

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Amanda Trópia Resende

**Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves
eVTOL na Paisagem Sonora de uma Região Urbana**

Trabalho de Graduação
2021

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Amanda Trópia Resende

**Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves eVTOL
na Paisagem Sonora de uma Região Urbana**

Orientador: Professor Doutor Evandro José da Silva (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Trópia Resende, Amanda Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves eVTOL na Paisagem Sonora de uma Região Urbana / Amanda Trópia Resende. São José dos Campos, 2021. 70f. Trabalho de Graduação – Engenharia Civil Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. Orientador: Professor Doutor Evandro José da Silva. 1. Aeronaves de decolagem vertical. 2. Ruído de aeronaves. 3. Simulação. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RESENDE, Amanda Trópia. **Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves eVTOL na Paisagem Sonora de uma Região Urbana**. 2021. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Amanda Trópia Resende

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves eVTOL na Paisagem Sonora de uma Região Urbana

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2021

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.



Amanda Trópia Resende
Rua H8A, Apartamento 122
12228-460, São José dos Campos - SP

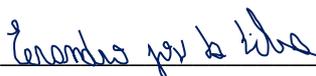
Estudo dos Efeitos da Operação de Aeronaves eVTOL na Paisagem Sonora de uma Região Urbana

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Amanda Trópia Resende

Autora



Prof. Dr. Evandro José da Silva (ITA)

Orientador



Prof. Dr. João Cláudio Bassan de Moraes

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 18 de novembro de 2021

Dedico esse trabalho a todas as mulheres incríveis que seguem carreiras nas áreas de STEM e que provam diariamente que nós podemos (e devemos), sim, ocupar esse espaço.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família. Aos meus pais, Maria Emília e Aster, pois sem seu apoio eu não teria tido coragem de me lançar aos desafios que me trouxeram minhas conquistas. À minha irmã, Alice, por ser minha melhor companhia e minha grande apoiadora, independentemente da distância. À minha avó Neusa, que nunca duvidou, nem por um momento, que eu poderia fazer qualquer coisa a que me propusesse. A todos os familiares que acompanharam a jornada dos últimos anos e que torceram pelo meu sucesso.

Ao professor Evandro, meu orientador, não só pela disponibilidade, paciência e compreensão durante o processo de desenvolvimento desse Trabalho, mas também por ser um exemplo de profissional comprometido e dedicado. Se todos os professores fossem como o senhor, o sistema de ensino seria muito, muito melhor.

Aos meus amores do 122, Amanda Zíngara, Ana Flávia Tuan, Glícia Rodrigues, Scarleth Castro, Thayna Baldão e Victória Cogo. Além de serem minha segunda família, que estive comigo por todo o caminho da graduação, vocês foram minha constante inspiração.

À minha amiga Maria Clara Sifuentes, por ter estado ao meu lado desde que eu me entendo por gente, me apoiando e me incentivando a seguir meus sonhos.

Aos integrantes do meu melhor trio, Lucas Bilobran e Thayna Baldão. Por compartilharem comigo não só os trabalhos do FUND, mas também as diversões e frustrações que o início dessa jornada nos proporcionou. Agradeço também pela paciência, eu sei que não era fácil me ajudar com os laboratórios de computação, mas sou imensamente grata por não terem desistido de mim.

Ao meu amigo Lucas Belzunces, por ter vivido comigo uma das aventuras mais incríveis da minha vida e por trazer um pouco da magia para o ambiente nem sempre maravilhoso da faculdade.

A todos os meus colegas da T21, da T1, e da Civil 21, por compartilharem comigo todos os momentos que ITA nos proporcionou. Pela ajuda nos momentos de necessidade e pelas risadas nos momentos de descontração. Essa jornada não teria sido tão incrível sem cada um de vocês.

"Ninguém ia me entregar o meu futuro de mão beijada, alcançar o meu sonho dependia de mim, segurá-lo com força e torna-lo realidade"

Viva – A Vida é uma Festa, 2017

Resumo

O desenvolvimento do conceito de *Urban Air Mobility* (UAM) e sua iminente aplicação nos centros urbanos vêm levantando discussões a respeito de quais requisitos as aeronaves de decolagem e pouso vertical (eVTOL) e seus respectivos locais de embarque e desembarque de passageiros (vertiportos) precisam atender para que sua operação em larga escala seja aceita pela população. Em geral, entende-se que esse novo sistema de transporte deve se adaptar ao meio urbano, não trazendo prejuízos para a qualidade de vida de seus ocupantes. Nesse contexto, o presente Trabalho de Graduação se propõe a definir quais níveis de intensidade e espectro de ruído gerado por eVTOLs podem ser tolerados, supondo-se aceitáveis ruídos que não causem alterações perceptíveis na paisagem sonora da região. Para isso, é aplicada uma metodologia baseada em um modelo de simulação de ruídos que utiliza como ferramenta o *software NoiseModelling*, a fim de comparar o ruído de fundo de uma área selecionada antes e depois da inserção dessas novas fontes de ruído. Os resultados mostram quais níveis de intensidade e espectro de ruído geram perturbações significativas na paisagem sonora e que, portanto, não seriam aceitos pela população. Estes resultados podem ser utilizados como referência para o planejamento do UAM, para auxiliar decisões de locação de vertiportos e para indicar aos fabricantes de aeronaves os requisitos mínimos que devem ser cumpridos para que seus produtos sejam amplamente aceitos.

Abstract

The development of the Urban Air Mobility (UAM) concept and its imminent application in urban centers have raised discussions about what requirements vertical take-off and landing aircraft (eVTOL) and their respective passenger boarding locations (vertiports) need to attend so that its large-scale operation is accepted by the population. In general, it is understood that this new transport system must adapt to the urban environment, not harming the quality of life of its neighbors. In this context, this Undergraduate Thesis aims to define which levels of intensity and spectrum of noise generated by eVTOLs can be tolerated, assuming acceptable noises that do not cause noticeable variations in the region's soundscape. For this, a methodology based on a noise simulation model that uses the NoiseModelling software as a tool is applied, in order to compare the background noise of a selected area before and after the insertion of these new noise sources. The results show which levels of intensity and noise spectrum generate significant disturbances in the soundscape and that, therefore, would not be accepted by the population. These results can be used as a reference for planning the UAM, to aid decisions on the location of vertiports and to indicate to aircraft manufacturers the minimum requirements that must be met for their products to be widely accepted.

Lista de Figuras

Figura 2-1: Diferença entre som musical e ruído – (a) Som musical; (b) Ruído	20
Figura 2-2: Relação entre propagação do som e distância à fonte	21
Figura 2-3: Comparação entre harmônicos e oitavas	22
Figura 2-4: Ponderações dBA, dBB e dBC	26
Figura 2-5: Área de audibilidade do ouvido humano	29
Figura 2-6: Exemplo de output do modelo computacional INM	31
Figura 2-7: Exemplo de output do modelo computacional AEDT.....	32
Figura 2-8: Interface do NoiseModelling	33
Figura 2-9: Exemplo de mapa de ruído gerado por outputs do NoiseModelling	34
Figura 2-10: Mapas de ruído apresentados como resultados no artigo Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping	34
Figura 3-1: Área de estudo	35
Figura 3-2: Modelagem dos prédios e áreas verdes	36
Figura 3-3: Rede de receptores criada sobre as vias.....	42
Figura 3-4: Localização das fontes de ruído (vertiportos).....	44
Figura 3-5: Arquivo de fontes utilizado na modelagem	45
Figura 4-1: Resultados dos cenários base.....	48
Figura 4-2: Mapas de ruído dos cenários C1	49
Figura 4-3: Mapas de ruído dos cenários C2.....	49
Figura 4-4: Mapas de ruído dos cenários C3.....	49
Figura 4-5: Mapas de ruído dos cenários C4.....	50
Figura 4-6: Mapas de ruído dos cenários C5	50
Figura 4-7: Mapas de ruído dos cenários C6.....	50

Figura 4-8: Mapas de ruído dos cenários C7	51
Figura 4-9: Mapas de ruído dos cenários C8	51
Figura 4-10: Mapas de ruído dos cenários C9	51
Figura 4-11: Mapas de ruído dos cenários C10	52
Figura 4-12: Mapas de ruído dos cenários C11	52
Figura 4-13: Mapas de ruído dos cenários C12	52
Figura 4-14: Mapas de ruído dos cenários C13	53
Figura 4-15: Mapas de ruído dos cenários C14	53
Figura 4-16: Mapas de ruído dos cenários C15	53
Figura 4-17: Mapas de ruído dos cenários C16	54
Figura 4-18: Mapas de ruído dos cenários C17	54
Figura 4-19: Mapas de ruído dos cenários C18	54
Figura 4-20: Resultado do cenário C1.1	55
Figura 4-21: Resultado do cenário C1.2	56
Figura 4-22: Resultados dos cenários C2.1	56
Figura 4-23: Resultados dos cenários C2.2	57
Figura 4-24: Resultado do cenário C3.1	57
Figura 4-25: Resultado do cenário C3.2	58
Figura 4-26: Resultado do cenário C4.1	58
Figura 4-27: Resultado do cenário C4.2	59
Figura 4-28: Resultado do cenário C5.1	59
Figura 4-29: Resultado do cenário C5.2	60
Figura 4-30: Resultado do cenário C6.1	60
Figura 4-31: Resultado do cenário C6.2	61
Figura 4-32: Resultado do cenário C7.1	61

Figura 4-33: Resultado do cenário C7.2.....	62
Figura 4-34: Resultado do cenário C8.1	62
Figura 4-35: Resultado do cenário C8.2.....	63
Figura 4-36: Resultado do cenário C9.1	63
Figura 4-37: Resultado do cenário C9.2.....	64
Figura 4-38: Resultado do cenário C10.1	64
Figura 4-39: Resultado do cenário C10.2.....	65

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Pressão sonora e o nível de pressão sonora de sons comuns	24
Tabela 2-2: Exemplo de conversão de dB para dBA	27
Tabela 2-2: Exemplo de cálculo de nível de pressão sonora equivalente	28
Tabela 3-1: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de tráfego	38
Tabela 3-2: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de velocidade	39
Tabela 3-3: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de veículos pesados	39
Tabela 3-4: Parâmetros para modelagem da superfície das vias	40
Tabela 3-5: Conversão de parâmetros para modelagem da superfície das vias	40
Tabela 3-6: Dados para modelagem da Av. Paulista	41
Tabela 3-7: Dados para modelagem da Av. 9 de Julho	41
Tabela 3-8: Dados para modelagem das pequenas avenidas principais	41
Tabela 3-9: Dados para modelagem das vias coletoras	41
Tabela 3-10: Exemplo de fonte modelada para simular a geração de ruídos das vias	43
Tabela 3-11: Exemplo de fonte modelada para simular a geração de ruídos das vias	44
Tabela 3-11: Cenários considerados	46
Tabela 4-1: Exemplo de resultados obtidos	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Definição do Problema	17
1.3	Objetivo	18
1.4	Estrutura do Trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	A Física do Som	19
2.1.1	Ondas Sonoras	19
2.1.2	Pressão Sonora.....	23
2.1.3	Modificação dos dBs físicos para expressar a percepção humana	25
2.2	Métricas usadas na avaliação do ruído ambiente	27
2.2.1	Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq})	27
2.2.2	Day Night Level (DNL)	28
2.3	Percepção Sonora	29
2.3.1	Sensibilidade do Ouvido Humano.....	29
2.4	Modelos de Simulação de Ruídos.....	30
2.4.1	<i>Integrated Noise Model</i> (INM) [17]	30
2.4.2	<i>Aviation Environmental Design Tool</i> (AEDT) [18]	31
2.4.3	<i>Common Noise Assessment Methods</i> (CNOSSOS-EU) e <i>NoiseModelling</i>	32
3	METODOLOGIA.....	35
3.1.1	Modelagem do Cenário Base.....	36
3.1.2	Modelagem da Fonte	43
3.1.3	Modelagem dos Cenários	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1.1	Resultados do Cenário Base	47
4.1.2	Resultados dos Cenários	48
4.1.3	Discussões	65
5	CONCLUSÕES.....	67
5.1.1	Limitações e Melhorias Futuras	67
	REFERÊNCIAS	68

1 Introdução

1.1 Contextualização

O conceito de *Urban Air Mobility* (UAM) tem sido amplamente discutido como uma alternativa de transporte nos meios urbanos, capaz de poupar os passageiros do congestionamento das grandes cidades e diminuir drasticamente o tempo de deslocamento, transformando a vida de seus usuários e, conseqüentemente, revolucionando a matriz de transporte mundial.

