metas para redução das emissões de GEE, conhecidas como contribuições nacionalmente determinadas (NDC, ou em inglês *intended nationally determined contribution* – INDC). O Brasil, por exemplo, comprometeu-se a diminuir suas emissões em 37% até 2025, além de ampliar esforços até atingir a meta de redução de 43% em 2030 (Milanez *et al.*, 2021). Atualmente, a aviação responde por aproximadamente por 2,5% a 3% das emissões globais de carbono, e estima-se que até o ano de 2050, as emissões de CO₂ provenientes do setor mais que dupliquem (Exame, 2022).

Como medida relevante para promover a sustentabilidade, a eficiência e a modernização da instrução aeronáutica no Brasil, a adoção de motores alternativos, em substituição aos convencionais, pode contribuir para a mitigação das emissões do setor e para uma formação mais atualizada e eficaz. Atualmente, são consideradas três principais alternativas: motores elétricos, motores a hidrogênio e sistemas híbridos, todos em diferentes estágios de pesquisa e desenvolvimento (Ruschel, Henkes, 2021).

2.2 Projetos de avião sustentável para instrução

A seguir, apresentam-se as principais propostas de motores que podem tornar sustentáveis e viáveis os projetos de aeronaves para instrução.

2.2.1 Motor e aeronave elétricos

Um motor elétrico pode ser conceituado como uma máquina destinada a realizar uma transformação de energia elétrica em mecânica. É utilizado em diversos tipos de motores, pois combina as vantagens da energia elétrica com base em uma construção simples, de grande versatilidade e adaptação de cargas e rendimentos (Franchi, 2008)

O motor elétrico, quando comparado ao convencional, traz vantagens significativas para o uso em aeronaves, tais como: grande eficiência energética, baixo peso, e alta potência em um espaço físico reduzido. Tem como desvantagem o alto custo dos ímãs permanentes, além da perda de eficácia em altas velocidades (Neocharge, 2021).

A bateria é um dispositivo que, de forma geral, transforma energia química em energia elétrica e foi o principal fator para a descontinuação de veículos elétricos no século XX. Uma parte importante a se considerar, quando se fala de motores elétricos, é que constitui o principal

limitante para a aviação, devido ao seu peso, alto preço e baixa capacidade energética, se comparado a combustíveis fósseis (Neocharge, 2021).

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos relacionados a baterias e eficiência de motores elétricos tornaram a propulsão elétrica uma alternativa promissora aos motores a combustão tradicionais na aviação. Antigamente, a relação massa-potência (Homa, 2023. p. 28) inviabilizava a utilização de motores elétricos em aeronaves de pequeno porte, por serem mais pesados em comparação a motores de combustão; no entanto, novos projetos têm demonstrado que é possível utilizar essa tecnologia.

Dentre as aeronaves que podem ser adotadas por escolas de instrução de voo, o modelo Velis Electro tem demonstrado ser uma boa opção, uma vez que, atualmente, é o único avião elétrico utilizado fora do país para instrução e o primeiro elétrico certificada para tal. Segundo a sua fabricante, o modelo foi desenvolvido em uma cooperação firmada entre a eslovênia Pipistrel e a EASA3 em 2020 (Pipistrel, 2020).

A Pipistrel projetou a aeronave Velis Electro para operar com duas baterias, que se espera fornecer 3000 ciclos, e varia de acordo com a temperatura ambiente a qual está exposta. O método de carregamento fornece por volta de 500 horas de voo, até atingir 80% da sua vida útil, quando a sua substituição é realizada. O valor para reposição das baterias está em torno de 10.200 € ou R\$ 62.550,00 em janeiro de 2021 (Sustainable Skies, 2019).

As baterias podem ser carregadas por meio de uma porta de carregamento instalada na aeronave. O tempo necessário para a carga completa das duas baterias do Velis Electro varia entre 1 hora e 20 minutos e pouco mais de 2 horas, a depender do nível de carga desejado. A recarga de 35% a 95% demanda aproximadamente 1 hora e 20 minutos, enquanto a carga de 30% até 100%, influenciada por fatores como temperatura ambiente e idade das baterias, pode ultrapassar duas horas (Pipistrel, 2020). Em condições ideais, as baterias oferecem autonomia de 1 hora e 2 minutos, alcance de 70 NM, velocidade máxima de cruzeiro de 93 KCAS, teto operacional de 12.000 pés e velocidade de estol que varia entre 51 e 42 KCAS, conforme configuração de flaps e potência (Pipistrel, 2020).

