

Considerações iniciais sobre a regulamentação de ruído para aeronaves e VTOL

Paul, S. ; de Lorenzo, M. ; Cordioli, J. A. 

Lab. de Vibrações e Acústica, Dep. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, stephan.paul@ufsc.br

Resumo

A busca por novas soluções de mobilidade urbana deu origem a propostas de aeronaves elétricas de pequeno porte com capacidade de decolagem e pouso na vertical (eVTOL) para o transporte de passageiros e bens. Previstos para operarem em centros urbanos, estas aeronaves e suas operações precisam ser cuidadosamente regulamentadas em aspectos como segurança de voo e o impacto sonoro para garantir sua aceitação na comunidade. A considerável diferença entre aeronaves convencionais e suas operações em aeródromos e aeronaves eVTOL e suas operações no ambiente urbano é analisada apresentando-se algumas das principais características de 50 projetos de aeronaves eVTOL que possam ser de relevância na regulamentação destas aeronaves e suas operações. Para contextualização e comparação apresenta-se um breve resumo considerando aeronaves e aeródromos convencionais. A partir da análise de artigos científicos, *whitepapers* e documentos de natureza regulamentar, explana-se o estado atual da regulamentação de aeronaves eVTOL, dando ênfase nas questões que potencialmente tenham relevância para a regulamentação de ruído que ainda está em fase de desenvolvimento. Conclui-se que atualmente há poucos elementos base para uma regulamentação de ruído deste novo tipo de aeronaves e operações, mas que projetos de aeronaves e propostas de regulamentação parecem estar alinhados com critérios para regulamentação de helicópteros de pequeno porte e aeronaves com rotores basculantes. Contudo, basear-se extensivamente na regulamentação estas duas classes de aeronaves não parece ser a melhor estratégia a ser adotada pelas autoridades aeronáuticas competentes, pelas diferenças que existem no que concerne características das emissões sonoras e procedimentos de operação. Neste sentido os autores dão sugestões que possa nortear esforços de pesquisa para apoiar o processo de regulamentação.

Palavras-chave: ruído de aeronaves, operações, aeródromos, vertiportos, eVTOL, UA, MAT.

PACS: 43.50, 43.50 Sr, 43.50 Lj.

Initial considerations on acoustic regulation for eVTOL aircraft

Abstract

The search for new urban mobility solutions induced a considerable number of proposals for small electrified aircraft with vertical take-off and landing capacity (eVTOL). For urban environments such aircraft and their operations need to be regulated carefully, including aspects such as safety and noise impact. The differences with respect to conventional aircraft and their operations using conventional airports and heliports are pointed out analyzing 50 eVTOL projects concerning aspects that might be relevant for regulation. For contextualization and comparison a short overview of the current state of conventional aircraft and airport noise regulation is presented. Based on the scientific literature, whitepapers, and legal documents the current state of regulation for eVTOL aircraft is introduced. While the regulation is still a matter of debate and only initial proposals are being developed, current eVTOL projects, especially for manned air transport are in line with light helicopter and tilt-rotor aircraft regulation. Nevertheless, blindly adopting the regulation framework of these aircrafts might not be appropriate as noise characteristics and operations differ considerably. In this sense the authors give research suggestions to help in the regulatory process.

Keywords: aircraft noise, operations, airports, vertiports, eVTOL, UA, MAT.

1. INTRODUÇÃO

Repensar e reformular as capacidades atuais de mobilidade urbana é essencial para responder os desafios futuros do transporte de passageiros e cargas. Inovações nos processos de armazenamento, distribuição e conversão de energia possibilitam o estabelecimento de novas opções de transporte sustentáveis [1]. Nesse contexto, uma possível proposta inovadora para solucionar os problemas de capacidade rodoviária é o uso de aeronaves eVTOL (*electric Vertical Take-off and Landing*) em centros urbanos. Esse conceito permeia diversas aplicações, dentre elas o tráfego de passageiros ou cargas em centros urbanos que será o enfoque deste manuscrito. Neste manuscrito serão chamados, respectivamente, de MAT (*Manned Air Taxi*) as aeronaves eVTOL voltadas ao transporte de pessoas e UA (*Unmanned Aircraft*) as aeronaves eVTOL voltadas ao transporte de bens.¹

Atualmente, um grande número de projetos de veículos eVTOL encontra-se em desenvolvimento e alguns protótipos de eVTOL já estão em fases finais de desenvolvimento (ou teste) ou em uso experimental. Apesar do grande potencial deste novo tipo de transporte por meio de aeronaves eVTOL, não há ainda pesquisa consolidada sobre os possíveis impactos sonoros por estas aeronaves, e existe uma lacuna em sua regulamentação de ruído. Devido à complexidade do assunto, que envolve diversas arquiteturas de propulsão, configurações aerodinâmicas e operações muito distintas das aeronaves convencionais, a regulamentação para aeronaves eVTOL ainda está em fase de elaboração. Esta regulamentação depende não apenas do entendimento das características e/ou dos mecanismos de emissão da fonte sonora, mas, também, dos perfis operacionais esperados para o sistema de transporte urbano baseado em aeronaves eVTOL e das suas possíveis percepções da população exposta a este tipo de ruído (i.e., incômodo sonoro, perturbação do sono, entre outros).

¹Não há unanimidade na literatura quando a nomenclatura a ser utilizada para descrever e classificar os eVTOL e aspectos da sua arquitetura, sendo que a nomenclatura também muda acompanhando o rápido avanço tecnológico da área.

Para fomentar a discussão sobre o assunto entre os envolvidos, este trabalho busca organizar informações sobre a regulamentação de aeronaves e aeródromos convencionais e informações atualizadas sobre os diferentes aspectos de regulamentação acústica de eVTOL, ainda que esta esteja em fase inicial de desenvolvimento. Para tanto apresenta-se inicialmente na Seção 2 uma visão geral sobre projetos atuais de aeronaves eVTOL e suas características principais. Nas Seções 3 e 4 será apresentada uma revisão breve sobre certificação de aeronaves e aeródromos convencionais, para posteriormente tratar na Seção 5 do estado atual no que concerne a regulamentação de aeronaves eVTOL, tanto de UAs como de MATs.

2. O CENÁRIO ATUAL DAS AERONAVES eVTOL

Além de grandes empresas mundialmente conhecidas tais como Amazon, Uber, Boeing, Bell e Embraer, há um número muito grande de empresas menores desenvolvendo aeronaves eVTOL para transporte de bens e passageiros. Os autores do presente artigo analisaram 50 projetos distintos para aeronaves eVTOL que estão mais avançados e disponibilizam algumas informações técnicas de relevância. Estas e muitas outras iniciativas podem ser acompanhadas pela *Vertical Flight Society* [2] na plataforma eVTOL News [3]. Destes 50 projetos 17 são aeronaves UA e os restantes 33 são aeronaves MAT.

De forma geral, as aeronaves convencionais apresentam duas arquiteturas principais dos sistemas propulsivos: (i) configuração de asa fixa com um a quatro motores turbofan, e (ii) a configuração de asa rotativa com dois rotores (helicópteros). Em comparação, as novas propostas de aeronaves UA e MAT podem apresentar configurações de propulsão muito distintas. Dos 50 projetos de aeronaves eVTOL analisados pelos autores, dez projetos usam a configuração *lift-and-cruise*, 16 a configuração *vectored thrust* e 22 a configuração *wingless*, conceitos apresentados em um critério usado pela *American Helicopter Society* [4], apresentadas no Quadro 1. Há nos projetos para MAT mais variedade em termos das configurações de propulsão se com-

parado aos UA, que usam quase em sua totalidade a configuração *wingless*, e aparentemente se assemelham intuitivamente aos helicópteros do que as aeronaves com configuração *vectored thrust* ou *lift-and-cruise*, devido à ausência de asas fixas.

Quadro 1: Configuração dos sistemas propulsivos para aeronaves eVTOL e exemplos.

Configuração de propulsão	Definição	Exemplo
<i>Lift and Cruise</i>	Um sistema de propulsão exclusivo para sustentação e outro para empuxo horizontal em voo	Embraer DreamMaker (Figura 1 (a))
<i>Vectored Thrust</i>	Utiliza o mesmo sistema de propulsão para sustentação e para empuxo horizontal em voo (<i>tilt-wing</i> e <i>tilt-rotor</i>)	Bell Nexus (Figura 1 (b))
<i>Wingless</i>	Múltiplos rotores apenas para sustentação (movimento horizontal pela diferença de sustentação entre rotores)	Volocopter 2X (Figura 1 (c))

Em um estudo, foram avaliadas as três configurações de propulsão para aeronaves eVTOL de acordo com critérios como carregamento, tempo total de sobrevoo, velocidade de cruzeiro e alcance. Nele, concluíram que a melhor configuração depende da missão [8]. A configuração *wingless* se mostra a mais eficiente em operações que necessitem de um maior controle aéreo. Já a configuração *vectored Thrust* é indicada para operações que exijam maior alcance, enquanto a configuração *Lift and Cruise* resulta em menor alcance e velocidade que o anterior, mas apresenta bom controle de voo.

Um parâmetro de grande relevância, em termos de regulamentação de aeronaves, é a massa máxima de decolagem (*maximum take-off weight* MTOW, e alternativamente, *maximum take-off mass* MTOM), tanto para aeronaves convencionais como para aeronaves eVTOL conforme apresentado de forma resumida no Quadro 3 e, posteriormente, na Seção 5. Pela análise de 35 projetos de eVTOL que disponibilizam dados de MTOW verifica-se que a maior parte dos projetos de aeronaves eVTOL tem pesos máximos



(a) Embraer DreamMaker (configuração *lift and cruise*)



(b) Bell Nexus (configuração *vectored thrust* com *tilt-rotor*)

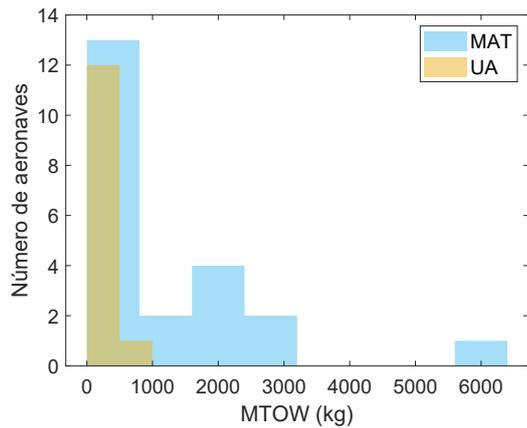


(c) Volocopter 2X (configuração *wingless*)

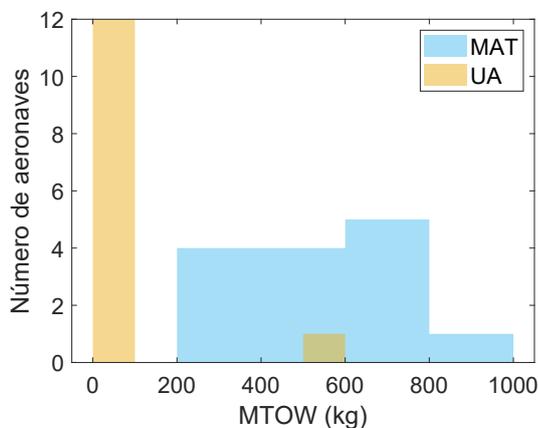
Figura 1: Exemplos de configurações de sistemas propulsivos de aeronaves eVTOL. Fontes: [5–7].

de decolagem inferior a 3175 kg (Figura 2). Há atualmente apenas um projeto que propõe um MAT com MTOW superior a 3175 kg. Também é importante verificar que aeronaves para transporte de passageiros (MAT) tem pesos de decolagem máxima muito maiores que aqueles pensadas para entrega de bens em ambientes urbanos, sendo que destes últimos nenhum projeto prevê MTOW superior a 555 kg como se verifica na Figura 2b. É inclusive relevante verificar que com exceção de um projeto, todos os UA tem MTOW inferior a 100 kg.

Em função do maior MTOW e considerações de segurança, as aeronaves eVTOL para MAT



(a) Faixa de 0 kg a 6000 kg



(b) Faixa de 0 kg a 1000 kg

Figura 2: Distribuição do peso máximo de decolagem (MTOW) de 50 aeronaves eVTOL - UA e MAT.

usam sistemas de propulsão mais potentes, envolvendo muitas vezes um número maior de rotores (Figuras 4 e 3), e portanto potencialmente um possível maior número de fontes sonoras.

