

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
CURSO DE CIÊNCIAS AERONÁUTICAS

THAYNÁ MACENO LUCAS

**AUTONOMIA DAS BATERIAS EM EVTOLS: DESAFIOS TÉCNICOS E
SOLUÇÕES PARA A MOBILIDADE AÉREA URBANA**

GOIÂNIA
2025

THAYNÁ MACENO LUCAS

**AUTONOMIA DAS BATERIAS EM EVTOLS: DESAFIOS TÉCNICOS E
SOLUÇÕES PARA A MOBILIDADE AÉREA URBANA**

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

Orientador: Prof. M.Sc. Salmen Chaquip Bukzem.

GOIÂNIA
2025

THAYNÁ MACENO LUCAS

**AUTONOMIA DAS BATERIAS EM EVTOLS: DESAFIOS TÉCNICOS E
SOLUÇÕES PARA A MOBILIDADE AÉREA URBANA**

GOIÂNIA-GO, 12/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

M. Sc. Salmen Chaquip Bukzem _____	CAER/PUC-GO _____
Assinatura	Nota
Esp. Tammyse Araújo da Silva _____	CAER/PUC-GO _____
Assinatura	Nota
Esp. William de Carvalho Xavier _____	CAER/PUC-GO _____
Assinatura	Nota

AUTONOMIA DAS BATERIAS EM EVTOLS: DESAFIOS TÉCNICOS E SOLUÇÕES PARA A MOBILIDADE AÉREA URBANA

Thayná Maceno Lucas¹

Salmen Chaquip Bukzem²

RESUMO

Este estudo analisou os desafios técnicos associados à autonomia das baterias, aspecto relevante para a viabilidade operacional dos veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOL). Por meio da revisão teórica, foram analisadas as quatro principais configurações de eVTOLs (*Multicopter*, *Lift & Cruise*, *Tilt Wing/Tilt Rotor* e *Ducted Vectored Thrust*) e cinco tecnologias de armazenamento de energia (íons de lítio, estado sólido, íons de sódio, lítio-enxofre e grafeno). Os resultados demonstram que, enquanto as baterias de íons de lítio permanecem como solução mais viável no curto prazo, as tecnologias de estado sólido e lítio-enxofre oferecem vantagens significativas em termos de densidade energética e segurança. O estudo destaca ainda a importância dos sistemas de gerenciamento de baterias (BMS), com o intuito de contribuir com a eficiência e segurança operacional dessas aeronaves. Conclui-se que o avanço no desenvolvimento de baterias, associado a avanços em aerodinâmica e gestão energética, será determinante para concretizar a mobilidade aérea urbana em escala comercial, com benefícios ambientais e econômicos significativos.

Palavras Chave: eVTOLs; Autonomia de Baterias; Mobilidade Aérea Urbana; Baterias de Íons de Lítio; Baterias de Estado Sólido; Battery Management System (BMS); Tecnologias Emergentes.

¹ Bacharelanda de Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO).

² Graduado em Desenvolvimento de Sistemas de Informação, Especialista em Gestão de Segurança da Informação e Comunicações pela Universidade de Brasília. e Mestre em Educação. Militar da Reserva da Força Aérea, onde exerceu a função de Supervisor e Instrutor de órgãos de controle de tráfego aéreo, com atuação na prevenção e investigação de Acidentes Aeronáuticos, Gerenciamento de Sistemas de Segurança Operacional, Inspeção em Prestadores de Serviço de Navegação Aérea e instrução em diversos cursos do SISCEAB. Professor do Curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BATTERY AUTONOMY IN EVTOLS: TECHNICAL CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR URBAN AIR MOBILITY

ABSTRACT

This study analyzed the technical challenges associated with battery autonomy, a relevant aspect for the operational viability of electric vertical take-off and landing vehicles (eVTOL). Through a theoretical review, the four main eVTOL configurations (Multicopter, Lift & Cruise, Tilt Wing/Tilt Rotor and Ducted Vectored Thrust) and five energy storage technologies (lithium-ion, solid-state, sodium-ion, lithium-sulfur and graphene) were analyzed. The results demonstrate that, while lithium-ion batteries remain the most viable solution in the short term, solid-state and lithium-sulfur technologies offer significant advantages in terms of energy density and safety. The study also highlights the importance of battery management systems (BMS) in contributing to the efficiency and operational safety of these aircraft. It is concluded that advances in battery development, associated with advances in aerodynamics and energy management, will be decisive in achieving urban air mobility on a commercial scale, with significant environmental and economic benefits.

Keywords: eVTOLs, Battery Autonomy; Urban Air Mobility; Lithium-ion Batteries; Solid-state Batteries; Battery Management System (BMS); Emerging Technologies.

1 INTRODUÇÃO

Os eVTOLs (*electric vertical take-off and landing*)³ surgem como uma das inovações mais promissoras para o transporte sustentável. Eles representam uma nova forma de se locomover pelas cidades, de maneira mais rápida, eficiente e com menos impacto ao meio ambiente.

Desde os primeiros conceitos até os protótipos atuais, esses veículos têm evoluído significativamente, isso devido a urgência em reduzir as emissões de carbono e otimizar o transporte nos grandes centros urbanos. Mas, como toda tecnologia inovadora, ainda enfrentam alguns desafios. Um dos principais é a autonomia das baterias, um fator que impacta diretamente a eficiência, a segurança e, claro, os custos operacionais dessas aeronaves (ANAC, 2023b).

A partir disso, surge a questão: quais são, de fato, os principais desafios tecnológicos e operacionais relacionados à autonomia das baterias em eVTOLs? A capacidade das baterias não influencia apenas o tempo de voo, mas também a viabilidade técnica e econômica desses veículos. Por isso, é primordial a análise de soluções inovadoras que possam superar as limitações atuais e garantir que esses veículos se tornem uma realidade comercialmente viável.

O objetivo geral deste estudo é justamente analisar as tecnologias emergentes e as perspectivas futuras para a melhoria da autonomia das baterias. Para isso, a pesquisa segue alguns objetivos específicos. O primeiro objetivo busca identificar as tecnologias atuais e emergentes para baterias, com foco em sua aplicação em eVTOLs. Em seguida, pretende-se avaliar os impactos da autonomia dessas baterias na operação e na viabilidade comercial dessas aeronaves. Por fim, propõe-se a

³ *Electric Vertical Take-Off And Landing* (eVTOL) são aeronaves elétricas com capacidade de decolagem e pouso vertical (ANAC, 2023b).

elaboração de cenários futuros para o desenvolvimento de baterias mais eficientes, capazes de atender às crescentes demandas técnicas e operacionais do setor da mobilidade aérea urbana.

