

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

KADU GIBRAN SILVA

**ESTUDO DO IMPACTO SONORO NO USO DE DRONE
EM CAMPO LIVRE**

SÃO CARLOS -SP
2022

KADU GIBRAN SILVA

ESTUDO DO IMPACTO SONORO NO USO DE DRONE EM CAMPO LIVRE

Monografia apresentada à banca como avaliação da disciplina Trabalho Final de Curso para obtenção do título de bacharel em Engenharia Física pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Antônio Cardoso

São Carlos-SP
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Física

Folha de aprovação.

Assinatura do membro da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa do Trabalho Final de Curso do candidato Kadu Gibran Silva, realizada em 22/09/2022:

Prof. Dr. Edson Augusto Melanda
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Érico Masiero
Universidade Federal de São Carlos

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: medição do nível de ruído de fundo (dB(A), eixo vertical) em função do tempo (minutos, eixo horizontal).

Gráfico 2: medição do nível de ruído do drone (dB(A), eixo vertical) em função do tempo (minutos, eixo horizontal).

Gráfico 3: relação entre o nível global de ruído e o ângulo de emissão do VANT no eixo horizontal

Gráfico 4: nível global de ruído (dB(A), eixo vertical) em função das frequências de $\frac{1}{3}$ de oitava (Hz, eixo horizontal) medido com o VANT em atividade..

Gráfico 5: espectro de banda estreita do ruído emitido pelo VANT, nível equivalente (dB(A), eixo vertical) em função da frequência (Hz, eixo horizontal)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB(A).

Tabela 2: nível de global de ruído obtido nos microfones.

Tabela 3: nível de global de ruído obtido nos microfones com a correção realizada devido a identificação de ruídos tonais.

Tabela 4: resposta estimada da comunidade ao ruído a partir da variação do nível equivalente corrigido e o nível critério. Fonte: Samir

LISTA DE SIGLAS

VANT: veículos aéreos não tripulados

RPAs: *remotely piloted aircraft system*

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

CETESB: Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

FFT: *Fast Fourier Transform*, ou Transformada Rápida de Fourier

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CPQMAE: Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia

SUMÁRIO

1. RESUMO	7
2. INTRODUÇÃO	8
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
3.1. PRESSÃO SONORA E ESCALA DECIBEL	11
3.2. ESPECTRO SONORO E CURVA DE PONDERAÇÃO A	14
3.3. MEDIÇÃO EM CAMPO LIVRE	16
3.3.1 NBR 10151/2000	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6. CONCLUSÕES	33
7. BIBLIOGRAFIA	34

1. RESUMO

Nos últimos anos houve um crescimento na utilização de veículos aéreos não tripulados, os VANTs, para diversas funcionalidades. Porém, este crescimento surge junto a uma preocupação com questões sobre a poluição sonora e seus possíveis impactos gerados pelos drones.

Para criação de uma regulamentação, que determinaria limites de ruído para a categoria, é necessário a realização de estudos no qual classificam características da emissão sonora como direcionalidade, presença de ruídos tonais e nível global de ruído.

Neste trabalho serão discutidos os principais métodos e normas vigentes para caracterização sonora a partir da realização de um ensaio com um VANT comercial com objetivo de identificar possíveis pontos críticos na discussão.

Palavras-chave: VANTs, nível global de ruído, acústica, emissão de ruído, direcionalidade.

2. INTRODUÇÃO

A aplicação dos RPAs (*remotely piloted aircraft system*), também conhecidos como VANTs ou *drones*, torna-se cada vez mais vasta em conjunto com a evolução tecnológica na qual permite sistemas de comunicação mais eficientes, materiais mais leves e, principalmente, no aprimoramento das baterias permitindo voos cada vez mais longos.

Dentre as aplicações possíveis, na agricultura pode ser utilizado para monitoramento e identificação de áreas irregulares na lavoura ou até mesmo na aplicação de defensivos agrícolas em uma determinada área. Também pode ser utilizado no ramo militar para transporte de carga, monitoramento de regiões e até mesmo para fins bélicos. Em adição, um dos tipos que mais cresce a utilização dos drones é o comercial, utilizado principalmente para recreação.

Outra vertente que tem atraído muita atenção é o uso de drones para a entrega rápida de mercadorias e refeições. Por exemplo, a empresa de entregas por aplicativo iFood em conjunto a empresa brasileira Speedbird recebeu a autorização para realizar testes nos quais drones serão utilizados para transporte de alimentos nas entregas na cidade de Campinas, no interior de São Paulo. Neste novo sistema, os VANTs não serão utilizados para a entrega diretamente para o consumidor, mas serão utilizados para sobrevoar trechos de congestionamento no qual veículos tradicionais teriam maior dificuldade, dessa maneira, aumenta-se a eficiência logística, tornando as entregas mais rápidas. [1]

Com valores cada vez mais acessíveis e o desenvolvimento da indústria com a entrada de novas empresas, os veículos tornam-se cada vez mais comuns no dia a dia das pessoas. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), órgão regulamentador deste mercado no Brasil, houve um crescimento de 11,3% nos registros de drones em 2021 em relação ao ano anterior, saindo de 79.858 para 90.030 drones registrados. [2]

Apesar da importância econômica e tecnológica, este aumento na frota dos drones no Brasil e no mundo todo traz questões a serem discutidas pela sociedade. Questões como a importância da regulamentação dos voos visando a segurança do tráfego aéreo para evitar acidentes com aeronaves de grande porte, assegurar a privacidade das pessoas, principalmente no perímetro urbano, sabendo-se que grande parte das aeronaves comerciais usadas para recreação possuem equipamento de fotografia ou vídeo e, por fim, toda a discussão da geração de ruído pelos quadrimotores e o debate de quais impactos ou incômodos esta poluição sonora podem ocasionar nas pessoas expostas.

Estudos da Organização Mundial da Saúde (OMS) determinam os impactos gerados

aos indivíduos quando sujeitos a diferentes níveis globais de ruído. A exposição a ruídos pode gerar desde perturbações do sono, impedindo que a pessoa atinja os estágios mais profundos do sono, estresse leva com excitação do sistema nervoso, perda de concentração e rendimento em tarefas ou até mesmo risco de perda auditiva depende da intensidade e do período de exposição. Assim, o nível sonoro está sujeito à regulação das autoridades competentes, sendo que no Brasil o nível sonoro em comunidades é avaliado de acordo com a norma NBR 10.151 [3], assim como eventual legislação local ou regional. As características específicas da fonte emissora também podem ensejar a formulação de normas específicas, como é o caso da decisão nº 389/2010/P, de 21/12/ 2010 da CETESB (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental), que regulamenta os níveis de ruído para sistemas lineares de transportes do Estado de São Paulo [4].

No caso dos VANTs, temos uma fonte sonora nova e com características próprias, seja pela sua potência sonora, espectro de emissão ou mesmo seu posicionamento espacial com relação aos eventuais receptores. Trata-se de uma fonte aérea, mas que guarda pouca relação com aviões ou helicópteros e é questionável se modelos para tais meios de transportes poderiam ser adaptados para si [5,6]. Além disso, há uma grande variedade de VANTs disponíveis, com dimensões e usos diversos e, conseqüentemente, diferentes características sonoras. Assim, torna-se importante compreender melhor as características desta nova fonte sonora, o impacto deste novo sistema de transporte e recreação na paisagem acústica das nossas cidades e a adequação das normas e modelos vigentes para a regulamentação do uso e emissão sonora pelos VANTs. Esta necessidade se torna mais urgente se considerarmos que o eventual impacto da introdução dos VANTs, se feita de maneira não regulada e cuidadosa, pode levar a uma reação inicial contrária da sociedade a esta nova tecnologia, podendo gerar resistências ao seu uso em larga escala [7].