Para analisar a viabilidade da utilização de motores elétricos na aviação de instrução, foram coletados e comparados dados técnicos e operacionais de aeronaves equipadas com motores a combustão e motores elétricos. O estudo evidenciou diversas vantagens em favor da propulsão elétrica, como elevada eficiência energética, próxima a 90%, em contraste com os cerca de 30% dos motores convencionais; redução do custo operacional, decorrente do menor preço da energia elétrica em relação a gasolina de aviação (AVGAS); manutenção simplificada

e menos onerosa, apesar do custo estimado das baterias; e emissões significativamente reduzidas (Lima; Henkes, 2022).

Entretanto, a autonomia das baterias permanece como um desafio tecnológico relevante, ainda que existam perspectivas de aumento gradual, impulsionadas por avanços contínuos na tecnologia de produção. No cenário atual, essa limitação inviabiliza a adoção de frotas exclusivamente elétricas, dado que os voos necessários à instrução excedem a capacidade das baterias, e assim, torna indispensável a manutenção de aeronaves convencionais para a formação de pilotos (Lima; Henkes, 2022).

A análise dos principais competidores na busca por combustíveis sustentáveis indica que a tecnologia elétrica, no momento, lidera a corrida energética, e é a única com aeronaves disponíveis para aquisição, aliada a um setor científico altamente ativo na busca por melhorias. Com base nisso, realizou-se um estudo de caso na escola de aviação Green Flight Academy (GFA), na Suécia, com o objetivo de avaliar a viabilidade atual da instrução elétrica e sua possível implementação no Brasil. A GFA foi estabelecida em 2021, como resultado de um grande investimento no norte da Suécia para posicioná-los como um dos centros europeus para a conversão para tecnologias verdes, cuja missão é:

Nós amamos a aviação e nós amamos voar. Viagem aérea e a interface entre culturas, pessoas e lugares. Para nos mantermos este incrível portão para o mundo, ele deve fazer a transição para um modelo sustentável. Esse é o futuro que a Green Flight Academy está trabalhando para chegar (Green Flight Academy, 2025).

A frota da GFA é composta por quatro tipos de aeronaves: o Pipistrel Velis Electro, atualmente utilizado para instrução elétrica; o Tecnam P2010 TDI, equivalente ao Cessna 172; o DA42-VI, empregado para treinamento multimotor; e o American Champion 7ECA, destinado às manobras acrobáticas exigidas na formação de pilotos comerciais. Além disso, a GFA dispõe do simulador Alsim ALX, de última geração, para treinamento de voo por instrumentos (Green Flight Academy, 2025).

O treinamento inicial é realizado no Velis Electro, que abrange aproximadamente 30% do curso, após o qual o aluno migra para o Tecnam P2010 TDI, que oferece autonomia de cinco horas. O Velis Electro é restrito a voos locais e circuitos de tráfego, devido à sua autonomia limitada a cerca de 50 minutos e ao elevado tempo de recarga (Green Flight Academy, 2025).

Embora a GFA não divulgue os valores das horas de voo, é possível estimar os custos operacionais com base em outra escola que utiliza o Velis Electro. A Santa Monica Flyers, nos Estados Unidos, lista o valor de US\$149/h para o Velis Electro e, em média, US\$200/h para o Cessna 172 (Santa Monica Flyers, 2025).

Esses dados indicam que a utilização de aeronaves elétricas pode reduzir os custos operacionais, e assim, permitir a oferta de cursos mais acessíveis e sustentáveis. Contudo, persistem desafios significativos, como a baixa autonomia e o longo tempo de recarga, que limitam a aplicação dessas aeronaves em programas de treinamento

2.2.2 Motor híbrido para aeronaves

Outra solução, mais sustentável e eficiente para viagens de longa distância, é a tecnologia híbrida, na qual motores elétricos e de combustão trabalham juntos, e com isso, dispensam o peso das baterias de uma aeronave totalmente elétrica. Logo, pode atender a demanda de viagens mais longas, e assim, torna-se mais sustentável que os motores de combustão interna. A economia de combustível fica na faixa de 7% a 12% com a hibridização dos motores (Voskuijl; Van Bogaert; Rao, 2018; Barriga, 2021; Martins, 2021; Strassburger, 2021).