No entanto, especialmente os projetos com números muito elevados de rotores, por exemplo o Lilium Jet com 36 rotores, estes se assemelham mais a *fans* e integram a arquitetura propulsiva mais extrema do conceito propulsão elétrica distribuída. De forma geral, nas aeronaves eVTOL os propulsores equipados com hélice serão sem dúvida a maior fonte sonora. Apesar de usarem, na maioria dos casos, duas pás em cada rotor² (Figura 5), similar a muitos helicópteros, as ve-

²É importante ressaltar que para aeronaves *lift and cruise*, alguns projetos são contabilizados duas vezes na Figura 5, por usarem dois rotores com relação pás/rotor diferente para o *lift* e *cruise*.

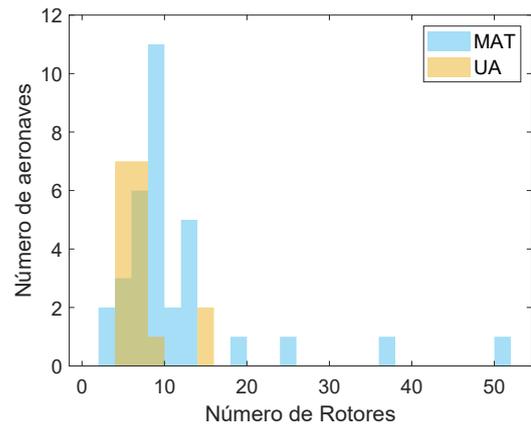


Figura 3: Distribuição do número de rotores em 50 aeronaves eVTOL.

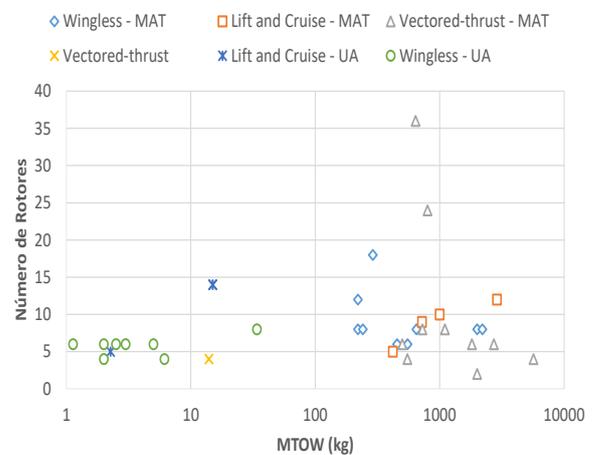


Figura 4: Número de rotores em função do peso máximo de decolagem (MTOW) de 50 aeronaves eVTOL - UA e MAT.

locidades de rotação e dimensões dos rotores são bastante distintas daquelas tipicamente presentes em helicópteros.

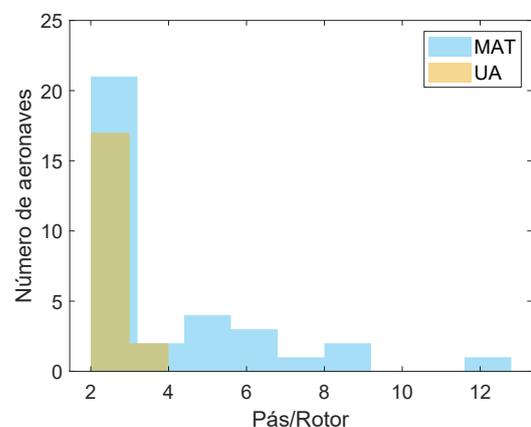


Figura 5: Distribuição do número de pás por rotor em 50 aeronaves eVTOL - UA e MAT.

Isso resulta em uma faixa de números de Mach da ponta de pá de 0,15 a 0,3 esperada para UA, 0,35 a 0,55 para MAT enquanto que em helicópteros os números de Mach variam entre 0,7 e 0,8 [9–12]. O número de Reynolds típico para para o escoamento sobre a hélice de um UA é da ordem de $Re_c(0,75R) \sim 10^4 - 10^5$, caracterizando um regime transicional-turbulento, enquanto que para helicópteros é da ordem de $Re_c(0,75R) \sim 10^6$, descrevendo um regime turbulento. Estas diferenças dificultam o uso de ferramentas semi-empíricas de predição de ruído de rotores convencionais [13, 14] e fazem com que os trabalhos sobre ruído de aeronaves eVTOL sejam atualmente bastante experimentais.

Ainda, no que concerne as velocidades de voo na fase de cruzeiro das aeronaves eVTOL verifica-se que nenhum projeto de UA tem velocidade de cruzeiro que exceda 75 nós (140 km/h). Já a maioria das aeronaves MAT tem velocidades de cruzeiro inferiores a 170 nós (315 km/h), e apenas um projeto tem velocidade superior a 250 nós (460 km/h).

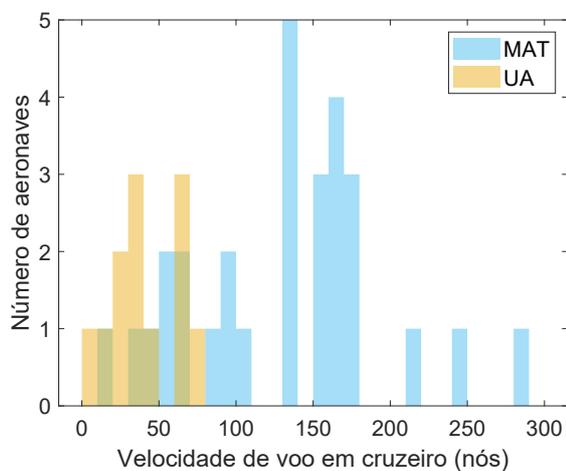


Figura 6: Distribuição das velocidades de voo em cruzeiro de 50 aeronaves eVTOL.

3. REGULAMENTAÇÃO DE RUÍDO DE AERONAVES CONVENCIONAIS

Aeronaves civis devem atender os requerimentos de certificação emitidos pelas autoridades aeronáuticas de cada região para a obtenção de um certificado de aeronavegabilidade. No que concerne as aeronaves civis, diversos paí-

ses, federações e organizações regionais participam do *Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)*, para oferecer assistência ao conselho da Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) na elaboração de *Standards and Recommended Practices (SARPS)* [15]. Os atuais participantes incluem membros, como o Brasil, e observadores como Portugal. Os primeiros procedimentos de medição e avaliação sonora para projetos de diferentes tipos de aeronaves, bem como seus limites máximos aceitáveis, foram propostos em 1969 no documento *Environmental Protection - Aircraft Noise*, conhecido como Anexo 16, servindo de base para o processo de certificação [16]. Desde então, este documento passou por 15 modificações, sendo a última publicada em 2019. O Quadro 2 destaca as recomendações considerando os aspectos de ruído [17].

Quadro 2: Atualizações do Anexo 16 e suas respectivas recomendações publicadas pela ICAO que consideram o aspecto ruído.

Encontro	Ano	Principais recomendações
CAN2	1972	Padrões de ruído para aviões leves
CAN6	1980	Padrões de ruído para helicópteros e aeronaves supersônicas submetidas antes de 1 de janeiro de 1975
CAEP1	1986	Padrões de ruído para aviões leves propulsores por hélices
CAEP2	1991	Padrões de ruído para helicópteros leves
CAEP5	2001	Aumento da severidade dos padrões de ruído para turbojato e aviões pesados propulsores por hélices (Capítulo 4)
CAEP9	2013	Aumento da severidade dos padrões de ruído para turbojato e aviões pesados propulsores por hélices pesados (Capítulo 14; e padrões de ruído para aeronaves com rotores basculantes (Capítulo 13)

O Volume I do Anexo 16 trata da emissão sonora de aeronaves acompanhando sua evolução tecnológica. Para isto, ele é dividido em Capítulos (*Chapters*), de acordo com as principais características de projeto das aeronaves, suas

respectivas datas de requisição do certificado de tipo (*type certificate*) e tecnologia [18], conforme Quadro 3. Assim, a certificação de aeronaves de cada grupo passa por um procedimento que varia no número e posição dos pontos de medição, as operações realizadas durante a medição, a métrica acústica aplicada e seus limites, em função das características da aeronave, normalmente da massa [18].

Um exemplo para aviões subsônicos a jato com requisição ao Certificado de Tipo submetida anteriormente a 06/10/1977 é apresentada na Figura 7. Como a aeronave se enquadra no Capítulo 2, são realizadas três operações de voo com seus respectivos pontos de medição de ruído: aproximação (*approach*), com um ponto de medição localizado a uma distância de 2000 metros da soleira da pista até o pouso; voo lateral (*lateral*), em que dois pontos de medição laterais são localizados a 650 metros da linha central da pista em cada lado da pista (onde o nível de ruído de decolagem é máximo). O nível de ruído certificado do voo lateral é a média dos níveis de ruído observados nestes dois pontos de medição lateral; e por fim sobrevoo (*fly-over*), no qual há um ponto localizado na linha central da pista, a uma distância de 6500 metros da liberação do freio [19].

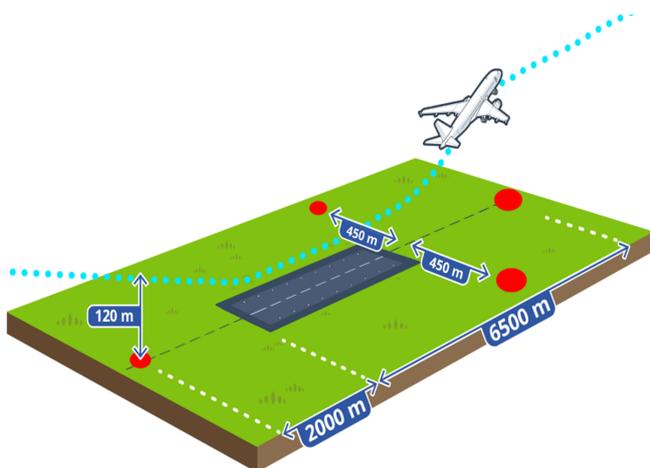


Figura 7: Pontos de medição do ruído de aeronaves descritas e regulamentadas pelo Capítulo 2 do Volume I do Anexo 16 da ICAO, baseado em [19].

Para helicópteros os procedimentos de medição e limites de ruído são descritos no Capítulo 8 do Volume I do Anexo 16 da ICAO. Nas três

operações de voo são necessários nove pontos de medição, como apresentado na Figura 8. Na decolagem (*take-off*), um ponto de medição é localizado diretamente abaixo da trajetória de voo, na distância de 500 m do início do procedimento e, os outros dois pontos simétricos a este, a 150 m lateralmente. Na aproximação (*approach*), um ponto de medição está diretamente abaixo da trajetória a uma distância de 1.140 m do fim do procedimento e, outros dois pontos estão localizados de forma simétrica à trajetória a 150 m desta. Por fim, na operação de sobrevoo (*overflight*) também há três pontos de medição, localizados num plano 150m abaixo da trajetória horizontal de voo. Enquanto que um está diretamente abaixo da trajetória, os outros dois encontram-se em posições laterais simétricas a distância de 150 m [20].

As emissões de ruído de aeronaves com rotores basculantes devem ser analisadas conforme descrito no Capítulo 13 do Anexo 1, durante um procedimento de *take-off*, um procedimento de *overflight* e um procedimento de *approach*. Nestes procedimentos os pontos de medição são os mesmos utilizados para helicópteros, conforme Capítulo 8 do Volume I do Anexo 16 da ICAO e explicados na Figura 8.

Com base nas medições realizadas nos pontos de medição, aplica-se a métrica acústica estabelecida do capítulo correspondente, para certificação de aeronaves descritos em cada capítulo do Anexo 16, conforme apresentado na Quadro 3. Os valores máximos aceitáveis para os limites de emissão sonora, em termos da métrica a ser considerada, variam de acordo com três fatores: Capítulo a que a aeronave pertence; número de propulsores; e sistema de propulsão (jato, *turbo-fan*, hélice). Uma vez que estes parâmetros sejam definidos, os valores aceitáveis máximos podem ser calculados em função do peso/massa máximo de decolagem (MTOW ou MTOM).