O objetivo do presente trabalho é contribuir para a discussão acima por meio da verificação experimental do nível sonoro produzido por um drone comercial à luz das normativas vigentes e, eventualmente, mediante ao levantamento bibliográfico pertinente, discutir o impacto desta nova fonte sonora em comunidades urbanas.

Para alcançar os objetivos, introduziremos brevemente a problemática ocasionada pela crescente utilização de drones no mundo junto a uma introdução teórica de acústica aplicada e suas normas. Posteriormente, iremos propor uma metodologia para a avaliação do nível sonoro gerado por um VANT empregando equipamentos de medição sonora e *softwares* especializados adequados.

Dessa maneira, será possível comparar os resultados obtidos com a bibliografia disponível para assim analisar os possíveis impactos que os indivíduos podem estar sujeitos quando se trata da geração de poluição sonora por drones.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. PRESSÃO SONORA E ESCALA DECIBEL

Define-se som como a interpretação dos nossos sistemas nervosos centrais as variações da pressão no ambiente detectadas pelo nosso sistema auditivo, ou seja, a sensação gerada a um estímulo. As variações de pressão no ambiente podem ser ocasionadas por alto-falantes, pregas vocais, instrumentos musicais, dentre outras diferenças estruturais nas quais vibram continuamente as partículas da matéria ao redor, o ar nos casos citados anteriormente, gerando uma concentração e um distanciamento das partículas em um movimento oscilatório. [8]

Quando a frequência e a amplitude desta variação de pressão atingem um intervalo específico para humanos, o som é gerado. Nos seres humanos, este valor mínimo médio de pressão sonora no qual o sistema auditivo consegue identificar é próximo da ordem de 2×10^{-5} Pa e denomina-se limiar da audição. Porém, quando temos um aumento na escala deste fator, a pressão ambiente pode causar incômodos, dores ou até prejuízos ao indivíduo. Dentro da bibliografia diferentes valores são atribuídos ao chamado limiar da dor, de 20 a 200 Pa. [8]

Quando o comprimento de onda do som emitido é muito maior que as dimensões da fonte, as ondas sonoras geradas podem ser tratadas como onda esférica, e assim a pressão acústica p é dada pela fórmula:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr + \Phi) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde A é amplitude da pressão sonora, r é o raio ou distância da fonte de emissão, ω a frequência angular, k o número de ondas e Φ o ângulo de fase [8]. Fontes que irradiam igualmente em todas as direções (ondas esféricas) são chamadas de omnidirecionais. Já quando o comprimento de onda do som emitido é da ordem da dimensão da fonte ou menor, a radiação sonora da fonte tende a ser direcional. Isso significa que, nas altas frequências (pequenos comprimentos de onda), a fonte apresentará direções preferenciais de radiação sonora. Fontes sonoras perdem a omnidirecionalidade por apresentarem formato não esférico, ou porque a amplitude e fase das vibrações de suas diferentes superfícies não são uniformes, ou ambas. O resultado é mais som irradiado em determinadas direções do que outras. Em outras palavras, diferentemente da esfera pulsante a uma mesma distância da fonte, a pressão sonora gerada por fontes direcionais, a uma mesma distância da fonte, será diferente em

direções diferentes. Para descrever completamente uma fonte direcional é preciso então determinar seus índices de diretividade, que nada mais são que correções feitas as ondas esféricas para descrever esta emissão preferencial em diferentes direções de propagação. [9]

Apesar da pressão sonora ser expressa na unidade internacional de pressão Pascal, normalmente para a discussão de ruído emprega-se a noção de nível de pressão sonora, onde a pressão sonora é apresentada em uma escala logarítmica. Isto é conveniente, pois, a variação na intensidade sonora não é interpretada de modo linear pelo sistema auditivo, mas de maneira logarítmica.

Em 1923 a empresa estadunidense *Bell Telephone Laboratories*, também conhecida como *Bell Labs*, desenvolveu uma unidade escala de medida chamada bel (*B*), na qual comparava potências de sistemas de telefonia através do sinal elétrico. O diferencial desta medida era a compressão de uma escala linear ampla utilizando da escala logarítmica, onde a potência do sistema medido era comparada a uma potência referencial arbitrária. A escala bel era dada por:

$$bel = \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Com o tempo, os engenheiros da Bell Labs identificaram a necessidade de modificar a escala para que ela mostrasse com maior definição pequenas variações de potência, dessa maneira, os engenheiros criaram a escala decibel na qual 1 B era equivalente a 10 dB. [10]

A utilização da escala decibel, originalmente utilizada para comparativo de potências de sistemas elétricos, passou a ser aplicada no contexto de acústica a partir do momento em que o cientista Harvey Fletcher, da mesma Bell Labs, averiguou que 1 dB era a mínima variação perceptível de potência sonora pelo ser humano [10]. A partir deste momento, criou-se a unidade de sensação, dada por:

$$unidade\ de\ sensação = 10\log\left(\frac{W}{W_0}\right)dB \quad \text{Eq. 3}$$

Onde W é a potência sonora e W_0 é a potência sonora referência. Pode-se relacionar então, potência sonora com a intensidade sonora, sendo que a potência sonora é proporcional ao quadrado da intensidade. Dessa maneira, podemos escrever a fórmula, do que chamamos de nível de pressão sonora L_p :

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) dB = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) dB \quad \text{Eq. 4}$$

Porém, quando tratamos de exposições a um nível de pressão sonora por um longo período de tempo podem ocorrer ou não flutuações. No contexto de VANTs, por exemplo, uma medição realizada em campo aberto pode ter diversos tipos de interferências que possam causar tais flutuações. Desde uma rajada de vento que perturba a estabilização no qual exige mais potência dos motores até emissões pontuais como trânsito de veículos automotores ou animais como pássaros e cachorros. Para contornar essas variações, utilizamos o que chamamos de nível equivalente sonoro, ou em inglês *equivalente continuous sound level, Leq*. Este nível equivalente representa a média de todas as exposições durante um tempo de exposição t e é dado pela fórmula [11]:

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{t} \int_0^t \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Podemos também relacionar o nível de pressão sonora com outra grandeza, a intensidade sonora I . A intensidade sonora é definida como a quantidade média de energia que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda sonora, dado pela unidade watt por metro quadrado (W/m^2). Podemos relacionar a intensidade sonora com a pressão sonora na equação 6:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde c é a velocidade da onda sonora no meio em metros por segundo (m/s) e ρ é a densidade do meio em kilogramas por metro cúbico (kg/m^3). Além da pressão sonora, podemos relacionar a intensidade sonora com a potência sonora da fonte de emissão. Considerando uma esfera pulsante sendo irradiada por uma potência constante, a fórmula da potência sonora W em watts (W) é dada por:

$$W = \frac{I}{4\pi r^2} \quad \text{Eq. 7}$$

Dessa maneira, podemos observar que a intensidade sonora diminui com o quadrado da distância da fonte sonora r . Isto ocorre pois quando aumentamos o raio, a mesma potência sonora terá atravessar uma área perpendicular maior, caso o raio dobre, a área será quatro vezes maior, por exemplo. [8]