A principal diferença entre os sistemas puramente elétricos e os sistemas híbridos reside na presença de dois mecanismos de propulsão integrados e monitorados por um sistema de supervisão. Um deles é o turbo hélice, responsável pela queima dos combustíveis, e assim, libera gases de exaustão e gera o empuxo necessário para o voo. O outro consiste no sistema de geração elétrica, que pode ser alimentado pelo próprio sistema de combustão e aproveitar a energia cinética das engrenagens da aeronave (Voskuijl; Van Bogaert; Rao, 2018; Strassburger, 2021).

Deve-se considerar que sistemas de propulsão híbridos elétricos são mais adequados para aeronaves com demanda flutuante de energia. O melhor desempenho é obtido quando os motores a combustão fornecem potência continuamente; e a demanda extra de potência é suprida pelos motores elétricos (Barriga, 2021). Portanto, os sistemas híbridos são úteis na maior parte do voo, principalmente em situações nas quais as aeronaves ficam um bom tempo em regime de cruzeiro.

Apesar da maior eficiência, a necessidade de baterias nas aeronaves pode ser eliminada, caso os sistemas híbridos compensem essa demanda. Contudo, os principais desafios estão relacionados ao aumento de peso e à complexidade estrutural que o sistema elétrico pode introduzir. Além disso, a autonomia das baterias, fator determinante para a duração do voo, ainda não é suficiente para percursos de longa distância (Kim, Perry; Ansell, 2018). Essas limitações explicam a ausência, até o momento, de aeronaves híbridas de pequeno porte, que seriam mais adequadas para a instrução de voo.

Todos esses fatores indicam que, embora os sistemas híbridos se apresentem como uma alternativa promissora, sua aplicação prática nas escolas de aviação permanece inviável. Como atualmente existem apenas projetos e protótipos em desenvolvimento, a utilização de motores elétricos continua sendo a solução mais explorada (Guimarães; Henkes, 2023).

2.2.3 Motor a hidrogênio para aeronaves

O hidrogênio é abundante no universo e, na atmosfera terrestre, encontra-se predominantemente na forma de compostos, representando cerca de 70% dos gases presentes. Descoberto em 1776, pelo cientista britânico Henry Cavendish, foi denominado “ar inflamável” (Rifkin, 2003). As pesquisas sobre hidrogênio se concentram na geração de eletricidade, calor e água como subprodutos do processo em que células a combustível convertem energia química em energia elétrica, sem causar danos ao meio ambiente (Silva, 2016).

Considerado um combustível ideal, o hidrogênio oferece benefícios sociais, econômicos e ambientais, pois possibilita a redução da dependência do petróleo e, conseqüentemente, a eliminação das emissões de carbono no setor de transportes. Dessa forma, contribui para mitigar os impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis (Kotay; Das, 2008).

Por essas razões, o hidrogênio é apontado como a energia limpa do futuro, já que sua combustão gera apenas vapor e água, sem emissão de monóxido ou dióxido de carbono — gases associados ao efeito estufa. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que viabilizem seu uso em larga escala pode representar uma solução para o problema das emissões de CO₂ a médio e longo prazos, e com isso, torná-lo uma alternativa essencial em comparação às demais fontes energéticas (Dewan, 2021).

Atualmente, diversas empresas desenvolvem protótipos que evidenciam a aposta na viabilidade do uso do hidrogênio como fonte de energia. Um exemplo é a Airbus, com o projeto ZEROe, que busca explorar diferentes formas de implementação da tecnologia, além de preparar o ecossistema para produção e fornecimento de hidrogênio. O programa contempla quatro conceitos de aeronaves voltados ao mercado regional, com autonomia estimada entre 1.000 e 2.000 NM, a depender do modelo (Airbus, 2023).