A análise das disposições do Volume 1 do Anexo 16 da ICAO revela que são utilizadas no momento três métricas para fins de certificação: o *Equivalent Perceived Noise Level* (EPNL), o nível de pressão sonora máximo ponderado em

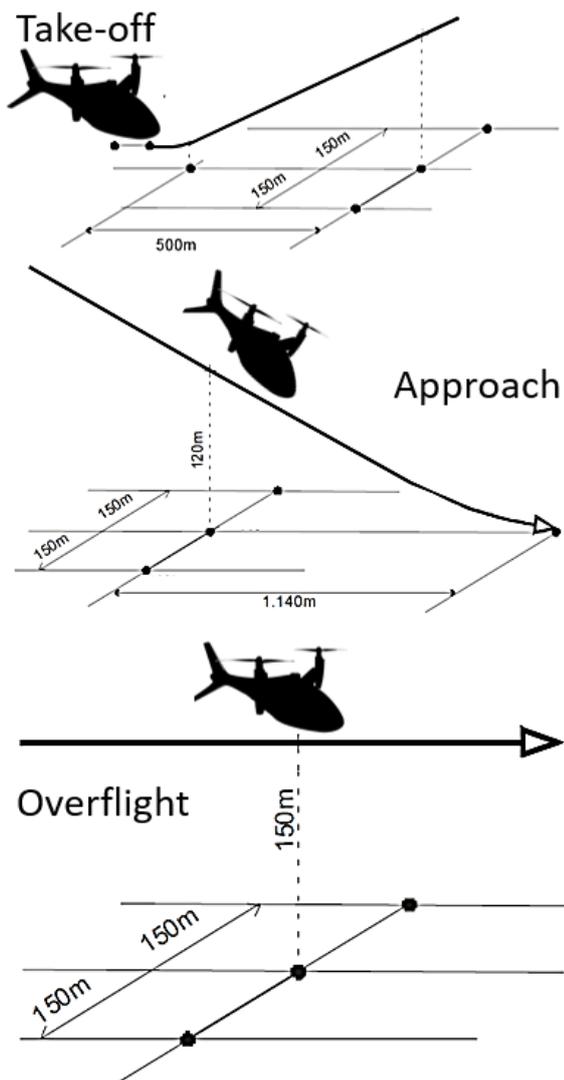


Figura 8: Trajetórias de voo e pontos de medição do ruído de aeronaves descritas e regulamentadas nos Capítulos 8 e 13 do Volume I do Anexo 16 da ICAO, baseado em [18, 20].

A ($L_{A, \max}$) e o *Sound Exposure Level* (SEL), dependendo do enquadramento da aeronave, conforme se verifica na Quadro 3.

Aeronaves com rotores basculantes do tipo *tilt-rotor* são tratados no Capítulo 13, de forma detalhada a partir da oitava edição do Anexo 16. Porém, não há descrição de procedimentos e/ou métricas para aeronaves propulsadas por hélice do tipo *short take-off and landing* (STOL) descritos no Capítulo 7 e unidades auxiliares de potência descritas no Capítulo 9.

O Brasil, baseia sua regulamentação nos Anexos da ICAO, antes publicadas pelo Departamento de Aviação Civil do Ministério da Aero-

náutica (DECEA), por meio do RBHA (Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica) [21]. A partir de 2005, com a criação da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o RBHA encontra-se em processo de gradativa substituição pelo RBAC (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) [22, 23]. A ANAC participa do fórum de discussão dos assuntos de ruído do CAEP. O Grupo de Trabalho 1 – Ruído – discute quais tecnologias podem reduzir o ruído de aeronave como fonte emissora e serão incorporadas ao Volume 1 do Anexo 16 e posteriormente incorporado nos regulamentos de ruído de aeronave, como o RBAC 36. O regulamento brasileiro adota integralmente o texto do documento da FAA 14 CFR Part 36, sendo que em divergência editorial contida no Apêndice A-I decorrente da republicação deverá prevalecer, mediante anuência da ANAC, o texto oficial da FAA [24, 25]. Isso é importante, visto que a RBAC 36 incorpora as Emendas de 36-01 a 36-28 do 14 CFR part 36 [26]. No entanto, o regulamento norte americano está em sua Emenda 36-31, de modo que importantes informações sobre aeronaves com rotores basculantes, novos limites de ruído para helicópteros e aeronaves do Capítulo 14 ainda precisam ser incorporadas no RBAC [24, 27].

Os regulamentos para certificação de ruído da aeronave foram publicados pela ANAC no RBAC 36 e MPH-280, que descreve os procedimentos internos adotados pela Gerência-Geral de Certificação de Produto Aeronáutico (GGCP). Em caso de extensão do processo de certificação de um projeto de tipo será a emenda efetiva na nova data selecionada pelo requerente, a qual não deve preceder um período de 5 anos da data de aprovação da modificação, conforme definido no RBAC 36.2(b) [28].

4. REGULAMENTAÇÃO DE RUÍDO PRODUZIDO POR OPERAÇÕES EM AERÓDROMOS CIVIS

A regulamentação de aeródromos é um pouco mais complexa do que aquela de aeronaves convencionais, pois além do ruído causado por tráfego aéreo, aquele gerado por operações de ma-

Quadro 3: Estruturação da Parte 2 - Certificação de Ruído de Aeronaves do Volume 1 do Anexo 16 da ICAO por tipologia de aeronave, pontos de medição acústica e métrica para certificação da aeronave.

Capítulo	Aplicabilidade	Classe de operação	Métrica acústica	Operações para medição
1	Administração			
2	Aviões subsônicos a jato com requisição ao Certificado de Tipo submetida anteriormente a 06/10/1977, normalmente usando a segunda geração de motores turbofan com baixa taxa de BRP (<i>by-pass ratio</i>)	CTOL	EPNL	A, L, F
3	Aviões subsônicos a jato com requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 06/10/1977 e antes de 01/01/2006; Aeronaves propulsadas por hélice com MTOW > 8618 kg e requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 01/01/1985 e antes de 01/01/2006	CTOL	EPNL	A, L, F
4	Aviões subsônicos a jato com requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 01/01/2006; Aeronaves propulsadas por hélice com MTOW > 8618 kg e requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 01/01/2006 [e até 31/12/2020]	CTOL	EPNL	A, L, F
5	Aeronaves propulsadas por hélice, com MTOW > 8618 kg e com requisição ao Certificado de Tipo submetida antes de 01/01/1985	CTOL	EPNL	A, L, F
6	Aviões propulsados por hélice, com MTOW < 8618 kg e com requisição ao Certificado de Tipo submetida antes de 17/11/1988	CTOL	$L_{A,max}$	O
7	Aviões propulsados por hélice do tipo STOL	STOL		
8	Helicópteros	VTOL	EPNL (PNLT modificado)	A, O, T
9	Unidades Auxiliares de Potência instaladas e sistemas de aeronave de operação em solo			
10	Aviões propulsados por hélice, com MTOW < 8618 kg e com requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 17/11/1988	CTOL	$L_{A,max}$	T
11	Helicópteros que não ultrapassem um MTOW de 3175 kg	VTOL	SEL	L
12	Aviões supersônicos com requisição ao Certificado de Tipo submetida antes de 1/1/1975	CTOL	EPNL	A, L, F
13	Aeronaves com rotores basculantes com requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 01/01/2018	VTOL	EPNL	A, O, T
14	Aviões subsônicos propelidos por jato e aviões propelidos por hélices com peso máximo de decolagem certificado acima de 55000 kg com requisição ao Certificado de Tipo submetida após 31/12/2020; aviões subsônicos propelidos por jato com peso máximo de decolagem certificado abaixo de 55000 kg, com requisição ao Certificado de Tipo submetida após 31/12/2020; aviões propelidos por hélices com peso máximo de decolagem certificado acima de 8168 kg e abaixo de 55000 kg, com requisição ao Certificado de Tipo submetida após 31/12/2020	CTOL, STOL, VTOL	EPNL, opcional: $L_{A,max}$ e SEL	A, L, F

CTOL: *conventional take-off + landing*, STOL: *short take-off + landing*, VTOL: *vertical take-off + landing*
A: *Approach/Landing* (Aproximação/Pouso), L: *Lateral/Sideline* (Lateral), F: *Flyover* (Decolagem/Sobrevôo), T: *Take-off* (Decolagem), O: *Overflight* (Sobrevoo). Importante notar que a definição do procedimento de decolagem e sobrevoo muda em função do tipo da aeronave.

nutrição e maquinário precisa ser levado em consideração. Por ser um local com fontes sonoras móveis mas recorrentes e fontes sonoras estacionárias/fixas localizadas, as exposições aos ruído decorrentes de diversos de eventos sonoros individuais podem ser cumulativos, e neste caso estudos de longo prazo são considerados para a avaliação do impacto sonoro.

Para o planejamento de um ambiente sonoro controlado, deve-se estreitar a comunicação entre os gestores e operadores dos aeroportos, os residentes vizinhos e autoridades aeronáuticas, além de promover a integração entre países no trato de questões referentes ao controle de ruído aeronáutico. Para auxiliar neste processo, a ICAO preconiza uma política internacionalmente aceita para a gestão de ruído aeronáutico chamada de abordagem equilibrada (*Balanced Approach*), propondo-se a maximizar o benefício ambiental, minimizando, ao mesmo tempo, o custo por meio de quatro áreas de atuação [29, 30]:

1. Redução da geração de ruído na fonte:

Desenvolvimento de tecnologias mais silenciosas para aeronaves e atualização de suas regulamentações de ruído para projeto de tipo de aeronaves [18].

2. Procedimentos operacionais de voo para mitigação/abatimento de ruído:

Modificações dos padrões de pouso e decolagem de acordo com o modelo da aeronave. Devem ser implementadas em conjunto com os pilotos e especialistas do controle de tráfego aéreo [31].

3. Restrições operacionais:

Restrição da operação de voo ou restrição de funcionamento do aeroporto [29]. Podem ser restrições por tipo de aeronave, por exemplo daquelas que se enquadram no Capítulo 2 do Volume I do Anexo 16 e foram restritas em vários aeroportos, como Europa e Japão [20], ou podem ser geográficas, em que se cria trajetos de operação em locais sensíveis [32]. Ainda podem ser temporais, com

transferência de operações de períodos noturnos para diurnos [20].

4. Planejamento e gestão do uso do solo: Envolve mecanismos cooperativos, tais como: programas de educação para a comunidade sobre o impacto sonoro de operações aéreas; planejamento e gestão do uso do solo nas imediações dos aeroportos com auxílio das autoridades locais e regionais; ações de tratamento acústico; incentivos fiscais e taxas aeroportuárias [29].

Além destas, uma outra área de atuação de grande importância é o engajamento da comunidade. O CAEP, em seu relatório *Environmental Community Engagement for Performance-Based Navigation* [33], fornece boas práticas que devem ser consideradas ao empreender a modernização do espaço aéreo, complementando a abordagem equilibrada.

Um exemplo dessa área para UA, é um conceito de implementação descrito no documento *UAM Concept Operations* publicado em 2020 pela FAA em colaboração com a NASA [34]. Por meio dos resultados de análise, simulação, demonstração e engajamento da comunidade propõe-se uma abordagem evolutiva, começando com operações de curta duração e baixa complexidade operacional. Por meio de compartilhamento de informações, protocolos operacionais e desempenho dos equipamentos, este conceito amadurece para operações cada vez mais complexas em regiões altamente povoadas. No caso de MAT, há o exemplo da iniciativa Elevate da Uber, que está desenvolvendo um plano de engajamento comunitário, com destaque para as questões do ruído, a fim de preparar o início dos serviços da Uber Air em 2023. Uma de suas estratégias será usar os dados de ruído de fundo coletados em cidades de lançamento dentro de ferramentas de simulação, para planejar rotas e locais de vertiportos. Em conjunto, serão intensificados os esforços de "socialização", conduzindo a divulgação na comunidade explicando como e por que as aeronaves eVTOL serão mais silenciosas que os helicópteros [35].

No que diz respeito aos aspectos da abordagem equilibrada, sendo o Brasil signatário da ICAO, compete à ANAC estabelecer regulamentos que associam a cada proposição [25]. Para o controle da emissão sonora de aeronaves relaciona-se o RBAC 36 - Requisito de Ruído para Aeronave [24]. Para os aspectos operacionais associados ao ruído aeronáutico apresenta-se o RBAC 91 - Requisitos gerais de operação para aeronaves civis [36], determinando regras para operação de aeronaves civis relacionadas ao nível de ruído produzido e para limitações de operação para aviões subsônicos. Para garantir a compatibilidade do uso do solo nos arredores de aeródromos estabeleceu o regulamento RBAC 161 - Plano de Zoneamento de Ruído de Aeródromos [37]. Neste trabalho o enfoque está direcionado a primeira e quarta área da abordagem equilibrada.