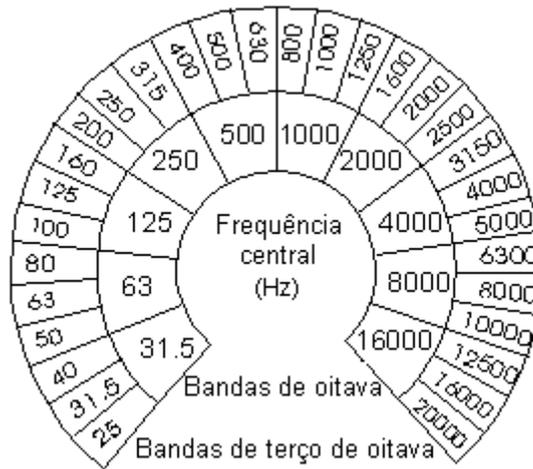
3.2. ESPECTRO SONORO E CURVA DE PONDERAÇÃO A

Na análise de uma medição de som, uma das principais ferramentas de estudo do mesmo é a análise do espectro de frequências do sinal sonoro. O espectro de um som é como a identidade do mesmo, a partir dele é possível visualizar as contribuições de diversas frequências em um som ou mesmo se existe a predominância ou não de alguma frequência específica. No caso de frequências que se predominam sobre outras pode-se associar essa frequência a uma fonte sonora específica, a qual já é conhecida pelas suas frequências características (por exemplo, tipos de maquinário). O espectro de frequências de um sinal no tempo é calculado pela Transformada de Fourier do sinal, que transforma uma função no domínio do tempo para uma função no domínio da frequência. Na análise de medidas discretas, como o que ocorre no processamento de sinais de ruído, onde a aquisição de níveis sonoros no tempo se realiza por amostragem e por sensores digitais, utiliza-se um procedimento de cálculo mais simplificado conhecido como Transformada Rápida de Fourier - FFT (Fast Fourier Transform). [13]

No caso de um som puro, de uma única frequência, o resultado da Transformada é um sinal com pico na mesma frequência de intensidade igual à média RMS da amplitude pico-a-pico do sinal original no tempo. Para o caso de um sinal multi-senoidal o resultado é mais de um pico, em todas as frequências presentes no sinal. Já no caso de um sinal aleatório existem componentes em todas as frequências.

O espectro sonoro obtido via FFT, todavia, é complexo e pouco útil para a regulamentação do ruído e padronização de procedimentos. Para simplificar a apresentação do espectro sonoro, pode-se fazer a análise por bandas de frequência. Neste caso, o som é filtrado por um conjunto de filtros passa banda e o nível de pressão sonora associado ao intervalo do filtro de cada banda é registrado. Cada banda é identificada por sua frequência central e pela largura da banda. Os filtros mais utilizados são os de oitava e de terço de oitava sendo que, para permitir a comparação entre diferentes medidas e modelos, trabalha-se sempre com bandas padrões, que são as indicadas na Figura 1.

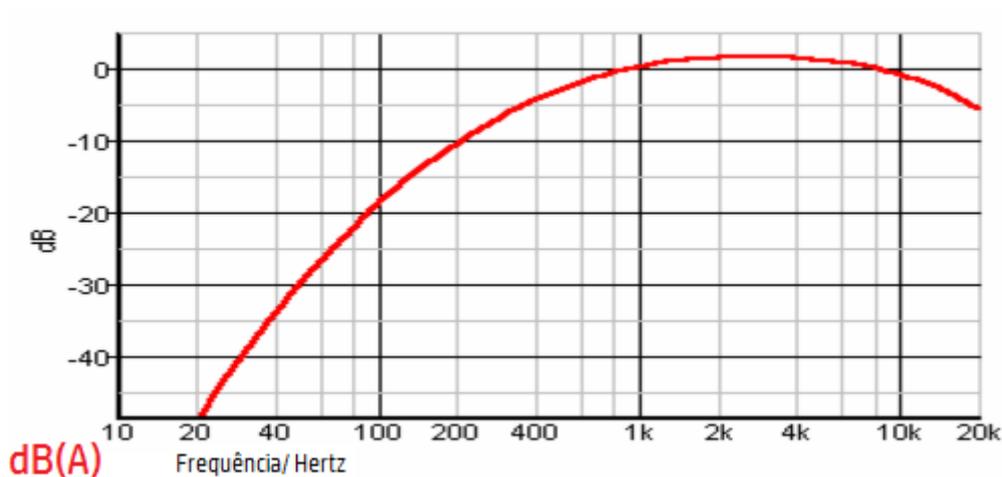
Figura 1: Bandas de oitava e terço de oitava padrões. Fonte: ACOEM



O espectro sonoro expresso em bandas de oitava ou de terço de oitavas ainda não é, todavia, a maneira mais útil de apresentar o som. Isto porque na medição de ruído pelos equipamentos de captação acústica, os resultados obtidos na variação dos níveis de pressão sonora podem não condizer com a percepção que um ser humano teria no ambiente. Isto ocorre pois o sistema auditivo humano interpreta o som de maneira diferente, dependendo não apenas da pressão, mas também da frequência da onda. Seres humanos interpretam as frequências médias melhor do que as frequências altas e baixas, dessa maneira, cria-se a necessidade de um fator de correção para aproximar a leitura do equipamento com a percepção humana. Surgem assim os filtros ponderadores. [11]

Um dos filtros utilizados para simular a percepção humana em diferentes frequências, é o filtro A, também conhecido como curva de ponderação A. Este filtro é um fator de correção no qual a pressão sonora para cada frequência do espectro audível pelos humanos, de 20Hz a 20KHz, é corrigida por um valor dado pela curva de ponderação. Tal como apresentado abaixo na Figura 2:

Figura 2: Curva de ponderação A [14]



Para demonstrar a utilização do filtro ponderado em uma medição do nível de pressão sonora em decibéis, utiliza-se a notação dB(A). Por proporcionar uma medida mais proximamente relacionada com a percepção humana, a ponderação A é largamente empregada na avaliação de ruído, psicoacústica e sempre que a percepção subjetiva do ruído é importante.

3.3. MEDIÇÃO EM CAMPO LIVRE

Realizar medições acústicas em um laboratório onde é possível ter um maior controle de variáveis traz como vantagem a obtenção de resultados mais acurados. Sendo assim, este tipo de estudo se torna a melhor opção quando tratamos de casos nos quais o resultado da medição precisa de uma acurácia maior. Como por exemplo um teste para medir o nível da potência sonora emitida por um equipamento para determinar se ele está seguindo padrões legais para ser comercializado. Também vale pontuar que o ambiente laboratorial afeta o resultado da medida sonora, já que o nível de pressão sonora obtido será dado não só pelo som direto emitido pela fonte mas também pelo campo reverberante devido ao ambiente fechado do laboratório. Assim, medidas em ambientes fechados devem ser realizadas em câmaras anecóicas ou semi-anecóicas.

Por outro lado, há situações em que queremos averiguar o impacto sonoro de uma dada fonte em um ambiente específico, como uma cidade. Nestas situações é importante notar que a complexidade do ambiente tem grande influência no resultado final da análise e assim é fundamental analisar a emissão sonora em campo livre.

Porém, quando tratamos de medições realizadas em ambiente aberto, onde o meio em questão interfere diretamente no resultado da medida, é necessário atentar-se a possíveis fatores de influência e tentar, da melhor maneira, reduzir essas variáveis. Fatores como: as condições atmosféricas (umidade, vento e temperatura) afetam o meio de propagação do som e interferem diretamente na captação; o ruído de fundo como automóveis, cortadores de grama, obras em andamento, animais e pessoas podem gerar com picos indesejáveis ou ruído de fundo que afetam o resultado; outro fator para se atentar são as superfícies refletoras, nas quais a presença é indesejável devido ao efeito de reflexão do som que também causa distorções nas medidas.

3.3.1 NBR 10151/2000

Para contornar os fatores de influência citados anteriormente, existem diversas normas criadas pela indústria e órgãos regulamentadores, como a ABNT com a finalidade de padronizar as medições em determinadas condições.