Este estudo está conectado ao desejo de contribuir para a construção de um futuro mais sustentável, seguro e eficiente, tanto para as cidades quanto para as pessoas que nelas habitam.

2 REVISÃO TEÓRICA

O eVTOL é uma aeronave elétrica capaz de decolar e pousar verticalmente, como um helicóptero, mas com uma grande diferença: em vez de motores a combustão, ele funciona com baterias recarregáveis, tornando-o mais sustentável e silencioso. Outra vantagem é que ele não precisa de uma pista para operar, como os aviões convencionais, o que significa que pode ser usado em espaços menores, até mesmo dentro de cidades. Essas aeronaves estão prontas para desenvolver a mobilidade urbana, especialmente com o conceito de *Urban Air Mobility (UAM)*⁴, que promete conectar regiões de forma rápida e eficiente. Com isso, os eVTOLs podem ajudar a reduzir o trânsito caótico e a poluição causada pelos veículos tradicionais, trazendo uma nova era de transporte aéreo para o dia a dia (Andrade, 2023).

2.1 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Os eVTOLs são uma mistura de tecnologias que já existem há mais de cem anos em outros tipos de aeronaves. Por um lado, adota-se a energia elétrica, que é usada em aviões elétricos, e por outro, os pousos e decolagens verticais, uma

⁴ *Urban Air Mobility (UAM)* – é o conceito de transporte aéreo urbano com aeronaves elétricas, voltado à mobilidade rápida em áreas congestionadas (ANAC, 2023b).

especialidade dos helicópteros. Para entender como eles surgiram, é preciso voltar no tempo e explorar a história dessas duas tecnologias (Aguiar, 2022). A energia elétrica em aeronaves começou a ser usada em 1885, quando os irmãos Gaston e Albert Tissandier controlaram o dirigível *La France* com um motor elétrico. No ano seguinte, os inventores Arthur Krebs e Charles Renard também adotaram uma técnica parecida. No entanto, o uso de motores elétricos em aviões de asa fixa só aconteceu muito depois, em 1957 (Aguiar, 2022).

O primeiro voo de uma aeronave elétrica ocorreu em São Francisco, em 2007, durante o primeiro Simpósio de Aeronaves Elétricas. Foi quando o avião Electra BL1E decolou pela primeira vez. Já no Brasil, o primeiro avião elétrico, o SORA-E, foi desenvolvido em 2015 pela equipe técnica da usina de Itaipu, como parte do Programa de Veículos Elétricos de Itaipu, em parceria com a ACS Aviation e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ligada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Iunovich; Horta, 2015).

Quando se trata de pousos e decolagens verticais, os helicópteros foram os pioneiros. A ideia de um helicóptero já existia desde o século XV, quando Leonardo da Vinci esboçou um conceito parecido. No entanto, o primeiro voo bem-sucedido de um helicóptero só aconteceu em 1907, graças ao engenheiro francês Paul Cornu. Nas décadas seguintes, o argentino Raul Panteras fez ajustes nas pás para melhorar o controle, e em 1937, a piloto de testes alemã Hanna Reitsch realizou o primeiro voo totalmente controlável de um helicóptero (Azevedo, 2024).

Em 1940, Igor Sikorsky desenvolveu o primeiro helicóptero anfíbio, capaz de decolar e pousar tanto na terra quanto na água. Já em 1946, foi lançado o Bell 47B, um helicóptero que carregava duas pessoas e atingia 140 km/h. Apesar de todas as vantagens dos helicópteros, como versatilidade e capacidade de pousar em locais pequenos, problemas como baixa eficiência, alto consumo de combustível e muito barulho persistem até hoje (Aguiar, 2022).

É nesse contexto que os eVTOLs surgem, buscando aprimorar a indústria e trazer benefícios para a sociedade. Essa nova tecnologia está atraindo grandes *players* do mercado, como a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço⁵ (NASA), que em janeiro de 2021 destacou a importância da mobilidade aérea urbana. Segundo a agência, o objetivo é desenvolver um sistema de transporte aéreo seguro e eficiente, capaz de conectar locais que antes não tinham acesso a esse tipo de serviço. A NASA criou até o Escritório de Integração da Missão Mobilidade Aérea Avançada (AAM) para acelerar o desenvolvimento dessa indústria (Kasliwal, *et al.*, 2019; Pereira, 2023).

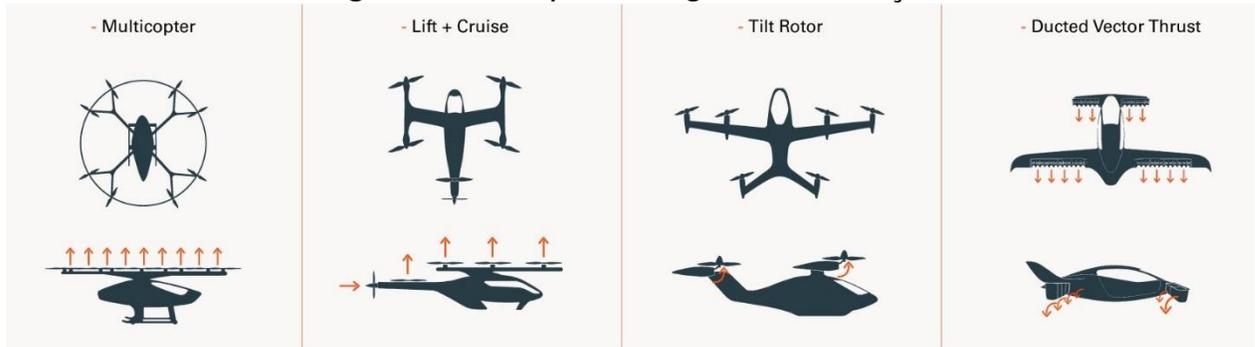
Com tudo isso, fica claro que os eVTOLs não são apenas uma evolução tecnológica, mas também uma resposta às necessidades modernas de mobilidade e sustentabilidade. E, com o apoio de gigantes como a NASA, o futuro da mobilidade aérea urbana parece estar decolando de vez (Kasliwal, *et al.*, 2019).

2.2 OS DESIGNS DE EVTOL

Com o avanço da indústria, os modelos dessas aeronaves foram organizados de acordo com seus designs. As grandes empresas do setor, como a Lilium e a Embraer, classificam quatro principais tipos de designs em produção: *Multicopters*, *Lift & Cruise*, *Tilt Wing & Tilt Rotor* e *Ducted Vectored Thrust*. Cada um desses modelos tem características únicas, variando em aspectos como nível de ruído, custo, eficiência e facilidade de navegação (Lilium, 2020).

A figura 1 a seguir apresenta um resumo esquemático desses diferentes designs.

