



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INTEGRAÇÃO INOVADORA: O VEÍCULO HÍBRIDO COMO UNIÃO ENTRE EVTOL E CARROS TERRESTRES

INNOVATIVE INTEGRATION: THE HYBRID VEHICLE AS A UNION BETWEEN EVTOLS AND LAND CARS

CLAUS, Rafael Claus Negrete¹;
PALMA, Josias Palma de Oliveira¹;
LOUREIRO, Daniel Loureiro²

¹ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Campus Itatiba

² Professor e Dr. Orientador, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Câmpus Itatiba.

rafaelclaus@outlook.com

palma.josias@hotmail.com

RESUMO. Está emergindo uma nova categoria de veículos com potencial para concretizar o conceito de "carros voadores" - as aeronaves elétricas de decolagem e aterrissagem vertical (eVTOL). Este trabalho propõe uma forma inovadora de mobilidade urbana: o carro híbrido, capaz de funcionar como eVTOL e veículo terrestre comum. Essa transição é viabilizada por mudanças integradas na estrutura do carro. Apesar do avanço da tecnologia embarcada, desafios persistem na produção e gestão da energia necessária, especialmente em relação às baterias, o que continua a ser um fator limitante. A abordagem combina uma análise teórica, abordando o desenvolvimento de regulamentações e as dinâmicas de mobilidade, com uma análise analítica, apresentando um modelo numérico para estimar parâmetros essenciais ao sistema de propulsão.

Palavras-chave: eVTOL, aeronaves elétricas, mobilidade urbana, carro híbrido.

ABSTRACT. A new category of vehicles is emerging with the potential to materialize the concept of "flying cars" - electric vertical takeoff and landing aircraft (eVTOLs). This work proposes an innovative form of urban mobility: the hybrid car, capable of functioning as both an eVTOL and a regular land vehicle. This transition is enabled by integrated changes in the car's structure. Despite advancements in embedded technology, challenges persist in the production and management of necessary energy, especially concerning batteries, which remain a limiting factor. The approach combines theoretical analysis, addressing the development of regulations and mobility dynamics, with an analytical analysis, presenting a numerical model to estimate essential parameters for the propulsion system.

Keywords: eVTOL, electric aircraft, urban mobility, hybrid car.

INTRODUÇÃO

Os meios de transporte desempenham um papel crucial na sociedade, facilitando o acesso a empregos, educação, saúde e integração social. Além de impulsionar a economia e o comércio, eles são essenciais para o crescimento urbano e a inovação tecnológica, entretanto, atualmente, os meios de transporte disponíveis apresentam inúmeras oportunidades de aprimoramento. Especificamente em grandes áreas metropolitanas, a mobilidade da população



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

é frequentemente prejudicada pela presença comum de congestionamentos volumosos, que em sua maioria são fontes de poluição, gerando preocupações significativas para nações que buscam ativamente reduzir as emissões de poluentes. Além disso, as dificuldades impostas pelo congestionamento impactam a qualidade de vida e a eficiência das operações urbanas.

Nosso trajeto diário não será mais ditado por redes de estradas e trilhos, uma vez que os eVTOLs nos permitirão ir mais rápido e com menos esforço. A próxima geração de UAM (Mobilidade Aérea Urbana) também será mais acessível do que o transporte de helicóptero convencional hoje em dia. Como resultado, ela tem o potencial de se tornar uma experiência comum que abrirá novas oportunidades para comunidades e suas economias. (FLIGHT PLAN 2030, EMBRAERX, 2020, p. 5, tradução nossa)

A proposta de um veículo conversível, capaz de transitar tanto em solo terrestre quanto no espaço aéreo, se desenvolvida de maneira sólida, pode apresentar uma significativa alternativa para melhorar a acessibilidade e diversificar as opções de mobilidade urbana. Tal iniciativa tem o potencial de contribuir para a otimização do tempo, a mitigação do impacto ambiental e a diversificação da matriz energética.

Mobilidade do futuro

A mobilidade do futuro é caracterizada por avanços transformadores, incluindo veículos autônomos, eletrificação, mobilidade compartilhada e integração de modos de transporte. A mobilidade aérea urbana, com aeronaves eVTOL, e carros autônomos prometem revolucionar os deslocamentos urbanos de curta e longa distância. Infraestruturas inteligentes e uma forte ênfase na sustentabilidade são fundamentais nesse cenário. Pesquisa e inovação desempenham papéis cruciais na realização dessa visão. A Eve, uma empresa subsidiária da Embraer, está atualmente envolvida no desenvolvimento de um eVTOL. A empresa tem a ambição de transportar 12,7 milhões de passageiros por ano até 2035, nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. A Eve planeja iniciar suas operações comerciais com o eVTOL na capital paulista a partir de 2026.

Motivação

Diante das oportunidades de aprimoramento nos meios de transporte urbanos existentes e do notável potencial dos eVTOLs para a mobilidade do futuro, surge a motivação para o estudo de desenvolvimento deste projeto, a criação de uma proposta de um protótipo que visa introduzir uma iniciativa inovadora de um veículo híbrido, combinando características de um carro convencional com um eVTOL. A concepção dessa ideia baseia-se na premissa de criar uma nova forma de mobilidade urbana, permitindo que o veículo trafegue pelas ruas e voe a qualquer momento, transformando-se de carro para eVTOL e vice-versa conforme a necessidade do piloto.

A inspiração para este projeto de idealização de um protótipo surgiu a partir de extensas pesquisas sobre veículos inovadores para a mobilidade urbana do futuro. Entre essas pesquisas, destacam-se os eVTOLs, que têm a tendência de se tornarem uma das principais formas de transporte urbano e de carga no futuro. Além disso, o projeto toma como referência o Multi-Modal Mobility Morphobot (M4), um drone desenvolvido pela JPL (Jet Propulsion Laboratory)



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

que foi fundado pela NASA e que tem uma forma inovadora de conversão de carro para drone, motivou a concepção do protótipo, visando não apenas inovação, mas também versatilidade e adaptabilidade às futuras demandas da mobilidade urbana.