Dentre essas normas, a NBR 10151 determina as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, especificando um método para a medição de ruído e aplicação de correções caso o ruído apresente características especiais. A avaliação normalizada envolve medições do nível de pressão sonora equivalente em decibéis ponderados em A. Estes valores experimentalmente obtidos devem então ser comparados com os níveis critérios especificados na norma, sendo aplicadas as penalidades devidas para situações particulares como, por exemplo, ruídos com característica tonal. [3]

Sobre os procedimentos de medição para ambientes externos, a norma condiciona a utilização de escudos de vento nos microfones, para isolar a influência do vento na captação e determina a distância mínima de 2 metros para superfícies refletoras (como muros e parede) e aproximadamente 1,2 metro do piso. Além disso, determina que medições não devem ser realizadas na existência de interferências provenientes de fenômenos naturais como trovões e chuvas fortes. Para a coleta de dados, a norma não determina a quantidade amostral, podendo envolver uma amostra única ou uma sequência delas. Em adição, o tempo de medição deve ser determinado de modo que permita a caracterização do ruído em questão. Deve-se empregar sonômetros classe 1, que devem ser calibrados antes de cada sessão de medidas. [3]

Além disso, a norma define uma penalidade de correção de 5 dB(A) para ruídos com caráter tonal. Isto porque sons com características tonais causam mais incômodos do que sons onde a energia sonora está mais uniformemente distribuída. Um ruído tonal é aquele no qual é possível identificar um tom puro a partir de tonalidades marcadas. A norma francesa NFS

31010, norma referência para mensuração de ruído ambiental, define uma tonalidade marcada aquela na qual a diferença entre as quatro bandas de $\frac{1}{3}$ de oitava mais próximas atingem ou ultrapassam os níveis de 10 dB para a faixa de frequência de 63 Hz a 215 Hz, 5 dB para a faixa de 400 Hz a 1250 Hz e 5 dB para a faixa de 1600 Hz a 6300 Hz.

Por fim, a norma define um nível de critério para avaliação para ambientes externos para diferentes tipos de áreas para o período diurno (das 7 hrs às 22 hrs para dias comerciais e 9 hrs às 22 hrs para feriados e domingos) e noturno (das 22 hrs às 7hrs para dias comerciais e 2 hrs às 9 hrs para feriados e domingos), os valores estão indicados na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: nível de critério de avaliação para ambientes externos, em dB(A) [3]

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

4. MATERIAIS E MÉTODOS

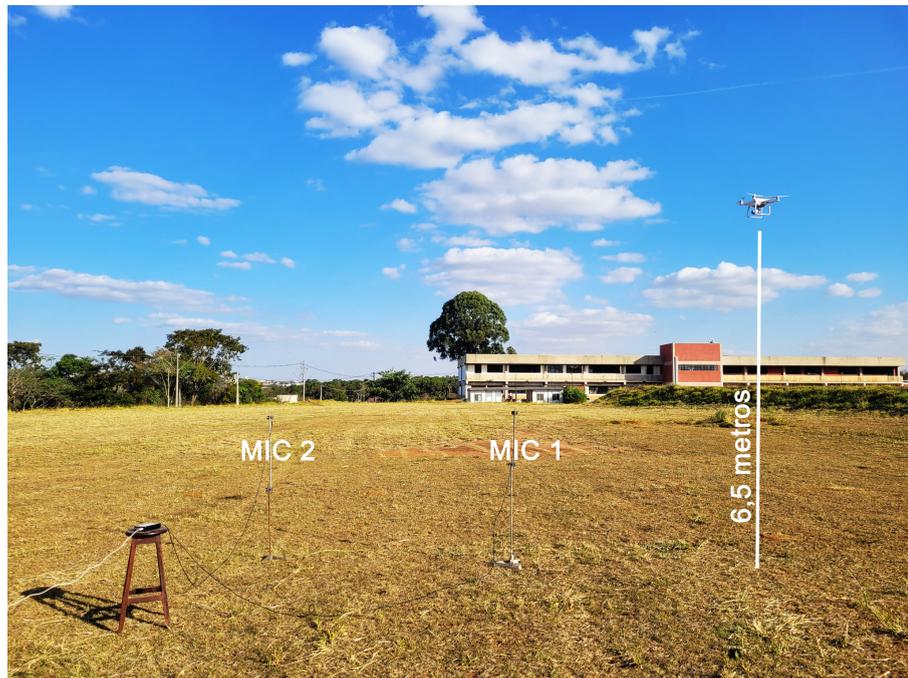
Neste trabalho buscamos desenvolver um procedimento simples para a avaliação do nível sonoro gerado por um VANT pairando estático em situação de campo livre. Para tanto, empregamos um VANT comercial Phantom 4 Pro V2.0, ilustrado na Figura 3, mantido estático a uma altura de 6,5 m, altura determinada por ser o mínimo valor para voo pelo software do aparelho.

Figura 3: Phantom 4 Pro V2.0



Dois microfones condensadores para campo livre de ½” G.R.A.S. 46AE, equipados com escudos de vento apropriados, foram dispostos a uma distância de 2,5 m (microfone 1) e 5,0 m (microfone 2) a partir do ponto de decolagem do VANT, e a 1,5 m acima do nível do solo, como ilustrado na Figura 4. Os dados foram coletados por um sistema de 4 canais dB4 (01dB-Metravib) e posteriormente analisados com o software dBFA (01dB-Metravib). Antes de cada sessão de medidas, ambos microfones foram calibrados individualmente com um calibrador classe 1 (01 dB-Metravib) e as medidas foram realizadas utilizando-se a ponderação de tipo A.

Figura 4: montagem realizada para coleta de dados. Na imagem os microfones ainda estão sem seus escudos de vento.



Como locação para as medidas foi escolhida uma ampla área plana e gramada no extremo nordeste do campus São Carlos da UFSCar, apresentada na Figura 5. Esta área, próxima ao edifício do Centro de Pesquisas em Materiais Avançados e Energia (CPQMAE), é bastante isolada tendo pouco trânsito de veículos e pessoas, além de ser vizinha a área de preservação do cerrado, sendo assim uma área bastante silenciosa. As medidas foram feitas em dia de vento fraco e interrompidas sempre que lufadas de vento mais intensas eram percebidas.

Figura 5: imagem de satélite da localização do experimento, sendo o triângulo o ponto de partida do VANT



Para efeitos comparativos, realizou-se medidas do nível de ruído global antes e depois do voo do quadrimotor. Como o ruído do VANT pairando é bastante uniforme, foram adotadas medidas de 100 s de duração. Para analisar a direcionalidade do ruído emitido, com auxílio do software do VANT, o próprio era girado em torno do próprio eixo vertical em passos de 45°, e as medidas repetidas.

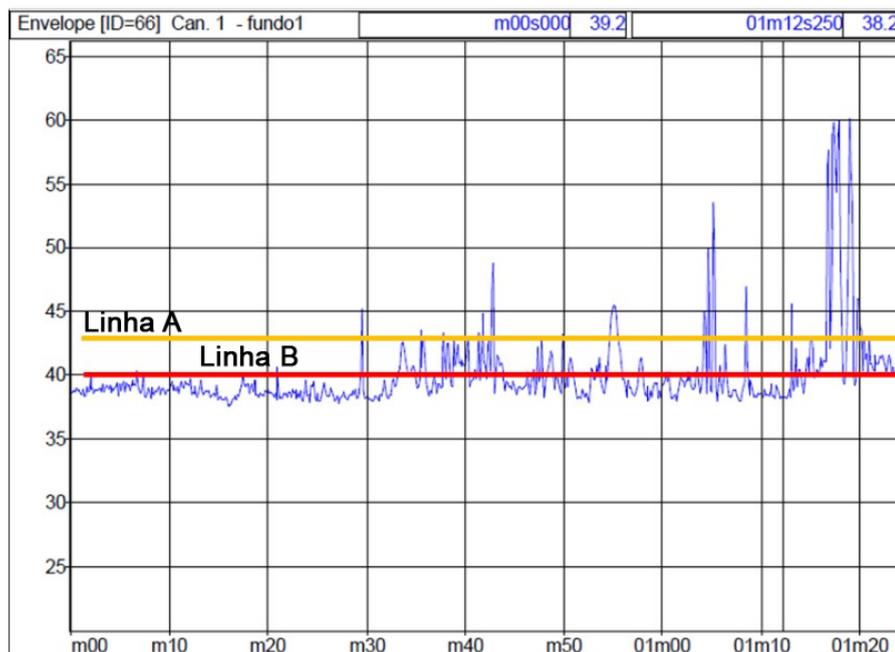
No software do programa, obteve-se o nível global de ruído para todas as medições, atentando-se a exclusão de trechos com possíveis eventos intrusivos. Em seguida, gerou-se um gráfico relacionando as medições de nível global de ruído e o ângulo de rotação para avaliação de um possível fator de direcionalidade da emissão neste eixo.