A inovação proposta pelo UAM não é apenas o transporte aéreo urbano, já que atualmente, este já é realizado por meio de helicópteros. Para colocar em prática esse novo conceito de transporte, estão sendo desenvolvidos veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOL), cujo funcionamento é voltado para atender áreas urbanas e seus arredores. A utilização desses veículos é concebida considerando-se um alcance suficiente para a realização de viagens dentro dos centros urbanos e pontos de parada para embarque e desembarque de passageiros e recarga das aeronaves, denominados vertiportos. A expectativa é que esse novo tipo de veículo, quando comparado aos helicópteros, irá possibilitar o desenvolvimento de um sistema de transporte associado a menores custos para os usuários, maior segurança e menores níveis de ruído, fatores essenciais para o sucesso de sua implementação.

No contexto em que o UAM está sendo desenvolvido, tendo como um de seus principais objetivos melhorar a qualidade de vida da população das grandes cidades, não basta apenas proporcionar um meio de transporte rápido. Para que esse novo sistema de transporte seja aceito pelo público e pelas autoridades, este deve se adaptar ao meio urbano e atender aos requisitos de qualidade de vida da população como um todo. Por esse motivo, além da

necessidade de desenvolver veículos que garantam o transporte rápido de seus usuários, existe também a preocupação de garantir a aceitação do uso extensivo desses veículos por parte da população dos centros urbanos.

Um dos principais fatores que pode influenciar a aceitação pública é o nível de ruído gerado por esse novo meio de transporte. Ruídos, que podem ser caracterizados como sons mais intensos, repetitivos e prolongados, são potencialmente nocivos à saúde, podendo causar malefícios aos indivíduos expostos constantemente a eles. Os prejuízos causados por esse tipo de exposição podem variar entre perda auditiva temporária ou permanente, comprometimento da comunicação, problemas neurológicos, como insônia ou dor de cabeça, vertigens, ansiedade, irritabilidade, desânimo, entre outros malefícios ao funcionamento pleno do organismo humano (Clinimed Joinville, 2019).

Frente a tais potenciais prejuízos a que a população pode enfrentar caso exposta à altos níveis de ruído, surge a preocupação relacionada à utilização intensiva de um novo meio de transporte aéreo nos centros urbanos. A população tende a ser tolerante em relação às operações associadas a serviços de saúde e segurança em áreas densamente populadas, como é o caso de operações de helicópteros servindo hospitais, por esses serem pouco frequentes e considerados essenciais. Entretanto, operações consideradas não essenciais historicamente encontram fortes oposições, caso atreladas a altos níveis de ruído. O tráfego intenso de helicópteros em grandes cidades tem se tornado controverso nos últimos anos, levando inclusive a discussões acerca de sua proibição em grandes metrópoles, como Nova York (Wieand, 2020).

Nesse contexto, em que um baixo nível de ruído é essencial para garantir a aceitação pública e, conseqüentemente, o sucesso da implantação do UAM, torna-se imprescindível que os fabricantes de eVTOL desenvolvam veículos significativamente mais silenciosos que os

helicópteros existentes no mercado atualmente, que são o padrão de veículo aéreo urbano amplamente conhecido pela população.

E qual seria um limite de geração de ruídos considerável razoável para garantir a aceitação desse novo tipo de veículo? Pode-se supor que para que essa aceitação ocorra, a introdução de operações desses veículos não cause alterações na paisagem sonora dos centros urbanos. A paisagem sonora de um local pode ser descrita como a composição dos diferentes sons presentes nesse ambiente, sejam esses de origem natural, humana, industrial ou tecnológica. No caso dos centros urbanos, por exemplo, a paisagem sonora é composta pelo ruído do tráfego das ruas, conversas entre indivíduos, ruídos de fontes d'água, sons de pássaros, etc. Essa paisagem sonora constitui um ruído de fundo característico de cada centro urbano, conhecido e supostamente já aceito pela população que nele reside.

1.2 Definição do Problema

Dada a relevância do nível de geração de ruídos sonoros para a aceitação pública do uso de eVTOLs como um novo meio de transporte urbano e dessa aceitação para o sucesso da implantação do conceito de UAM, faz-se o seguinte questionamento: Qual seria um limite de geração de ruídos considerado razoável para garantir a aceitação desse novo tipo de veículo?

Esta pergunta poderia ser respondida de duas formas: (i) estabelecendo-se um limite de ruído limítrofe para uma área de influência, ordenando-se o uso do solo; ou (ii) avaliando-se o impacto das operações sobre a paisagem sonora de dada localidade. A forma (i) relaciona-se, por exemplo ao RBAC 161 (ANAC, 2021). A forma (ii) é a adotada neste trabalho. Assim, supõe-se que os novos veículos poderão ser aceitos se o seu impacto sobre a paisagem sonora for baixo o suficiente. Tal abordagem justifica-se pelo fato de que a política

de restrições ao uso do solo tende a funcionar melhor em áreas ainda em desenvolvimento, contrapondo-se aos centros urbanos consolidados.

1.3 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo geral definir quais níveis de intensidade e espectro de ruído gerado por eVTOLs podem ser tolerados em centros urbanos, supondo-se como aceitáveis ruídos que não causem alterações significativas no nível de ruído de fundo de uma dada região.

Para atingir esse objetivo geral, foram estipulados os seguintes objetivos específicos:

- Definir cenário representativo de uma área urbana brasileira em que seja razoável prever a implementação de uma nova rede de transporte aéreo urbano;
- Utilizar um simulador para estimar o ruído de fundo da área de estudo;
- Propor possíveis cenários para níveis de ruído gerados por eVTOLs.

1.4 Estrutura do Trabalho

Além da introdução, este trabalho apresenta, no capítulo 2, uma fundação teórica que contempla conceitos essenciais para as discussões propostas, relacionados à física do som, às métricas utilizadas para avaliação do ruído de um ambiente, para a percepção sonora e para a concepção de modelos de simulação de ruídos. No capítulo 3, descreve-se a metodologia implementada para a modelagem do cenário considerado e geração dos resultados de níveis de ruídos oriundos da implementação de vertiportos nesse cenário. O capítulo 4 apresenta análises e resultados obtidos a partir da metodologia proposta e faz uma análise crítica dos impactos observados. No capítulo 5 são resumidas as principais conclusões do estudo e apontadas possíveis sugestões e melhorias que podem ser introduzidas em estudos futuros.

2 Fundamentação Teórica

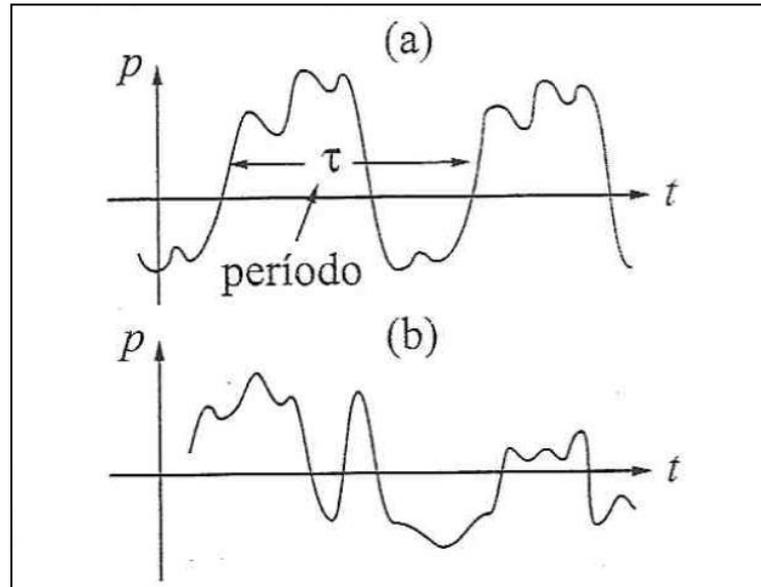
2.1 A Física do Som

2.1.1 Ondas Sonoras

Ondas sonoras são ondas que podem se propagar através de qualquer meio material, mas que são mais comumente experienciadas como ondas mecânicas longitudinais que se propagam pelo ar e que resultam na percepção humana de escutar um som (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). Nem todas as ondas sonoras podem ser, de fato, ouvidas pelos seres humanos: sua percepção depende da faixa de frequência em que em que essas estão situadas. As ondas sonoras classificadas como audíveis são aquelas com frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz (Halliday & Resnick, 2012) e estas podem ter diversas origens, como instrumentos musicais, voz humana, alto-falantes etc. (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010).

Dentre as ondas sonoras, há também a distinção entre som musical e ruído, que se dá essencialmente pela periodicidade do som (Nussenzveig, 2002). Enquanto sons musicais são periódicos e percebidos como uma experiência agradável, ruídos são não-periódicos e associados a efeitos adversos na saúde humana, como irritabilidade, ansiedade, pressão alta etc. (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). Essa diferença pode ser observada na Figura 2-1. Esse estudo se propõe a analisar o efeito da inserção de fontes de ruído em uma paisagem sonora já existente e, portanto, características associadas à sons musicais, como periodicidade, altura e timbre (Nussenzveig, 2002), não serão discutidas.

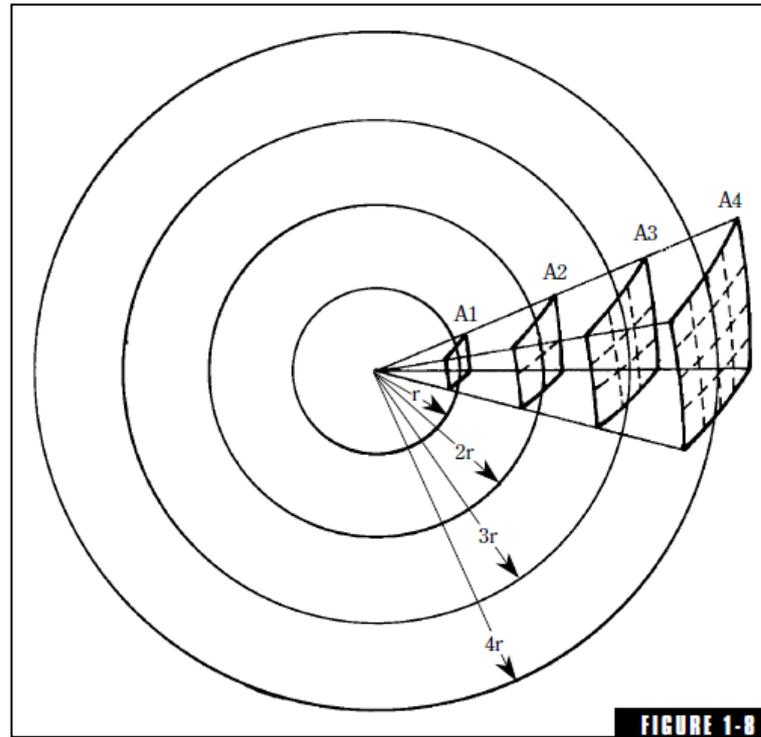
Figura 2-1: Diferença entre som musical e ruído – (a) Som musical; (b) Ruído



Fonte: H. Moysés Nussenzveig – Curso de Física Básica, Vol. 2, p. 132.

Um importante parâmetro para caracterização da percepção das ondas sonoras é a sua intensidade, que “é definida como a energia média transmitida através da seção, por unidade de tempo e área” (Nussenzveig, 2002). A intensidade do som decresce a medida em que a distância da fonte aumenta. Em um espaço livre de obstáculos, o som proveniente de uma fonte pontual se propaga uniformemente em todas as direções. A diminuição da intensidade do som pode ser entendida a partir da observação da Figura 2-2. A mesma energia sonora flui pelas áreas A1, A2, A3 e A4, que variam proporcionalmente ao quadrado da distância à fonte, ou seja, quanto mais distante da fonte, maior a área em que uma mesma quantidade de energia está distribuída (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). Pode-se concluir, portanto, que a intensidade de um som, quando propagado em área livre de obstáculos, é proporcional ao quadrado da distância à fonte.