No segmento de aeronaves de pequeno porte, os projetos são mais escassos, embora existam iniciativas relevantes. A empresa britânica ZeroAvia investe na conversão de aeronaves, como o Dornier 228 para 19 passageiros, com tecnologia híbrida. A Alaska Airlines também manifestou interesse, ao disponibilizar um Bombardier Dash 8-Q400, com 76 assentos, para adaptação com sistema de propulsão elétrica a hidrogênio (ZeroAvia, 2023).

No contexto da instrução aeronáutica, destaca-se o Project HEAVEN, consórcio europeu financiado pelo governo, que visa demonstrar a viabilidade do uso de hidrogênio líquido criogênico em aeronaves. Em setembro de 2023, o projeto realizou voos experimentais com a aeronave HY4, inclusive um com duração superior a três horas. Os testes indicaram que o uso de hidrogênio líquido, em substituição ao gasoso, ampliou a autonomia do HY4 de 750 km para 1.500 km. Apesar disso, o projeto mantém foco em aeronaves regionais, com caráter predominantemente demonstrativo (Pipistrel, 2023).

O principal desafio atual reside no armazenamento do hidrogênio a bordo, baseado em duas abordagens. A primeira consiste no armazenamento líquido, posteriormente utilizado na combustão. Embora seja considerada a solução mais simples, exige tanques mantidos a -253 °C, mesmo quando vazios, o que implica elevados custos energéticos e operacionais (Airbus, 2022b). A segunda abordagem envolve células a combustível, que convertem hidrogênio diretamente em eletricidade, gerando calor e água como subprodutos. Para viabilizar essa tecnologia, é necessário equipar aeronaves elétricas com milhares de células interligadas, formando um sistema semelhante a uma bateria. Contudo, a baixa densidade energética e o elevado custo de produção tornam essa solução, por ora, inviável para operações comerciais (Airbus, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da trajetória da instrução aeronáutica e dos motores atualmente empregados revela a urgência na busca por alternativas sustentáveis. Atualmente, a instrução no Brasil emprega majoritariamente aeronaves mais antigas e consolidadas, como o Cessna 172, que é o avião mais utilizado mundialmente para instrução. Apesar de ser a aeronave mais vendida no mundo e reconhecida por sua alta confiabilidade, com mais de 50 anos de mercado, apresenta sinais de obsolescência. Os motores convencionais utilizados nessas aeronaves operam, em geral, segundo o Ciclo Otto, e possuem baixa eficiência térmica, o que significa que cerca de 70% da energia liberada na combustão não é convertida em tração. Além disso, o Cessna 172 tem alto consumo de combustível (30L/h) e baixa autonomia.

Essa situação contrasta com a crescente conscientização ambiental e a busca por tecnologias mais limpas. A aviação responde por aproximadamente 2% a 3% das emissões globais de carbono, com previsões de que essas emissões dobrem até 2050. O Brasil, em consonância com as metas da COP 21, comprometeu-se a reduzir suas emissões em 37% até

2025 e 43% até 2030. Portanto, a adoção de motores alternativos é considerada uma medida relevante para promover a sustentabilidade e a modernização da instrução.

A tecnologia de motores elétricos demonstra ser a alternativa mais explorada e disponível para a instrução, e lidera a corrida energética no momento. Embora a utilização de aeronaves elétricas possa reduzir os custos e oferecer cursos mais acessíveis e sustentáveis, a baixa autonomia e o tempo de recarga persistem como desafios significativos. Essa limitação tecnológica inviabiliza, no cenário atual, a adoção de frotas exclusivamente elétricas, e assim, torna indispensável a manutenção de aeronaves convencionais (como o Tecnam P2010 TDI, que oferece 5 horas de autonomia na GFA) para a conclusão da formação do piloto.

Os motores alternativos (híbridos e a hidrogênio) são tecnologias promissoras, mas ainda não estão disponíveis para uso na instrução:

1. sistemas híbridos: embora ofereçam uma economia de combustível na faixa de 7% a 12% e sejam mais adequados para voos com demanda flutuante de energia, eles aumentam o peso e a complexidade estrutural das aeronaves. Atualmente, existem apenas projetos e protótipos em desenvolvimento, o que torna a sua aplicação prática nas escolas de aviação inviável;

2. motores a hidrogênio: o hidrogênio é apontado como a "energia limpa do futuro", pois sua combustão gera apenas vapor e água, e elimina as emissões de monóxido ou dióxido de carbono. Grandes empresas, como a Airbus (projeto ZEROe), têm investido em protótipos regionais. No entanto, o principal desafio reside no armazenamento a bordo. O armazenamento líquido exige tanques mantidos a -253 °C, o que implica em elevados custos operacionais. A utilização de células a combustível também é dificultada pela baixa densidade energética e o alto custo de produção, sendo, por ora, inviável para operações comerciais. Projetos no segmento de aeronaves de pequeno porte para instrução são escassos.