Para identificar um possível caráter tonal da emissão e, assim, aplicar a penalidade definida pela NBR 10151, gerou-se o espectro de banda de $\frac{1}{3}$ de oitava para comparar as bandas destaque com as 4 bandas vizinhas mais próxima a partir dos padrões definidos pela NFS 31010. Além disso, gerou-se um sonograma a partir de uma das medidas realizadas para constatar a constância das medições realizadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para ilustrar o significado do nível equivalente e alguns cuidados necessários durante a realização de medidas e/ou suas análises, apresentamos no Gráfico 1 abaixo uma das nossas medidas de ruído de fundo.

Gráfico 1: medição do nível de ruído de fundo (dB(A), eixo vertical) em função do tempo (minutos, eixo horizontal).



Podemos ver que o nível sonoro permanece abaixo do nível de 40 dB(A) durante boa parte da medida, até que uma lufada de vento próximo ao seu 1min20s causa um grande aumento no nível sonoro, quando então a medida é interrompida.

Observem que esta medida foi feita usando escudo de vento e portanto a influência do vento já se encontra fortemente reduzida. Ainda assim, quando calculamos o nível sonoro equivalente de toda a medida, encontramos $Leq(A) = 43,2$ dB(A) (linha A). Já quando limitamos nosso cálculo aos 72 segundos iniciais da mesma, retirando o aumento causado pela lufada, o nível equivalente é significativamente menor ($Leq(A) = 39,2$ dB(A)) e representa com maior acuidade o nível sonoro do local onde as medidas foram realizadas.

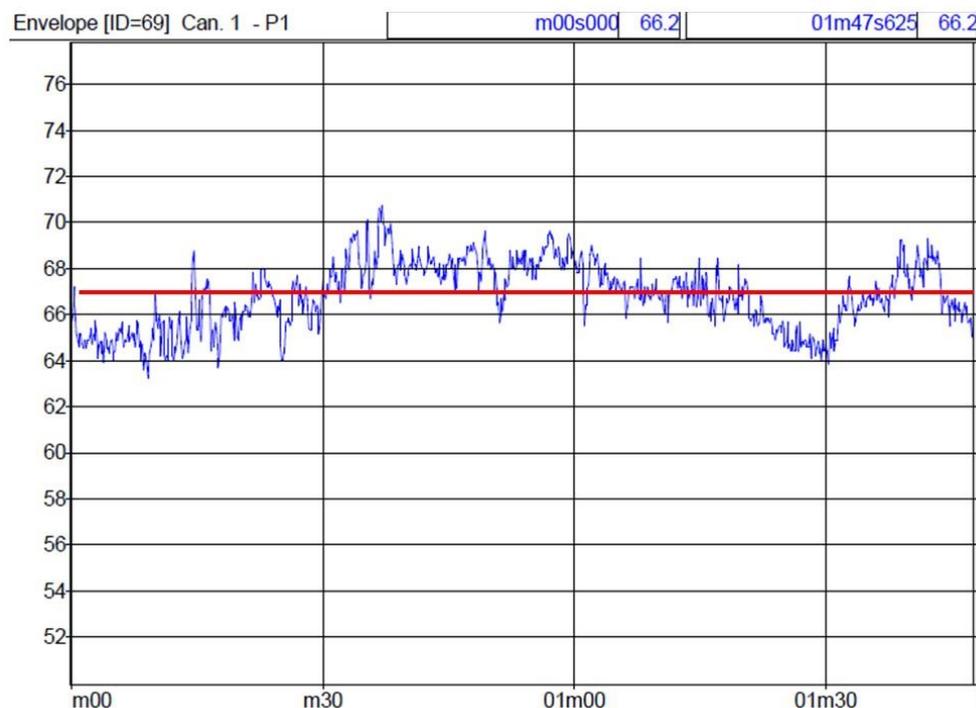
Vejam que as linhas estão acima da maior parte da medida. Isto porque o nível equivalente essencialmente distribui a energia acústica contida nos eventos intrusivos que ocorreram em um determinado período em um único valor que, quando tomando a duração

total da medida, tem a mesma energia acústica da medida em si.

Assim, percebemos a importância de realizar medidas extensas, de tal maneira que a influência destes eventos intrusivos seja melhor diluída e não afete tanto o nível equivalente calculado. Entretanto, medidas envolvendo VANTs são também limitadas pela duração das baterias, não sendo prático realizar múltiplas medidas de 10 a 15 minutos cada uma. Por isso, optamos por medidas mais curtas porém posteriormente analisadas cuidadosamente para validar cada medida. Pode-se também observar que ainda que os equipamentos empregados tenham uma precisão muito alta, o erro nos valores dos níveis equivalentes obtidos pode ser significativo caso tenhamos muitos eventos intrusivos durante a medida, sendo o vento o mais comum deles.

Neste aspecto, no Gráfico 2, vale a pena observar o nível sonoro em função do tempo para uma medida do ruído do VANT. Veja que neste caso o nível sonoro é muito mais alto do que no caso do ruído de fundo, de tal forma que a influência de eventos intrusivos nesta medida é mínima. Também observamos que o ruído do VANT é relativamente constante, variando ± 3 dB(A) em torno do nível equivalente $Leq(A) = 67$ dB(A) (linha vermelha).

Gráfico 2: medição do nível de ruído do drone (dB(A), eixo vertical) em função do tempo (minutos, eixo horizontal).



Com a função do nível global de ruído demonstrada, considerando que a fonte de emissão é constante, ao realizar diversas medições, variando apenas o ângulo do VANT em relação ao posicionamento da disposição de microfones, é possível analisar uma possível correlação entre o nível global de ruído e o ângulo, identificando um possível fator de direcionalidade na emissão.

Os resultados do nível global de ruído anterior à decolagem do quadrimotor no microfone 1 (5,59 metros de distância do drone) e no microfone 2 (7,07 metros de distância do drone) foram 43,2 dB(A) e 41,0 dB(A), respectivamente. A partir dos resultados obtidos para o ruído de fundo, realizou-se as medidas com o VANT em voo e obteve-se os seguintes resultados demonstrados na Tabela 2.

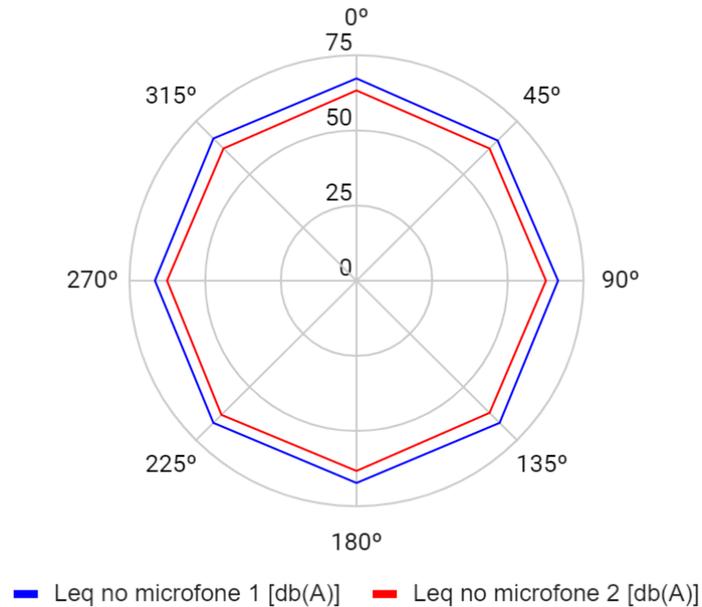
Tabela 2: nível de global de ruído obtido nos microfones.