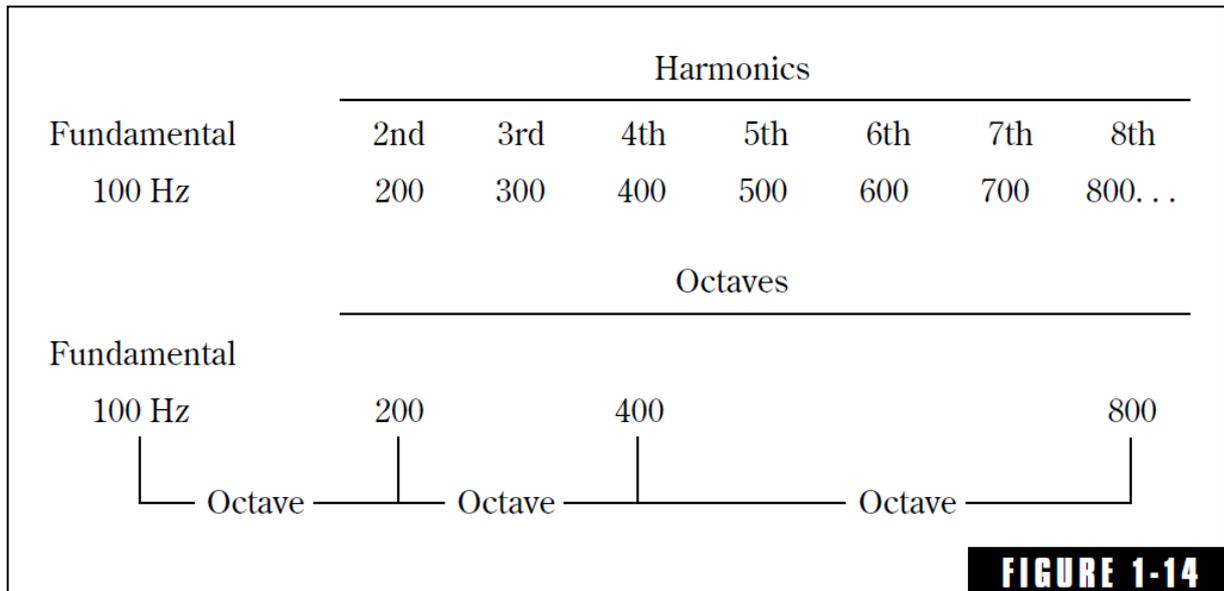
Figura 2-2: Relação entre propagação do som e distância à fonte



Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 9.

A frequência de um som também é essencial para sua caracterização. Como mencionado anteriormente, ondas sonoras audíveis são aquelas cuja frequência pertence ao intervalo de 20 a 20.000 Hz. Uma possível caracterização para os sons, dentro dessa faixa de frequência, são os harmônicos, que são múltiplos de uma frequência fundamental: o segundo harmônico é duas vezes a frequência fundamental, o terceiro harmônico é três vezes a frequência fundamental e assim em diante. Outra possível caracterização a partir da frequência de uma onda sonora é a partir de oitavas. Assim como nos harmônicos, as oitavas possuem entre si uma relação de multiplicidade, mas enquanto a relação entre as harmônicas é linear, a entre as oitavas é logarítmica (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). Uma comparação entre harmônicos e oitavas pode ser observada na Figura 2-3.

Figura 2-3: Comparação entre harmônicos e oitavas

**FIGURE 1-14**

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 17.

A caracterização por meio de oitavas é frequentemente utilizada por especialistas em acústica, devido à relação da escala logarítmica com a percepção do som pelo ouvido humano (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010) que será mais amplamente discutida no item 2.1.2. Devido à essa relação, é comum o uso de escalas de frequência, medições em unidades logarítmicas e dispositivos baseados em oitavas (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010).

Essas divisões e escalas são utilizadas com o intuito de caracterizar e identificar diferentes sons. Entretanto, seria difícil identificar um tipo de som considerando-se uma única frequência, sem uma divisão básica universal (Acústica em Foco, s.d.). Como dizer qual é a frequência da voz feminina, por exemplo? A resposta seria muito variável, pois esse som não pode ser caracterizado por uma frequência única, mas sim por um intervalo de frequência entre 150 e 250 Hz (UFMG, s.d.). Por esse motivo, foi criada uma divisão das frequências em bandas de oitava, cujos limites são 31 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz 16.000 Hz, ou seja, as frequências compreendidas na primeira banda de oitava são aquelas cuja frequência está no intervalo entre 0 Hz e 31 Hz, e assim em diante. Essa divisão permite que a identificação das frequências seja feita em grupos, tendo valores menos específicos. É válido ressaltar que sons mais complexos possuem componentes em mais de uma banda de oitava: voltando ao exemplo da voz feminina, esta provavelmente teria componentes tanto na banda de 125 Hz quanto na de 250 Hz.

Outras métricas essenciais para a compreensão da percepção do som pelos seres humanos serão discutidas no item a seguir.

2.1.2 Pressão Sonora

A pressão sonora é o resultado das variações de pressão no ar, oriundas da propagação das ondas sonoras. A pressão sonora mais baixa que pode ser ouvida por um ser humano, denominada limiar de audição, é de 2×10^{-5} Pa, enquanto que a pressão mais alta que pode ser suportada, conhecida como limiar da dor, é de 20 Pa, ou seja, a pressão do som no limiar da dor é um milhão de vezes maior do que a pressão do som no limiar da audição (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010).

O nível de pressão sonora (β) é uma relação logarítmica entre a pressão sonora no ambiente e uma pressão sonora de referência, e é expresso em decibéis. A medição do nível de pressão sonora, ao invés da própria pressão sonora, é conveniente pois torna mais simples lidar com o grande intervalo de pressões sonoras a que o ouvido humano é sensível sendo, portanto, amplamente utilizada (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). O nível de pressão sonora é calculado por meio da Equação 2-1, em que P é a pressão sonora no ambiente e P_0 é a pressão sonora de referência:

$$\beta(dB) = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad \text{Equação 2-1}$$

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 27.

Pela Equação 2-1 pode-se concluir que o nível de pressão sonora correspondente ao limiar de audição é de 0 dB, enquanto que aquele correspondente ao limiar da dor é de 120 dB. A Tabela 2-1 a seguir lista a pressão sonora e o nível de pressão sonora de alguns sons comuns.

Tabela 2-1: Pressão sonora e o nível de pressão sonora de sons comuns

Sound Source	Sound pressure (Pa)	Sound level* (decibels, A-weighted)
Saturn rocket	100,000. (one atmosphere)	194
Ram jet	2,000.	160
Propeller aircraft	200.	140
Threshold of pain		135
Riveter	20.	120
Heavy truck	2.	100
Noisy office, } Heavy traffic }	0.2	80
Conversational speech	0.02	60
Private office		50
Quiet residence	0.0002	40
Recording studio		30
Leaves rustling	0.0002	20
Hearing threshold, good ears at frequency of maximum sensitivity		10
Hearing threshold, excellent ears at frequency maximum response	0.00002	0

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 32.

O nível de pressão sonora (β) também pode ser descrito como uma relação logarítmica entre a intensidade do som em um ambiente, medida em W/m^2 , e uma intensidade de referência. Essa forma alternativa para o cálculo do nível de pressão sonora é possível devido à relação existente entre a intensidade sonora e o quadrado da pressão sonora. Nesse caso, a menor intensidade de referência, que é a correspondente ao limiar de audição, é igual à $1,00 \times 10^{-12} W/m^2$. A Equação 2-2 representa o cálculo da pressão sonora como função da intensidade sonora.

$$\beta(dB) = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{Equação 2-2}$$

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 27.

Pelas Equação 2-1 e pela Equação 2-2 percebe-se que a percepção humana da intensidade de som, comumente chamada de “altura” do som está intimamente relacionada à escala logarítmica, isto é, um som com uma pressão sonora 10 vezes maior que um som de referência é considerado, por um ouvinte como duas vezes mais “alto”, o que faz com que a

medição do nível sonoro seja mais conveniente, também, para mensurar a percepção dos receptores das ondas sonoras (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010).

A soma de valores em uma escala logarítmica, como é o caso do nível de pressão sonora, em dB, não pode ser realizada da mesma forma que valores em uma escala linear. Por exemplo, a soma de duas fontes de mesma intensidade (potência/área) resulta em uma fonte com o dobro de intensidade (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). Esse acréscimo de intensidade resulta no seguinte acréscimo de nível de pressão sonora:

$$\Delta\beta(dB) = 10\log 2 = 3dB$$

Ou seja, seguindo-se esse raciocínio, a soma de duas fontes com níveis sonoros de 100 dB resulta em um nível sonoro equivalente de 103 dB. Portanto, o procedimento correto para encontrar o nível sonoro equivalente resultante da soma de duas fontes sonoras seria encontrar a intensidade sonora de cada uma das fontes, a partir da Equação 2-2, somar essas intensidades, de maneira linear, e utilizar novamente a Equação 2-2 para calcular o novo nível de pressão sonora. Portanto, de maneira genérica, os cálculos necessários para realizar a soma entre valores em dB são descritos pela Equação 2-3 a seguir:

$$\text{soma de } \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n = 10\log(e^{\frac{\beta_1}{10}} + e^{\frac{\beta_2}{10}} + \dots + e^{\frac{\beta_n}{10}}) \quad \text{Equação 2-3}$$

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 36.

2.1.3 Modificação dos dBs físicos para expressar a percepção humana

Uma observação importante a respeito da Equação 2-1 é que, rigorosamente, ela só é válida para sons cuja frequência é 1.000 Hz, considerada uma frequência padrão na área de acústica. Essa limitação ocorre, pois, a intensidade do som no limiar da audição é de 10-12 W/m² apenas nessa frequência, e, portanto, somente para sons com frequência de 1.000 Hz essa intensidade sonora correspondendo à um nível de pressão sonora de 0 dB (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010). A aplicação da Equação 2-2 para outras frequências, portanto, é uma aproximação.

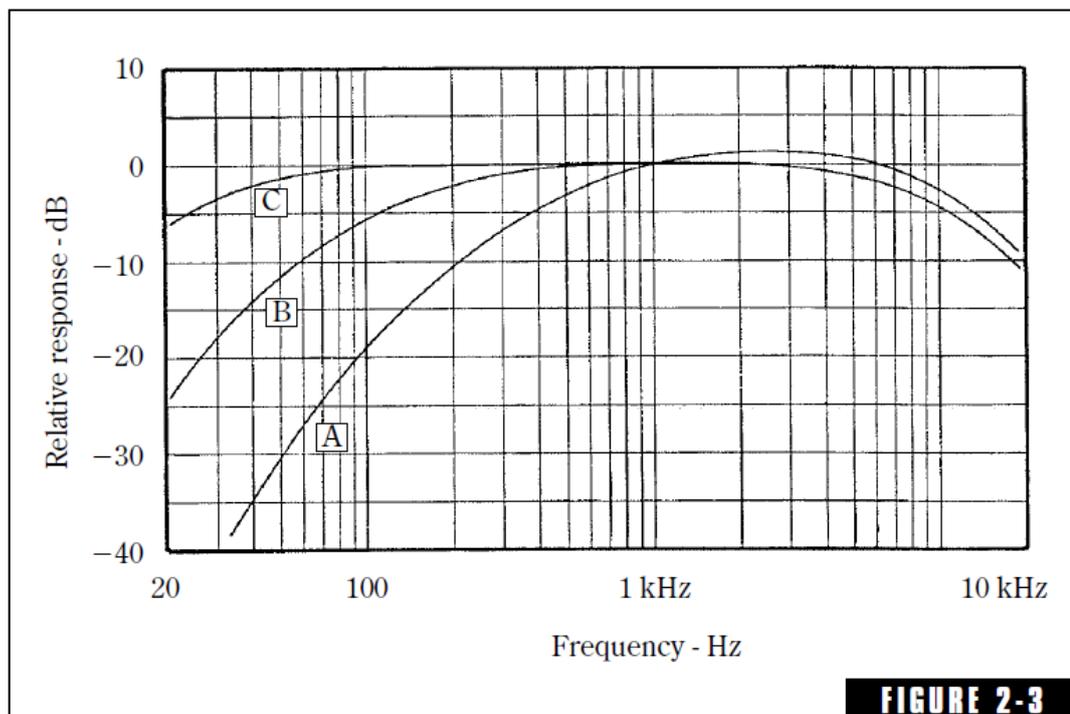
Entretanto, a percepção do som pelo ouvido humano é mais complexa do que essa aproximação pode fazer parecer. Considerando-se o intervalo de frequência que caracteriza os sons audíveis (entre 20Hz e 20.000 Hz), a sensibilidade da percepção do som pelo ouvido varia significativamente com a frequência, isto é, dois sons de intensidade física igual, mas

frequências distintas, podem ser percebidos pelo ouvido como tendo intensidades muito diferentes. Pode-se dizer, portanto, que a percepção sonora humana, que pode ser aqui interpretada como o nível de pressão sonora, é, na realidade, função de duas variáveis: intensidade (ou pressão, ou potência) e frequência (UFRGS, s.d.).