⁵ *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) - dedica-se à exploração do desconhecido no ar e no espaço, promovendo inovações em prol da humanidade e inspirando o mundo por meio de suas descobertas.

Figura 1 - Principais Designs em Produção

Fonte: Lilium, 2020.

Os *Multicopters* têm um design simples e compacto, sem asas, o que os torna fáceis de manobrar. No entanto, essa simplicidade tem um custo: eles têm um alcance mais limitado e consomem mais energia, já que precisam compensar a falta de eficiência aerodinâmica (Aguiar, 2022). A figura 2 a seguir ilustra o design Multicopter.

Figura 2 - Design Multicopter do eVTOL Velocity

Fonte: Evtol News, 2025a.

O design Lift & Cruise combina o melhor dos dois mundos: a capacidade de decolar e pousar verticalmente, como um *Multicopter*, com a eficiência de voo horizontal de uma aeronave tradicional. Apesar dessa versatilidade, uma desvantagem é o ruído gerado durante a operação, o que pode ser um desafio em áreas urbanas (Aguiar, 2022). O modelo de design Lift & Cruise pode ser observado

na figura 3 a seguir.

Figura 3 - Design Lift & Cruise do eVTOL VoloConnect



Fonte: eVTOL News, 2025b.

Já o Tilt Wing & Tilt Rotor utiliza hélices multi-lâminas que giram mais lentamente, reduzindo significativamente o ruído. Além disso, oferece um alcance maior e alta velocidade, ideal para viagens mais longas. Por outro lado, o design é mais complexo, exigindo motores elétricos mais pesados e potentes, o que pode aumentar os custos e a necessidade de manutenção (Pardo, 2023). Esse design pode ser visto na figura 4.

Figura 4 - Design Tilt Wing do eVTOL Aero3

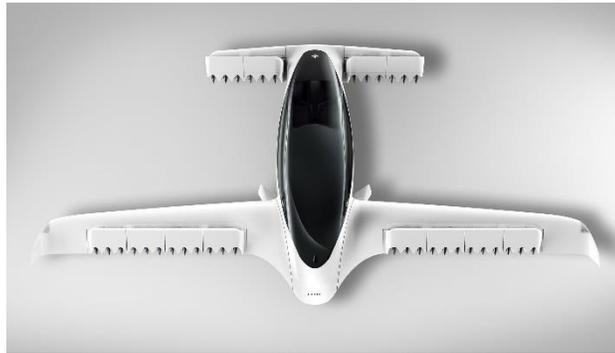


FONTE: Dufour Aerospace, 2021.

O *Ducted Vectored Thrust* utiliza um motor elétrico para controlar dutos de

ventilação nas asas fixas, permitindo uma operação eficiente e silenciosa durante pousos e decolagens. Esse sistema é uma das opções mais avançadas em termos de tecnologia, mas também pode ser mais caro e exigir maior cuidado no desenvolvimento (Aguiar, 2022). Esse design pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Design Ducted Vectored Thrust do eVTOL Lilium Jet



FONTE: Lilium, 2019.

2.3 REGULAMENTAÇÕES E NORMAS PERTINENTES AO EVTOL

A regulamentação e as normas para os eVTOLs são fundamentais para a implementação da Mobilidade Aérea Urbana. As principais autoridades competentes nesse processo são o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). O DECEA é responsável pela regulação do tráfego aéreo e pela criação de um grupo de trabalho para viabilizar a UAM no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). A ANAC regula e fiscaliza a aviação civil, colaborando com o DECEA na implementação do conceito UAM (DECEA, 2025).

No contexto internacional, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) recomenda que os países desenvolvam suas próprias estruturas regulatórias. Sendo

assim, a Administração Federal de Aviação (FAA)⁶ e a Agência de Segurança da Aviação da União Europeia (EASA)⁷ já estão desenvolvendo regulamentações específicas para aeronaves eVTOL (FAA, 2023).

A Portaria nº 1.546 do DECEA estabelece que um UAM necessita de uma reestruturação do espaço aéreo para melhorar a infraestrutura existente, requerendo análise de segurança e simulações para testar as mudanças realizadas. Os requisitos de acesso ao espaço aéreo serão flexíveis, atendendo às necessidades operacionais, e em áreas congestionadas, poderão ser exigidos o uso de tecnologias como o *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)*.⁸

Com a expectativa de que se tornem realidade em breve, a ANAC está desenvolvendo regulamentações específicas para esses veículos. A Portaria nº 15.760 de 2024, publicada pela ANAC, detalha os requisitos técnicos que as aeronaves eVTOL devem atender em aspectos como estrutura, sistemas de controle, propulsão e baterias, marcando um avanço significativo no processo de certificação (ANAC, 2024).

Por fim, a ANAC e a FAA já assinaram uma carta de intenções para colaborar na certificação dos eVTOLs, formalizada em 17 de outubro durante o encontro do *Certification Management Team* em São Paulo, reforçando o compromisso de ambas as agências em estabelecer um ambiente regulatório seguro e eficiente para a UAM (ANAC, 2023a).

2.4 PRINCÍPIOS BÁSICOS E CONCEITO DE ENERGIA ESPECÍFICA

⁶ *Federal Aviation Administration (FAA)* - tem como compromisso oferecer o sistema aeroespacial mais seguro e eficiente do mundo (FAA, 2025).

⁷ *European Aviation Safety Agency (EASA)* - atua como o núcleo dinâmico da segurança da aviação e da proteção ambiental no continente europeu (EASA, 2025).

⁸ *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)*. Um meio pelo qual aeronaves, veículos de aeródromo e outros objetos podem transmitir e/ou receber automaticamente dados como identificação, posição e dados adicionais, conforme apropriado, em um modo de transmissão por meio de um enlace de dados (Cerqueira, 2021).

Para compreender como as baterias funcionam em aeronaves, especialmente nos eVTOLs, é essencial começar com os conceitos básicos de energia. Um desses conceitos é a energia específica, que se refere à quantidade de energia armazenada por unidade de massa. Em outras palavras, a energia específica indica quanta energia uma bateria pode fornecer em relação ao seu peso. Quanto maior for esse valor, maior será a capacidade da bateria de armazenar energia sem aumentar significativamente sua massa (Gabaldo, 2024).

No contexto das aeronaves, dois tipos de baterias se destacam: as baterias térmicas e as baterias eletroquímicas. As baterias térmicas geram eletricidade a partir da energia térmica, enquanto as baterias eletroquímicas convertem energia química em elétrica por meio de reações químicas. Dentre essas, as baterias eletroquímicas são as mais utilizadas devido à sua maior eficiência e densidade energética, características que as tornam ideais para aplicações que demandam alto desempenho e leveza (Gabaldo, 2024).