O Plano de Zoneamento de Ruído (PZR) permite identificar as áreas de influência de um aeródromo, fornecendo informações relevantes para garantir a compatibilização do uso do solo com a quantidade de exposição sonora prevista para um perfil operacional no seu horizonte máximo de operação. Como tal, é um dos aspectos de maior importância na avaliação do impacto sonoro em aeródromos, pois permite avaliar quais dos quatro elementos da abordagem equilibrada podem ser implementados e/ou otimizados. Dessa forma, tipicamente o PZR é composto por um conjunto de curvas de ruído e uma proposta (tabela) de compatibilização do uso do solo com a exposição sonora esperada. Tal prática está em acordo com a proposta da ICAO de se usar indicadores de exposição sonora e apresentar estes por meio de mapas. A apresentação gráfica em um mapa, simples ou mais detalhado, também é conhecida como mapa de curvas (isofônicas)³ de ruído, ou, me-

³Os autores não concordam com o uso do termo “isofônico” no contexto do ruído aeronáutico como é praxe no Brasil, pois curvas isofônicas são curvas de igual sensação de volume sonoro e não curvas de igual ruidosidade. A relação linear entre ruidosidade e sensação de volume sonoro verificada para ruído de aeronaves no início dos anos 1970 [38] não deve ser considerada válida *a priori* para o ruído de aeronaves, operações e contextos distintos daqueles verificados na época. Os autores julgam

lhor curvas de contorno de ruído. Cada país utiliza à sua maneira as recomendações propostas pela ICAO para elaboração das curvas [39], o que gera problemas de comparabilidade entre curvas elaboradas com procedimentos distintos (Quadro 4).

No Brasil, as orientações para a elaboração, apresentação, aprovação e divulgação dos PZR são dadas pelo RBAC, número 161, publicada em 2013. Este regulamento orienta a elaboração de um documento oficial de representação geográfica da área de impacto do ruído causado pelas operações em aeródromos civis na vizinhança. Baseado neste documento a autoridade competente, por exemplo o município, deve assegurar a compatibilidade do uso do solo no desenvolvimento das comunidades no entorno dos aeródromos [37]. A identificação de áreas compatíveis e incompatíveis ao uso do solo seguem o mesmo modelo do documento 9184 da ICAO, ou seja, as áreas são delimitadas por curvas de ruído computadas por um programa. Também deve ser definido se o aeródromo requer um PBZR ou um PEZR.

Plano Básico de Zoneamento de Ruído - PBZR: o uso deste instrumento ocorre quando a média anual de movimento de aeronaves nos últimos 3 anos é inferior a 7000 e se não for exigido um PEZR por motivos específicos a critério da ANAC. Não exige elaboração de estudos detalhados e as curvas de ruído apresentam geometrias simples, parametrizadas, como apresentado para aeroportos e heliportos na Figura 9.

Para elaboração de PBZR de aeródromos a curva de ruído de 75 é mais próxima do aeródromo e prevê DNL superiores a 75 dB(A). Nesta área, a maior parte das atividades urbanas é proibida. Na área delimitada pelas curvas de ruído de 65 e 75 dB(A) DNL, o DNL varia entre 75 dB(A) a 65 dB(A). Embora várias

que o melhor termo seria ‘curvas de contorno de ruído’, que na sua representação gráfica, como por exemplo na Figura 9, sempre deveriam vir acompanhadas da métrica para evitar que curvas elaboradas com base em métricas distintas, por exemplo DNL no Brasil e L_{den} na Europa (Quadro 4), sejam comparadas como se fossem iguais.

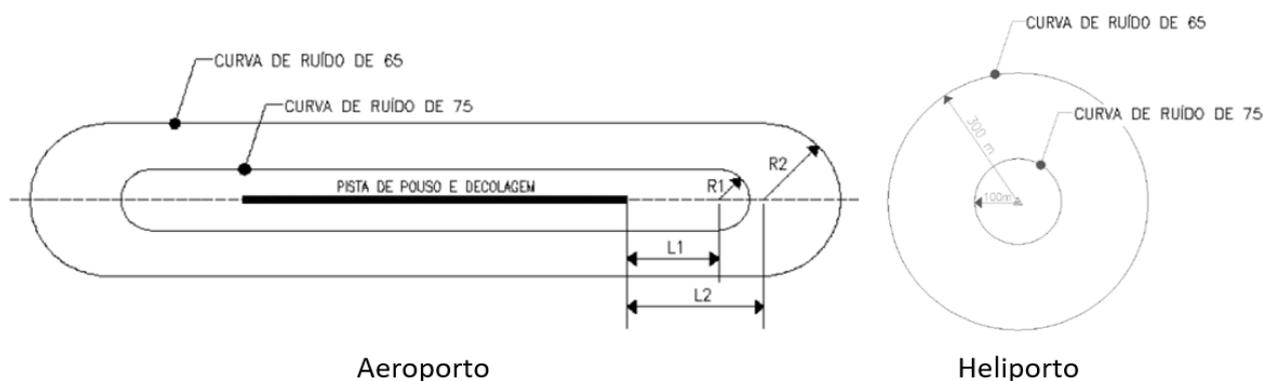


Figura 9: Plano Básico de Zoneamento de Ruído. Fonte [37].

atividades urbanas são permitidas, o uso residencial quanto o educacional são incompatíveis aos níveis sonoros previstos pelo PZR (embora possam se tornar compatíveis em situações especiais, mediante a elaboração de tratamento acústico). Finalmente, na área externa à curva de ruído 65 dB(A) DNL, a legislação aeronáutica brasileira atual não prevê todas as possíveis incompatibilidades para o uso e ocupação do solo. Como demonstrado na Figura 9, os parâmetros L_1 , L_2 , R_1 e R_2 utilizados para delimitar as curvas de ruído, dependem do movimento médio anual de aeronaves nos últimos três anos, se este for menor que 7000, demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros geométricos utilizados para as curvas de ruído para um PBZR. Fonte [37].

Movimento Anual	L_1 (m)	R_1 (m)	L_2 (m)	R_2 (m)
até 400	70	30	90	60
de 400 a 2000	240	60	440	160
de 2000 a 4000	400	100	600	300
de 4000 a 7000	550	160	700	500

Para a elaboração de PZR de heliportos, a regulamentação descreve procedimentos semelhantes, ou seja, curvas de DNL de 75 dB(A) e 65 dB(A), aplicável com um movimento médio de até 7000 aeronaves em 3 anos. As dimensões destas curvas de ruído são fixas e não variam com o movimento de helicópteros. Além disso, heliportos privados construídos em locais já estabelecidos só podem funcionar se - e enquanto - as condições do local e do entorno corresponde-

rem às exigidas na regulamentação aeronáutica. Assim, caso sejam implantadas edificações ou outras estruturas que interfiram nos gabaritos dos Planos de Zona de Proteção ou alterem substancialmente o perfil operacional utilizado na construção do Plano de Zoneamento de Ruído o heliporto privado poderá ser objeto de restrições pela ANAC, podendo, inclusive, ter o seu registro cancelado [20, 40].

Plano Específico de Zoneamento de Ruído - PEZR: o uso deste instrumento ocorre quando a média anual de movimento de aeronaves nos últimos 3 anos for superior a 7000, ou por exigência da ANAC. Para os demais aeródromos, é facultado ao operador de aeródromo escolher o tipo de plano a ser elaborado (PBZR ou PEZR), ainda assim, a ANAC poderá solicitar a elaboração de um PEZR a qualquer aeródromo. A elaboração das cinco curvas de ruído exige o uso de um programa computacional com dados de entrada, como: número de aeronaves, dimensões e coordenadas geográficas de pistas existentes; elevação do aeródromo; temperatura de referência do aeródromo; previsões de movimento por tipo de aeronave em cada rota; trajetórias de pouso, decolagem, etc. As curvas de ruído em DNL são separadas nos seguintes curvas de ruído : 85, 80, 75, 70 e 65, tanto para aeroportos quanto para heliportos.

As orientações para garantir compatibilidade do uso das áreas delimitadas pelas curvas de ruído podem considerar diferentes aspectos econômicos e sociais na comunidade do entorno, com

regiões que permitem algumas atividades, cerceiam outras ou permitem sob um acordo de tratamento acústico nas construções. As orientações para garantir a compatibilização do uso do solo sob os aspectos de ruído são apresentadas para ambos os tipos de planos de zoneamento de ruído na Subparte E do RBAC 161 [37].

Como afirmado anteriormente, cada país incorpora na sua legislação nacional as recomendações da ICAO à sua maneira, ou seja, internacionalmente, nem todos os países utilizam o DNL como métrica para a elaboração das curvas de ruído. Contextos históricos bem como disponibilidade tecnológica determinam qual métrica será utilizada. Apresenta-se, no Quadro 4, as métricas utilizadas nas regulamentações para aeródromos do Brasil, Estados Unidos, União Europeia e outros países [41–43].

Quadro 4: Métricas utilizadas nas curvas de ruído de aeródromos convencionais, baseado em [41–43].

País	Autoridade aeronáutica	Regulamentação	Métrica
Brasil	ANAC	RBAC No 150	DNL
Estados Unidos	FAA	14 CFR Part 150, Part 161	NEF e DNL
União Europeia	EASA	2002/49/EC	L_{den}
Japão	JCAB	EQSAN	WECPNL _J
Singapura	CAAS	Aerodrome Standards	NEF
China	CAAC	GB 9660-88	WECPNL

No Brasil, atualmente a Comissão Especial de Estudos CEE-196 Acústica da ABNT está finalizando o segundo projeto de norma 2P ABNT NBR 16.425-2 Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes - Parte 2: Sistema de Transporte Aéreo, podendo esta eventualmente dar novos direcionamentos na questão da avaliação e regulamentação do ruído proveniente da operação de aeronaves em aeródromos de diferentes naturezas.

5. REGULAMENTAÇÃO PARA AERONAVES ELÉTRICAS

As estratégias para avaliar o impacto sonoro de aeronaves costumam ter como base padrões e práticas recomendadas (SARPs) e seus documentos orientativos (Doc. 9829, 9911, 10031, etc) publicados pela ICAO [30, 39, 44]. Em face aos recentes avanços tecnológicos, foi publicado o relatório trianual de atividades de proteção ambiental *2019 Environmental Report - Aviation and Environment* abordando ruído, qualidade do ar, operações, tecnologia, combustíveis sustentáveis, dentre outros [45]. No conteúdo do Capítulo 4 deste documento: *Operações e Tecnologias*, é informado que o Secretariado da ICAO acompanha o desenvolvimento do setor em termos de projetos de aeronaves elétricas e híbridas por meio da Plataforma de Aeronaves Elétricas e Híbridas para Inovação e aplicação para MAT (E-HAPI), que contém uma lista de 32 projetos identificados globalmente, desde aeronaves de aviação geral ou recreativas; aeronaves executivas e regionais; grandes aeronaves comerciais e aeronaves de decolagem e pouso na vertical. Ainda assim, até o momento, nenhum padrão de certificação de ruído para projetos de tipo de aeronaves VTOL foi internacionalmente estabelecido para tais projetos [46].

Com relação à UA para uso comercial, a ICAO lançou em 2011 o *Circular 328 AN/190* [47]. Seu objetivo foi propor um quadro normativo, na qual não foram definidas normas específicas no que diz respeito a limites máximos/ aceitáveis e métricas de ruído para avaliação operacional dessas aeronaves. Nele, constam duas considerações sobre este tipo de aeronave para discussões futuras: UA pode ou não ser operado em aeródromos tradicionais, em que normas de ruído seriam exigidas (segundo a *Section 6.49*); requisitos de ruído para as categorias de aeronaves atuais serão aplicáveis ao UA, assumindo que sejam utilizadas estruturas de aeronave e sistemas de propulsão semelhantes (segundo a *Section 6.50*). Em 2015, foi publicado o Doc 10019 que substituiu o Circular 328, discutindo importantes pontos sobre registro, autorização e segurança, e certificação de ruído,

este último, no entanto, apenas quando aplicável [48]. Para avaliar a necessidade de novos SARPS, a ICAO busca acompanhar por exemplo as principais regulamentações de UA dos países signatários. Estas informações estão disponíveis em seu site através da plataforma UAS Toolkit [49].

As regras para certificação, registro e operações de aeronaves eVTOL, passaram por uma evolução na última década, em diferentes partes do mundo como observado, no caso de UA, na Figura 10. Este é um processo frequentemente impulsionado pelo próprio setor regulado. Para a elaboração e atualização das regulamentações, os órgãos responsáveis têm recebido contribuições de especialistas, usuários, setores da indústria e da pesquisa através de seminários e consultas públicas. No entanto, o estágio de desenvolvimento das regulamentações não é o mesmo para UA e MAT; sendo que o primeiro já está em um ponto de discussão em diversos países e o segundo está em etapas iniciais de elaboração.