Para considerar essa diferença na percepção de acordo com sua frequência, são propostas ponderações que variam com a frequência. Nesse contexto, três escalas podem ser utilizadas, dBA, dBB e dBC, a depender do nível de pressão sonora do som analisado:

- Pressões sonoras entre 25 e 55 dB: escala dBA;
- Pressões sonoras entre 55 e 85 dB: escala dBB;
- Pressões sonoras entre 85 e 140 dB: escala dBC.

Figura 2-4: Ponderações dBA, dBB e dBC



Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 39.

Para um som com pressão sonora entre 25 e 55 dB, por exemplo, podem ser utilizados os fatores da coluna “Ponderação A” da Tabela 2-2 para converter os valores de dB para dBA, para cada banda de oitava.

Tabela 2-2: Exemplo de conversão de dB para dBA

Bandas de Oitava	Nível de Pressão Sonora (dB)	Ponderação A	Nível de Pressão Sonora (dBA)
63	97.0	-26.2	70.8
125	90.0	-16.1	73.9
250	82.5	-8.6	73.9
500	88.7	-3.2	85.5
1000	73.0	0.0	73.0
2000	69.0	1.2	70.2
4000	65.0	1.0	66.0
8000	75.0	-1.1	73.9

Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 32.

2.2 Métricas usadas na avaliação do ruído ambiente

2.2.1 Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq})

O nível de pressão sonora equivalente pode ser descrito como o nível de ruído equivalente de um som produzido durante um determinado período de tempo e medido com filtro de frequência na ponderação A. O L_{Aeq} corresponde, matematicamente, à soma logarítmica dos níveis de pressão sonora dos componentes de um ruído sonoro, conforme mostrado na Equação 2-3.

Para exemplificar a aplicação dessa métrica de avaliação do ruído ambiente, consideraremos uma fonte hipotética, descrita pela Tabela 2-3, que emite ruído cuja frequência pode ser decomposta em bandas de oitava. Nesse caso, cada banda de oitava terá um nível de pressão sonora correspondente, em dBA (já que o L_{Aeq} é aplicável para níveis de ruído medidos com filtro de frequência na ponderação A). Para calcular o nível de pressão sonora equivalente dessa fonte, portanto, deve-se realizar a soma logarítmica dos níveis sonoros de cada banda de oitava, utilizando-se a Equação 2-3. No caso da fonte hipotética, essa soma resulta em um nível sonoro equivalente de 70 dBA.

Tabela 2-3: Exemplo de cálculo de nível de pressão sonora equivalente

Bandas de Oitava	Nível de Pressão Sonora (dBA)	Nível de Pressão Sonora Equivalente(dBA)
63	19.4	
125	23.3	
250	28.0	
500	33.6	
1000	40.3	70.0
2000	48.4	
4000	58.1	
8000	69.7	

Fonte: Autora.

Como, em sua maioria, os sons presentes no cotidiano são formados por uma composição de diferentes frequências, o L_{Aeq} é amplamente utilizado, pois fornece um valor que indica a percepção desses sons complexos pelos seres humanos. Por esse motivo, essa métrica é comumente utilizada para elaboração de mapas de ruído.

2.2.2 Day Night Level (DNL)

Outra métrica que pode ser utilizada para a avaliação do ruído ambiente é o DNL. Este é um indicador do nível de ruído que pode ser descrito como o “nível de ruído médio de um período de 24 horas, calculado segundo a metodologia *Day-Night Average Sound Level*” (ANAC, s.d.). Essa metodologia prevê uma sensibilidade de 10 dB para o período da noite, compreendido entre 22h e 7h, o que implica, por exemplo, que um som constante de 70 dBA durante o dia e 60 dBA durante a noite definiria uma vizinhança com 70 dB DNL. (Uber Elevate, 2016).

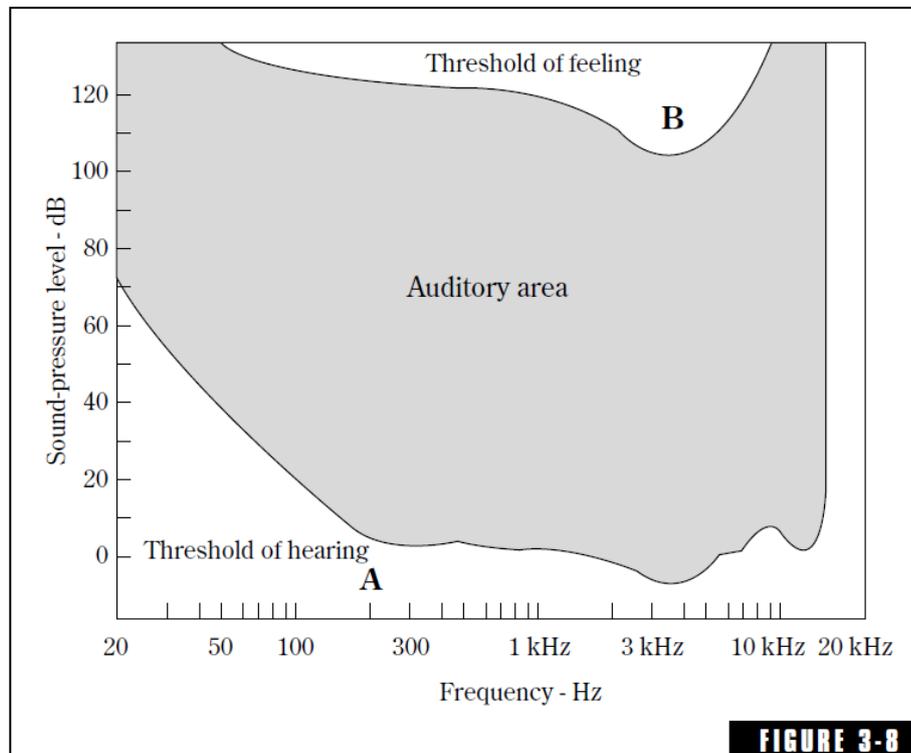
Essa métrica é amplamente utilizada para medir o impacto do ruído aeronáutico, sendo utilizada pela ANAC como referência para a geração de curvas de ruído para a elaboração de planos de zoneamento de ruído de aeródromos, conforme recomendações explicitadas no RBAC 161.

2.3 Percepção Sonora

2.3.1 Sensibilidade do Ouvido Humano

Como mencionado anteriormente, o ouvido humano é sensível a sons compreendidos em um grande intervalo de pressão sonora, situados entre o limiar da audição e o limiar da dor. Tais limites da audição humana, descritos em dB, variam de acordo com a frequência do som, como pode ser observado na Figura 2-5. Nela, a curva A representa a relação entre nível de pressão sonora e frequência para sons quase inaudíveis, enquanto que a curva B representa essa mesma relação para sons que começam a ser dolorosos. A área entre essas duas curvas é a área de audibilidade do ouvido humano.

Figura 2-5: Área de audibilidade do ouvido humano



Fonte: F. Alton Everest, McGraw - The Master Handbook of Acoustics, p. 53.

Percebe-se que, de fato, o ouvido humano possui a sensibilidade necessária para perceber sons de diversos níveis sonoros, e que sons próximos ao limiar da audição são percebidos de maneira muito diferente daqueles próximos ao limiar da dor. Nesse contexto, diferenciar sons cujos níveis de pressão sonora são muito diferentes parece ser uma tarefa trivial, mas e no que diz respeito a sons com níveis de pressão sonora próximos? Qual é a

sensibilidade do ouvido humano para que seja percebida a mudança do nível de pressão sonora de um som?

A capacidade de detecção de intensidade de um som varia em função da frequência e do nível de pressão sonora. Por exemplo, para uma frequência de 3 kHz e baixos níveis de pressão sonora, uma variação de 3 dB é a mínima que pode ser detectada pelo ouvido, mas a altos níveis de pressão sonora, uma variação de 0,25 dB, para essa mesma faixa de frequência, já pode ser detectada. Para as frequências situadas no centro do intervalo audível e para níveis de pressão sonora mais usuais nos sons cotidianos, a variação mínima detectada pelo ouvido humano está situada entre 2 e 3 dB. Portanto, pode-se dizer que, em geral, variações inferiores a estas não são percebidas pelo ouvido humano (Raymond A. Serway and John W. Jewett, 2010).

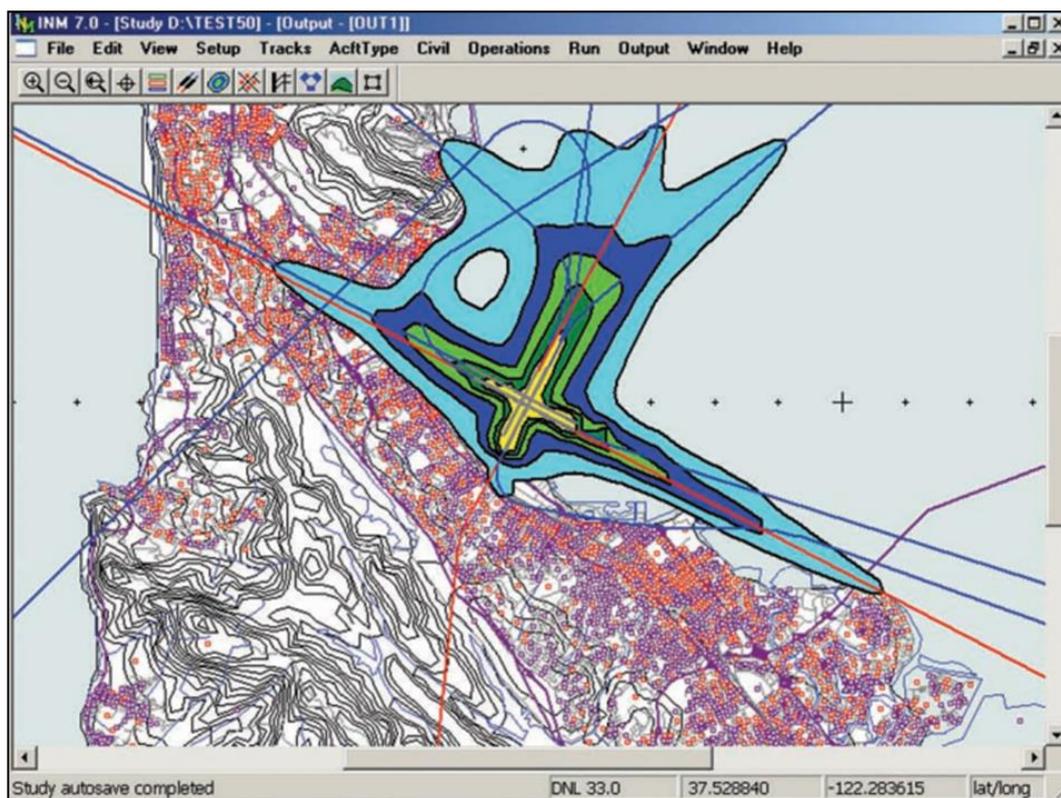
2.4 Modelos de Simulação de Ruídos

Modelos de simulação de ruído são uma alternativa para analisar o impacto da existência de fontes sonoras em um determinado ambiente, possibilitando a geração de mapas de ruído que podem mostrar a relação entre o nível de pressão sonora e a distância à fonte. Neste item, são apresentados alguns modelos comumente utilizados para a simulação de ruídos.