Atualmente a principal tecnologia de armazenamento de energia são as baterias de íons de lítio, sendo amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e, mais recentemente, nos veículos de decolagem e pouso vertical. Seu sucesso deve-se principalmente à alta densidade energética, que permite armazenar grande quantidade de energia em um tamanho e peso reduzidos, característica essencial para aplicações que demandam leveza e eficiência (Lombardo; Dhir, 2024).

A história do lítio começa em 1817, quando o químico Johann Arfvedson descobriu o elemento químico em Estocolmo, Suécia. Mas foi só em 1855 que outros cientistas, Robert Wilhelm Bunsen e Augustus Matthiessen, conseguiram isolá-lo. As primeiras tentativas de usar lítio em baterias surgiram em 1912, com o físico Gilbert Newton Lewis, mas a tecnologia levou décadas para se tornar segura e viável

comercialmente (Leite, *et al.*, 2024; Milagre, 2023).

O desenvolvimento dessa tecnologia começou mesmo em 1970, quando Michael Stanley, criou as primeiras baterias usando lítio metálico e sulfeto de titânio. No entanto, somente em 1991 as baterias de íons de lítio alcançaram maturidade tecnológica suficiente para aplicação comercial. A partir de 2010, devido às crescentes preocupações ambientais e a necessidade de fontes de energia mais sustentáveis, as pesquisas nessa área intensificaram-se significativamente (Carvalho, *et al.*, 2019).

Embora as baterias de lítio continuem sendo a opção mais viável atualmente, pesquisas estão em andamento para aprimorar a segurança, reduzir custos e diminuir os impactos ambientais. Paralelamente, já existem estudos que buscam analisar tecnologias de baterias que podem oferecer maior densidade energética e níveis superiores de segurança, indicando um futuro promissor para o setor da aviação (Nitta *et al.*, 2015).

3 METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma abordagem bibliográfica, documental e estudos de caso para analisar os desafios técnicos e as soluções emergentes relacionadas à autonomia das baterias em eVTOLs no contexto da mobilidade aérea urbana. A pesquisa baseou-se em uma revisão de materiais já publicados, como artigos científicos, relatórios documentais, estudos de caso já existentes, normas regulatórias e documentos institucionais, com o objetivo de compilar, sintetizar e interpretar o conhecimento existente, além de identificar lacunas para futuras investigações.

Inicialmente, foi traçado um panorama histórico dos eVTOLs, abordando desde suas concepções iniciais até os modelos mais recentes, além dos fatores que

motivaram seu desenvolvimento. Na sequência, realizou-se uma análise dos principais designs de eVTOLs, considerando suas características técnicas, arquiteturas aerodinâmicas, aplicações urbanas e a relação direta com os desafios de consumo energético e autonomia.

Posteriormente, o estudo abordou de forma detalhada as tecnologias de baterias, com foco inicial nas de íons de lítio, considerando sua evolução histórica, características como densidade energética, peso, segurança e seu impacto na viabilidade técnica dos eVTOLs. Paralelamente, foi realizada uma pesquisa sobre as regulamentações e normas aplicáveis à operação dos eVTOLs, tanto no contexto nacional quanto internacional.

Além disso, foi realizada uma análise entre as tecnologias emergentes de baterias, considerando critérios técnicos, operacionais, ambientais e econômicos, essa análise foi sustentada por dados técnicos disponíveis em relatórios institucionais, artigos científicos e estudos de caso de empresas do setor. Por fim, foi abordado o papel do *Battery Management System* (BMS), ressaltando sua importância para o monitoramento contínuo das células, o balanceamento energético, segurança e prolongamento da vida útil das baterias, sendo essencial para garantir a confiabilidade dos eVTOLs.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de entrevistas com especialistas e a análise de dados de desempenho de protótipos em testes para ampliar as conclusões.

4 RESULTADOS

A importância das novas tecnologias de bateria para o desenvolvimento futuro dos eVTOLs não pode ser subestimada. As baterias de íons de lítio, que antes dominavam o mercado, agora enfrentam concorrência de inovações como as baterias

de estado sólido, as de íons de sódio, lítio-enxofre, grafeno, dentre outras. Essas tecnologias emergentes contam com vantagens únicas e devem ser consideradas para as futuras aplicações em larga escala desses veículos.

4.1 BATERIAS DE ESTADO SÓLIDO

As baterias de estado sólido são consideradas uma alternativa às baterias de íon-lítio, apresentando potencial para superar muitas das limitações das tecnologias convencionais. Essa inovação baseia-se na substituição do eletrólito líquido por um material sólido, proporcionando vantagens significativas em termos de segurança, eficiência energética e design estrutural (Gomes, 2024).

Diferente das baterias de íons de lítio, que operam com um eletrólito líquido e exigem um separador poroso, as baterias de estado sólido eliminam componentes inflamáveis, reduzindo riscos de vazamentos e incêndios. Essa característica, aliada à maior estabilidade mecânica e resistência térmica, torna essa tecnologia especialmente atrativa para aplicação dos veículos elétricos (Leite, *et al.*, 2024).

Além da segurança aprimorada, as baterias de estado sólido apresentam um potencial superior em densidade energética, permitindo armazenar mais energia no mesmo volume. Isso se traduz em maior autonomia, bem como tempos de recarga reduzidos, já que a estrutura sólida pode suportar taxas de carga mais altas sem os problemas de superaquecimento típicos dos eletrólitos líquidos (Gomes, 2024).

No entanto, desafios precisam ser superados para a adoção em larga escala das baterias de estado sólido. Enquanto as baterias de íons de lítio possuem cadeias de produção bem estabelecidas e custos menores, a fabricação das baterias de estado sólido ainda enfrentam obstáculos tecnológicos e econômicos. Com avanços contínuos na pesquisa e desenvolvimento, essa tecnologia pode reelaborar os padrões de eficiência e segurança no setor (Alkhalidi; Khawaja; Ismail, 2024).

4.2 BATERIAS DE IONS DE SÓDIO

As baterias de íons de sódio são recarregáveis e funcionam de forma semelhante às de íons de lítio, mas utilizam sódio, um metal alcalino abundante na natureza, encontrado em depósitos de sal marinho e na crosta terrestre. Isso torna o sódio uma alternativa viável ao lítio, embora esse tipo de bateria tenha se iniciado na década de 1980, seu potencial só ganhou destaque no século XXI (Galan, 2025).

Sua estrutura é composta por um ânodo, responsável pela liberação dos elétrons, um cátodo, que os recebe, e um eletrólito, que permite o fluxo de íons entre os eletrodos. Durante a descarga, os íons de sódio vão do ânodo ao cátodo através do eletrólito, gerando corrente elétrica. No processo de recarga, retornam ao ânodo até atingir a tensão ideal (Clark, 2025).