O presente trabalho é estruturado em quatro seções que incluem introdução, referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusões finais relacionadas à conclusão do projeto, e referências bibliográficas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados os fundamentos teóricos que envolvem o desenvolvimento do projeto do nosso veículo híbrido, o carro que se transforma em eVTOL, divididos em três seções distintas. Na primeira parte, são abordadas as normas reguladoras para o desenvolvimento e operação de veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOL) e de veículos terrestres, em conformidade com os requisitos estabelecidos. Na segunda parte são apresentados os equipamentos usados para desenvolver o sistema ciber físico do nosso veículo híbrido, já na terceira um estudo no Solidworks para o início da validação do nosso protótipo.

Considerações na versão eVTOL

A Porsche Consulting (2018) defende que o estabelecimento do mercado de mobilidade aérea urbana, por meio de veículos eVTOLs, está condicionado à atendimento de quatro fundamentos cruciais:

1. Sistemas de aeronaves
2. Certificação
3. Aceitação social
4. Infraestrutura

O primeiro ponto aborda os requisitos técnicos para o veículo aéreo, englobando a propulsão e a busca pelas melhores tecnologias disponíveis no mercado. Diversas organizações estão desenvolvendo projetos, e várias ideias já surgiram e continuam a emergir globalmente. (Porsche, 2018)

O segundo ponto discute as regulamentações aplicáveis a esse tipo de mercado, conforme evidenciado no estudo da NASA (2018). A Porsche (2018) compartilha a perspectiva de que o mercado estará sujeito a regulamentações rigorosas, com a Federal Aviation Administration (FAA) e a European Aviation Safety Agency (EASA) desempenhando papéis essenciais nesse contexto. Os requisitos regulatórios e legais predominantes incluem a certificação da organização de desenvolvimento de aeronaves, a própria aeronave, o processo de produção, as operações, os serviços oferecidos e a licença de piloto.

Embora ainda não exista uma certificação específica para a mobilidade de veículos eVTOL voltada para a mobilidade urbana, a EASA deu um passo inicial em 2019 ao introduzir as Special Condition VTOL Aircraft, representando as primeiras diretrizes ainda em fase de análise para o desenvolvimento de uma certificação definitiva. (EASA,2019)

O terceiro ponto está relacionado à resposta do público diante das soluções propostas pelas empresas em relação a questões de segurança, potencial de poluição visual e sonora, e benefícios da integração desse mercado na mobilidade urbana. As primeiras implementações



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

desse mercado ocorrerão em locais mais receptivos a testar novas tecnologias e com processos decisórios rápidos, como Cingapura, Dubai e China. Acredita-se que as lições aprendidas nessas implementações iniciais serão essenciais para moldar a percepção das preocupações com segurança e proteção (GRANDL et al., 2018).

O quarto ponto é um componente crucial para o sucesso da mobilidade vertical: a infraestrutura necessária para decolagem, pouso, carregamento, manutenção do veículo e estacionamento à espera dos passageiros. A integração eficiente com o transporte existente é fundamental, e as aeronaves eVTOL só se tornarão verdadeiramente úteis para a mobilidade se estiverem bem integradas à rede de transporte geral de uma cidade (GRANDL et al., 2018).

Regulamentação

A European Union Aviation Safety Agency (EASA, 2019) publicou um documento com o nome de Special Condition Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft, para atender várias solicitações para certificação de aeronaves do tipo VTOL.

No documento é apontado que mesmo que os VTOLS tenham diversas semelhanças com os helicópteros por possuírem as características de poderem pairar e realizarem pouso e decolagem vertical, não é possível classificar esse novo tipo de mobilidade urbana como sendo uma aeronave convencional ou um helicóptero. A EASA também conclui que se for aplicada as especificações de certificação de uma aeronave ou para helicópteros, dependendo se são mais parecidos com uma aeronave ou um helicóptero, e apenas adicionar algumas modificações, não garantiria tratamento igualitário (EASA, 2019).

Ainda sobre o documento da EASA (2019) nos traz a perspectiva das primeiras regras que foram criadas para a regulamentação dos VTOLS, essas regras ainda estão em análise para o desenvolvimento de uma certificação final, no geral o documento estabeleceu uma condição especial para certificação de aeronaves VTOL na categoria pequena, com ênfase na capacidade VTOL e propulsão distribuída. Foram criadas categorias de certificação (Básica e Aprimorada) para operações planejadas, com padrões de segurança mais rigorosos para transporte comercial e mobilidade aérea urbana. As metas de segurança foram determinadas através de avaliações considerando a complexidade do sistema, operações planejadas e dependência de sistemas VTOL. Requisitos foram estabelecidos para evitar falhas catastróficas, colisões com aves e para a instalação de gravadores de voo. A EASA permitiu a pilotagem remota e a autonomia, e destacou a importância de gravadores para investigações de acidentes, com a opção de transmissão remota de dados.

As duas categorias certificação para aeronaves VTOL (Vertical Takeoff and Landing) com o objetivo de tornar as regulamentações proporcionais à natureza e ao risco das operações aéreas. As categorias são chamadas de Básica e Aprimorada, cada uma vinculada ao tipo de operações planejadas. A Categoria Aprimorada tem requisitos mais rigorosos, visando a segurança de terceiros em áreas congestionadas e o transporte aéreo comercial de passageiros. As aeronaves certificadas na Categoria Aprimorada devem ser capazes de realizar pousos de emergência controlados em caso de falha e continuar até o destino original ou um vertiporto alternativo adequado. Na Categoria Básica, apenas os requisitos de pouso de emergência controlado precisam ser atendidos, semelhantes a um planeio controlado. As operações da Categoria Aprimorada envolvem maior risco operacional para terceiros e transporte remunerado de passageiros, justificando a aplicação dos mais altos padrões de segurança, independentemente do número de ocupantes. (EASA, 2019)

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No Brasil ainda não tivemos a formalização de nem um documento sobre as regras que serão estabelecidas sobre os VTOLS, o que se sabe e que foi formalizada uma parceria entre a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Federal Aviation Administration (FAA) o que promete ser um marco significativo na evolução de uma regulamentação de certificação de veículos elétricos de pouso e decolagem vertical (eVTOLs), isso significa uma grande passo para evolução do transporte aéreo e sinaliza o empenho das autoridades de aviação em moldar um futuro da mobilidade urbana (GOV.BR, 2023)

A ANAC (2023) publicou um documento onde procurou descrever o cenário atual do desenvolvimento da Mobilidade Aérea Avançada (AAM), suas perspectivas e desafios; bem como delinear as ações em andamento e previstas para a Superintendência de Aeronavegabilidade da ANAC.