2.4.1 *Integrated Noise Model (INM) (FAA, 2019)*

O INM é um modelo computacional que avalia os impactos do ruído de aeronaves nas proximidades de aeroportos. Foi desenvolvido com base em um algoritmo que usa dados de ruído-potência-distância (NPD) para estimar a contabilização de ruído para um modo de operação específico, configuração de empuxo e geometria fonte-receptor, diretividade acústica e outros fatores ambientais. O INM pode gerar curvas de ruído para uma área ou níveis de ruído em locais pré-selecionados. O *output* de ruído pode ser baseado na exposição, no nível máximo ou no tempo. Um exemplo de *output* gerado pelo modelo pode ser observado na Figura 2-6

Figura 2-6: Exemplo de *output* do modelo computacional INM



Fonte: FAA - INM 7.0 Technical Manual.

Nos Estados Unidos, esse modelo computacional foi amplamente utilizado pela FAA. O INM possui muitos usos analíticos, dentre eles: avaliar os impactos do ruído da aeronave em torno de um determinado aeroporto ou heliporto; avaliar mudanças no impacto do ruído resultante de pistas novas ou estendidas; avaliar mudanças no impacto do ruído resultante da nova demanda de tráfego e mix de frota; avaliar impactos de ruído de novos procedimentos operacionais e avaliar os impactos do ruído das operações de aeronaves dentro e ao redor de áreas verdes.

Atualmente, esse modelo computacional está em desuso, tendo a FAA substituído seu uso em prol do *Aviation Environmental Design Tool* (AEDT) em 2015.

2.4.2 *Aviation Environmental Design Tool* (AEDT) (FAA, s.d.)

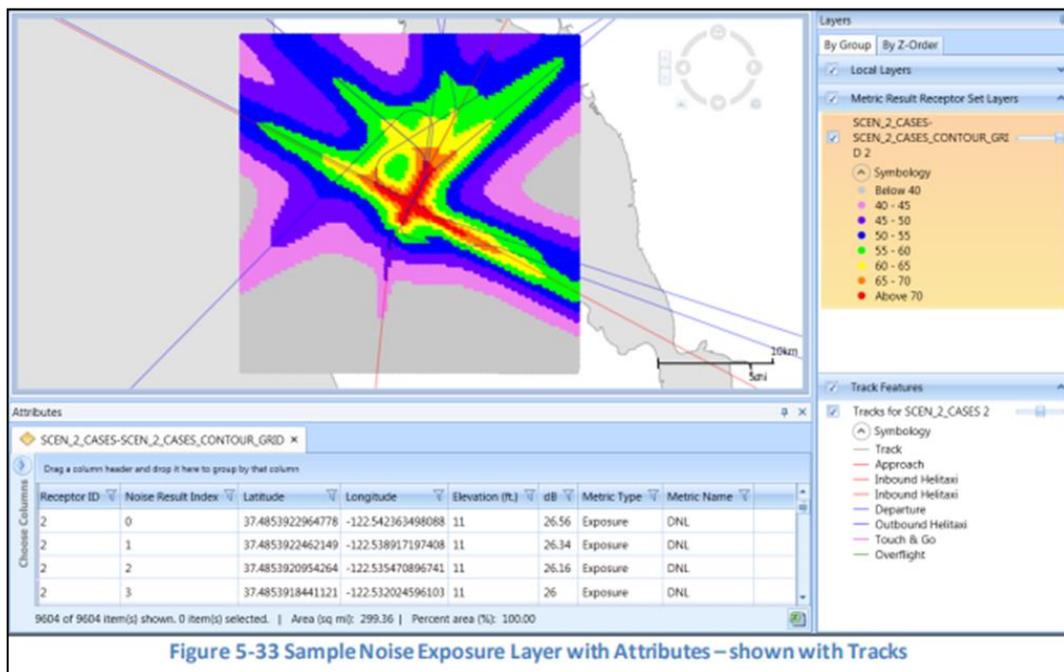
Aviation Environmental Design Tool é um sistema de software que modela o desempenho da aeronave no espaço e no tempo para estimar o consumo de combustível, as emissões, o ruído e as consequências da operação para a qualidade do ar. É uma ferramenta abrangente utilizada pela FAA para fornecer informações às partes interessadas em cada um

desses impactos ambientais específicos. O AEDT facilita as atividades de revisão ambiental, consolidando a modelagem desses impactos ambientais em uma única ferramenta.

O AEDT é projetado para modelar estudos individuais que variam em escopo de um único voo em um aeroporto a cenários em nível regional, nacional e global. O software aproveita o sistema de informações geográficas (GIS) e a tecnologia de banco de dados relacional para alcançar essa escalabilidade e oferece oportunidades para explorar e apresentar resultados. As versões do AEDT são usadas pelo governo dos Estados Unidos para o planejamento do sistema de aviação doméstico, bem como para a análise da política ambiental da aviação doméstica e internacional.

Um exemplo de *output* gerado pelo modelo pode ser observado na Figura 2-7 a seguir.

Figura 2-7: Exemplo de output do modelo computacional AEDT



Fonte: FAA – AEDT 3C User Manual.

2.4.3 Common Noise Assessment Methods (CNOSSOS-EU) e NoiseModelling

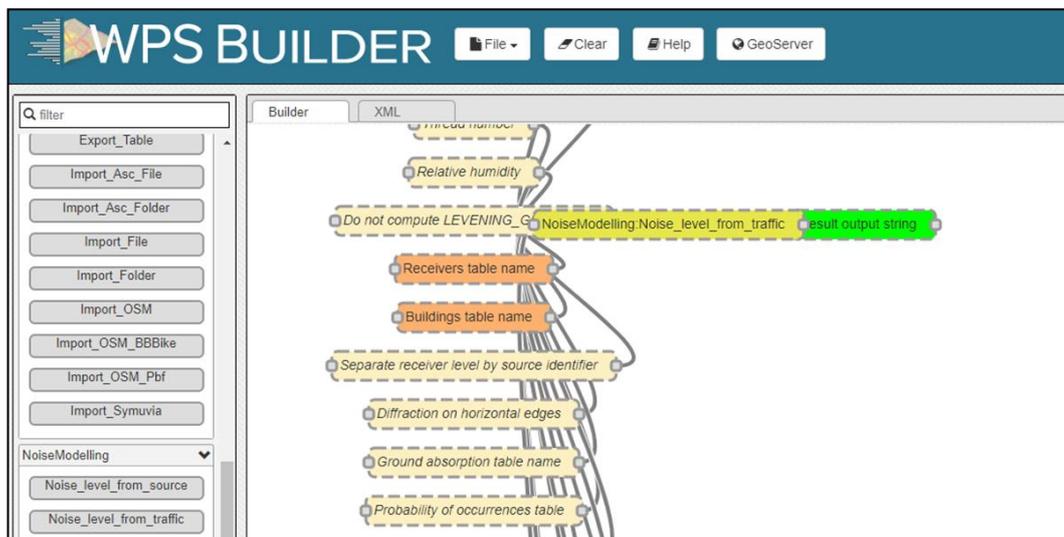
O *Common Noise Assessment Methods* (CNOSSOS-EU) é uma metodologia cujo objetivo principal é desenvolver um método consistente de avaliação capaz de fornecer como resultados o mapeamento estratégico de ruídos. Essa metodologia foi desenvolvida para modelagem de ruídos rodoviários, ferroviários, aeronáuticos e industriais a serem usados para fins de mapeamento estratégico de ruído (Stylianios Kephelopoulos, 2012).

Essa metodologia estabelece requisitos para a modelagem dos mapas sonoros, reconhecidos como requisitos críticos, essenciais para a consistência dos resultados do mapeamento de ruído estratégico (ou seja, para a estimativa do total população exposta a níveis específicos de ruído em uma aglomeração) e que, portanto, precisam ser especificadas.

NoiseModelling é uma biblioteca capaz de produzir mapas de ruído de cidades. Esta ferramenta se aproxima da compatibilidade com o método padrão CNOSSOS-EU para a emissão de ruído, no que diz respeito ao tráfego rodoviário, e para propagação de ruído (*NoiseModelling*, 2002).

Por meio da utilização desse software, é possível modelar a interação entre fontes de ruído e o entorno. Por meio dele, é possível modelar cenários que tenham como fonte de ruído as vias da cidade ou fontes pontuais, utilizando-se como dados de input características de emissão das fontes, posicionamento e características geométricas dos obstáculos no entorno (comumente representados pelos prédios) e a localização dos receptores que irão perceber o som emitido pela fonte. A Figura 2-8 mostra a interface do *NoiseModelling*

Figura 2-8: Interface do *NoiseModelling*



Fonte: Tutorial *NoiseModeling*.

A partir dos dados de *input*, o *software* gera como *output* o nível de ruído equivalente percebido por cada um dos receptores. A partir dos resultados gerados, pode-se gerar mapas de ruído como o observado na Figura 2-9.

Figura 2-9: Exemplo de mapa de ruído gerado por outputs do *NoiseModelling*



Fonte: Tutorial *NoiseModelling*.

O *NoiseModelling* pode ser utilizado como ferramenta para produzir resultados de nível técnico satisfatório para embasar discussões em publicações acadêmicas que se propõem a analisar a influência de fontes de ruído em um ambiente. O artigo *Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping* (IFSTTAR, CEREMA, UMRAE, F-44344 Bouguenais, France) utiliza a ferramenta para discutir a influência de diferentes tipos de fontes de ruído (conversa de pedestres, pássaros, fontes d'água e tráfego) na paisagem sonora de uma cidade. Os resultados encontrados podem ser observados na Figura 2-10 (d).

Figura 2-10: Mapas de ruído apresentados como resultados no artigo *Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping*

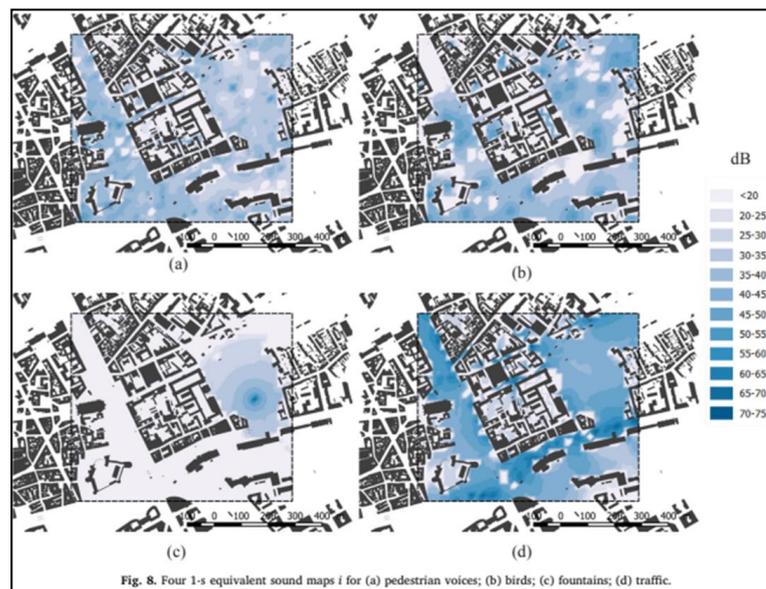


Fig. 8. Four 1-s equivalent sound maps *i* for (a) pedestrian voices; (b) birds; (c) fountains; (d) traffic.

Fonte: IFSTTAR, CEREMA, UMRAE, F-44344 Bouguenais, France - *Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping*.

3 Metodologia

Neste item serão descritas as metodologias utilizadas para a modelagem do cenário base considerado e das fontes de ruído, utilizando-se como ferramentas os *softwares QGIS e NoiseModelling*.