Um dos principais atrativos das baterias de íons de sódio é a abundância e o baixo custo do sódio, tornando essa tecnologia economicamente vantajosa. Além disso, essas baterias oferecem estabilidade em temperaturas extremas, maior segurança contra superaquecimento e fuga térmica, e menor toxicidade, pois não utilizam metais como cobalto, níquel ou cobre (Clark, 2025).

De acordo com Galan (2025) as baterias de íons de sódio enfrentam desafios técnicos e estruturais, como uma densidade de energia relativamente baixa e uma vida útil mais curta, o que impacta sua competitividade em relação às de íons de lítio. Contudo, avanços nas pesquisas, têm impulsionado melhorias na performance, tornando-as uma opção cada vez mais promissora.

4.3 BATERIAS DE LÍTIO ENXOFRE

As baterias de lítio-enxofre (Li-S) são uma alternativa em relação às de íons de

lítio, oferecendo maior densidade de energia e menor impacto ambiental. Seu diferencial está no uso do enxofre, um material abundante e acessível, o que reduz custos e a dependência de metais raros como níquel e cobalto. Enquanto as baterias de íons de lítio requerem elementos escassos e de extração cara, as baterias Li-S aproveitam o enxofre, o 16º elemento mais abundante da crosta terrestre, cuja produção anual é de cerca de 70 milhões de toneladas (Jackson, 2024).

Com uma elevada capacidade específica, as baterias Li-S podem ampliar a autonomia dos veículos elétricos de decolagem e pouso vertical, tornando a mobilidade aérea mais viável. Além da aviação, seu impacto se estende ao setor automotivo e ao armazenamento de energia renovável, contribuindo para um futuro energético mais sustentável (Ban, 2024).

No entanto, ainda existem alguns desafios que precisam ser superados, entre eles, a dificuldade em manter a estabilidade durante os ciclos de carga e descarga e a redução da vida útil com o uso contínuo. Empresas como a Solidion Technology trabalham no desenvolvimento de soluções para acelerar a evolução dessa tecnologia. Desta forma, espera-se que as baterias de lítio enxofre possam transformar o cenário para a implementação eficiente dos eVTOLs (Ban, 2024).

4.4 BATERIAS DE GRAFENO

As baterias de grafeno surgem como uma inovação na busca por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis. Essas baterias possuem uma densidade de energia elevada, o que significa que conseguem armazenar mais carga em um espaço reduzido. Além disso, sua velocidade de carregamento impressiona, permitindo que dispositivos eletrônicos e veículos elétricos sejam recarregados em questão de minutos (Costa *et al.*, 2022).

Outro benefício das baterias de grafeno é a segurança. Diferente de outras

tecnologias, elas não utilizam eletrólitos líquidos, o que reduz significativamente os riscos de superaquecimento e explosão. Além disso, sua estrutura flexível permite maior adaptação a diferentes formatos e aplicações, tornando-as uma alternativa versátil para diversas indústrias (Castilla, 2016).

A durabilidade também se destaca, já que essas baterias sofrem menos desgaste ao longo do tempo. Sua estabilidade estrutural impede que o volume do ânodo se altere a cada ciclo de carga e descarga, garantindo uma vida útil muito mais longa. Isso reduz a necessidade de substituições frequentes e contribui para um menor impacto ambiental (Costa *et al.*, 2022).

4.5 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

O *Battery Management System* (BMS)⁹ é um sistema eletrônico fundamental para o gerenciamento de baterias recarregáveis. Seu principal objetivo é proteger o sistema de baterias contra danos, prever e prolongar sua vida útil, além de manter o conjunto em condições operacionais precisas e confiáveis. Para isso, o BMS é responsável por monitorar e controlar as células, individualmente ou em conjunto, garantindo que sua operação ocorra dentro de limites seguros, conhecidos como *Safety Operation Area* (SOA)¹⁰. Essa atuação protege tanto o sistema quanto os usuários contra riscos como sobrecarga, subcarga, superaquecimento e curtos-circuitos (Motta, 2022).

Para isso, o BMS realiza a leitura contínua de parâmetros essenciais como tensão, corrente e temperatura das células. Com base nesses dados, também é possível estimar o estado de carga (*State of Charge* - SoC)¹¹, o estado de saúde (*State*

⁹ *Battery Management System* (BMS) é um sistema que monitora e protege as baterias, garantindo operação segura, eficiente e prolongando sua vida útil (Motta, 2022).

¹⁰ *Safety Operation Area* (SOA) faixa dentro da qual a operação é segura (Motta, 2022).

¹¹ *State of Charge* (SoC) refere-se ao nível de carga atual de uma bateria (Park, 2020).

of Health - SoH)¹² e a profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DoD)¹³. Vale destacar que o monitoramento de SoC e SoH são essenciais, pois servem como base para aumentar a confiabilidade e garantir a segurança. Além disso, há muitos outros indicadores que ajudam a prever o comportamento e o desempenho da bateria ao longo do tempo (Park, *et al.*, 2020).

Outro desafio no gerenciamento de baterias está relacionado às variações naturais entre as células, como diferenças de resistência interna, capacidade de carga e fuga de corrente, resultantes de desvios no processo de fabricação. Essas diferenças causam desequilíbrios no carregamento e descarregamento, o que compromete a eficiência e a durabilidade do conjunto (Daowd, *et al.*, 2014).

Para lidar com isso, o BMS também executa a função de balanceamento das células, promovendo a equalização da energia entre elas. Esse balanceamento pode ocorrer de forma dissipativa, onde o excesso de energia é convertido em calor e dissipado, ou de forma não dissipativa, que realoca a energia excedente para outras células. Além disso, quando qualquer parâmetro monitorado ultrapassa os limites estabelecidos, o sistema pode desabilitar temporariamente determinadas funções e emitir alertas ao usuário, prevenindo falhas graves ou acidentes (Pereira, 2021).

Nos veículos elétricos, a tensão de operação das baterias varia conforme os requisitos de potência e autonomia. Para atingir os níveis desejados de energia, utiliza-se a associação de células em série e/ou paralelo. Contudo, quando muitas células são conectadas em série, os desequilíbrios mencionados se tornam ainda mais relevantes, exigindo uma atuação precisa do BMS para manter a eficiência e prolongar a vida útil do sistema (Kharrich; Kim; Yu, 2024).

¹² *State of Health* (SoH) refere-se à saúde ou condição atual da bateria em comparação com seu estado inicial (Park, 2020).