Figura 1 - Roadmap da certificação de projeto às operações futuras



Fonte: ANAC (2023).

O infográfico apresentado a acima ilustra as etapas convencionais do processo de certificação de projeto de uma aeronave, organizadas de maneira lógica. Atualmente, no contexto brasileiro, encontra-se na fase de estabelecimento da Base de Certificação. Em termos simples, após a emissão do Certificado de tipo, a empresa estará autorizada a fabricar as aeronaves. Estas, ao serem comercializadas, poderão ser utilizadas para operações apropriadas. (ANAC, 2023)



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Gerenciamento e dinâmica tráfego aéreo

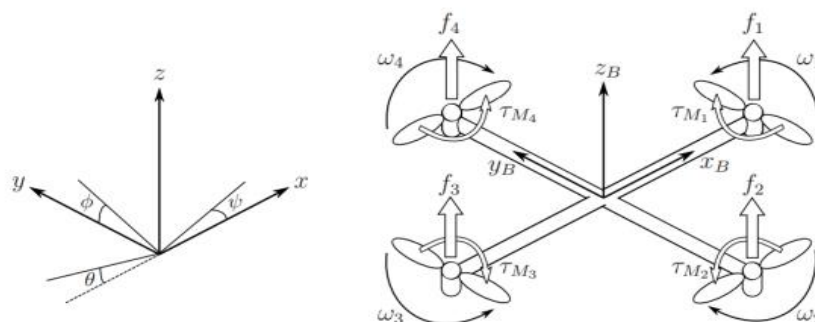
O Urban air traffic management (UATM) novo tipo de abordagem proposto pela Embraer-X será um importante sistema que empregará estruturas e procedimentos estrategicamente planejados no espaço aéreo para assegurar a segurança e eficiência dos voos urbanos, minimizando o impacto no gerenciamento de tráfego aéreo (ATM). O sistema UATM será viabilizado por tecnologias como Communication, Navigation, and Surveillance (CNS), autonomia, inteligência artificial e redes de troca de informações. À medida que a tecnologia evolui, ela impulsiona mudanças nas capacidades do UATM, cujo papel futuro será capacitar novos designs e procedimentos no espaço aéreo, mantendo o sistema ágil, responsivo e harmonizado (Flight Plan 2030).

Ainda segundo o Flight Plan (2030) da Embraer-X a implementação do UATM deve ser adaptada às necessidades urbanas, com envolvimento crítico da comunidade de aviação, operadores de skyports e frotas. A colaboração informará decisões sobre equidade no acesso ao espaço aéreo e posições de rotas, já o gerenciamento de tráfego aéreo urbano possibilita o crescimento do transporte aéreo urbano.

Dinâmica do vtol

Em um drone quadrimotor, que possui quatro motores, é essencial que os motores não girem todos na mesma direção. Em outras palavras, é necessário que um par de motores, posicionados em lados opostos, gire no sentido dos ponteiros do relógio, enquanto o outro par gira no sentido oposto, a fim de evitar que o quadrimotor rotacione em torno do seu eixo (D. McGriffy, 2016), (A. Juniper, 2015), (T. Luukkonen, 2011).

Figura 2 - Representação das forças do drone e sentido de rotação dos motores em um drone com formato.



Fonte: T. Luukkonen, 2011.

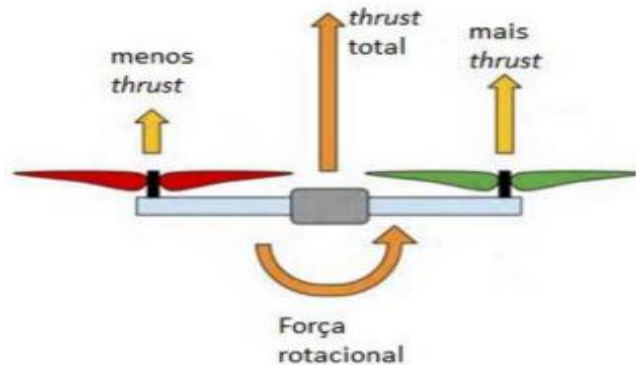
Na Figura 2, é possível observar que cada motor exerce uma força no drone, denominadas f_1 , f_2 , f_3 e f_4 , conhecidas como thrust. Para que o drone consiga realizar a decolagem vertical, é imperativo que a soma dessas forças, o thrust total, seja maior que a força gravitacional, conforme indicado na Equação 4 (T. Luukkonen, 2011):

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 > mg \text{ (Equação 4)}$$

- m representa a massa do drone;
- g a constante de aceleração da gravidade.



Figura 3 - Velocidade dos motores de maneira que seja possível movimentar-se ao longo de x ou y.



Fonte: D. McGriffy, 2016

Conforme os conceitos apresentados na pesquisa da Porsche (2018), os eVTOLs são categorizados em fases, como indicado na figura:

Figura 4 - Conceitos aerodinâmicos simplificados utilizados em mobilidade aérea vertical

Conceitos simplificados de aerodinâmica aplicada em mobilidade aérea vertical			
	Fase única	Fase dupla	Fase de transição
	MULTIROTOR Sustentação	LIFT AND CRUISE Combinação	TILT-X tilt-wing, tilt-rotor, tilt-duct
Tempo pro mercado	Certificação mais rápida de todas	Certificação mais lenta	Certificação mais lenta de todas
Velocidade de viagem (estimado)	~70–120 km/h	~150–200 km/h	~150–300 km/h
Rotas	Selecionadas	Todas	Todas
Potencial	~70% de intra-cidade 0% de cidade-cidade	~100% de intra-cidade 100% de cidade-cidade	~100% de intra-cidade 100% de cidade-cidade

Fonte: (GRANDL et al., 2018)

Aprimorar e desenvolver o conceito do projeto do veículo é um elemento crucial para transformar a mobilidade combinada em uma realidade. Cada configuração apresenta vantagens e desvantagens em relação ao tempo de entrada no mercado, velocidade de deslocamento, rotas ideais, eficiência e tamanho potencial do mercado (GRANDL et al., 2018).