Para a análise da influência da inserção de vertiportos na paisagem sonora, foi selecionada uma área de estudo adjacente à Avenida Paulista, na cidade de São Paulo, cuja delimitação pode ser observada na Figura 3-1. O sistema de referência utilizado foi o WGS 84/ Zona UTM 23S, e as coordenadas que delimitam a área selecionada são: (330.489,25; 7.392.858,19), (330.489,25; 7.393.658,19), (331.289,25; 7.393.658,19) e (331.289,25; 7.392.858,19).

Figura 3-1: Área de estudo



Fonte: Autora.

As análises foram feitas utilizando como ferramenta para modelagem dos níveis de ruído o *software NoiseModeling*. Para a geração de mapas de ruído de um ambiente, esse *software* analisa dados relativos às características físicas do espaço, representadas pela presença de prédios e áreas verdes, e às fontes de ruído para gerar resultados que correspondem à pressão sonora percebida por receptores expostos às fontes. Tais dados foram

modelados utilizando-se como ferramenta o *software QGIS* e considerando-se a geometria observada a partir de mapa gerado pelo *Open Street Maps*.

3.1.1 Modelagem do Cenário Base

3.1.1.1 Prédios e Áreas Verdes

Para a construção do cenário base foi necessário criar um modelo que contemplasse as características geométricas da área selecionada para o estudo. Para isso, foram modelados os prédios e as áreas verdes utilizando-se como ferramenta o *software QGIS*. Os dados inseridos nessa modelagem foram aqueles necessários para que o arquivo gerado a partir desta fosse compatível com as necessidades do *software NoiseModelling*:

- Para os prédios, foi necessário ter como input a projeção plana, a altura e um número de identificação; A projeção plana foi obtida considerando-se a geometria observada a partir de mapa gerado pelo *Open Street Maps*, e foi adotada para os prédios uma altura de 30m, correspondente à altura média de um prédio de 10 andares;
- Para as áreas verdes, foram necessários os *inputs* de projeção plana e de número de identificação. A projeção plana foi obtida considerando-se a geometria observada a partir de mapa gerado pelo *Open Street Maps*.

A modelagem dos prédios e áreas verdes pode ser observada na Figura 3-2:

Figura 3-2: Modelagem dos prédios e áreas verdes



Fonte: Autora.

3.1.1.2 Ruído de Fundo

Além dos prédios e áreas verdes, o cenário base contemplou também a paisagem sonora da área selecionada. Para isso, assumiu-se que o ruído gerado pelos veículos que transitam pelas ruas é o principal responsável pela paisagem sonora dos centros urbanos e, portanto, este foi selecionado para ser inserido no modelo como correspondente ao ruído de fundo.

Assim como para os prédios e áreas verdes, a modelagem do ruído das ruas foi feita levando-se em consideração as informações essenciais para o funcionamento do *software NoiseModelling*. Além da geometria das ruas, representada por meio de linhas, para ser compatível com os requisitos do *NoiseModelling*, precisaram ser inseridos no modelo os seguintes dados:

- PK: Número de identificação para cada rua;
- TV_D (nº veículos/h): Movimentação média de veículos leves durante o dia (das 6h às 18h);
- TV_E (nº veículos/h): Movimentação média de veículos leves durante o entardecer (das 18h às 22h);
- TV_N (nº veículos/h): Movimentação média de veículos leves durante a noite (das 22h às 6h);
- HV_D (nº veículos/h): Movimentação média de veículos pesados durante o dia (das 6h às 18h);
- HV_E (nº veículos/h): Movimentação média de veículos pesados durante o entardecer (das 18h às 22h);
- HV_N (nº veículos/h): Movimentação média de veículos pesados durante a noite (das 22h às 6h);
- LV_SPD_D (km/h): Velocidade média dos veículos leves que circulam na via durante o dia (das 6h às 18h);
- LV_SPD_E (km/h): Velocidade média dos veículos leves que circulam na via durante a noite (das 18h às 22h);
- LV_SPD_N (km/h): Velocidade média dos veículos leves que circulam na via durante a madrugada (das 22h às 6h);
- HV_SPD_D (km/h): Velocidade média dos veículos pesados que circulam na via durante o dia (das 6h às 18h);

- HV_SPD_E (km/h): Velocidade média dos veículos pesados que circulam na via durante a noite (das 18h às 22h);
- HV_SPD_N (km/h): Velocidade média dos veículos pesados que circulam na via durante a madrugada (das 22h às 6h);
- PVMT: Identificador do tipo de pavimento.

Para atribuir valores aos campos necessários, foi utilizado como referência o *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure* (WG-AEN, 2006), manual utilizado pelo próprio *NoiseModeling* como referência para modelagem de vias. Nesse manual, são recomendados os valores para as variáveis citadas acima, quando não se possui dados precisos, como é o caso desse estudo. As tabelas a seguir apresentam um resumo das considerações feitas para a construção da modelagem das vias:

Tabela 3-1: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de tráfego

Tool 2.5: No traffic flow data available			
Method	complexity	accuracy	cost
Make traffic counts for each of the three periods: daytime, evening and night time		< 0.5 dB	
Select sample roads and do traffic counts there; extrapolate to other roads of same type		2 dB	
Use official traffic flow data for typical road types.		4 dB	
Use other traffic flow data for typical road types.		4 dB	
Use default values, such as:			
Road type	traffic¹⁹		
	day	evening	night
Dead-end roads	175	50	25
Service roads (mainly used by residents living there)	350	100	50
Collecting roads (collecting traffic from service roads and leading it to & from main roads)	700	200	100
Small main roads	1,400	400	200
Main roads		< 0.5 dB	
	Must undertake traffic counts or produce flows from a traffic model. See section 2.10		

Fonte: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure.

Tabela 3-2: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de velocidade

Tool 3.5: No speed data			
Method	complexity	accuracy	cost
Measure vehicle speeds by means of radar or other suitable technology		< 0.5 dB	
Measure time vehicles take to travel along a road section of known length and calculate average traffic speed		< 0.5 dB	
Determine average traffic speed by driving in the average traffic flow		1 dB	
Use the speed limit (e.g. from traffic signs)		2 dB	
Make an assumption of average traffic speed based on experience from similar road types		2 dB	

Fonte: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure.

Tabela 3-3: Parâmetros para modelagem de vias sem informações de veículos pesados

Tool 4.5: No heavy vehicle data available			
Method	complexity	accuracy	cost
Make traffic counts for each of the three periods: daytime, evening and night time		< 0.5 dB	
Select sample roads and do traffic counts there; extrapolate to other roads of same type		< 0.5 dB	
Use official statistics for heavy vehicle rates of different road types published by recognised bodies or authorities		1 dB	
Use other statistical heavy vehicle rates for different road types		1 dB	
Use default values, for example ²⁴ :			
Road type	traffic		
	day	evening	night
Dead-end roads	2 %	1 %	0 %
Service roads (mainly used by residents living there)	5 %	2 %	1 %
Collecting roads (collecting traffic from service roads and leading it to & from main roads)	10 %	6 %	3 %
Small main roads	15 %	10 %	5 %
Main roads	20 %	15 %	10 %
Major main roads	20 %	15 %	10 %
Trunk roads	20 %	20 %	20 %
Motorways	25 %	35 %	45 %

Fonte: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure.

Tabela 3-4: Parâmetros para modelagem da superfície das vias

Tool 5.4: Road surface type based on road type																					
Method	complexity	accuracy	cost																		
Divide all roads into different categories and apply for every road type the default pavement most likely for this kind of road. Example Only <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type of road</th> <th>Default pavement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>dead-end roads</td> <td>stones</td> </tr> <tr> <td>service roads</td> <td>stones</td> </tr> <tr> <td>collecting roads</td> <td>asphalt</td> </tr> <tr> <td>small main roads</td> <td>asphalt</td> </tr> <tr> <td>main roads</td> <td>asphalt</td> </tr> <tr> <td>major main roads</td> <td>concrete/porous/asphalt</td> </tr> <tr> <td>trunk roads</td> <td>concrete/porous/asphalt</td> </tr> <tr> <td>motorways</td> <td>concrete/porous/asphalt</td> </tr> </tbody> </table> Every region or Member State should make its own classification. Use Tool 5.2 or Tool 5.3.	Type of road	Default pavement	dead-end roads	stones	service roads	stones	collecting roads	asphalt	small main roads	asphalt	main roads	asphalt	major main roads	concrete/porous/asphalt	trunk roads	concrete/porous/asphalt	motorways	concrete/porous/asphalt			
Type of road	Default pavement																				
dead-end roads	stones																				
service roads	stones																				
collecting roads	asphalt																				
small main roads	asphalt																				
main roads	asphalt																				
major main roads	concrete/porous/asphalt																				
trunk roads	concrete/porous/asphalt																				
motorways	concrete/porous/asphalt																				

Fonte: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure.

Tabela 3-5: Conversão de parâmetros para modelagem da superfície das vias

NMPB 96 EU Interim Road surface	CNOSSOS road surface
Rough texture paving stones (+6)	NL11
Smooth texture paving stones (+3)	NL10
Cement concrete and corrugated asphalt (+2)	NL08
Smooth asphalt (0dB)	NL05
Porous surface (-1 to -3 dependent upon speed)	NL13

Fonte: Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU.

No que diz respeito às informações relacionadas ao tráfego de veículos leves e pesados, considerou-se que as avenidas Paulista e 9 de Julho são vias principais, as ruas Augusta, Rui Barbosa e São Carlos do Pinhal são pequenas vias principais e as demais são vias coletoras. Conforme indicação da Tabela 3-1, para as vias principais seria necessário conhecer sua movimentação na hora pico, a fim de estimar a movimentação média ao longo do dia, entretanto, na ausência dessa informação, supôs-se, para a Avenida paulista, uma contagem de 7000 veículos durante o dia. Esse valor foi estimado levando-se em conta que essa avenida teria uma movimentação 5 vezes maior que uma das pequenas vias principais. Além disso, foi observado o nível de ruído global gerado a partir dessa movimentação, próximo à 80 dBA, como esperado para os entornos de avenidas muito movimentadas (IFSTTAR, CEREMA, UMRAE, F-44344 Bouguenais, France). Para a Avenida 9 de julho,

foi feita a estimativa de que sua movimentação de veículos durante o dia corresponde à 50% á da av paulista.

Em relação à velocidade dos veículos, foi considerada a velocidade limite das vias, que é de 50 km/h para as avenidas Paulista e 9 de Julho e de 40 km/h para as demais vias. Já no que diz respeito ao tipo de revestimento das ruas, este foi considerado como asfalto para todas as vias, representado pelo código NL08, conforme Tabela 3-5.

As tabelas a seguir mostram os dados inseridos para a modelagem das vias principais, das pequenas vias principais e das vias coletoras.

Tabela 3-6: Dados para modelagem da Av. Paulista

PK	TV_D	TV_E	TV_N	HV_D	HV_E	HV_N	LV_SPD_D	LV_SPD_E	LV_SPD_N	HV_SPD_D	HV_SPD_E	HV_SPD_N	PVMT
50	7000	2000	1000	1050	200	50	50	50	50	50	50	50	NL08

Fonte: Autora.

Tabela 3-7: Dados para modelagem da Av. 9 de Julho

PK	TV_D	TV_E	TV_N	HV_D	HV_E	HV_N	LV_SPD_D	LV_SPD_E	LV_SPD_N	HV_SPD_D	HV_SPD_E	HV_SPD_N	PVMT
50	3500	1000	500	525	100	25	50	50	50	50	50	50	NL08

Fonte: Autora.

Tabela 3-8: Dados para modelagem das pequenas avenidas principais

PK	TV_D	TV_E	TV_N	HV_D	HV_E	HV_N	LV_SPD_D	LV_SPD_E	LV_SPD_N	HV_SPD_D	HV_SPD_E	HV_SPD_N	PVMT
50	1400	400	200	210	40	10	40	40	40	40	40	40	NL08

Fonte: Autora.

Tabela 3-9: Dados para modelagem das vias coletoras

PK	TV_D	TV_E	TV_N	HV_D	HV_E	HV_N	LV_SPD_D	LV_SPD_E	LV_SPD_N	HV_SPD_D	HV_SPD_E	HV_SPD_N	PVMT
50	700	200	100	70	12	3	40	40	40	40	40	40	NL08

Fonte: Autora.