¹³ *Depth of Discharge* (DoD) é a quantidade de uma bateria que pode ser utilizada com segurança em cada ciclo (Park, 2020).

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES

Os quatro principais designs de eVTOLs: (*Multicopter*, *Lift & Cruise*, *Tilt Wing/Tilt Rotor* e *Ducted Vectored Thrust*), apresentam diferenças marcantes quanto à eficiência energética, autonomia, ruído operacional e complexidade construtiva. Essa diversidade impacta diretamente a escolha de tecnologias de bateria, viabilidade econômica e adaptabilidade a diferentes contextos urbanos (Aguiar, 2022; Pardo, 2023).

Um dos maiores entraves técnicos enfrentados pelos eVTOLs é a limitação de autonomia imposta pela tecnologia atual de bateria. Conforme destacado por Lombardo e Dhir (2024), mesmo as baterias de íons de lítio mais avançadas possuem uma densidade energética entre 250 e 300 Wh/kg, o que compromete principalmente os modelos *Multicopter*, cuja baixa eficiência aerodinâmica exige maior consumo de energia por quilômetro percorrido.

Por outro lado, o design *Lift & Cruise* combina rotores verticais para decolagem e pouso, e propulsão horizontal para o voo de cruzeiro, otimizando o consumo de energia. Segundo Aguiar (2022), seu desempenho aerodinâmico é superior ao do *Multicopter*, com autonomia de 30 a 50 km com baterias de íons de lítio. Tecnologias emergentes como as baterias de estado sólido e lítio-enxofre podem aumentar esse alcance, oferecendo densidade energética superior a 400 Wh/kg. A estrutura desse modelo facilita a manutenção e a integração de novos sistemas, mas há desafios acústicos nas fases verticais do voo.

Já os modelos *Tilt Wing/Tilt Rotor* e *Ducted Vectored Thrust* mostram-se mais eficientes em termos de aerodinâmica, especialmente em trajetos mais longos. Combinando asas fixas e elementos móveis de propulsão, esses designs oferecem maior alcance e menor consumo por quilômetro. Tecnologias como as baterias de estado sólido, citadas por Alkhalidi, Khawaja e Ismail (2024), e de lítio-enxofre,

conforme Ban (2024), demonstram potencial para dobrar a autonomia dessas aeronaves, possibilitando voos acima de 100 km com segurança operacional e estabilidade térmica.

Além da autonomia, a segurança das baterias continua sendo uma preocupação crítica na aviação elétrica. As baterias de íons de lítio, por utilizarem eletrólitos líquidos inflamáveis, apresentam riscos como fuga térmica e incêndio em caso de falhas estruturais. Neste contexto, tecnologias como as baterias de estado sólido e de grafeno ganham destaque por sua estabilidade térmica superior e maior resistência a variações ambientais severas (Gomes, 2024).

Somando-se a isso, o uso de sistemas avançados de gerenciamento como o BMS tem se mostrado essencial. Esses sistemas monitoram parâmetros críticos como estado de carga (SoC), estado de saúde (SoH) e temperatura das células, atuando preventivamente para evitar falhas. Estudos como o de Daowd et al., (2014) indicam que um BMS eficiente pode aumentar em até 25% a vida útil das baterias, ao mesmo tempo em que aprimora a confiabilidade geral da aeronave.

Ainda nesse contexto, a sustentabilidade é um dos principais argumentos para a adoção em larga escala dos eVTOLs. Tecnologias de baterias como as de íons de sódio e lítio-enxofre, são vistas como alternativas mais ecológicas quando comparadas às tradicionais de íons de lítio. O sódio, além de ser mais abundante, pode ser extraído com menor impacto ambiental, sem depender de metais raros como cobalto e níquel (Clark, 2025). Já o enxofre, utilizado nas baterias Li-S, é um subproduto da indústria petrolífera, o que contribui para a redução de resíduos industriais (Jackson, 2024).

A tratar da viabilidade econômica, percebe-se que o custo das baterias representa cerca de 30% do valor total da aeronave, segundo Lombardo e Dhir (2024). As baterias de íons de lítio, atualmente as mais utilizadas, oferecem boa densidade energética e maturidade tecnológica, mas seu custo permanece elevado

devido à dependência de metais raros como cobalto e níquel, além de impactos ambientais que podem influenciar sua viabilidade a longo prazo.

Após analisar os dados apresentados, as baterias de íons de sódio apresentam uma alternativa mais acessível, com custos significativamente mais baixos graças à abundância e fácil extração do sódio (Galan, 2025). Embora ainda não alcancem a mesma densidade energética das de íons de lítio, seu potencial de redução de custos operacionais é relevante.

As baterias de lítio-enxofre (Li-S) também prometem ganhos econômicos, principalmente por utilizarem materiais mais baratos e abundantes, como o enxofre. No entanto, ainda enfrentam desafios técnicos, como baixa vida útil, que limitam seu uso comercial em curto prazo (Jackson, 2024).

As baterias de estado sólido representam outra aposta para o futuro, com potencial para oferecer maior segurança, densidade energética superior e menor risco de inflamabilidade. Contudo, seus altos custos de fabricação e a complexidade dos materiais ainda dificultam a viabilidade comercial em larga escala (Gomes, 2024).

Por fim, as baterias de grafeno, apesar do alto custo atual, destacam-se pela durabilidade, estabilidade e velocidade de recarga. Se os processos de fabricação forem otimizados, podem se tornar economicamente vantajosas, reduzindo a frequência de substituições e aumentando a eficiência operacional. A Tabela 1 a seguir, compara as baterias analisadas.

Tabela 1 - Comparativo das tecnologias de baterias analisadas

Tipo de Bateria	Vantagens Principais	Desvantagens Principais	Densidade Energética (aprox.)	Viabilidade Atual
Íons de Lítio	Alta densidade energética, tecnologia madura	Inflamável, alto custo, uso de metais raros	250–300 Wh/kg	Alta

Estado Sólido	Alta segurança, alta densidade, menor risco térmico	Custo elevado, complexidade na fabricação	>400 Wh/kg	Média (em testes)
Íons de Sódio	Baixo custo, abundância, não usa metais raros	Menor densidade energética, vida útil menor	100–150 Wh/kg	Média
Lítio-Enxofre	Alta capacidade específica, baixo custo, uso de enxofre	Vida útil reduzida, instabilidade em ciclos longos	>400 Wh/kg (teórico)	Baixa/Média
Grafeno	Alta durabilidade, recarga rápida, flexível e segura	Alto custo de produção, ainda pouco difundida	200–350 Wh/kg (estimado)	Baixa

Fonte: Adaptado de Galan (2025); Jackson (2024); Gomes (2024); Clark (2025); Costa (2022); Lombardo e Dhir (2024).