Com relação a aeronaves UA, a Figura 10 sumariza os principais documentos emitidos ao longo dos últimos anos nos EUA, Europa e Brasil. Dentre eles, destaca-se, nos EUA, a regulamentação para UA, que desde 2005, passou por 10 modificações, com duas consultas públicas. Entre elas, destaca-se a modificação de 2016 que abordou sobre ruído, sendo que aeronaves com menos de 55 lbs (aproximadamente 25 kg) não necessitam de certificação acústica [50], ao passo que fora deste contexto as aeronaves com menos de 3175 kg de asa rotativa requerem os limites acústicos do Apêndice J do 14 CFR part 36 [27]. Em 2008, Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA) emitiu seu primeiro documento, após algumas definições preliminares para a categorização de UA baseados no risco. Em 2018 abriu uma consulta pública para elaboração de emendas às regulamentações já existentes. Em seu último documento, a Regulamentação Delegada⁴ (EU) 2019/945, a agência estabelece limites máximos/aceitáveis

para o nível de potência sonora para algumas classes de UA [51] conforme Tabela 3.

No Brasil, a consulta pública de 2015 trouxe colaborações para a atual regulamentação de UA, a RBAC-E 94 [67], publicada em 2017, incorporando regras de aeronavegabilidade para aeronaves de 25 kg até 150 kg. Apenas aeronaves acima de 150 kg (Classe 1) deverão seguir todos os procedimentos estabelecidos no RBAC 21 dentre outras avaliações de risco [68, 69]. Em 2019, a ANAC abriu nova consulta pública para tomada de subsídios até fevereiro de 2020, solicitando contribuições para o futuro da regulamentação de ruído, representando um importante aspecto para uma futura RBAC-E 94 ou disposições correspondentes que venham a substituí-la. A ANAC também acompanha as atualizações nas recomendações da ICAO, FAA, EASA e de outros países.

As operações com UA envolvem pessoas interessadas e familiarizadas com a aviação (envolvidos), bem como muitas que não o são (terceiros, não envolvidos ou não anuentes). Por isto, o processo de capacitação de pilotos, registro de aeronaves e limites operacionais são elementos presentes na regulamentação. A Tabela 2 apresenta alguns aspectos das regulamentações de UA em países de diferentes regiões do mundo. Pode-se observar uma ampla variação nos critérios utilizados para a classificação de aeronaves, como tamanho, classe de MTOW ou uso pretendido.

A partir da análise dos dados na Tabela 2, observam-se pontos em comum, nas várias regiões, em aspectos que tratam da relação entre envolvidos e não envolvidos, como limites de aproximação lateral, sobrevoos, espaço aéreo e horários permitidos, requisitos de segurança e obrigações do usuário. Por esta razão, embora as atuais regulamentações não contemplem de forma específica o incômodo sonoro, já trazem informações que podem servir de base para expectativas futuras de impacto sonoro de eVTOL em áreas urbanas.

⁴Conjunto de normas primárias subordinadas diretamente à normas constitucionais.

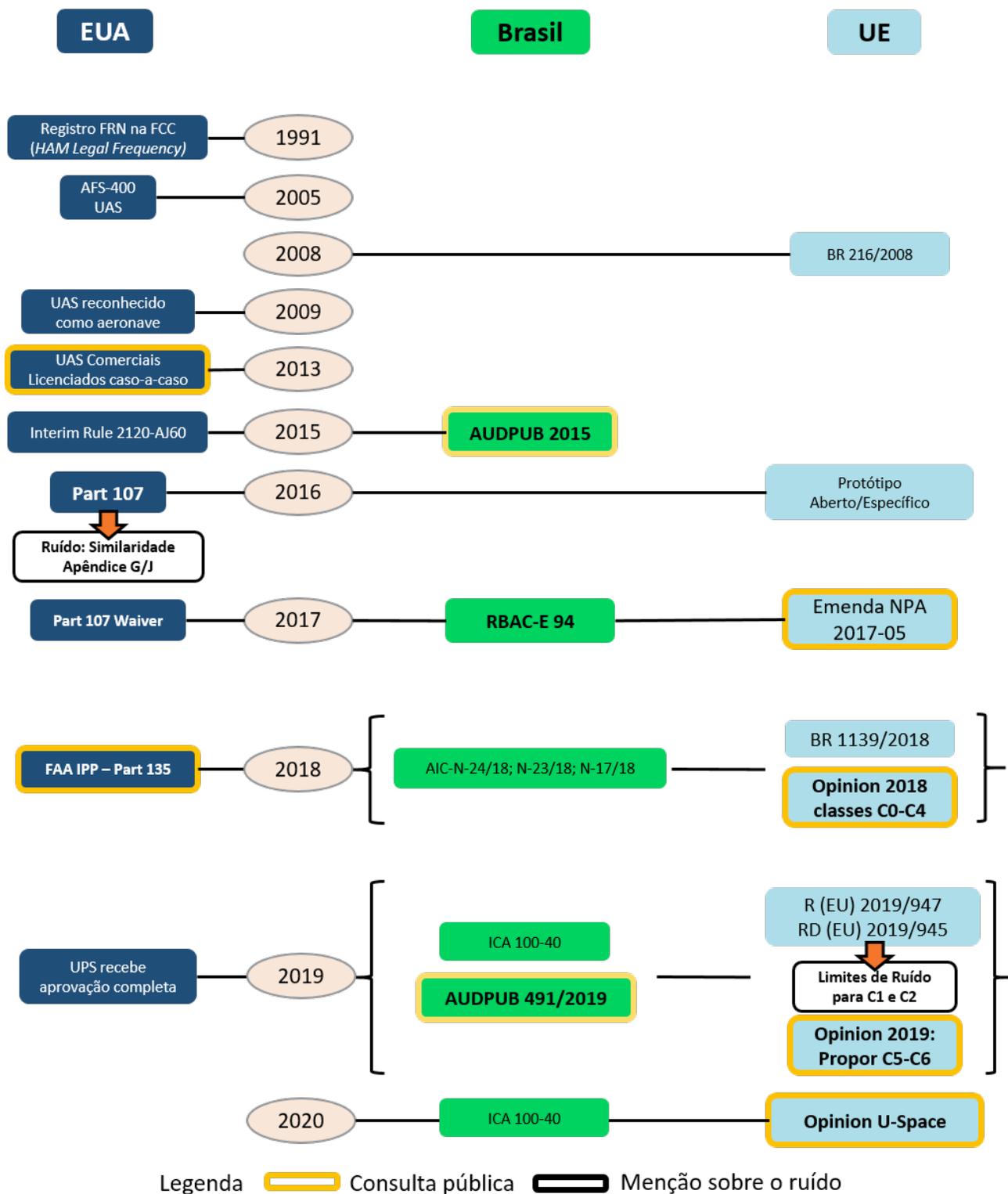


Figura 10: Linha de tempo de regulamentações para UA - Brasil, EUA e UE, baseado em [50–66].

Tabela 2: Resumo das regulamentações no cenário atual, elaborado pelo autor, baseado em [50, 51, 67, 70-78].

País publicação e/ou última atualização	Classes de MTOW	Distância mínima de pesoas	Altura máxima permitida de voo	VLOS/ Distância lateral	BVLOS	Uso pretendido e certificado operacional	Necessidade de registro	Qualificação do piloto
Brasil 2015-2019 [67]	0,25/ 25/ 150kg	30 m	400 ft	EVLOS possível	Aprovação especial (CAER)*	BVLOS, >400 ft	>0,25 kg	>0,25 kg >400 ft
Estados Unidos 2007-2019 [50]	0,25/ 25kg	50 m	400 - 500 ft	EVLOS possível	Aprovação especial (Part 107 Waiver)*	Vôos noturnos, maiores velocidades, BVLOS e em maiores altitudes	>0,25 kg	>0,95kg licença de piloto
União Européia 2018-2019 [51]	0,25/ 0,95/ 4/ 25kg	Não sobre multi-dões	400 ft	EVLOS possível	Autorização especial (NAA)*	>0,95 em sobrevôo, BVLOS	>0,25 kg	>0,95 kg licença de piloto >0,25 e <0,95 kg em VLOS: teste online da EASA
Reino Unido 05/2002 03/2015 [70]	7/20/150 kg	50 m	400 ft	500 m, VLOS possível	Aprovação especial	Requer aprovação para diversas operações	-	-
Austrália 07/2002 09/2016 [71]	2/25/150 kg	30 m	400 ft	EVLOS possível	Aprovação especial	>2/25 kg	-	>2 kg licença de piloto
Nepal 2015-2019 [72,73,79]	2/2/25 kg	30 m	200 ft	VLOS possível	Necessita aprovação especial	requer autorização de voo	sim com número de identificação	>18 anos, piloto competente, assinar termo de anuência
Canadá 2010-05/2015 [74]	2/25 kg	30 m, 150 m	400 ft	VLOS	piloto e auxiliar, certificados + Aprovação especial	>25 kg ou uso não recacional (SFOC)* <30 m terceiros <400 ft Espaço aéreo restrito	>0,25	Piloto competente
China 09/2016 [75]	7 kg	-	-	-	-	Autorização de vôo e certificado de operação	-	Certificação de piloto
Japão 12/2015 [78]	0,20 kg	30 m	495 ft	EVLOS possível	-	Para espaço aéreo próximo à aeroportos, áreas densamente povoadas ou acima de 492 ft	-	Vôos de teste prévios, não operar sob efeito do álcool
Singapura 200X-201X [76]	0,25/1,5/ 7/25 kg	Não sobre multi-dões	200 ft	-	Aprovação especial (CAAS)*	Permissão de atividade para cada operação	>0,25 kg	>1,5 kg certificado treino básico, >7 kg licença de piloto
África do Sul 09/2015 [77]	7/20 kg	50 m	400 ft	EVLOS possível	Necessita aprovação especial	Licença, carta de aprovação para operação	Registro de marcas	Licença de piloto

NAA:National aviation authority, CAAS:Civil Aviation Authority of Singapore, CAER:Certificado de Aeronavegabilidade Especial de RPA
SFOC:Special Flight Operations Certificate, VLOS:Visual Line Of Sight, EVLOS:Extended Visual Line of Sight, BVLOS:Beyond Visual Line of Sight.

Tabela 3: Limite Máximo do Nível de potência sonora de UA segundo o RD 2019/945 para Classes C1 e C2.
Fonte: [51, 53].

Classe	MTOM [g]	Nível Máximo de Potência Sonora [dB]		
		31 / 12 / 2020	31 / 12 / 2022	31 / 12 / 2024
-	-			
C1	$250 \leq m \leq 900$	85	83	81
C2	$900 \leq m \leq 4000$	$85 + 18,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{m}{900} \right)$	$83 + 18,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{m}{900} \right)$	$81 + 18,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{m}{900} \right)$

5.1 Regulamentação de ruído atual para aeronaves eVTOL

Atualmente as regulamentações de ruído de aeronaves eVTOL estão em fase de desenvolvimento e verificam-se avanços diferentes entre UA e MAT, justificando a apresentação de uma descrição separada para estas duas classes de aeronaves eVTOL.

5.1.1 Aeronaves UA

Apesar de regulamentações operacionais para aeronaves UA estarem presentes em vários países, não foram encontradas, fora a EASA, normas de ruído específicas para UA. Existem regulamentações apenas por regras de similaridade, como proposto pela Circular 328 [47] da ICAO. Na Regulamentação Delegada (EU) 2019/945, um procedimento de ensaio para medição da potência sonora, baseado na ISO 3744:2010 [80] e seu Anexo F é proposto. As características do procedimento preveem que o UA deve estar em voo estacionário a 0,5 m acima de um plano refletor (acusticamente duro) e que o UA deve estar completamente envolto por uma superfície de medição hemisférica duas vezes maior que suas dimensões de acordo com a Figura 11. O nível de potência sonora será calculado por :

$$L_W = \overline{L}_p + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ [dB]}, \quad (1)$$

sendo S a área em metros quadrados da superfície de medição, S_0 igual à unidade em metros quadrados e \overline{L}_p a média temporal e espacial dos níveis de pressão sonora na superfície do hemisfério descrito na Figura 11. Para as classes de peso C1 e C2, existem limites máximos aceitáveis dos níveis de potência sonora a serem respeitados, conforme descritos na Tabela 3.

Para as demais classes de UA não existem limites máximos definidos, mas medidas operacionais a serem tomadas para a maior redução de emissão sonora possível, além da necessidade de permissão a ser concedida pela autoridade aeronáutica competente. Dos 17 projetos de aeronaves UA analisados, doze tem informações sobre o MTOW. Destes nenhum se enquadraria na classe C1, cinco estariam na classe C2 e sete estariam em uma futura classe com MTOW superior.