Em resumo, a tecnologia elétrica é a única alternativa sustentável disponível no mercado para a instrução. Contudo, a limitação da autonomia da bateria atua como um gargalo tecnológico, e assim, impede que as aeronaves elétricas substituam totalmente as frotas convencionais nos programas de formação. A adoção da instrução elétrica no Brasil, conforme demonstrado pelo caso sueco, exigiria um modelo híbrido de frota, no qual aeronaves elétricas são usadas para fases iniciais (voos locais), e aeronaves convencionais de maior autonomia (motores a combustão ou equivalentes de baixo consumo, como o Tecnam P2010 TDI) são mantidas para as fases de navegação e treinamento mais extenso

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou inicialmente um panorama histórico da aviação de instrução, e evidenciou que, apesar da evolução contínua, as aeronaves atualmente utilizadas permanecem tecnologicamente defasadas e ineficientes frente às demandas de um mundo orientado para a sustentabilidade, e com isso, contribui para emissões significativas de dióxido de carbono e impactos ambientais indesejáveis.

A análise demonstrou que a indústria aeronáutica não está inerte diante desses desafios, mas tem investido em projetos que exploram diferentes alternativas sustentáveis, com destaque para as tecnologias elétrica, híbrida e baseada em hidrogênio. Foram examinados os princípios de funcionamento, vantagens e limitações de cada abordagem.

No caso da propulsão elétrica, constatou-se elevada eficiência energética (cerca de 90%, frente aos 30% dos motores convencionais), redução de custos operacionais devido ao menor preço da energia elétrica em comparação ao AVGAS, manutenção simplificada e emissões drasticamente reduzidas. Contudo, obstáculos como peso, custo e baixa autonomia das baterias limitam sua aplicabilidade, mantendo a dependência de motores a combustão.

Quanto aos sistemas híbridos, embora apresentem potencial para reduzir consumo e emissões, sua complexidade estrutural e os altos custos de implementação e manutenção inviabilizam, no presente, sua adoção em aeronaves de pequeno porte, especialmente para instrução.

A tecnologia baseada em hidrogênio, apesar de contar com investimentos expressivos e projetos promissores, enfrenta desafios relacionados à armazenagem, densidade energética e ausência de iniciativas voltadas para aeronaves leves, tornam a sua aplicação na instrução um horizonte distante.

O estudo de caso da Green Flight Academy evidenciou a viabilidade parcial da instrução elétrica, com redução de custos operacionais e tarifas mais acessíveis. Entretanto, a baixa autonomia do Velis Electro e a necessidade de suporte por aeronaves convencionais, somadas ao elevado investimento governamental inexistente no Brasil, dificultam a adoção nacional.

A comparação entre aeronaves reforça a inviabilidade comercial e operacional da tecnologia elétrica no Brasil no cenário atual, devido à autonomia limitada, tempo prolongado de recarga, menor capacidade útil e ausência de infraestrutura adequada em aeródromos.

Apesar dessas restrições, a evolução tecnológica e a crescente demanda por soluções sustentáveis indicam que, no futuro, a propulsão elétrica pode se tornar uma alternativa viável para a instrução de voo no país.