A comparação entre as diferentes tecnologias de baterias evidencia que, apesar da dominância atual dos íons de lítio, novas alternativas como estado sólido, íons de sódio, lítio-enxofre e grafeno revelam avanços significativos. Cada uma apresenta benefícios específicos, seja em segurança, custo ou desempenho, mas ainda enfrentam limitações que impedem sua consolidação no mercado. O cenário demonstra um campo em constante evolução, no qual o investimento em inovação tende a desempenhar um papel fundamental na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis.

6 CONCLUSÃO

Durante a análise comparativa das principais tecnologias de baterias, incluindo íons de lítio, íons de sódio, lítio-enxofre, grafeno e estado sólido, evidenciou-se que as baterias de estado sólido se destacam como a alternativa mais viável no cenário atual. Sua capacidade de oferecer maior densidade energética, segurança térmica e resistência a falhas supera as limitações críticas das tecnologias convencionais, especialmente no que diz respeito à inflamabilidade e ao risco de fuga térmica. Tais

atributos tornam essa tecnologia ideal para aplicações no setor de mobilidade aérea, onde segurança e eficiência energética são requisitos inegociáveis.

Embora ainda existam entraves relacionados ao custo de produção e à complexidade de fabricação, os avanços contínuos em pesquisa e desenvolvimento indicam uma trajetória de maturação acelerada, reforçando sua viabilidade técnica e econômica para aplicações no setor aeronáutico. Assim, a adoção das baterias de estado sólido tem potencial para redefinir os parâmetros operacionais dos eVTOLs, ampliando sua autonomia, reduzindo o tempo de recarga e elevando os padrões de segurança do setor.

Além disso, a integração de um sistema avançado de gerenciamento de baterias (BMS) às baterias de estado sólido acrescenta uma camada essencial de segurança e eficiência operacional. O BMS monitora continuamente parâmetros críticos como temperatura, tensão e corrente, assegurando que as células operem dentro da chamada Área Segura de Operação (SOA), o que previne falhas severas, como curtos-circuitos e eventos de fuga térmica. O sistema também utiliza indicadores como o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH) para otimizar o desempenho e a durabilidade da bateria ao longo do tempo. Além disso, o BMS executa o balanceamento ativo ou passivo das células, corrigindo variações naturais entre elas, o que resulta em um funcionamento mais uniforme e confiável do conjunto. Essa gestão inteligente pode tornar as baterias de estado sólido ainda mais seguras e atrativas para aplicações em eVTOLs, contribuindo decisivamente para a evolução da mobilidade aérea urbana.

Portanto, diante dos dados levantados e das tendências tecnológicas emergentes, conclui-se que a combinação entre baterias de estado sólido e sistemas avançados de gerenciamento (BMS) configura, atualmente, a solução mais promissora e estratégica para enfrentar os desafios relacionados à autonomia em eVTOLs. Essa integração tecnológica eleva os níveis de segurança e eficiência

energética, além de contribuir para ampliar a confiabilidade operacional, reduzir os custos de manutenção e estender a vida útil dos sistemas embarcados. Assim, tal integração se apresenta como um impulso decisivo para a consolidação técnica dos eVTOLs, acelerando o avanço da mobilidade aérea urbana rumo a um modelo mais seguro, sustentável e viável em larga escala.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Acordo internacional entre Brasil e Estados Unidos**. 2023a. Disponível em: <https://sistemas.anac.gov.br/certificacao/Acordos/AcordosPaisDetail.asp?AGRCodi=000130>. Acesso em: 24 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Advanced Air Mobility - Panorama e Perspectivas**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/aam-panorama-2023.pdf>. Acesso em 24 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Critérios finais de aeronavegabilidade para a aeronave eve-100**. Portaria nº 15.760 publicado no DOU de 01 de nov. de 2024, seção 1, p. 240. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/portarias/2024/portaria-15760>. Acesso em: 25 mar. 2025.

AGUIAR, G. dos S. **Advanced air mobility no Brasil**: estudo exploratório de ligações interurbanas no estado do Rio de Janeiro. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10038042.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2025.

ALKHALIDI, A.; KHAWAJA, M.; ISMAIL, M. Solid-state batteries, their future in the energy storage and electric vehicles market. **Science Direct**, v. 11, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772569324000902?via%3Dihub>. Acesso em: 01 abril. 2025.

ANDRADE, R. **A corrida dos carros voadores**. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade, IPEA, 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/377-a-corrída-dos-carros-voadores>. Acesso em: 8 mar. 2025.

AZEVEDO, K. C. G. de. Implementação e potencial das aeronaves elétricas com decolagem e pouso vertical (evtol) no brasil: perspectivas para a mobilidade aérea urbana. **Revista Brasileira De Aviação Civil e Ciências Aeronáuticas**, v. 4, n. 2, p. 66–83, 2024. Disponível em:

<https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/229>. Acesso em: 14 mar. 2025.

BAN, X. **Solidion's Lithium-Sulfur batteries and the future of eVTOL Aircraft**. Business Aviation. 2024. Disponível em: <https://businessaviation.aero/evtol-news-and-electric-aircraft-news/evtol/solidions-lithium-sulfur-batteries-and-the-future-of-evtol-aircraft>. Acesso em: 02 abril. 2025.

CARVALHO, A.; CARVALHO, A. D.; ROMÃO, U. G. Baterias de íon de lítio estado da arte e aplicações. **Revista Acadêmica - Ensino De Ciências e Tecnologias**, v. 5, n. 5, p. 86-106, 2019. Disponível em: https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume05/1.Engenharias/Ed05_EN_07_86_106.pdf. Acesso em: 24 mar. 2025.

CASTILLA, M. A. **Estudo energético de baterias de grafeno em veículos elétricos**. Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Linares. 2016. Disponível em: <https://crea.ujaen.es/server/api/core/bitstreams/62e52076-4c4d-4cbc-af7d-04238cad293d/content>. Acesso em: 02 abril. 2025.

CERQUEIRA, S. R. Regulação para o ADS-B1 no espaço aéreo brasileiro. **Revista da UNIFA**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 2, p. 21 - 35, 2021. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/pdf/v34n2/regulacao.pdf>. Acesso em: 14 abril. 2025.

CLARK, G. **Sodium-ion vs Lithium-ion batteries: comparison and applications**. 2025. Disponível em: https://holobattery.com/pt/sodium-ion-vs-lithium-ion-battery/#elementor-toc_heading-anchor-5. Acesso em: 01 abril. 2025.