Todavia, é importante ressaltar que o procedimento de medição da potência sonora adotado pela Regulamentação Delegada (EU) 2019/945 baseado na ISO 3744:2010 [80] e seu Anexo F não avalia a direcionalidade da emissão sonora do UA. No entanto, resultados reportados em um importante estudo [81] sugerem que nas proximidades de UA as características de emissão sonoras são fortemente dependentes da direção.

5.1.2 Aeronaves MAT

Com relação às aeronaves MAT, atualmente não há provisões ou normas específicas de ruído da ICAO no Volume I do Anexo 16 para enquadrar a aplicabilidade das provisões atuais a tais tipos de aeronave. A ICAO ainda esta monitorando este tipo de aeronave e avaliando quais SARPS específicos precisam ser desenvolvidos [46].

Nos Estados Unidos, as regulamentações de aeronavegabilidade e ruído são definidas pela 14 CFR 21, 14 CFR Part 23 e 14 CFR Part 36 [27, 82, 83]. Por meio destas a FAA emitiu, em 2017, 63 meios de cumprimento (MOC) para promover a instalação mais rápida de tecnologias inovadoras, aumentar a segurança em pequenos aviões e reduzir os custos para a indústria da aviação [84]. Na União Europeia, o

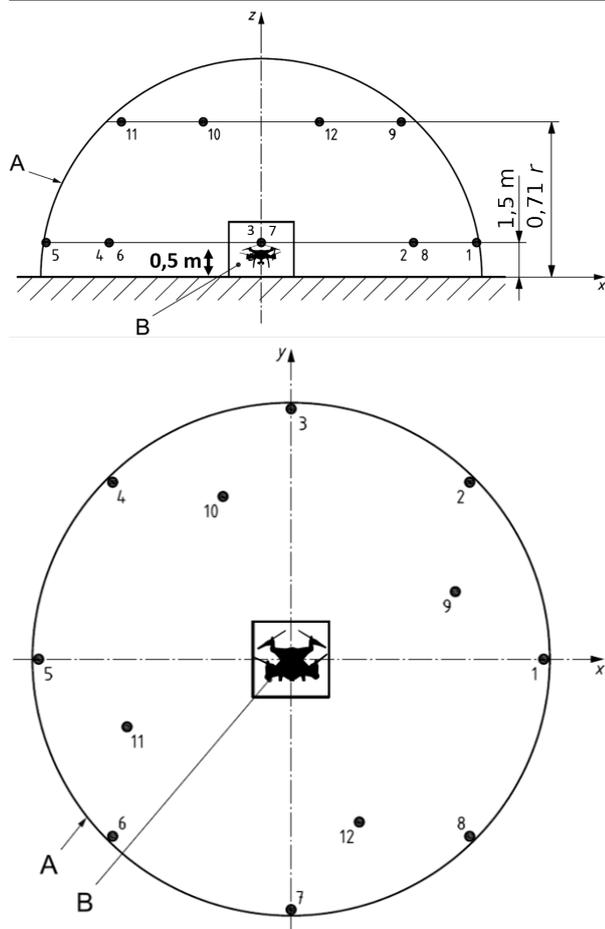


Figura 11: Definições da superfície de medição de potência sonora de UA das classes C1 e C2, conforme ISO 3744:2010. Fonte: [80].

CS-23 e CS-36 [85, 86] fornecem os requisitos técnicos para a certificação para aeronaves com MTOW inferior a 5700 kg com MOCs. O Brasil baseia-se nas regulamentações dos Estados Unidos, com o RBAC 21, RBAC 23 e o RBAC 36 [24, 68, 87]. No entanto, a aplicabilidade destas regulamentações não contempla atualmente aeronaves da classe MAT em centros urbanos. Desta forma, a EASA, em julho de 2019, publicou o *Special Condition for small-category VTOL aircraft* [88], documento que cria duas categorias, a básica e a aprimorada. Esta última, refere-se a aeronaves que pretendem ser operadas como transporte aéreo comercial sobre áreas congestionadas e são capazes de voar e aterrissar em segurança após mau funcionamento crítico/falha do sistema de empuxo/elevação, considerando os seguintes critérios: 1) MTOW inferior a 3175 kg; 2) igual ou menor que nove passageiros; 3) velocidade menor que 250 nós e 4) transporte comercial em áreas densamente po-

voadas. O critério de MTOW inferior a 3175 kg retoma o critério utilizado para enquadrar os helicópteros no Capítulo 11 do Volume I do Anexo 16. Ainda pela análise dos projetos de aeronave eVTOL realizadas na Seção 2 verifica-se que basicamente todas aeronaves eVTOL propostos ou em desenvolvimento se enquadram no critério MTOW inferior a 3175 kg. O mesmo vale, com uma exceção, para o critério velocidade de cruzeiro ou quantidade de passageiros.

O documento *Special Condition for small-category VTOL aircraft* encontrava-se disponível para consulta pública, até o fim de janeiro de 2020, e recebeu 996 respostas. Destas, apenas a DGAC France apresentou questionamentos sobre o ruído, afirmando ser contra uma regulamentação que permita voo em áreas densamente povoadas sem nenhuma regulamentação básica de ruído. Como resposta, a EASA então determinou que a consulta continuasse em andamento, pois reconhece que o documento até o momento discute apenas aeronavegabilidade [89]. O evento *Quiet Drones* organizado pelo I-INCE Europe e *Le Centre d'information et de documentation sur le bruit*, e previsto para ocorrer em maio de 2020, visava dar visibilidade à problemática, para que se possa fazer melhores encaminhamentos no futuro.⁵

Diante dessas questões, a FAA também está decidindo se estes veículos entrarão como uma classe especial (14 CFR 21.17b), analogamente ao SC-VTOL-01, ou se serão condições especiais adicionadas ao 14 CFR part 23. No Brasil, a ANAC acompanha as regulamentações propostas para harmonização de emendas. Ainda assim, a perspectiva é de consolidar os aspectos de aeronavegabilidade e segurança antes do ruído para aeronaves eVTOL. Isto deve-se ao fato que mesmo na RBAC 36 consta como parte da certificação que a aeronave deve atender aos regulamentos de aeronavegabilidade que constituem o tipo base de certificação da aeronave em todas as condições em que a conformidade com esta parte é mostrada (segundo a *Section 36.3*) [24].

⁵Devido ao COVID-19 o evento foi postergado para o final de 2020.

5.2 Propostas de órgãos não regulamentadores e o futuro da regulamentação de ruído para eVTOL

Enquanto aguarda-se o estabelecimento de uma regulamentação sobre o ruído de eVTOL, algumas aeronaves já estão realizando voos testes em centros urbanos, como a Volocopter, com seu conceito eVTOL 2X em Singapura. O que torna possível este tipo de operação é a permissão do Ministério do Transporte e a CAAS, pois acredita-se que este trabalho próximo às empresas de inovação pode beneficiar o avanço de uma aviação segura para o público. Mesmo assim, o uso desta tecnologia ainda está muito a frente de uma regulamentação governamental [90], especialmente da regulamentação de ruído.

Embora a regulamentação de ruído para UA, no momento, esteja em fase de elaboração e consolidação, e para MAT ainda em consulta pública, algumas pesquisas abordam aspectos como métricas acústicas, rotas de voo, e posicionamento de vertiportos, que deveriam ser considerados pelos órgãos reguladores.

Com relação a quais métricas utilizar, para certificação de aeronaves eVTOL e regulamentação de aerodromos/vertipontos nos quais irão operar, algumas empresas dão sugestões por meio de *White Papers*. Para certificação de aeronaves eVTOL a UBER propõe a métrica EPNL, em conformidade com as disposições para helicópteros e aeronaves com rotores basculantes com requisição ao Certificado de Tipo submetida a partir de 01/01/2018, regulamentadas pelos Capítulo 8 ou 13 respectivamente. Os procedimentos de voo e os pontos de medição seriam aqueles descritos na Figura 8.

O que concerne de forma mais genérica o impacto em solo a *Uber Elevate* espera no solo um $L_{A,max} < 62$ dB(A) para uma aeronave voando 150 m de altura, e em termos de métricas de eventos sonoros espera-se um SEL de no máximo 67 dB(A) a 76 m de altura do chão [91].

Já com relação aos vertiportos, conforme [91] espera-se um aumento de 1 dB no DNL da região com a presença das aeronaves eVTOL. Há

de se ponderar que a escala esperada para a operação de eVTOL é maior que aquela atualmente apresentada na operação de helicópteros, o que demandaria a construção de mais vertiportos para dar sustentabilidade econômica a este modelo de transporte [92]. Contudo, vertiportos construídos em áreas urbanas densamente povoadas podem eventualmente fazer o plano de zoneamento de ruído deixar de cumprir sua principal finalidade, que é fornecer informações básicas para assegurar a compatibilidade do uso e ocupação do solo entre operação do vertiporto e a vizinhança [20]. Existem várias propostas gerais para implementar vertiportos, por exemplo a certificação de heliportos já existentes que permitem apenas pousos de emergência e adaptá-los tecnologicamente para aeronaves eVTOL e sugestões de se construir mais vertiportos em áreas residenciais [93]. Há evidentemente interesses em conflito em cada uma das soluções adotadas. Em 2018, um estudo avaliou o posicionamento dos vertiportos de acordo com três cenários de priorização: negócios (de acordo com a maior demanda de passageiros), ruído (de acordo com o menor número de habitantes negativamente afetados) e combinado (maior razão entre demanda de passageiros e o número de habitantes negativamente afetados). O cenário de negócios considera a maior quantidade de vertiportos e passageiros por unidade, enquanto que para o cenário de ruído houve uma redução do número de vertiportos e uma redução do lucro por vertiporto de 20% a 80%. Mesmo no cenário combinado, o número de vertiportos seria inferior ou igual ao número de vertiportos no cenário de negócios para todos os critérios de otimização [94]. Isso indica que a implantação de vertiportos e seu critério de implantação é sensível ao impacto sonoro, o que, por sua vez, afeta a rentabilidade e o alcance da rede. Logo, a adaptação de vertiportos e apenas o seguimento das regras atuais de PZR podem possivelmente não ser medidas suficientes.

Com relação às rotas, helicópteros e outras aeronaves menores como aeronaves eVTOL em voo simultâneo podem não ser tão simples de gerenciar na prática. A FAA contabilizou 1200 incidentes, em 2015, de UA que realizavam voos

próximos a outras aeronaves. A capacidade tecnológica de orientação em um ambiente denso e heterogêneo estão sendo avaliados em projetos de mobilidade urbana aérea (*Urban Air Mobility*) [92, 95]. Um dos pontos de discussão é, antes de trabalhar com UA, MAT e helicópteros, simultaneamente, desenvolver uma etapa intermediária com separação horizontal ou vertical entre as aeronaves.

Para a segregação horizontal, cada aeronave pertenceriam a diferentes zonas de priorização, além de estratégias como automatização de voos e fronteiras com o uso de *geofencing*⁶. A *Uber Elevate* conta com os esforços da NASA para determinar o tráfego aéreo de UA e futuramente MAT [91, 96]. Um relatório apresentando os resultados preliminares de medidas de desempenho de operações em condições similares a centros urbanos indicam que algumas latências de resposta automatizada levaram o estudo a não atingir o índice de sucesso esperado [97]. Assim, novos testes são necessários para melhor implementar a segregação horizontal.

A proposta de segregação vertical, apresentada no Flightplan 2030 da Embraer, define três níveis de voo, o mais baixo para UA, em seguida MAT, e outras aeronaves, em espaço aéreo controlado representado esquematicamente pela Figura 12. Esse modelo é mais acessível pois não requer o mesmo nível de automatização que a segregação horizontal e facilita a inserção de MAT caso o UA já esteja em operação. Ainda assim, propõe-se uma central de controle de tráfego eficiente, podendo esta ser não governamental ou uma extensão daquelas já existentes [95, 98]. No entanto, essa segregação cria altitudes máximas para uma aeronave não adentrar o espaço aéreo de outras, limitando a estratégia de distanciamento para redução do ruído. Também haveria interseção de níveis perto de vertiportos, e considerando que o modelo de transporte aéreo com MATs demanda uma rede densa de vertiportos, o número de interseções pode ser elevado.

As análises anteriores de mobilidade para eVTOL consideraram trajetos em linha reta ponto

⁶Restrições de trajeto automatizadas.