Ângulo em relação aos microfones	Nível global de ruído no microfone 1 [dB(A)]	Nível global de ruído no microfone 2 [dB(A)]
0°	67,0	63,5
45°	66,4	62,6
90°	66,7	62,4
135°	67,0	62,6
180°	67,5	63,6
225°	67,3	63,1
270°	66,6	62,8
315°	67,2	62,6
Média	67,0	62,9
Desvio Padrão	0,4	0,5

Quando inserimos os resultados obtidos em função do ângulo do drone em relação aos microfones em um gráfico de tipo de radar com a finalidade de observar o fator da direcionalidade, obtemos o seguinte resultado:

Gráfico 3: relação entre o nível global de ruído e o ângulo de emissão do VANT no eixo horizontal

Nível global de ruído em função do ângulo



Ao analisarmos a formato do quadrimotor utilizado, podemos observar a disposição das hélices em formato de “X”, como ilustrado na Figura 6, tal posicionamento não uniforme poderia gerar um fator de direcionalidade de mesma ordenação ou de maneira polar entre as hélices laterais. Da mesma maneira, a vibração de algum componente da estrutura do VANT poderia causar uma emissão direcional.

Figura 6: visão superior do drone DJI Phaton 4 Pro V2.0. Fonte: Tecno Drones.



Porém, quando dispomos os dados em um gráfico de radar, Gráfico 3, visualmente

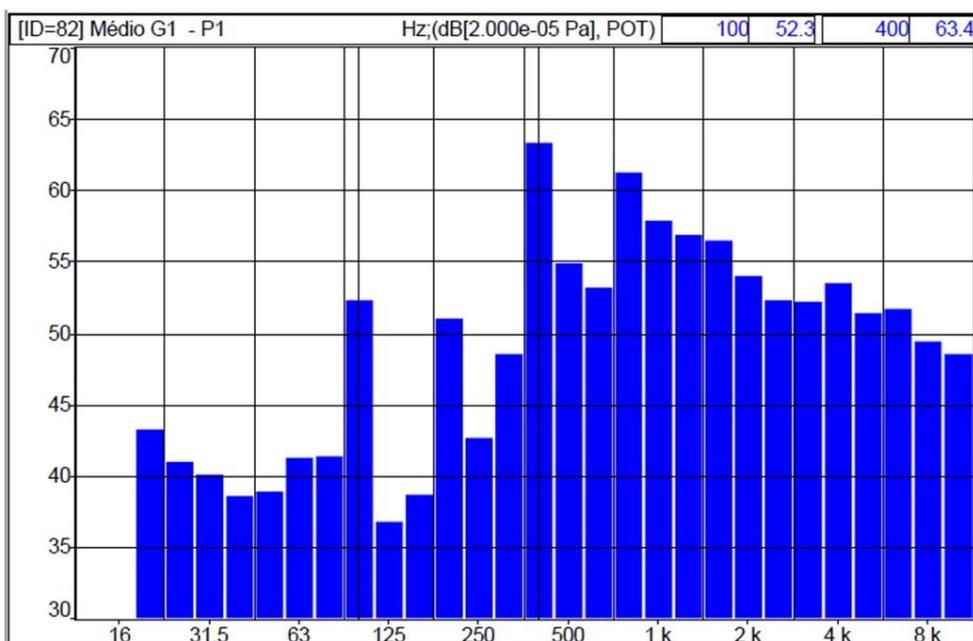
não observamos nenhuma alteração em alguma posição do nível global de ruído, sendo um valor quase constante em toda a volta, tanto para a captação no microfone 1 quanto no microfone 2, como esperado.

A percepção visual gerada pelo gráfico de radar é reforçada quando analisamos estatisticamente os resultados através do desvio padrão, no qual, quanto mais próximo de zero, maior a constância dos resultados. Os resultados obtidos foram o desvio padrão de 0,4 para as medidas do microfone 1 e 0,5 para o microfone 2, permitindo a conclusão de que não há relação entre a variação do ângulo horizontal e a pressão sonora gerada pelo VANT.

No entanto, a análise realizada é referente ao eixo horizontal do drone, o que abre a possibilidade de em um trabalho futuro uma outra análise referente ao eixo vertical. Como os VANTs utilizam hélices que propulsionam o ar no sentido vertical, este caráter pode influenciar também na direcionalidade da emissão abaixo e acima do drone. Do mesmo modo que é possível pensar na influência do deslocamento do VANT, onde haveria uma suposta potencialização de um conjunto de motores em relação a outros para gerar o movimento.

Para iniciarmos uma análise, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os valores referência da NBR 10151, primeiramente devemos classificar se a emissão sonora do VANT possui característica tonal a partir do Gráfico 4.

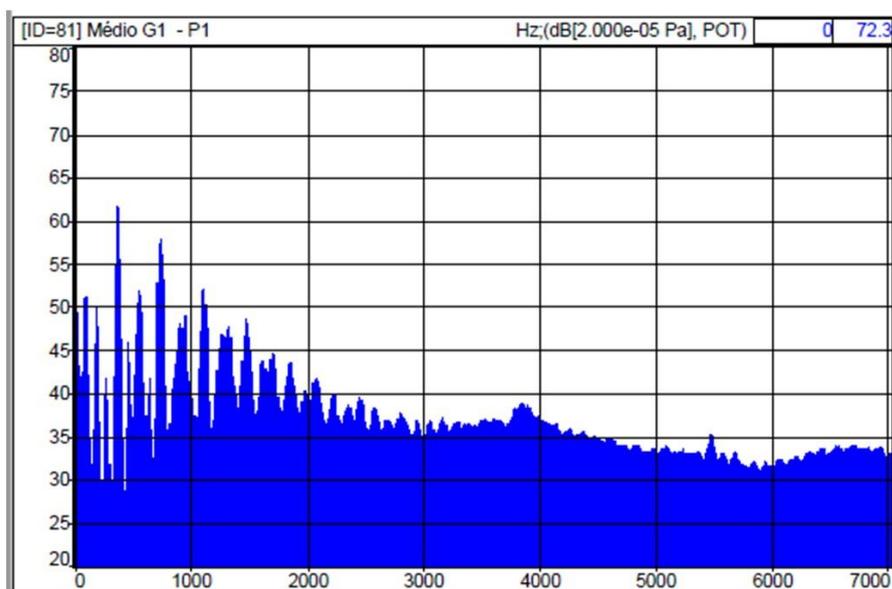
Gráfico 4: nível global de ruído (dB(A), eixo vertical) em função das frequências de $\frac{1}{3}$ de oitava (Hz, eixo horizontal) medido com o VANT em atividade.



Podemos ver no gráfico acima que as bandas de 100 e 400 Hz apresentam-se em destaque, com valores ao menos 21 e 8,5 dB, respectivamente, acima das quatro bandas vizinhas (duas de cada lado). Podemos então concluir que o ruído do VANT apresenta característica tonal já que tanto a banda em 100 Hz quanto a em 400 Hz pois satisfazem o critério da norma francesa NFS 31010 de uma diferença de 10 dB(A) do nível equivalente da banda em relação as quatro bandas mais próximas para frequências de 63 Hz a 215 Hz e 5 dB(A) para a faixa de 400 Hz a 1250 Hz.