Regulamentação na versão carro

A construção de um protótipo de carro é um desafio multifacetado que requer uma abordagem integrada, considerando as complexidades do design, engenharia, produção, bem como as exigências regulatórias e de homologação. A compreensão e análise dos requisitos

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

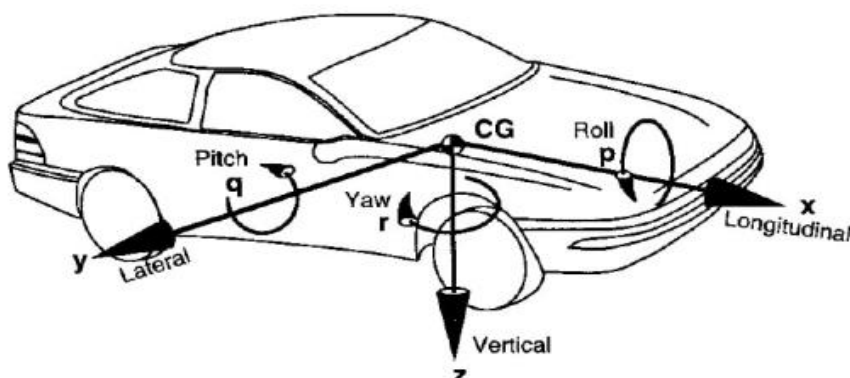
fundamentais envolvidos nesse processo, incluindo a conformidade com as normas de segurança, emissões e eficiência estabelecidas pelas autoridades reguladoras, são cruciais para o sucesso do empreendimento. Portanto, diferentemente da abordagem feita no eVTOL, um veículo ainda em construção, este tópico tem como objetivo fornecer uma visão abrangente que contribuirá para a criação de veículos mais inovadores, eficientes e seguros, alinhados não apenas com as necessidades e expectativas da sociedade atual, mas também com as exigências legais que governam a indústria automobilística (Faveri, 2021).

A Indústria automobilística é regida sobre diversas normas ISO, notadamente, a ISO/TS 16949 voltada para o setor é baseada diretamente na NBR ISO 9001 Sistema de Gestão de Qualidade que visa a melhoria contínua, enfatizando a prevenção de defeitos com base na gestão de riscos e na redução de variação e de desperdícios na cadeia de fornecimento (MIGNOLI, 2016).

Dinâmica veicular

Para colocar um veículo em movimento, é necessário superar as forças que se opõem ao deslocamento (GILLESPIE, 1992; SANTOS, 2012). O estudo da dinâmica veicular geralmente é subdividido em três eixos, correspondendo aos eixos longitudinal, lateral e vertical. A norma J 670 (Vehicle Dynamics Terminology) da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) aborda essa normalização, conforme ilustrado na Figura 21 (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; DIAS, 2013).

Figura 5 - Representação de forças em um carro.



Fonte: Gillespie (1992).

Onde:

- x - movimentos longitudinais, considerando positivo para frente do veículo;
- y - movimentos laterais, sendo positivo para o lado direito do veículo;
- z - movimentos verticais, positivos para baixo em relação ao veículo;
- p - velocidade de rolagem (roll) em torno do eixo x ;
- q - velocidade de arfagem (pitch) em torno do eixo y ;
- r - velocidade de guinada (yaw) em torno do eixo z ;
- C_G - centro de gravidade.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

As funções de aceleração e frenagem estão intimamente ligadas à dinâmica longitudinal, a qual se relaciona com o deslocamento do eixo principal do veículo (eixo x), além de estudar rotações em torno do eixo y . Os principais componentes dessa dinâmica são a carroceria e o conjunto propulsor, compreendendo o motor, transmissão e rodas. A dinâmica lateral está associada ao esterçamento das rodas, realizado por meio do eixo do volante, possibilitando a mudança de direção do veículo no deslocamento ao longo do eixo y , e essa dinâmica também analisa rotações em torno dos eixos x e z . Por sua vez, a dinâmica vertical estuda o movimento vertical ao longo do eixo z , influenciado pelas irregularidades do pavimento, e investiga as rotações em torno dos eixos x e y (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; DIAS, 2013).

Veículos híbridos elétricos

Enquanto os veículos elétricos conquistam um espaço cada vez mais importante no cenário da mobilidade sustentável, a convergência entre veículos elétricos e híbridos, juntamente com a expansão da tecnologia eVTOL, reflete uma evolução marcante no cenário da mobilidade sustentável e representa um campo de inovação que desafia as barreiras tradicionais da mobilidade. A busca por soluções de transporte versáteis e adaptáveis que possam transitar entre vias terrestres e espaços aéreos tem capturado a imaginação de engenheiros e entusiastas da mobilidade., que combinava a funcionalidade de um carro e a capacidade de voar, e o Curtiss Autoplane, produzido pela Curtiss-Wright em 1917, que se assemelhava a um carro com a capacidade de transformar-se em uma aeronave, atualmente o PAL-V Liberty, que combina características de carro e girocóptero para permitir a mobilidade terrestre e aérea (introduzido em 2012) e com fabricação prevista para o próximo ano (Scientific American 2017; PAL-V Liberty 2017).

Figura 6 - Curtiss Autoplane 1917



Fonte: Scientific American (2017).

Figura 7 - PAL-V Liberty



Fonte: PAL-V Liberty (2017).



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Além desses, outros exemplos notáveis de veículos híbridos incluem o AeroMobil, um veículo que pode transitar nas estradas como um carro convencional e, em seguida, se transformar em uma aeronave de asa fixa (produzido em diversos protótipos desde 2013); o Terrafugia Transition, que incorpora as funções de carro e pequeno avião em um único veículo (lançado em 2009); Esses protótipos e conceitos representam uma nova era na mobilidade, destacando a versatilidade e a adaptabilidade das soluções de transporte para enfrentar os desafios da mobilidade urbana do futuro. Nesse contexto, notáveis exemplos de veículos híbridos incluem o ConvAirCar, fabricado pela Convair em 1947.

Sistema de armazenamento de energia

No contexto de um sistema totalmente elétrico, a propulsão do veículo é exclusivamente alimentada por baterias, tornando assim os critérios de desempenho durante o voo dependentes das características de densidade energética e capacidade do sistema de armazenamento de energia (Marques e Henrique, 2021).

Baterias, conforme explicado por Chagas (2012), são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas.