Como sugestões para pesquisas futuras, indica-se estudos de impacto ambiental e social da adoção gradual de aeronaves elétricas, que considerem a redução de emissões e benefícios para comunidades próximas a aeródromos, além de simulações operacionais para determinar a proporção ideal entre aeronaves elétricas e convencionais em programas de treinamento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Anac). **Mudanças Climáticas**. Brasília: Anac, 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/mudanca-climatica>. Acesso em: 30 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Anac). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC n. 141, Emenda n. 3**: certificação e requisitos operacionais. Centros de instrução de aviação civil. Brasília: Anac, 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-141> Acesso em: 2 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Anac). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC n. 61, Emenda n. 16**: licenças, habilitações e certificados para pilotos. Brasília: Anac, 2024. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-61>. Acesso em: 2 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Anac). **Dados gerais – CIAC (RBAC 141)** Anac. Brasília: Anac, 2025a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYzA3NTNmZDctZTA0OC00M2EwLTk1YjgtZmI2YTE0MDZiMzk0IiwidCI6ImI1NzQ4ZjZiLWI0YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiIsImMiOiR9>. Acesso em: 16 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Anac). **Registro aeronáutico brasileiro (RAB)**. 2025b. Disponível em: <https://aeronaves.anac.gov.br/aeronaves/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

AIRBUS. ZEROe. Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft. 2023 Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/lowcarbon-aviation/hydrogen/zeroe>. Acesso em: 18 out. 2025

BARRIGA, A. M. **Motores híbridos en aeronaves de transporte de pasajeros**. 2021. Tese (Doutorado) — Universitat Politècnica de València. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/169500?show=full>. Acesso em: 30 set. 2025.

CENIPA. Painel Sipaer.2025. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br/extensions/Sipaer/Sipaer.html> Acesso em: 16 abr. 2025

CESSNA AIRCRAFT COMPANY. **Pilot's operating handbook**.1980.1981`model 172P, 1980.

DEWAN. A. **Hidrogênio verde pode ser o combustível do futuro**. Mas ainda não deve resolver todos os problemas. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/o-hidrogenio-verde-pode-ser-o-combustivel-do-futuro-mas-ainda-nao-deve-resolver-todos-os-problemas/>. Acesso em: 18 out. 2025

FAY, C. M.; FONTES, R. S. O papel do aeroclube do Brasil na construção de uma política nacional de aviação brasileira (1911-1972). **História (São Paulo)**, v. 36, 2017, p. 1-35.

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=221049548013>. Acesso em: 15 set. 2025

FRANCHI, C. M. Acionamentos elétricos. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008. Disponível em: <https://archive.org/details/acionamentos-eletricos-claiton-moro-franchi>. Acesso em: 15 set. 2025.

EXAME. Países assinam acordo para empresas de aviação neutralizarem emissão de carbono até 2050. 2022. Disponível em: https://classic.exame.com/esg/paises-assinam-acordo-para-empresas-de-aviacao-neutralizarem-emissao-de-carbono-ate-2050/?utm_source=copiaecola&utm_medium=compartilhamento. Acesso em: 16 abr. 2025.

GREEN FLIGHT ACADEMY. Nossa missão: tornar a aviação sustentável. 2025. Disponível em: <https://greenflightacademy.com>. Acesso em: 15 set. 2025.

GUIMARÃES, N. HENKES, J. Um estudo sobre o uso de aeronaves elétricas e híbridas na Aviação de médio porte e seus impactos no ambiente. **R. bras. Av. civil. ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 170-196, jan.-mar. 2023. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/124/222>. Acesso em: 30 set. 2025

HOMA, J. **Aeronaves e motores**. 39. ed. São Paulo: Asa, 2021.

KIM, H. D.; PERRY, A. T.; ANSELL, P. J. A Review of Distributed Electric Propulsion Concepts for Air Vehicle Technology. In: **AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium**, Cincinnati, OH, EUA, 9 a 11 jul. 2018. Disponível em: <https://www1.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/2018EATS-Review-of-DEP-Hyun-D.-6.2018-4998.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

KOTAY, S. M.; DAS, D. Biohydrogen as a renewable energy resource: prospects and potentials. **Int. J. Hydrogen Energy**, v. 33, p. 258-263, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222619463_Biohydrogen_as_a_renewable_energy_resource-Prospects_and_potentials. Acesso em: 18 out. 2025

LIMA, J; HENKES, J; Giordani, E. Estudo De Viabilidade Do Uso De Aviões A Propulsão Elétrica Na Formação De Pilotos, E Seus Possíveis Impactos. **R. bras. Av. civil. ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 2, n. 2, p. 63-87, maio-jun. 2022. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/download/100/127/294>. Acesso em: 19 mar. 2025.