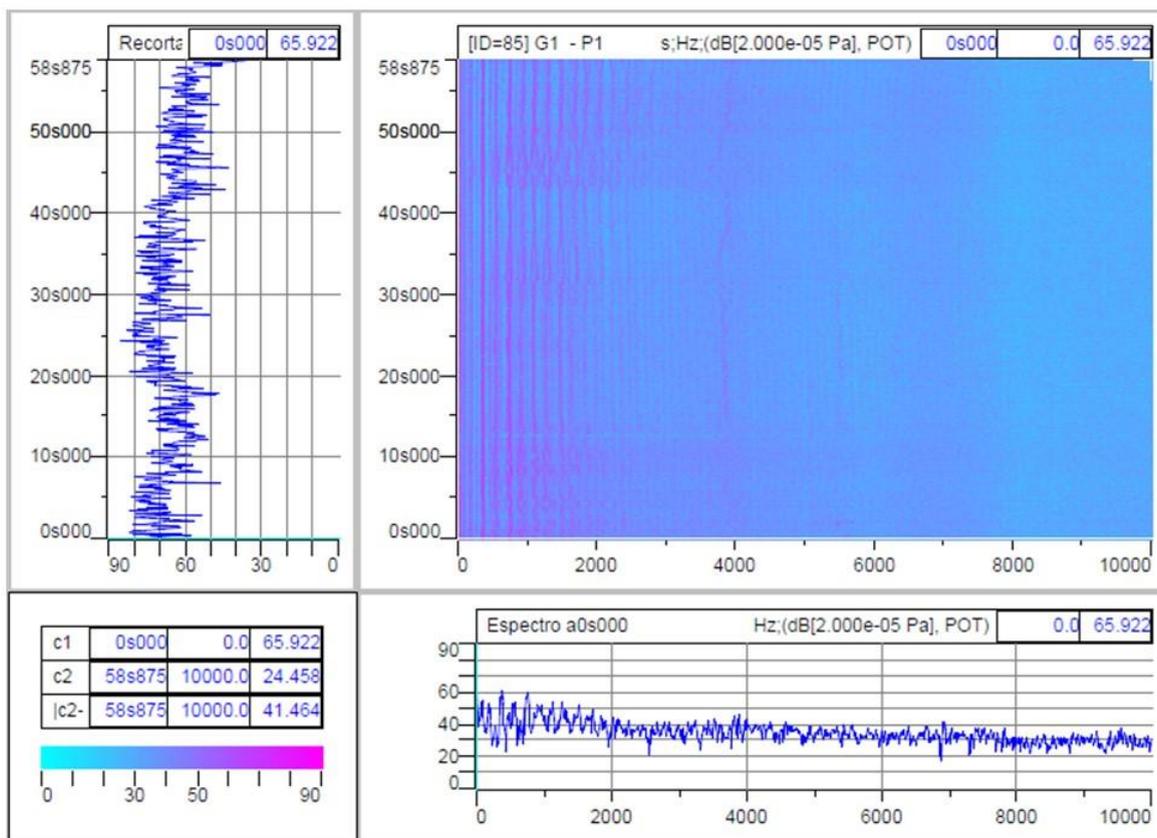
A característica tonal do ruído do VANT não é, de fato, uma surpresa já que trata-se de equipamento com motores elétricos que promovem a rotação das quatro hélices com frequências bem definidas, além das vibrações características do corpo do equipamento. Para ilustrar esta característica do ruído, apresentamos abaixo, no Gráfico 5, o espectro em banda estreita (FFT) deste mesmo ruído, onde podemos observar claramente que a emissão é concentrada em diversos picos regularmente espaçados, especialmente para frequências abaixo de 3000 Hz.

Gráfico 5: espectro de banda estreita do ruído emitido pelo VANT, nível equivalente (dB(A), eixo vertical) em função da frequência (Hz, eixo horizontal)



Outra maneira interessante de analisar estes dados é a partir do sonograma, mostrado na Figura 7, que nada mais é do que o registro da evolução temporal do espectro do som medido no qual nos permite avaliar as variações do nível equivalente para cada frequência durante toda a medição.

Figura 7: sonograma gerado pela emissão sonora do VANT.



Aqui fica claro como o ruído do VANT é constante no tempo, inclusive em termos de espectro. Outro ponto interessante é que podemos perceber que aos 33 e 43 s de medida temos como que uma bifurcação dos picos em frequência do ruído. Especulamos se isso não poderia se dever ao processo de estabilização do VANT, que para se manter estático quando empurrado pelo vento modifica a velocidade de rotação de seus motores, acelerando os motores de um lado e reduzindo a velocidade dos motores do outro lado.

Descartando a possibilidade de um fator de direcionalidade na emissão sonora no eixo horizontal do VANT, podemos analisar o nível global de ruído a partir dos resultados obtidos em todas as direções. Ao realizarmos a média dos resultados obtidos nos microfones 1 e 2, obtemos o resultado de 67,0 dB(A) e 62,9 dB(A), respectivamente. Tal diferença entre os resultados dos microfones, é totalmente esperada e compreendida devido à distância entre os microfones e o VANT.

A partir da conclusão do caráter tonal da emissão, podemos aplicar a correção de 5 dB definida nos resultados da Tabela 3, dessa maneira obtemos os seguintes resultados:

Tabela 3: nível de global de ruído obtido nos microfones com a correção realizada devido a identificação de ruídos tonais.

Ângulo em relação aos microfones	Nível global de ruído no microfone 1 [dB(A)]	Nível global de ruído no microfone 2 [dB(A)]
0°	72,0	68,5
45°	71,4	67,6
90°	71,7	67,4
135°	72,0	67,6
180°	72,5	68,6
225°	72,3	68,1
270°	71,6	67,8
315°	72,2	67,6
Média	72,0	67,9
Desvio Padrão	0,4	0,5

A partir dos resultados da tabela, podemos obter os novos valores médios para as medições no microfone 1 e microfone 2, sendo 72,0 dB(A) e 67,9 dB(A), respectivamente. Quando comparamos esses resultados como nível de critério de avaliação para áreas estritamente residenciais urbana ou de hospitais ou de escolas, de 50 dB(A), observamos um resultado possivelmente alarmante, no qual há uma diferença considerável de 22 dB(A) para distâncias de 5,59 metros e de 17,9 dB(A) para distâncias de 7,07 metros. Mesmo se compararmos nossos resultados com uma o nível de critério para uma área mista, com vocação recreacional, de 65 dB, os resultados ainda continuariam acima do estipulado.

Ao pensarmos o drone como alternativas para substituição de algumas formas tradicionais de transporte, é necessário também compará-los a estas fontes. Para efeitos comparativos, podemos comparar os resultados obtidos com outros valores referentes à bibliografia. Por exemplo, a ABNT através da NBR 15145:2004 determina os limites de ruído máximos para motocicletas de até 125 cm³ em 77 dB(A), nível um pouco acima do obtido em nossa medição. [11]

Em adição, podemos também comparar nossos resultados a possíveis respostas estimadas da comunidade devido a variação do nível de ruído gerado, na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: resposta estimada da comunidade ao ruído a partir da variação do nível equivalente corrigido e o nível critério. [11]

Valor em dB(A) da variação	Descrição
0	Não se observa reação
5	Queixas esporádicas
10	Queixas generalizadas
15	Ação comunitária
20	Ação comunitária vigorosa

Dessa maneira, se definirmos o nível de critério a partir da Tabela 1 como uma área estritamente residencial urbana ou de escolas, um ruído gerado por VANTs com proximidade similar ao realizado experimentalmente teria potencial de gerar reações da comunidade local como ações comunitárias. Vale ressaltar, quando se realiza estudos de ruído ambiental, é necessário a realização de medidas por longos períodos de tempo, dessa maneira a presença de um drone por curto período não seria capaz de influenciar no nível equivalente geral, sendo necessário um grande tráfego de equipamentos para termos uma real influência sonora.