Uma limitação do software *NoiseModelling* não permite que sejam gerados resultados considerando-se simultaneamente a geração de ruídos por parte de vias e de fontes pontuais (como uma fábrica, por exemplo), pois a análise emprega uma metodologia distinta para cada caso. Para contornar essa limitação, foi necessário criar fontes pontuais que simulassem a geração de ruído das ruas. Para isso, foi criada uma densa camada de receptores sobrepostos

às ruas, utilizando a função do *software QGIS* para criar pontos aleatórios sobre uma linha. A rede de receptores gerada pode ser observada na Figura 3-3 a seguir.

Figura 3-3: Rede de receptores criada sobre as vias



Fonte: Autora.

O arquivo gerado foi inserido como *input* no *NoiseModelling* juntamente com os arquivos de prédios e a de ruas, e foi selecionada a metodologia de análise que considera as vias como fonte de ruído. A partir dessa análise, foram gerados valores de nível de pressão sonora percebida pelos receptores para dia, entardecer e noite. Os resultados gerados pelo *NoiseModelling* são compostos por valores de pressão sonora para cada banda de oitava e um valor de pressão sonora equivalente, que são exatamente as informações necessárias para a modelagem de uma fonte nesse mesmo *software*. Como os receptores foram dispostos sobre as ruas, é razoável considerar a aproximação de que a pressão sonora percebida pelos receptores é a mesma que é emitida pelos carros.

A partir dessa consideração, utilizou-se esses dados para modelagem de fontes sobre as ruas, nos mesmos pontos em que estiveram localizados os receptores. Foram utilizados os valores de nível de potência sonora nas bandas de oitava, nível equivalente de pressão sonora e número de identificação. Um exemplo de uma das fontes modeladas para simular a geração de ruídos das vias pode ser observado na Tabela 3-10 a seguir.

Tabela 3-10: Exemplo de fonte modelada para simular a geração de ruídos das vias

IDRECEIVER	HZ63 (dB)	HZ125 (dB)	HZ250 (dB)	HZ500 (dB)	HZ1000 (dB)	HZ2000 (dB)	HZ4000 (dB)	HZ8000 (dB)	LAEQ (dBA)
61423	78.81	73.61	72.9	74.18	74.68	70.48	62.8	53.9	77.97

Fonte: Autora.

Para assegurar que a aproximação feita, que considera a conversão de uma fonte linear para várias fontes pontuais é razoável, foram gerados os resultados desse conjunto de fontes que simula as ruas para uma grade regular de receptores. Esses resultados foram comparados com aqueles gerados pelas ruas modeladas de maneira contínua, considerando-se a mesma rede de receptores, com a intenção de realizar uma verificação do ajuste adotado. A partir da comparação de resultados, chegou-se à conclusão da validade de aplicação do modelo, encontrando um erro médio de 1,3 dBA.

Partindo-se das considerações citadas nesse item, foram criados dois cenários bases, o primeiro considerando uma maior movimentação de veículos, equivalente ao período do dia (entre 6h e 18h), e, portanto, um maior ruído de fundo, denominado cenário Controle.1 e o segundo considerando uma menor movimentação de veículos, equivalente ao período do entardecer (entre 18h e 22h), e, portanto, um menor ruído de fundo, denominado cenário Controle.2.

3.1.2 Modelagem da Fonte

Para a modelagem das fontes de ruído, foi necessário determinar a localização e o nível equivalente de pressão sonora emitida, de maneira compatível com as necessidades de entradas do *software NoiseModelling*. As fontes aqui mencionadas referem-se a vertipontos, assumindo-os como pontos emissores de ruído. Naturalmente, tal abordagem não é capaz de capturar totalmente o ruído da operação UAM, a ser composto por aeronaves em diferentes fases de voo. Pode-se argumentar que o ruído emitido a partir de vertipontos tende a ser mais intenso do que o ruído de aeronaves em fases de cruzeiro, saída e aproximação: não só a velocidade de deslocamento nos pousos e decolagens é baixa, prolongando a emissão, quanto o nível de potência aplicado é alto.

A localização das fontes foi feita considerando-se o reaproveitamento da infraestrutura de helipontos já existentes atualmente. A região selecionada para estudo possuía grande número de helipontos, mas considerou-se aqueles que estivessem a um mínimo de 280 m um do outro,

premissa adotada como condição mínima para operação simultânea dos vertiportos. Partindo-se dessa consideração, foram modeladas três fontes. A localização das fontes pode ser observada na Figura 3-4.

Figura 3-4: Localização das fontes de ruído (vertiportos)



Fonte: Autora.

A emissão de ruído foi determinada considerando-se nível de potência sonora de cada banda de frequência e o nível de pressão sonora equivalente. Um exemplo de modelagem de uma fonte de ruído pode ser observado na Tabela 3-11 a seguir.

Tabela 3-11: Exemplo de fonte modelada para simular a geração de ruídos das vias

HZ63 (dB)	HZ125 (dB)	HZ250 (dB)	HZ500 (dB)	HZ1000 (dB)	HZ2000 (dB)	HZ4000 (dB)	HZ8000 (dB)	LAEQ (dB)
33.5	40.2	48.2	57.8	69.4	83.3	100.0	120.0	120

Fonte: Autora.

As fontes correspondentes aos vertiportos foram inseridas em um arquivo juntamente com as fontes utilizadas para simular a emissão de ruído das vias. Esse arquivo foi inserido como *input* no *NoiseModeling* juntamente com os arquivos de prédios e a de ruas, e foi selecionada a metodologia de análise que considera fontes pontuais como fonte de ruído. A imagem representativa do arquivo de fontes utilizado para análise pode ser observada a seguir.

Figura 3-5: Arquivo de fontes utilizado na modelagem



Fonte: Autora.

3.1.3 Modelagem dos Cenários

Dado que o objetivo deste estudo é estabelecer um limite para o nível de ruído de um eVTOL para que a operação deste não cause alterações na paisagem sonora do local em que for inserido, foram modelados diversos cenários, considerando-se não só diferentes níveis de potência sonora, mas também diferentes espectros de emissão, isto é, diferentes níveis de pressão sonora para as bandas de oitava.

Foram considerados como limites inferior e superior, respectivamente, a potência sonora gerada por um carro elétrico, em torno de 70 dBA (Marie-Agnès Pallas, 2019) e por um helicóptero, de cerca de 120 dBA (Thomas Kupper, 2012). A partir dessa pressão total equivalente foram concebidos cenários com diferentes distribuições de pressão sonora entre as bandas de oitava, buscando analisar o impacto de sons mais agudos ou mais graves sobre a paisagem sonora. Para isso, foram criados três cenários de emissão para cada nível equivalente, conforme tabela a seguir.

Tabela 3-12: Cenários considerados

ID	HZ63 (dB)	HZ125 (dB)	HZ250 (dB)	HZ500 (dB)	HZ1000 (dB)	HZ2000 (dB)	HZ4000 (dB)	HZ8000 (dB)	LAEQ (db)
C1	111.0	111.0	111.0	111.0	111.0	111.0	111.0	111.0	120
C2	120.0	96.0	76.8	61.4	49.2	39.3	31.5	25.2	120
C3	33.5	40.2	48.2	57.8	69.4	83.3	100.0	120.0	120
C4	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	110
C5	110.0	88.0	70.4	56.3	45.1	36.0	28.8	23.1	110
C6	30.7	36.8	44.2	53.0	63.6	76.3	91.6	109.9	110
C7	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	100
C8	100.0	80.0	64.0	51.2	41.0	32.8	26.2	21.0	100
C9	27.9	33.5	40.1	48.2	57.8	69.4	83.3	99.9	100
C10	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	90
C11	90.0	72.0	57.6	46.1	36.9	29.5	23.6	18.9	90
C12	25.1	30.1	36.1	43.3	52.0	62.4	74.9	89.9	90
C13	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0	80
C14	80.0	64.0	51.2	41.0	32.8	26.2	21.0	16.8	80
C15	22.3	26.7	32.1	38.5	46.2	55.4	66.5	79.8	80
C16	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	70
C17	69.5	55.6	44.5	35.6	28.5	22.8	18.2	14.6	70
C18	19.4	23.3	28.0	33.6	40.3	48.4	58.1	69.7	70

Fonte: Autora.

Cada fonte mostrada na tabela acima foi inserida em ambos os cenários base modelados, considerando-se os contextos de ruídos de fundo correspondes ao dia e ao entardecer. Os cenários cujo ruído de fundo corresponde à movimentação de veículos durante o dia foram identificados com final .1, enquanto que os cenários cujo ruído de fundo corresponde à movimentação de veículos durante o entardecer foram identificados com final .2. Por exemplo, o cenário em que a fonte C1, mostrada na Tabela 3-12, foi inserida no cenário base que considera a movimentação diurna dos veículos foi identificado como C1.1, enquanto que o cenário em que essa mesma fonte foi inserida no cenário base que considera a movimentação noturna de veículos foi identificado como C1.2.

4 Resultados e Discussões

4.1.1 Resultados do Cenário Base

Como descrito anteriormente, os cenários base são aqueles em que não foi considerada a inserção de novas fontes de ruído correspondentes à operação de eVTOLs. Estes cenários serão utilizados como referência para a verificação de possíveis alterações na paisagem sonora nos cenários cujos resultados serão discutidos posteriormente. Como já mencionado, são considerados dois cenários base: o primeiro, denominado Controle.1, considera uma maior movimentação de veículos, equivalente ao período do dia (entre 6h e 18h), e, portanto, um maior ruído de fundo, enquanto o segundo, denominado Controle.2, considerando uma menor movimentação de veículos, equivalente ao período do entardecer (entre 18h e 22h), e, portanto, um menor ruído de fundo.

Os seguintes resultados gerados a partir do *NoiseModelling*, para cada receptor da rede de receptores modelada:

- Nível de pressão sonora de cada banda de oitava, em dB;
- Nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}), em dBA.

Para exemplificar o formato em que os resultados são gerados, a Tabela 4-1 mostra os resultados obtidos para alguns dos receptores do cenário Controle.1:

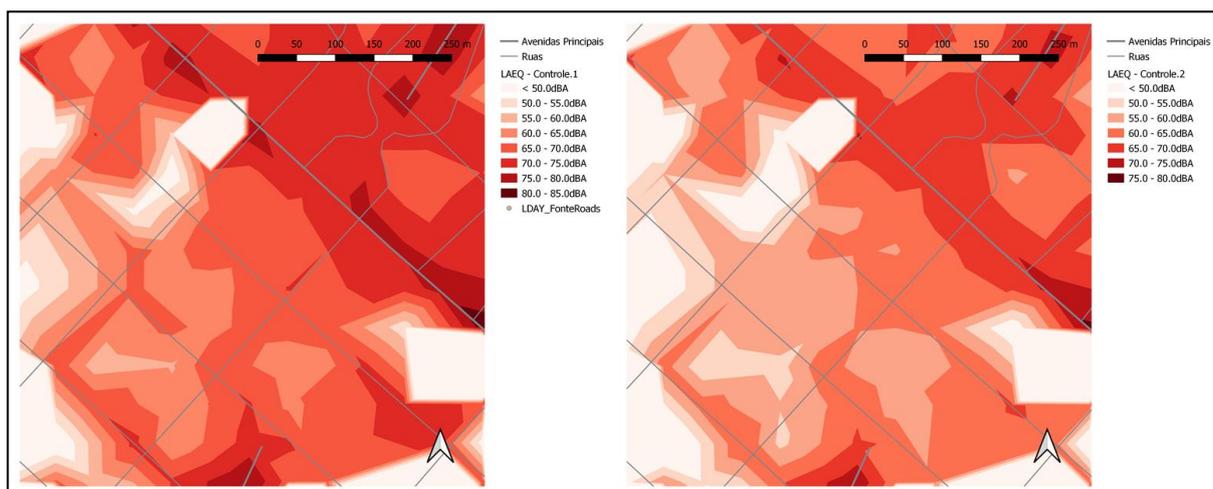
Tabela 4-1: Exemplo de resultados obtidos

IDRECEIVER	HZ63 (dB)	HZ125 (dB)	HZ250 (dB)	HZ500 (dB)	HZ1000 (dB)	HZ2000 (dB)	HZ4000 (dB)	HZ8000 (dB)	LAeq (dBA)
61418	52.1	45.6	44.6	45.5	45.6	41.2	32.5	17.6	48.91
61419	57.9	51.5	50.5	51.4	51.5	47.3	39.1	26.7	54.89
61420	63.4	57.8	56.9	58.0	58.3	53.8	44.9	31.8	61.5
61421	66.6	61.3	60.5	61.7	62.1	57.5	48.5	34.6	65.25

Fonte: Autora.