Na aviação, três tipos de baterias são comumente utilizados: bateria chumbo-ácido, Lipo (Lítio polímero) e Lítio-íon. De acordo com Jacqueline Copetti (2007), as baterias de chumbo-ácido ainda são consideradas viáveis, pois representam uma tecnologia conhecida e dominada, apresentando uma boa relação entre rendimento, custo e vida útil. Essas baterias são aplicáveis em uma variedade de contextos, incluindo sistemas automotivos, veículos elétricos e sistemas de alimentação interrupta, como os de emergência, destacando-se pela versatilidade e confiabilidade. Além disso, elas são mais acessíveis, abrangendo aproximadamente 40% do mercado.

As vantagens das baterias Lipo e Lítio-íon residem no fato de que seus eletrodos são mais leves em comparação com outros tipos de baterias do mesmo tamanho. O lítio, sendo um elemento altamente reativo, permite o armazenamento de uma quantidade significativa de energia em suas ligações atômicas. Isso resulta em uma alta densidade energética quando comparada a outros tipos de baterias, como o chumbo-ácido, NiCd e NiMH (Saha; Goebel, 2009).

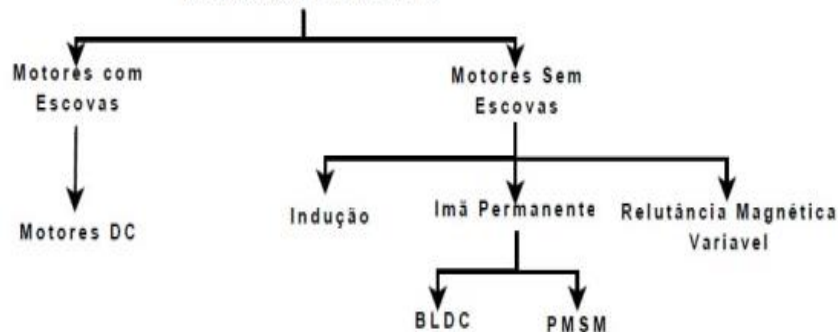
Sistema de propulsão

Tipicamente, o sistema de propulsão de uma aeronave eVTOL é formado por vários motores elétricos distribuídos em diferentes pontos da aeronave, proporcionando sustentação e propulsão vertical. O número de rotores a serem utilizados está condicionado à tração máxima do sistema em comparação com a tração máxima que cada motor pode gerar (Marques e Silva, 2021).

Os motores do tipo brushless, frequentemente empregados em eVTOL's, são motores elétricos que dispensam escovas de carvão, sendo controlados eletronicamente. São eficientes, possuem uma vida útil mais longa, requerem menos manutenção e possibilitam um controle preciso de velocidade e torque. Adicionalmente, os motores BLDC apresentam uma maior eficiência devido à redução das perdas de energia causadas pelo atrito das escovas e são constituídos por um estator, onde as bobinas de fio condutor são inseridas em um núcleo ferromagnético, e um rotor que contém os ímãs permanentes. (Da Silveira, 2023).

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 9 – Classificação dos motores
Clasificação dos Motores



Fonte: Correa et al (2013).

Controle e navegação

A implementação de um sistema de controle eficiente é essencial para assegurar a operação segura dos eVTOLs, especialmente considerando a perspectiva de expandir as operações para altitudes superiores a 1500 pés acima do terreno (Airservices, 2020, p. 17, tradução nossa).

No entanto, a questão da autonomia versus pilotagem humana permanece como um ponto de interrogação significativo. A ausência de uma certificação específica para esse tipo de aeronave apresenta desafios, conforme destacado pelas preocupações expressas pela. Nesse contexto, a agência enfatizou a importância da confiabilidade do sistema autônomo, ressaltando que está se desenvolve ao longo do tempo por meio de adaptações contínuas. (NASA, 2018)

Segundo Goyal (2018) é crucial observar que a transição para a autonomia total não ocorre sem desafios e reflexões críticas. À medida que as tecnologias evoluem, é fundamental considerar não apenas a redução de erros humanos, mas também a coexistência harmoniosa entre sistemas autônomos e a intervenção humana quando necessário. A figura 10 ilustra essa complexa relação, evidenciando a interdependência entre o desenvolvimento tecnológico e a garantia da segurança operacional nos eVTOLs. Essa interação dinâmica entre máquina e operador desempenha um papel central na determinação do futuro da navegação dessas aeronaves inovadoras.

Figura 10 – Gráfico comparativo da segurança operacional.



Fonte: GOYAL et al., (2018).



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

A estabilidade, segurança e eficiência operacional dos eVTOLs (veículos elétricos de decolagem e pouso vertical) estão intrinsecamente ligadas ao sistema de controle e navegação. Esses sistemas geralmente integram uma combinação avançada de hardware e software, desempenhando funções como estabilização, controle de voo, navegação autônoma e comunicação com os sistemas de controle de tráfego aéreo (GOYAL et al. 2018).

ESTUDO DA ARTE

Os elementos a serem abordados nesta pesquisa compreendem as regulamentações do DECEA e da ANAC, o Flight Plan 2030, os conceitos operacionais do eVTOL da EMBRAER, juntamente com publicações relacionadas disponíveis nas plataformas da EMBRAER, em portais de notícias e em artigos especializados. Essa compilação de recursos tem como finalidade estabelecer uma base sólida para a análise e compreensão das práticas e normativas relevantes no cenário da aviação elétrica vertical. Além disso, ao longo do desenvolvimento desta seção, são ressaltados os estudos conduzidos em seções específicas, como Motores Elétricos (2.5), Sistemas de Armazenamento de Energia (2.4) e Sistema de Propulsão Híbrido-Elétrico (2.7). Tais áreas, ao abordarem aspectos fundamentais, desempenham um papel crucial na formulação das diretrizes técnicas e estratégicas para o bem-sucedido desenvolvimento do projeto, alinhando-se às inovações propostas no âmbito da aviação elétrica vertical.

Metodologia

O projeto concentra-se na elaboração de um plano para a produção inicial de protótipos, sintetizando os principais aspectos de sua construção. Essa iniciativa é fundamentada na revisão do estudo da arte, permitindo uma visão abrangente das pesquisas na área e orientando futuras direções de estudo. O estudo da arte oferece uma compreensão das linhas de pesquisa que se concentram nesse tema específico, possibilitando entender os rumos desses estudos. Assim, ao considerar essas diretrizes, o projeto visa guiar a fabricação dos primeiros protótipos de maneira sólida e alinhada com os avanços recentes e futuros na área de pesquisa. Além disso, este trabalho adota uma abordagem descritiva ao examinar as regras estabelecidas pelos regulamentos em vigor, utilizando o estudo bibliográfico e documental como método, por meio da análise das normas brasileiras.