MARTINS, J. **A viabilidade da utilização de motores elétricos em aviões comerciais. 2021**. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL. 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 set. 2025.

MENOCIN, R. Os aviões de instrução mais utilizados no Brasil. *blog.bianch*, 2023. Disponível em: <https://blog.bianch.com.br/os-avioes-de-instrucao-mais-utilizados-no-brasil/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

MILANEZ, A; MAIA, C; GUIMARÃES, D.; FERREIRA, C. Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. **R. BNDES**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 361-398, dez. 2021. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22048/1/PR_Biocombustiveis%20de%20Aviao%20no%20Brasil_Revista%20BNDES_n.%2056.pdf acesso em: 16 abr. 2025

NEOCHARGE. **Vantagens e desvantagens dos motores elétricos**. 2021. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br>. Acesso em: 15 set. 2025.

PALHARES, G. L. Transportes Turísticos. São Paulo, Aleph, 2002. *In*: PALHARES, G. L. **Transporte aéreo desenvolvimento socioeconômico**. São Paulo, Aleph, 2006.

PIPISTREL. **Pilot's Operating Handbook** Velis Electro, 2020.

RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio**. São Paulo: M. Books, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/Hyh9HZbmgy9Wwr4gKR9ZCNQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 5 out. 2025.

ROCHA, C. H. M. SOUSA, R. R. C.; CAMPOS, N. S. Uma análise da situação financeira da indústria brasileira de aviação civil. **Journal of Transport Literature**, v. 10, n. 3, p. 35–39, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n3a7> Acesso em: 19 mar. 2025.

RUSCHEL, D.; HENKES, J. Uma Análise Da Inserção De Aeronaves Movidas A Energias Renováveis Nas Escolas De Aviação. **R. bras. Av. civil. ci. Aeron.**, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 267-300, maio 2021. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/33/215>. Acesso em: 19 mar. 2025.

SALES, M. V. Pré-industrialização nos Afonsos (1912-1931). **Rev. UNIFA**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 31, p. 82-91, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.22480/revunifa.2012.25.708>. Acesso em: 19 mar. 2025.

SANTA MONICA FLYERS. Our Fleet. 2025. Disponível em: <https://santamonicaflyers.com/our-fleet/>. Acesso em: 20 set. 2025

SENA, H. S. **O setor de aviação civil no Brasil**: impactos da crise de 2006/2007 e criação da ANAC para geração de inovação. 2010. 88 f. Monografia (Bacharelado em Administração Pública) — Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SILVA, O; SANTOS, R. Trajetória Histórica Da Aviação Mundial. **Revista Científica Eletrônica de Turismo**, Garça, ano VI, n. 11, ISSN: 1806-9169, jun. de 2009.

SILVA, I. A. Hidrogênio: Combustível do Futuro. Ensaios e Ciência: C. **Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 20, n. 2, 2016, p. 122-126. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

SMITH, R. **Cessna 172**: a pocket history. 1. Ed. Amberley Publishing Limited, 2013.

SOUZA, T. M. **Inserção de aeronaves a propulsão elétrica em escolas de aviação e aeroclubes do Brasil**. 2018. Monografia (Graduação) — RIUNI, Palhoça, 2018. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/ee126beb-cb30-4b34-8848-a071a462009c>. Acesso em: 30 abr. 2025

SUSTAINABLE SKIES. **Pipistrel Velis Electro**: características e autonomia. 2019. Disponível em: <https://sustainableskies.org/>. Acesso em: 15 set. 2025.

STRASSBURGER, N. **Impactos econômicos e operacionais na utilização de motores híbridos em aeronaves de transporte aéreo regular**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Aeronáuticas) — Universidade do Sul de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/17631>. Acesso em: 30 set. 2025.

VOSKUIJL, M.; VAN BOGAERT, J.; RAO, A. G. Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft. **CEAS Aeronautical Journal**, v. 9, p. 15-25, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13272-017-0272-1>. Acesso em: 30 set. 2025.

ZEROAVIA. Alaska Airlines and ZeroAvia developing world's largest zeroemission aircraft. 2023. Disponível em: <https://zeroavia.com/alaska-airlines-zeroemission-q400/>. Acesso em: 18 out. 2025