Figura 12: Representação esquemática do espaço aéreo segregado verticalmente. Fonte: [95].

a ponto [92, 93]. Para UA, uma abordagem baseada em conceitos de complexidade contrapõe este tipo de trajeto simples. Buscando minimizar o tempo de desvio de colisão e o tempo total da viagem, a aviação livre se mostrou melhor para cenários de até no máximo 10.000 operações por dia se comparada com a aviação não livre (com vias aéreas pré-definidas). Porém ultrapassando este número a complexidade aumenta drasticamente e, com isso, o tempo de voo e a exposição sonora. Esta análise considerou o tempo de desvio de colisão em campo aberto, mas se outras restrições aéreas forem consideradas, o adensamento de aeronaves irá aumentar, assim como o seu tempo normalizado de desvio de colisão, mesmo para uma quantidade menor de operações [99].

Para MAT é de se esperar uma realidade semelhante. Helicópteros estão sujeitos a restrições operacionais perto de áreas urbanas impostas por rotas específicas de voo. Os critérios para escolha são rotas com alto potencial de geração de ruídos (como grandes rodovias) ou rotas não populadas (como perto de rios) [20, 100]. O *Flightplan 2030* propõe esta mesma estratégia para MAT [95]. Contudo, esta estratégia pode não ser viável em todos os centros urbanos ou ser incompatível com o modelo de transporte por demanda, no qual a distância entre terminal da modalidade, no caso um vertiporto, e a origem/o destino do usuário deve ser minimizado.

6. CONCLUSÕES

A implementação de novas modalidades e meios de transporte, principalmente no meio urbano vai requerer a regulamentação dos produtos e serviços de um setor que muito rapidamente está respondendo às demandas e desafios tecnológicos, o setor de transporte por demanda por meio de aeronaves eVTOL. Apesar de já existirem vários projetos de aeronaves eVTOL, alguns deles já com aeronaves em fase de protótipos e com vôos experimentais, ainda não há uma regulamentação consolidada das aeronaves e das operações das mesmas. Por meio de uma revisão da literatura buscou-se então organizar as informações obtidas a partir de artigos científicos, *whitepapers* e documentos de natureza regulamentar para aeronaves e aeródromos convencionais e para aeronaves eVTOL (UA e MAT) com o objetivo de elucidar os aspectos que tangem a regulamentação destas últimas, em especial as diferenças entre os novos tipos de aeronaves e operações associadas e as aeronaves convencionais e suas operações. Para tanto, apresentou-se na Seção 2 um *overview* sobre as principais características de aeronaves eVTOL que estão sendo atualmente consideradas para fins de regulamentação, sendo estas a massa/peso máximo de decolagem e a velocidade máxima de cruzeiro.

Enquanto que a regulamentação de ruído ao redor do mundo está consolidada para aeródromos e aeronaves convencionais, após sucessivas alterações para acompanhar o desenvolvimento tecnológico, constatou-se que para algumas aplicações específicas a regulamentação existente não faz previsões, como ocorre por exemplo para aeronaves propelidas por hélice do tipo STOL. No que concerne a regulamentação de aeronaves eVTOL, que engloba UA e MAT, observa-se que a mesma está em fase de elaboração. Verifica-se que já existem regulamentações iniciais para UA de pequeno porte, sendo estas regulamentações principalmente voltadas para a segurança em vôo. Aspectos de emissão sonora ainda são regulamentados apenas parcialmente, em termos da potência sonora que pode ser emitida em função do MTOW do UA para aeronaves UA com MTOW inferior a 4 kg. Para

aeronaves MAT há encaminhamentos aproveitando a similaridade da operação com helicópteros, fazendo sugestões de regulamentação para aeronaves MAT com MTOW inferior a 3175 kg, velocidade de cruzeiro inferior a 250 nós e de até nove passageiros. Notou-se que a grande maioria dos projetos de aeronaves MAT se enquadraram nestas condições.

Ainda que possam existir semelhanças, há de se considerar que a emissão sonora destes novos tipos de aeronaves não é igual à emissão sonora de helicópteros, tanto por questões construtivas como devido a diferenças na operação. Pesquisas sobre a geração de ruído por estes novos tipos de aeronaves são muito recentes, e generalizações devem ser feitas com prudência. Desta forma, a escolha de procedimentos e métricas para caracterização da emissão sonora e do impacto sonoro que causam no ser humano é um aspecto que merece maior atenção, principalmente para evitar problemas decorrentes de simplificações como ocorrem atualmente com aeronaves e aeródromos convencionais.

Um outro fator fundamental na elaboração da regulamentação para aeronaves eVTOL está relacionada com a missão que cada projeto específico irá empreender. Claramente, aeronaves UA e MAT apresentam procedimentos de operação bastante distintos, os quais devem ser levados em consideração na definição dos procedimentos e pontos de medição do ruído gerado por essas aeronaves. Entretanto, a grande gama de projetos de aeronaves eVTOL, os quais apresentam muitas vezes configurações bastante distintas, torna a definição da regulamentação ainda mais complicada, visto que mesmo para a mesma missão podem haver trajetórias de voo bastante distintas. Nesse sentido, uma regulamentação que carece de um embasamento mais profundo pode resultar na limitação do desenvolvimento tecnológicos dessas aeronaves, ou pelo menos de uma das vertentes conceituais atualmente em desenvolvimento.

No que se refere à abordagem equilibrada usada para mitigar problemas de ruído em aeródromos convencionais, três destes pilares se referem às estratégias de redução do impacto so-

noro por meio de restrições, sejam estas em operações dos padrões de voo, restrição de aeronaves e/ou funcionamento do aeroporto, ou restrição das atividades econômicas permitidas dentro da área delimitada por cada curva de ruído. No entanto, estas podem ser incompatíveis com o modelo de serviços de transporte por demanda, que busca maximizar a acessibilidade de seus serviços com mais rotas, mais horários de operação e mais aeronaves em espaços urbanos já consolidados e nos quais se espera quase que naturalmente uma demanda grande. Uma possibilidade de resolver este conflito podem ser operações evolutivas, em termos de números de operações e áreas afetadas pelo ruído, assim como proposto pela FAA e NASA [34]. Por esta razão, o primeiro critério, que é reduzir a geração de ruído na fonte, é vital para o êxito da inserção das aeronaves eVTOL em centros urbanos. Para tanto, a compreensão dos mecanismos de geração de ruído e formas adequadas de avaliação e mitigação dependem do avanço científico. Especialmente no que diz respeito às formas de avaliação, há de considerar que o ruído gerado por estas aeronaves eVTOL, que usam propulsão distribuída, tem características bem distintas do ruído gerado por aeronaves convencionais. Por exemplo, em aeronaves que usam as configurações *lift and cruise* ou *wingless* as variações de velocidade de rotação e ângulo de *pitch* entre rotores e ao longo do tempo podem gerar modulações de amplitude e frequência, aspectos que causam bastante incômodo mas que não são caracterizados pelas métricas atualmente utilizadas para certificação de ruído de projetos de aeronaves. Apesar de existirem alternativas para quantificar sensações sonoras, por exemplo a sensação de volume sonoro ou sensação da Intensidade de Flutuação (*Fluctuation Strenght*) [101, 102] há de se assegurar que as implementações desses modelos são suficientemente padronizados para permitir o uso para fins de regulamentação, pois no passado essa padronização era insuficiente [103, 104]. Dito isto, publicações que versam sobre características psicoacústicas do ruído de aeronaves elétricas com propulsão distribuída, inclusive aquelas citadas no decorrer do presente trabalho, devem ser analisadas com

cautela, para evitar que conclusões distorcidas destas publicações influenciem marcos regulatórios. Sugere-se inclusive a realização de um estudo sobre a representatividade e confiabilidade de modelos psicoacústicos para avaliação do ruído produzido por aeronaves elétricas com propulsão distribuída para orientar futuras decisões a acerca da regulamentação do ruído destas aeronaves.

Um outro aspecto relevante é a questão de tratar a aeronave como fonte sonora pontual ou conjunto de fontes sonoras distribuídas. Aeronaves convencionais são sempre tratadas, na questão regulatória, como fontes sonoras pontuais mesmo que as diferentes fontes sonoras como motores, interação fluido-estrutura, entre outras estão distribuídas na aeronave. Apesar das distâncias entre estas diferentes fontes poderem ser grandes, no caso de um A380 ou B777-X de até 80 m, as distâncias ainda maiores entre estas fontes e o receptor, em solo, permitem que para fins de regulamentação de ruído todas estas fontes sejam consideradas uma única fonte sonora pontual. No que concerne os atuais projetos de aeronaves eVTOL, que são pequenos e normalmente usam vários rotores, há de avaliar se as diferentes fontes de ruído neste tipo de aeronave podem ser considerados também como única fonte sonora pontual para fins de regulamentação, pois diferentemente das aeronaves convencionais as aeronaves UA possam eventualmente operar muito próximo dos receptores (humanos), apesar de serem em geral menores.

Diante o exposto no decorrer do artigo, e os pontos já elencados na presente conclusão, não há como não reconhecer a falta de vários conhecimentos específicos no que concerne vários aspectos da operação de aeronaves eVTOL e da geração e emissão de ruído por esta nova classe de aeronaves. Assim, os autores sugerem pesquisa nos seguintes temas para orientar os esforços de regulamentação: 1) análise estatística de padrões de voo típicos de UAV e MAT para nortear a escolha de procedimentos de medição; 2) criação de uma base de dados (sonoras, operacionais, características) para possibilitar estudos/pesquisa sobre relações entre características construtivas, características operacionais e

assinatura e emissão sonora; 3) estudos experimentais que avaliem as relações entre assinatura acústica e aspectos construtivos e operacionais de aeronaves eVTOL; e 4) estudos numéricos para o desenvolvimento de ferramentas de simulação do emissão sonora de aeronaves eVTOL.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os comentários e as sugestões de melhoria dados pelos revisores muito competentes. Agradecemos ao editor pela dedicação no acompanhamento dos ajustes no manuscrito.

REFERÊNCIAS

1. ARTHUR D. LITTLE. *The Future of Mobility 3.0: Reinventing mobility in the era of disruption and creativity*. Paris, France, 2018. 100 p.
2. VERTICAL FLIGHT SOCIETY. The vertical flight society entry page. *Main Website*. Disponível em: <https://vtol.org/>.
3. ELECTRIC VTOL NEWS. evtol news entry page. *Main Website*. Disponível em: <https://evtol.news/>.
4. AMERICAN HELICOPTER SOCIETY. Vertipedia website. Disponível em: <https://vertipedia.vtol.org/>.
5. ELECTRIC VTOL NEWS. Bell Nexus 4EX. *Aircraft Site Section*. Disponível em: <https://evtol.news/aircraft/bell-nexus-4ex/>.
6. ELECTRIC VTOL NEWS. EmbraerX DreamMaker. *Aircraft Site Section*. Disponível em: <https://evtol.news/aircraft/embraer/>.
7. TRANSPORTUP. Volocopter 2X. *Aircraft Site Section*. Disponível em: <https://transportup.com/volocopter-2x/>.
8. BACCHINI, A.; CESTINO, E. Electric VTOL configurations comparison. *Aerospace*, n. 6, 2019.
9. MARTE, J. E.; KURTZ, D. W. *Technical Report 32-1462: A review of aerodynamic noise from propellers, rotors, and lift fans*. Pasadena, California, 1970. 58 p.
10. BROWN, A.; HARRIS, L. W. A vehicle design and optimization model for on-demand aviation. *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2018.
11. ZAWODNY, N. S.; BOYD, D. D. Jr.; BURLEY, C. L. Acoustic characterization and prediction of representative, small-scale rotary-wing unmanned aircraft system components. *72nd American Helicopter Society (AHS) Annual Forum*, 2016.
12. FARASSAT, F.; SUCCI, G. P. A review of propeller discrete frequency noise prediction technology with emphasis on two current methods for time domain calculations. *Journal of Sound and Vibrations*, p. 399–419, 1980.
13. SYNODINOS, A.; SELF, R.; TORIJA, A. Noise assessment of aircraft with distributed electric propulsion using a new noise estimation framework. *24th International Congress of Sound and Vibration*, 2017.
14. CANDELORO, P.; FRANCESCO, S. Di; PAGLIARONI, T. Small-scale rotor aeroacoustics for drone propulsion: A review of noise sources and control strategies. *DGA-MRIS aeroacoustics of MAV propellers*, 2019. No prelo.
15. ICAO. EASA certification noise levels. *Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) site section*. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>.
16. FRANKEN, W. J. History of noise certification documentation. *Noise Certification Workshop*, 2004.
17. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO, 2019 Environmental Report Aviation and Environment. *ICAO environmental protection Website*. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>.
18. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Annex 16 Volume I: Interna-*

tional standards and recommended practices - environmental protection - aircraft noise. Europe, 2017.