Configuração

A escolha da categoria de um veículo eVTOL é influenciada por vários fatores, como o tipo de missão, carga útil, autonomia e peso máximo de decolagem. É de suma importância levar em consideração o tipo de certificação ao qual o produto estará sujeito, conforme ressaltado em Mercado UAM (2.2), uma vez que cada processo de certificação implica em diferentes custos, prazos e requisitos até chegar ao produto final.

Ao examinar a "Figura 5: Conceitos aerodinâmicos simplificados utilizados em mobilidade aérea vertical", nota-se que a plataforma multirotor é o modelo mais ágil para entrar no mercado. Isso se deve ao fato de que nessa categoria não são necessários sistemas extras para diferenciar a aeronave no modo de voo hover e no modo de voo cruzeiro, como é o caso das configurações Lift + Cruise e Vectored Thrust. Por esse motivo, essa configuração apresenta subsistemas de fabricação mais simples.



Dado que um dos objetivos deste trabalho é apresentar uma solução de engenharia como uma alternativa para reduzir o peso das baterias utilizadas nos veículos eVTOL, o fator de tempo no mercado é essencial. O desenvolvimento de baterias mais leves, com maior capacidade de carga e densidade energética, está diretamente relacionado ao alcance e autonomia desses veículos. Portanto, a categoria de estudo definida para este trabalho é a de multirotóres.

Desenho auxiliado por computador

O CAD, que significa Desenho Auxiliado por Computador (Computer Aided Design, em inglês), é uma tecnologia adotada por projetistas para substituir o desenho manual, fazendo uso de um software em um computador. De acordo com a definição de Um (2018), o CAD envolve a criação e manipulação de imagens em um computador para ajudar os engenheiros no processo de projeto.

No início deste projeto, foi concebido um veículo com uma estrutura simples e de rápida transformação para alcançar o objetivo de um veículo adequado ao uso diário. O software de modelagem SOLIDWORKS foi empregado para visualizar um primeiro protótipo e considerar como possíveis estudos poderiam se desenvolver a partir dele. O Shaili, um desenho 3D disponível em sites de modelagem, foi utilizado como referência e modificado para se adequar ao que foi proposto neste trabalho.

Figura 11 – Proposta de protótipo de nosso carro híbrido.



Fonte: Próprio autor.

Embora o estudo de viabilidade do projeto tenha sido conduzido sem considerar inicialmente a segurança, dado que ainda se trata de um protótipo, o projeto incorpora a proteção das hélices pela estrutura. Essa medida visa assegurar a segurança durante os testes, tanto para o operador quanto para os componentes.

Ao examinar a configuração de conversão das rodas para hélices, torna-se claro que vários tipos de sensores devem operar em conjunto com o eixo para possibilitar um controle seguro dessa estrutura.

Dimensionamento do eVTOL

A determinação da velocidade estimada foi fundamentada nos eVTOLs da categoria equivalente (multirotóres). O Volocopter 2X, por exemplo, possui uma velocidade de cruzeiro de 100 km/h, ao passo que o Seraph apresenta uma velocidade de cruzeiro de 80 km/h. Assim,



os parâmetros a serem empregados para o dimensionamento encontram-se detalhados na tabela abaixo:

Tabela 1 - Critérios empregados para o dimensionamento do sistema de propulsão elétrica.

Configuração	Multirotor
Peso máximo(MTOW)	250 Kg
Alcance mínimo	50 Km
Autonomia mínima	30 Min
Velocidade de cruzeiro	80 Km/h

Ao constatar empresas especializadas no desenvolvimento de motores elétricos para eVTOL, é possível obter informações técnicas de desempenho fornecidas pelos próprios fabricantes. A principal empresa de referência explorada neste estudo é a T-MOTOR (T-MOTOR, 2023), especializada em motores elétricos de fluxo radial. Nos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS), é comum estabelecer a relação entre o peso máximo de decolagem (MTOW) e a tração como sendo igual ou inferior a 70% (HALFCHROME, 2019). Para o contexto deste projeto, que envolve um veículo tripulado, os requisitos de segurança são mais rigorosos, portanto, o valor considerado deve ser inferior a 60%.

Existem três categorias de perdas de energia possíveis em motores elétricos: perdas por atrito, perdas resistivas e perdas de ferro. As perdas por atrito referem-se ao atrito nos mancais e ao arrasto causado pelo movimento do rotor no ar. As perdas resistivas descrevem a dissipação de calor resultante da passagem de corrente pelos fios da bobina. As perdas de ferro estão relacionadas a perdas localizadas no núcleo de ferro do estator. Assim, a eficiência máxima de motores sem escovas (Brushless) pode variar acima de 90% (SCHÖMANN, 2014).

Um parâmetro vital relacionado às características dos motores elétricos é a eficiência, que correlaciona a massa de tração e a potência (g/W). Para calcular isso, foram utilizados valores baseados nos dados fornecidos pelo fabricante de motores com alta capacidade de carga. Observa-se que, para valores de eficiência g/W de 7 a 10, a relação MTOW/Tração é inferior a 60%.

Tabela 2 - Dados para calcular a potência necessária durante a operação de hover dos motores elétricos empregados no sistema de sustentação do veículo.

Número de rotores (Nr)	4
Peso máximo (MTOW)	250 Kg
Eficiência dos motores elétricos (ηm)	90%
Relação MTOW/Tração (P/T)	30 Min
Eficiência g/W ($\eta g/W$)	7,0

A seguinte equação possibilita calcular a máxima tração disponível (T_{max}) dos motores elétricos:



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

$$T_{max} = MTOW/(P/T) \quad (1)$$

Com essa conclusão, é viável determinar a tração máxima requerida para os motores elétricos disponíveis no mercado ($T_{max.mot}$).