COSTA, J.; SILVA, C. S.; VENANCIO, C. E.; TAKIISHI, H.; ABE, Y. I.; SOARES, P. E. Aplicação de derivados de grafeno em baterias e ímãs permanentes. **Revista da ABPN**, v. 14, n. 41, p. 124-142, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366471951_application_of_graphene_derivatives_in_batteries_and_permanent_magnets. Acesso em: 02 abril. 2025.

DAOWD, M.; OMAR, M.; LATAIRE, P.; BOSSCHE, P.; MIERLO, J. Battery Management System: balancing modularization based on a single switched capacitor and bidirectional DC/DC converter with the Auxiliary Battery. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2897-2937, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en7052897>. Acesso em: 07 abril. 2025.

DECEA (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO). **Diretriz da aeronáutica para o controle do espaço aéreo brasileiro**. 2025. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/DCA-351-7>. Acesso em 27 mar, 2025.

DUFOUR AEROSPACE - **Specifications of Aero3, tilt-wing eVTOL flagship aircraft**. 2021. Disponível em: <https://www.dufour.aero/post/dufour-aerospace-publishes-specifications-of-aero3-its-tilt-wing-evtol-flagship-aircraft>. Acesso em: 28 abril, 2025.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). **The Agency. 2025**. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/the-agency>. Acesso em: 15/06/2025.

EVTOLS NEWS. **Diamond aircraft velocity (prototype)**. 2025a. Disponível em: <https://evtol.news/volocoaster-velocity/>. Acesso em: 28 abril, 2025.

EVTOLS NEWS. **Diamond aircraft voloregion (prototype)**. 2025b. Disponível em: <https://evtol.news/volocoaster-voloconnect/>. Acesso em: 28 abril, 2025.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **About FAA**. 2025. Disponível em: <https://www.faa.gov/about>. Acesso em: 15/06/2025.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA) **Urban air mobility concept of operations**. Version 2.0. 2023. Disponível em: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0_0.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.

GABALDO, M. **Evtol baterias, densidade energética**: o futuro das baterias de aeronaves. LinkedIn. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/evtol-baterias-densidade-energ%C3%A9tica-o-futuro-das-de-marco-Aaldo-yhwff/>. Acesso em 15 mar. 2025.

GALAN, S. I. **Baterias de íons de sódio**: a revolução no armazenamento de energia renovável. Grupo Iberdrola. 2025. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/meio-ambiente/eficiencia-energetica/baterias-ions-sodio>. Acesso em: 01 abril. 2025.

GOMES, G. **As Baterias de estado sólido**. Energia Inteligente - Pet Elétrica UFJF. 2024. Disponível em: <https://energiainteligenteufjf.com.br/como-funciona/as-baterias-de-estado-solido/>. Acesso em: 01 abril. 2025.

IUNOVICH, P.; HORTA, L. **Avião elétrico faz voo histórico no céu de itaipu**. Itaipu Binacional. 2015. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/informativo_ve_8_final.pdf. Acesso em 18 mar 2025.

JACKSON, B. **Baterias de lítio-enxofre: as baterias do futuro**. 2024. Disponível em: <https://mundodocurioso.com.br/baterias-de-litio-enxofre-as-baterias-do-futuro/>. Acesso em: 02 abril. 2025.

KASLIWAL, A.; FURBUSH, N.; GAWRON, J.; MCBRIDE, J.; WALLINGTON, T.; KLEINE, R.; KIM, H.; KEOLEIAN, G. Role of flying cars in sustainable mobility. **Nature Communications**, v. 10, n. 1555. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09426-0>. Acesso em: 16 mar. 2025.

KHARRICH, M.; KIM, J.; YU, Q. Review of cell-balancing schemes for electric vehicle battery management systems. v. 17, 1271. **Energies**. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17061271>. Acesso em: 7 abril. 2025.

LEITE, S. F.; FRANÇA, A.; SOARES, M.; FREITAS, I.; SALVADORI, F. **Baterias de íons de lítio: estado da arte e perspectivas futuras**. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 2024. Disponível em: https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper_8451.pdf. Acesso em: 01 abril. 2025.

LILIUM. **An introduction to the lilium jet**. 2019. Disponível em: <https://lilium.com/newsroom-detail/youve-never-seen-anything-like-this-an-introduction-to-the-lilium-jet>. Acesso em: 28 abril, 2025.

LILIUM. **What it takes to design na aircraft from scratch**. 2020. Disponível em: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-architecture-design-principles>. Acesso em: 7 mar. 2025.

LOMBARDO, T.; DHIR, S. **EV battery supply chain sustainability**. International Energy Agency (IEA). 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e75c9a13-3753-4677-933f-c7f9ae38cfdb/EVBatterySupplyChainSustainability.pdf>. Acesso em 14 mar. 2025.

MILAGRE, J. P. S. **Revisão histórica e tecnológica das baterias enfatizando os modelos de lítio e desenvolvimento de um protótipo para o carregamento simultâneo de duas células de li-íon**. Universidade Federal de Uberlândia,

Uberlândia. 2023. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39647/1/Revis%C3%A3oHist%C3%B3ricaTecn%C3%B3logica.pdf>. Acesso em 24 mar. 2025.

MOTTA, T. T. **Sistema de gerenciamento de baterias de íons de lítio: BMS com aplicação em veículo elétrico**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/239766>. Acesso em: 07 abril. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Sobre a NASA**. 2025. Disponível em: <https://www.nasa.gov/about/>. Acesso em: 15/06/2025.

NITTA, N.; WU, F.X; LEE, J. T.; YUSHIN, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. **Science Direct**, v. 11, p. 252-264. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118?via%3Dihub>. Acesso em: 12 mar. 2025.

PARDO, J. O. **Proposta de um modelo multicritério para seleção de aeronaves eVTOL considerando o problema do desenvolvimento da mobilidade na Grande São Paulo**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São João da Boa Vista. 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/191efae5-daaa-4128-a4e5-205730a91bbf>. Acesso em: 7 mar. 2025.

PARK, S.; AHN, J.; KANG, T.; KIM, Y.; CHO, I. Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. **Journal of Power Electronics**, v. 20, p. 1526–1540. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00122-7>. Acesso em: 07 abril. 2025.

PEREIRA, N. A. **Sistema modular de gerenciamento de bateria com comunicação sem fio**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas. 2021. Disponível em: <https://portal.ifto.edu.br/palmas/campus-palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos-academicos/engenharia-eletrica/2021/alisson-neres-pereira.pdf>. Acesso em: 07 abril. 2025.

PEREIRA, V. A. C.; SILVA, T. A. da. Aeronaves Evtol como um novo conceito de aviação no Brasil: desafios, implementação e perspectivas. **Revista Brasileira de Aviação Civil. Ciências Aeronáuticas**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 7–31. 2023. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/150>. Acesso em: 7 mar. 2025.