19. DIRECTORATE GENERAL OF CIVIL AVIATION. General Information on the NoisedB database. *DGAC Site Noise dB Section*. Disponível em: <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/index-en.html>.

20. GAMA, A. P. *Avaliação do Impacto Sonoro do Tráfego de Helicópteros em Áreas Urbanas*. 228 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

21. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. RBHA – Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica. Disponível em: <https://www.decea.gov.br/sirius/index.php/2011/06/14/rbha-regulamento-brasileiro-de-homologacao-aeronautica/>.

22. CASA CIVIL SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS. Lei Nº 11.182 - Cria a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11182.htm.

23. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC e RBHA. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac>.

24. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 36: Requisitos de ruído para aeronave*. Brasil, 2009. 15 p.

25. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Ruído. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/ruído>.

26. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC 36. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/rbac-36>.

27. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *14 CFR 36: Noise Standards: Aircraft Type and Airworthiness Certification*. United

States. Disponível em: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/part-36>.

28. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Mpr-280: Certificação de ruído de projetos de tipo de aeronaves. 2010. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=5250>.

29. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Balanced approach to aircraft noise management. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/noise.aspx>.

30. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *DOC 9289 AN/451: Guidance on the balanced approach to aircraft noise management*. [S.l.], 2011. 134 p.

31. BERTON, J.; NARK, D. Low-noise operating mode for propeller-driven electric airplanes. *24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018.

32. MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA. Operação de helicópteros e para construção e utilização de helipontos ou heliportos. *Lex Magister Site*. Disponível em: http://www.lex.com.br/doc_3941697_PORTARIA_N_18_GM5_DE_14_DE_FEVEREIRO_DE_1974.aspx.

33. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Environmental community engagement for performance-based navigation. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Community-engagement-for-aviation-environmental-management.aspx>.

34. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Concept of operation v.1. Disponível em: https://assets.evtol.com/wp-content/uploads/2020/07/UAM_ConOps_v1.0.pdf.

35. UBER ELEVATE. Uber Elevate turns its focus to community engagement. Disponível em: <https://evtol.com/news/uber-elevate-community-engagement/>.

36. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 91: Requisitos gerais de operação*

para aeronaves civis. Brasil, 2020. 81 p.

37. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 36 - Emenda 01*: Planos de zoneamento de ruído de aeródromos. Brasil, 2013. 18 p.

38. BERGLUND, B.; BERGLUND, U.; LINDVALL, T. Scaling loudness, noisiness, and annoyance of aircraft noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 57 (4), 1975.

39. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *DOC 9911*: Recommended method for computing noise contours around airports. [S.l.], 2018. 198 p.

40. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 155*: Helipontos. Brasil, 2018.

41. EUROPEAN COUNCIL. *Directive 49 EC*: Relating to the assessment and management of environmental noise. Europe, 2002.

42. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *14 CFR 161: Notice and Approval of Airport Noise and Access Restrictions*. United States. Disponível em: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/part-161>.

43. SEGAWA, T. *et al.* Assessment of environmental noise immission in Japan. *Proceedings of Inter Noise*, Rio de Janeiro, 2005.

44. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *DOC 10031*: Guidance on environmental assessment of proposed air traffic management operational changes. [S.l.], 2014. 76 p.

45. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Destination Green*: Whitepaper: The next chapter. Montreal, Canada, 2019. 376 p.

46. PLATFORM, ICAO. E-hapi platform. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx>.

47. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Circular 308*: Unmanned aircraft systems uas. Montreal, Canada, 2011. 32 p.

48. SKYBRARY AERO. Manual on remotely piloted aircraft systems (rpas) - 10019. 2020. Disponível em: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/4053.pdf>.

49. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Current state regulations. *UAS Toolkit Home Site*. Disponível em: <https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/default.aspx>.

50. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Fact sheet – small unmanned aircraft regulations (part 107). Disponível em: https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=22615.

51. EUROPEAN COUNCIL. *Regulamentação Delegada 945*: Relativo às aeronaves não tripuladas e aos operadores de países terceiros de sistemas de aeronaves não tripuladas. Europe, 2019.

52. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Contribuições para regras de drone. *ANAC site Drones section*. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/ContribuicoesParaRegraDrones_v2.pdf.

53. EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. Drones - regulatory framework timeline. *EASA site Civil Drones section*. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/drones-regulatory-framework-timeline>.

54. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Uas integration pilot program. *FAA site partnership section*. Disponível em: https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/integration_pilot_program/.

55. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *AFS-400 UAS Policy 0501*: Unmanned aircraft systems operations in the u.s. national airspace system—interim operational approval guidance. [S.l.], 2005.

56. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *AR-09/7*: Unmanned aircraft system regulation review. [S.l.], 2009.

57. ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS. *FCC 97*: Amateur radio service

telecommand of model craft. [S.l.], 1991.

58. CABLE NEWS NETWORK. Faa takes initial steps to introduce private drones in u.s. skies. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2013/11/07/us/faa-drones-over-us/index.html>.

59. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Certificates of waiver or authorization (coa). Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/systemops/aaim/organizations/uas/coa/.

60. USATODAY WEBSITE. Faa lets 4 companies fly commercial drones. Disponível em: <https://www.usatoday.com/story/money/business/2014/12/10/faa-drones-trimble-vdos-clayco-woolpert-amazon/20187761/>.

61. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. *AUBPUD 20/2015*: Relatório de análises de contribuições - audiência pública. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/participacao-social/consultas-publicas/audiencias/2015/aud20/relatorio.pdf>.

62. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. *ICA 100-40*: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4944>.

63. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. *ICA 100-40*: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=5250>.

64. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Part 107 Waiver*. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://droneshowla.com/decea-publica-novas-aics-para-regulamentar-o-uso-de-drones/>.

65. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *RIN 2120-AJ60*: Operation and certification of small unmanned aircraft systems. [S.l.], 2015.

66. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Certificate of Waiver - Issued to UPS*. [S.l.], 201. Disponível em: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/part_107_waivers/waivers_issued/media/107W-2019-04958_James_Ackerson_CoW.pdf.

67. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC-E 94*: Requisitos gerais para aeronaves não tripulados de uso civil. Brasil, 2017.

68. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 23*: Certificação de produto e artigos aeronáuticos. Brasil, 2018. 81 p.

69. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. drones classe 1 (rpa com peso máximo de decolagem maior que 150 kg).

70. CIVIL AVIATION AUTHORITY UK. Unmanned aircraft system operations in uk airspace - guidance and policy:2019. *Civil Aviation Authority UK Site*. Disponível em: http://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP722_Edition7_A3_SEP2019_20190903.pdf.

71. CIVIL AVIATION SAFETY AUTHORITY AU. Remotely piloted aircraft systems Amendments to Part 101 of CASR - NFRM 1309OS:2017. *Civil Aviation Safety Authority AU Site*. Disponível em: <https://www.casa.gov.au/files/nfrm1309ospdf-0>.

72. MINISTRY OF HOME AFFAIRS. Remote piloted aircraft. Disponível em: <http://www.moha.gov.np/en/post/drone-related-procedure-2019>.

73. UAV SYSTEMS. Nepal drone laws. Disponível em: <https://uavcoach.com/drone-laws-in-nepal/>.

74. GOVERNMENT OF CANADA, AERONAUTICS. Regulations Amending the Canadian Aviation Regulations for Unmanned Aircraft Systems:2017. *Government of Canada, Aeronautics Site*. Disponível em: http://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP722_Edition7_A3_SEP2019_20190903.pdf.

75. CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. Measures for the administration of air traffic in civil unmanned aircraft systems:2017. *Civil Aviation Administration of China Site*. Disponível em: <https://www.hlmediacomms.com/2016/01/>

[21/china-launches-first-operational-rules-for-civil-unmanned-aircraft/](#).

76. CIVIL AVIATION AUTHORITY OF SINGAPORE. Air Navigation Act Chapter 6 – Part 101 – Unmanned Aircraft Operations Regulations:2019. *Civil Aviation Authority of Singapore Site*. Disponível em: <https://www.caas.gov.sg/public-passengers/unmanned-aircraft/ua-regulations>.

77. SOUTH AFRICAN CIVIL AVIATION AUTHORITY. South african civil aviation authority - technical guidance material for rpas part 101:2015. *South African Civil Aviation Authority Site*. Disponível em: <http://www.caa.co.za/Pages/RPAS>.

78. JAPAN MINISTRY OF LAND INFRASTRUCTURE TRANSPORT AND TOURISM. Amendments to the Aeronautical Act. Dez 2015 - Japan's safety rules on Unmanned Aircraft (UA)/Drones: 2017. *Civil Aviation Bureau Site Japan*. Disponível em: <https://www.mlit.go.jp/en/koku/uas.html>.

79. UAV COACH. Nepal drone laws. Disponível em: <https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/future-mobility-30>.

80. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 3744:2010: Acoustics — determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*. Geneva, CH, 2010.

81. KLOET, N.; WATKINS, S; CLOTHIER, R. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems. *International Journal of Micro Air Vehicles*, v. 9(1), p. 3–14, 2017.

82. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *14 CFR 23: Airworthiness Standards*. United States.

83. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *14 CFR 21: Certification Procedures for Products and Articles*. United States. Disponível em: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/part-21>.

84. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Faa publishes means to comply with part 23. Disponível em: <https://www.faa.gov/news/updates/?newsId=90566>.

85. EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. *CS 36: Aircraft noise*. Europe, 2019.

86. EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. *CS 23: Normal, utility, aerobatic and commuter aeroplanes*. Europe, 2003.

87. AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC 23: Requisitos de aeronavegabilidade: Aviões categoria normal, utilidade, acrobática e transporte regional*. Brasil, 2017. 15 p.

88. WOLFE, F. Will EASA Create a New Category for eVTOL Certification? Disponível em: <https://www.aviationtoday.com/2019/02/01/will-easa-create-new-category-evtol-certification/>.

89. US AIR FORCE. US Air Force to launch 'Agility Prime' eVTOL development on 27 April. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol>.

90. ALJAZEERA. Volocopter takes to singapore sky, but can air taxis take off? *Aljazeera Site*. Disponível em: <https://www.aljazeera.com/news/2019/10/volocopter-takes-singapore-sky-air-taxis-191022084726414.html>.

91. HEAD, E. Uber elevate turns its focus to community engagement. *eVTOL*. Disponível em: <https://evtol.com/news/uber-elevate-community-engagement/>.

92. VASCIK, P. D.; HANSMAN, R. J. Evaluation of key operational constraints affecting on-demand mobility for aviation in the los angeles basin: Ground infrastructure, air traffic control and noise. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2017.

93. DASKILEWICZ, M. *et al*. Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for evtol daily commuting. *Avi-*

ation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018.

94. TEREKHOV, I. Assessing noise effects of the urban air transportation system. *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018.

95. EMBRAERX. Flight plan 2030. *Embraerx Site*. Disponível em: <https://embraerx.embraer.com/global/en/flightplan-2030>.

96. NASA. Uas traffic management (utm) project. *NASA Site*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/aeroresearch/programs/aosp/utm-project-description>.

97. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *UAS Service Supplier Network Performance: Results and analysis from flight testing multiple uss providers in nasa's tcl4 demonstration*. Moffett Field, California, 2020. 31 p.

98. ELECTRIC VTOL NEWS. Embraer dreammaker. Disponível em: <https://evtol.news/aircraft/embraer/>.

99. BULUSU, V.; SENGUPTA, R.; LIU, Z. Unmanned aviation: To be free or not to be free? *The Cal Unmanned Aviation Lab*, 2016.

100. HELICOPTER ASSOCIATION INTERNATIONAL. *Fly Neighbourly Guide*. Alexandria, Virginia, 1993. 36 p.

101. TERHARDT, E. On the perception of periodic sound fluctuations (roughness). *Acustica*, v. 30, n. 4, p. 201–213, 1974.

102. GENUIT, K. Die Bedeutung der Rauigkeit und der Schwankungsstärke zur Bestimmung der Akustischen Qualität von Schallereignissen. In: *Fortschritte der Akustik DAGA'92*. [S.l.: s.n.], 1992.

103. GENUIT, Klaus; SOTTEK, Roland; FIEBIG, Andre. Comparison of loudness calculation procedures in the context of different practical applications. In: *Proc. Internoise*. Ottawa: [s.n.], 2009.

104. PAUL, Stephan; DIETRICH, Pascal. Quantifying slow amplitude and frequency modulations with psychoacoustic models -

problems and preliminary solutions. In: *Society of Automotive Engineers*. [S.l.: s.n.], 2009. doi: [10.4271/2009-36-0357](https://doi.org/10.4271/2009-36-0357).