Essa informação será crucial ao decidir qual modelo utilizar no sistema propulsor de sustentação do veículo:

$$T_{max.mot} = T_{max}/(Nr * \eta m) \quad (2)$$

Uma das características fundamentais dos eVTOLs de configuração multirrotor é a habilidade de decolagem vertical e voo pairado (estacionário/hover). Em seguida, será realizado o cálculo da tração requerida para o voo em hover (T_{hover}) que cada motor precisa gerar, utilizando a seguinte equação:

$$T_{hover} = MTOW/(Nr * \eta m) \quad (3)$$

Assim, a fórmula que calcula a potência total (P_{total}) dos motores VTOL durante o voo em hover é a seguinte:

$$P_{total} = MTOW/(\eta g/W * 1000) \quad (4)$$

Dimensionamento da versão carro

Quando um veículo está se movendo em uma rampa, uma componente de seu peso atuará na direção do declive. Na subida, essa componente do peso se opõe ao movimento, enquanto na descida auxilia o movimento. No entanto, para a análise de desempenho, considera-se apenas as subidas. A Equação 24 é apresentada conforme revisão bibliográfica (GILLESPIE, 1992; EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_g = M g \sin(\alpha) \quad (5)$$

Onde: M = peso do veículo em (kg); g = aceleração da gravidade; α = ângulo de inclinação da pista.

Diversas metodologias são empregadas para dimensionar o sistema de tração de veículos elétricos, baseando-se na dinâmica veicular, e uma delas leva em consideração três condições de operação (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997):

- Aceleração inicial;
- Velocidade nominal do veículo;
- Velocidade máxima do veículo.

Conforme a segunda lei de Newton, para alterar seu estado de movimento (repouso ou movimento retilíneo uniforme), um veículo precisa ter uma força aplicada que se some às forças de resistência ao movimento. Dessa forma, é conferida uma aceleração linear ao veículo, conforme demonstrado pela equação 6.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

$$Fla = \frac{M dV}{dt} (t) \quad (6)$$

Para calcular a rotação (Nt) nas rodas/pneus em [rpm] pcom base na velocidade do veículo (Vk) é necessário seguir os seguintes passos, nos quais a Equação 7, conforme apresentada por Tanaka (2013), proporcionará o valor da rotação da roda/pneu em [rpm].

$$Nt = \frac{30V}{rd} \quad (7)$$

Para determinar a rotação do motor em [rpm], é crucial considerar a relação de transmissão. Multiplicando o valor obtido para a rotação na roda/pneu (Nt) pelo valor especificado da relação de transmissão total (ig), é possível determinar o valor da rotação do motor em [rpm], como demonstrado pela equação 8. (TANAKA, 2013).

$$Nm = \beta g * Nt \quad (8)$$

Ao realizar esses cálculos, obtêm-se os valores de rotação do motor para a velocidade nominal de cruzeiro e a velocidade máxima do veículo, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa teórica oferecem perspectivas valiosas sobre a viabilidade e os desafios potenciais associados à concepção e implementação de um veículo híbrido. A análise abrangente abordou uma variedade de aspectos, incluindo regulamentações, tecnologias, dinâmica de tráfego aéreo e considerações específicas para a versão automotiva do veículo proposto, além do dimensionamento.

O contexto atual da mobilidade urbana, caracterizado por congestionamentos significativos, impactos ambientais e desafios na eficiência operacional, motivou o estudo e desenvolvimento do projeto de um veículo híbrido capaz de transitar tanto em solo terrestre quanto no espaço aéreo. A proposição de um veículo conversível, inspirado nas tendências da Mobilidade Aérea Urbana (UAM) e nos avanços tecnológicos, busca oferecer uma alternativa inovadora para aprimorar a acessibilidade, otimizar o tempo de deslocamento e contribuir para a diversificação da matriz energética.

O referencial teórico aborda aspectos fundamentais para o desenvolvimento do projeto, desde normas reguladoras até dinâmicas veiculares. A discussão sobre a regulamentação de veículos eVTOL destaca a importância de elementos como sistemas de aeronaves, certificação, aceitação social e infraestrutura, visando garantir a segurança em diferentes contextos operacionais.

A discussão sobre o sistema de propulsão enfatiza a relevância dos motores elétricos brushless (BLDC) em eVTOLs, ressaltando sua eficiência, vida útil mais longa e controle preciso. A classificação dos motores e a análise de sua eficiência destacam a diversidade dessas tecnologias e sua contribuição para o desempenho dessas aeronaves inovadoras.

Este estudo sugere que a proposta de um veículo híbrido apresenta um potencial inovador e pode contribuir significativamente para a diversificação das opções de mobilidade urbana. No entanto, existem desafios substanciais, como os relacionados à regulamentação e



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

certificação, que precisam ser abordados para uma implementação bem-sucedida. A integração eficiente de sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo urbano é crucial, assim como uma compreensão aprofundada das normas específicas da indústria automotiva. O estudo destaca a necessidade contínua de pesquisa, colaboração e inovação para transformar a visão de mobilidade do futuro em realidade.

Além disso, a discussão sobre controle e navegação destaca a complexidade da transição para a autonomia total nos eVTOLs, enfatizando a importância da confiabilidade do sistema autônomo e a necessidade de adaptações contínuas para garantir a segurança operacional. Adicionalmente, torna-se evidente a necessidade e complexidade de integrar dois tipos distintos de mobilidade em um único veículo. A questão da segurança, regulamentação, estudos e desenvolvimento ainda representa um processo extenso a ser superado. A questão da matriz energética também permanece como um desafio a ser enfrentado.

Em síntese, os resultados e a discussão destacam a abrangência e complexidade do projeto de um veículo híbrido, evidenciando a importância da integração de conhecimentos multidisciplinares e da consideração de normas e regulamentações específicas. O trabalho apresenta uma base sólida para o desenvolvimento futuro do protótipo, alinhado com as tendências e desafios da mobilidade urbana contemporânea.

CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi compreender a tecnologia eVTOL e sua potencial adaptação ao veículo híbrido, em comparação com a legislação vigente, visando determinar os requisitos de infraestrutura para sua operação no Brasil. É crucial ressaltar que o levantamento realizado sobre os requisitos, por meio das normas atuais, constitui projeções do que se espera nos próximos anos. Isso se deve ao fato de que as normas existentes para outros tipos de aeronaves não abrangem as particularidades de voo necessárias nas operações de mobilidade urbana.

A aplicação do Desenho Auxiliado por Computador (CAD), especialmente através do SOLIDWORKS, exemplifica a integração de ferramentas tecnológicas avançadas no processo de design, permitindo visualizações detalhadas e ajustes iterativos para atender aos objetivos do projeto. O dimensionamento do sistema de propulsão elétrico, com foco na eficiência dos motores e considerações de segurança, estabelece uma base sólida para o desenvolvimento do protótipo, contribuindo para a otimização do desempenho e autonomia do veículo.