Em contrapartida, ao pensarmos a fundo estes resultados sobre a óptica da aplicação dos VANTs para entregas de alimentos, assim como está sendo usado pela empresa iFood, onde os voos são realizados a dezenas de metros de altura, tal resultado pode tornar-se menos preocupantes na questão de poluição sonora e impactos para indivíduos. Vale ressaltar que o drone utilizado no experimento é um drone utilizado para filmagens e monitoramento de regiões, um drone que é utilizado para esse tipo de entregas possui características diferentes, como tamanho e potência, que influenciam diretamente na pegada acústica gerada.

Neste contexto, existem alternativas para amenização do problema como definição de rotas áreas nas quais utilizam-se de vias mais movimentadas, e, por consequência, mais barulhentas para mascarar o ruído advindo do VANT ou criação de uma legislação na qual define distanciamentos mínimos de áreas críticas no qual o ruído pode ser prejudicial. Porém, podemos pensar nos locais de pouso e decolagem e seus possíveis impactos para funcionários e civis ao entorno. Considerando o grande volume de entregas no qual uma cidade como

Campinas pode ter devido sua grande população, o tráfego constante de drones para moradores próximos ou até trabalhadores desses locais pode trazer incômodos.

Podemos traçar um paralelo dos drones com outras fontes de emissão tradicionais como aviões, caminhões e trens. Algumas destas fontes, se analisadas da mesma maneira que o drone também foi neste trabalho, também ultrapassarão os limites determinados pela NBR 10151, porém o uso destes meios de transporte é imprescindível para a economia, do mesmo modo que a utilização de VANTs pode se tornar no futuro. Mas o que podemos destacar nestas categorias são as normas e lei vigentes específicas para a própria modalidade, dessa maneira não se cria um padrão impeditivo no qual seria inatingível para mecanismos de grande porte. Por exemplo no caso dos sistemas lineares de transportes em São Paulo, como citado anteriormente, que possuem a decisão da CETESB nº 389 de 21/12/2010 para aprovar e regulamentar níveis de ruídos no estado para controlar a poluição sonora em áreas urbanizadas. A decisão estipula níveis máximos de ruído para áreas de até 150 metros das vias durante o período diurno. Para cálculo do nível sonoro equivalente, considera-se variáveis como nível de ruído ponderado em A durante a passagem da composição ferroviária, o nível de ruído ponderado em A característico (sem a influência da composição), tempo médio audível de uma passagem e o fluxo. A partir do nível calculado, define-se níveis máximos para cada período do dia para diferentes tipos de ocupações próximas a via (unidades básicas de atendimento a saúde, creches, comércios, serviços locais, universidades, etc) e determina responsabilidades de implantação de medidas mitigadoras caso seja constatado nível sonoro acima dos padrões. [4]

Ao redor do mundo países e comissões internacionais iniciam estudos e regulamentações para esse novo mercado, por exemplo o caso da Europa. A Comissão Europeia emitiu em 2019 a regulamentação 2019/945 na qual determinava um valor máximo para nível de pressão sonora com ponderação em A para diferentes categorias de drone a partir da ISO 3744:2010, na qual implica medições em campo livre sobre terrenos refletivos. Porém, esta determinação foi criticada por não abarcar as diferentes emissões para as diferentes situações como decolagem, pouso, momento de voo, além de não determinar também outras características acústicas importantes como componentes tonais, flutuações no nível sonora, ruído de alta frequência, etc. [6]

O caso anteriormente citado demonstra uma nova frente, caminhos e dificuldades para uma categoria em ascensão no mercado como os VANTs. Para a criação de uma possível regulamentação, é necessário desenvolvimento de estudos para avaliar os impactos dos veículos sempre atentando-se às particularidades do veículo e aplicações pensando na

interação da emissão sonora com o ambiente e indivíduos.

6. CONCLUSÕES

Ao estudar experimentalmente o comportamento acústico de um VANT comercial em pleno voo em campo livre, foi possível neste trabalho discutir conceitos teóricos acústicos como a ausência da direcionalidade horizontal, o caráter tonal presente nas frequências de 100 e 400 Hz seguindo normas internacionais e a comparação do nível global de ruído com normas vigentes no país e comparar com referências apontadas na bibliografia.

Porém, apesar dos resultados indicarem um nível de poluição sonora com possível potencial para gerar impacto em comunidades, no qual seria problemático devido ao contexto da utilização dos VANTs que, diferente de outros veículos aéreos, tem o agravante de se aproximarem muito das pessoas, existem métodos para combater tal nível de ruído. Como o mascaramento acústico através do sobrevoo em vias mais movimentadas ou mesmo a possibilidade de criação de leis ou normas para regulamentar a prática, assim como é realizado em outras conjunturas como em sistemas lineares de transporte.

Neste sentido, países na Europa já discutem normas para a regulamentação da prática, que demonstra grande potencial de evolução e utilização em massa no futuro por grandes empresas. Contudo, é necessário discutir teoria e os métodos para o desenvolvimento destas normas a partir das particularidades da categoria.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] PACETE, Luiz Gustavo. **Como funciona uma entrega por drone?**. [S. l.]: Forbes, 11 fev. 2022. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-tech/2022/02/como-funciona-uma-entrega-de-delivery-por-drone/>. Acesso em: 31 ago. 2022

[2] SANTOS, Cler. **Voando alto: registro de drones cresce 11,3% no Brasil e 18,8% em Minas**. [S. l.]: Estado de Minas, 21 fev. 2022. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2022/02/21/internas_economia,1346547/voando-alto-registro-de-drones-cresce-11-3-no-brasil-e-18-8-em-minas.shtml. Acesso em: 16 ago. 2022.

[3] ABNT NBR 10151 - **Acústica - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, Visando o Conforto da Comunidade** - Procedimento, 2000.

[4] CETESB, **Portaria nº 389/2010/P**, 2010

[5] Christian, A.W.; Cabell, R. **Initial Investigation into the Psychoacoustic Properties of Small Unmanned Aerial System Noise**. In Proceedings of the AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, Denver, CO, USA, 5–9 June 2017.

[6] Torija, A.J.; Clark, C. A. **Psychoacoustic Approach to Building Knowledge about Human Response to Noise of Unmanned Aerial Vehicles**. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 682. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020682>

[7] Torija, A. J., Li,Z., Self, R. H.. **Effects of a hovering unmanned aerial vehical on urban soundscapes perception**. Transportation Research Part D 2020, 102195. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.024>

[8] CONCEITOS fundamentais do som. In: BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011. cap. 2, p. 17-28. ISBN

978-85-212-0581-4.

[9] FONTES sonoras. In: BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011. cap. 8, p. 153-200. ISBN 978-85-212-0581-4.

[10] NÍVEL logarítmico e espectro sonoro. In: BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011. cap. 3, p. 29-42. ISBN 978-85-212-0581-4.

[11] ABNT NBR 15145 - **Acústica - Medição de ruído emitido por veículos rodoviários automotores em aceleração** - Método de engenharia, 2004.

[12] EFEITOS do Ruído e de Vibrações no Homem. In: GERGES, Samir N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 1992. cap. 2, p. 41-80. ISBN 85-900046-01-X.

[13] FUNDAMENTOS e instrumentos de medições acústicas. In: BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011. cap. 6, p. 87-114. ISBN 978-85-212-0581-4.

[14] FABRO, Daniel. **Ponderação A ou C?**. [S. l.]: Medisom, 2021. Disponível em: <https://medisom.com.br/blog/ponderacao-a-ou-c>. Acesso em: 3 set. 2022.