A abordagem detalhada sobre o sistema de armazenamento de energia sublinha a importância das baterias, considerando diferentes tipos como chumbo-ácido, Lipo e Lítio-íon. A eficiência dessas tecnologias desempenha um papel crucial no desempenho dos veículos totalmente elétricos, especialmente nas aeronaves eVTOL, onde a densidade energética e a capacidade do sistema de armazenamento são fatores determinantes.

A análise da versão carro do eVTOL, com cálculos detalhados para a dinâmica veicular em aclives, adiciona uma camada extra de complexidade ao projeto, levando em conta as diferentes condições operacionais. Essa abordagem completa, combinando aspectos normativos, tecnológicos e de desempenho, contribui para a criação de um eVTOL que não apenas atenda aos requisitos de segurança e regulamentares, mas também seja eficiente e prático em diversas situações operacionais. Em resumo, este estudo oferece uma visão integrada e abrangente do processo de desenvolvimento de eVTOL, fornecendo insights valiosos para futuras iniciativas no campo da aviação elétrica vertical.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Embora o estudo tenha revelado perspectivas promissoras para a viabilidade de um veículo híbrido, é importante reconhecer que a implementação bem-sucedida dessa proposta ainda enfrenta desafios tecnológicos significativos. A integração perfeita de sistemas autônomos, a certificação rigorosa para aeronaves VTOL e as demandas específicas de mobilidade urbana representam obstáculos complexos. Contudo, a rápida evolução tecnológica sugere que, no futuro, poderemos superar esses desafios. O avanço contínuo em áreas como baterias de alta densidade energética, sistemas de propulsão mais eficientes e algoritmos de controle aprimorados pode abrir caminho para uma implementação mais eficaz de veículos híbridos, contribuindo assim para a transformação positiva da mobilidade urbana. O compromisso contínuo com pesquisas e inovações tecnológicas é fundamental para impulsionar o desenvolvimento nesse campo, proporcionando soluções cada vez mais viáveis e eficientes no cenário da mobilidade do futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Juniper, The complete guide to drones. Reino Unido: ILEX, 2015

ADVANCED AIR MOBILITY – PANORAMA E PERSPECTIVAS - 2023 ANAC
<https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/aam-panorama-2023.pdf>

AIRSERVICES AUSTRALIA. EMBRAER BUSINESS CENTER INNOVATION. Urban Air Traffic Management: concept of operation. [S. L.]: Prodigy Plus, 2020. 93

ANAC e FAA firmam acordo de cooperação para certificação de Evtol, disponível em:
<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2023/anac-e-faa-firmam-acordo-de-cooperacao-para-certificacao-de-evtol>

ANBUHI, Hebatullah. SHAILI The economic human-carrying Shaili multicopter, disponível em: <https://grabcad.com/library/shaili-1>

CHAGAS, Luciana Gomes. URBANO, Alexandre. SCARMINIO, Jair. Princípios Físicos e Químicos de Baterias de Íon Lítio. Laboratório de Filmes Finos e Materiais. 2012

CORREA, Fernanda Cristina et al. Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela

D. McGriffy, Make: drones: teach an Arduino to fly. São Francisco: Maker Media, 2016.

DA SILVEIRA, Alexandre Miguel Marques. Motor de corrente contínua sem escovas (Brushless-BLDC). Neutro à Terra, n. 31, p. 13-18, 2023.

DIAS, Jullierme Emiliano Alves. Modelagem longitudinal e controle de velocidade de um carro autônomo. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DSOUZA, Darryl. PAL-V Liberty. disponível em: <https://www.thrustzone.com/pal-v-liberty-worlds-first-flying-car-showcased-at-the-geneva-motor-show/>

EASA - EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft: Special condition for small-category vtol aircraft. [S.l.], 2019

EHSANI, Mehrdad; RAHMAN, Khwaja M; TOLIYAT, Hamid A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on industrial electronics, IEEE, v. 44, n. 1, p. 19–27, 1997.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; EMADI, Ali. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.

FAVERI, Flavio. Regulação da mobilidade Elétrica: Quais avanços e desafios. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/regulacao-da-mobilidade-eletrica/>.

GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of vehicle dynamics. [S.l.], 1992.

GRANDL, G. et al. The future of vertical mobility: Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035. Porsche Consulting, 2018.

GOYAL, R. et al. Nasa's urban air mobility (uam) market study. National Aeronautics and Space Administration: Aeronautics Research Mission Directorate, October 2018.

HALFCHROME, D. Drone thrust testing. 2019. Disponível em: <https://www.halfchrome.com/drone-thrust-testing/>.

HANSMAN, D. R. J.; ULLMAN, J.; ECK, J. Flight plan 2030: An air traffic management concept for urban air mobility. EmbraerX, June 2019.

MIGNOLI, M. IATF 16949:2016. Setec Consulting Group, São Paulo, 2016. 8 p. Disponível em: <<http://www.setecnet.com.br/>>.

MARQUES, Fernanda Barbosa; SILVA, Yan Henrique. Dimensionamento preliminar de sistemas de propulsão híbrido-elétrico de veículos eVTOL. 2021.

UM, D. Solid modeling and applications. Rapid prototyping, CAD and CAE theory. 2nd ed. 2018. ed. [S.l.]: Springer, 2018. ISBN 9783319745947; 3319745948; 9783319745930; 331974593X.

T. Luukkonen, «Modelling and Control of Quadcopter», August 22, 2011.

TANAKA, Carlos Naomi. Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

T-MOTOR. U15XXL Combo KV29. 2021. Disponível em: <https://store-en.tmotor.com/goods.php?id=891>.

SCHLENOFF, Dan. Aviation in 1917: The State of the Industry and Science, disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/aviation-in-1917-the-state-of-the-industry-and-science-slide-show/>.

SCHÖMANN, J. Hybrid-electric propulsion systems for small unmanned aircraft. Tese (Doutorado) — Technische Universität München, 2014.

SIHITE, E., KALANTARI, A., Nemovi, R. et al. Multi-Modal Mobility Morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. Nat Commun 14, 3323 (2023). disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39018-y>.