Os mapas de ruídos gerados para cada um dos cenários base, a partir dos resultados de nível de pressão sonora equivalente obtidos, podem ser observados na Figura 4-1 a seguir.

Figura 4-1: Resultados dos cenários base



Fonte: Autora.

Como esperado, o nível de pressão sonora equivalente é maior em regiões mais próximas às avenidas principais, onde o tráfego de veículos é mais intenso, e é significativamente menor em áreas com alta densidade de prédios, que atuam como obstáculos para a propagação do som.

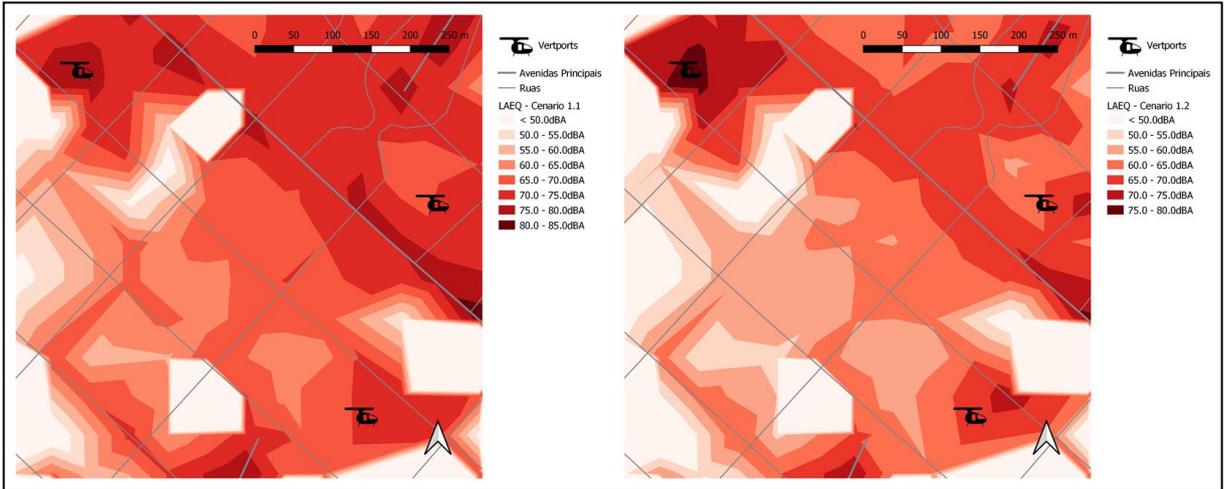
4.1.2 Resultados dos Cenários

Para cada cenário descrito no item 3.1.3 foram gerados resultados, para cada receptor, de nível de pressão sonora para cada banda de oitava, em dB, e de nível de pressão sonora equivalente, em dBA.

4.1.2.1 Mapas de Ruído

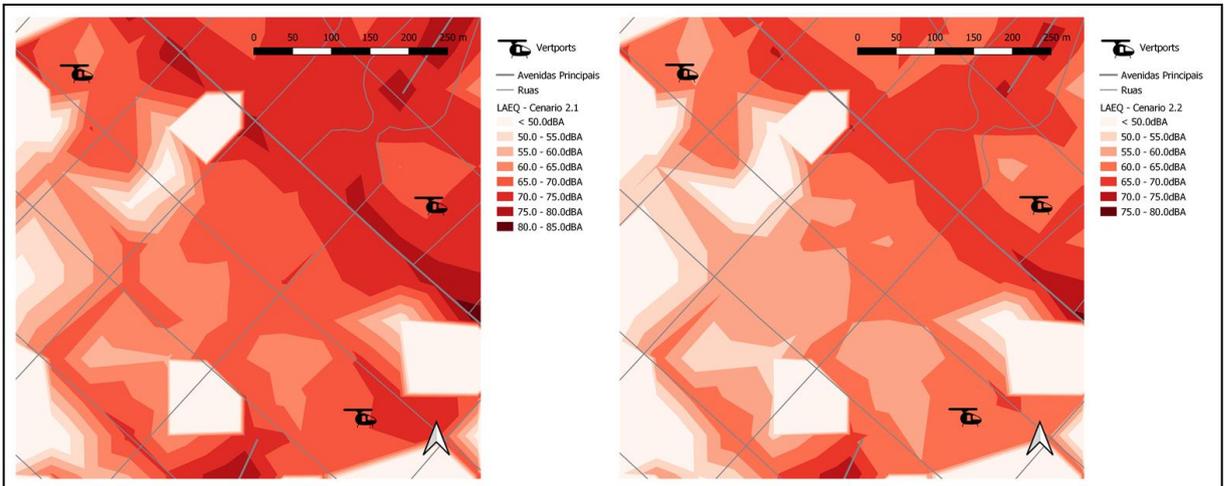
Para cada cenário, foi gerado um mapa de ruído, a fim de compará-lo ao seu respectivo cenário base para verificar modificação na paisagem sonora do ambiente em decorrer da inserção de novas fontes de ruído. As figuras abaixo representam alguns dos mapas de ruído gerados. Ressalta-se que os mapas de ruído estão identificados pelo ID das fontes inseridas e pela indicação .1, para cenários com ruído de fundo relativos à movimentação de veículos durante o dia e pela indicação .2 para cenários com ruído de fundo relativos à movimentação de veículos durante o entardecer.

Figura 4-2: Mapas de ruído dos cenários C1



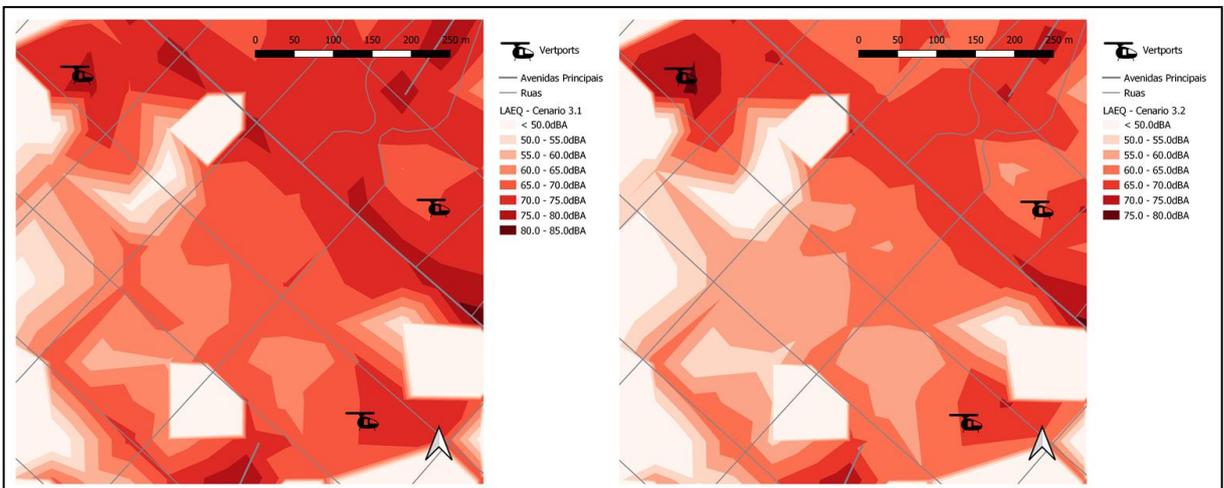
Fonte: Autora.

Figura 4-3: Mapas de ruído dos cenários C2



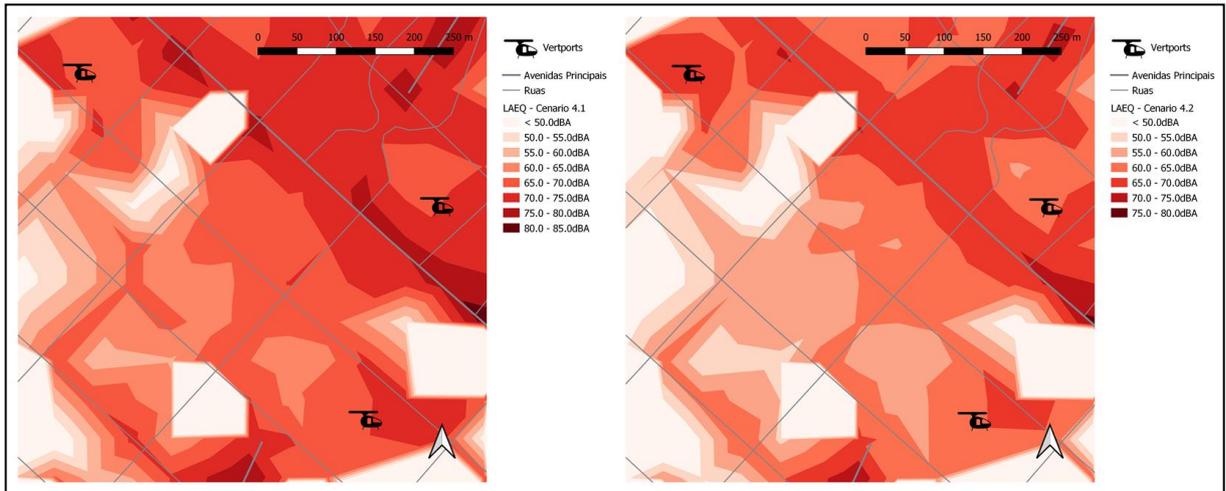
Fonte: Autora.

Figura 4-4: Mapas de ruído dos cenários C3



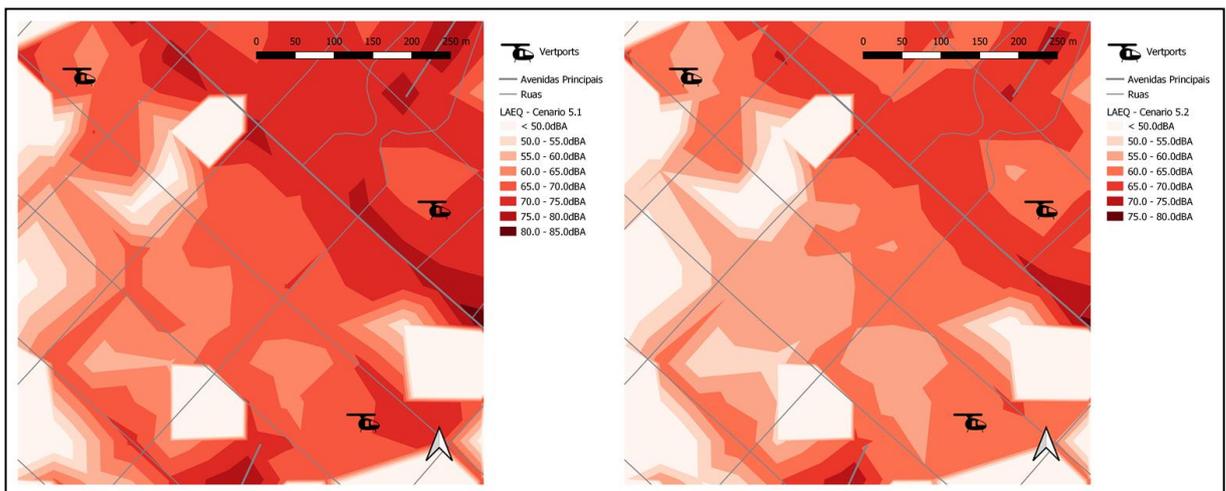
Fonte: Autora.

Figura 4-5: Mapas de ruído dos cenários C4



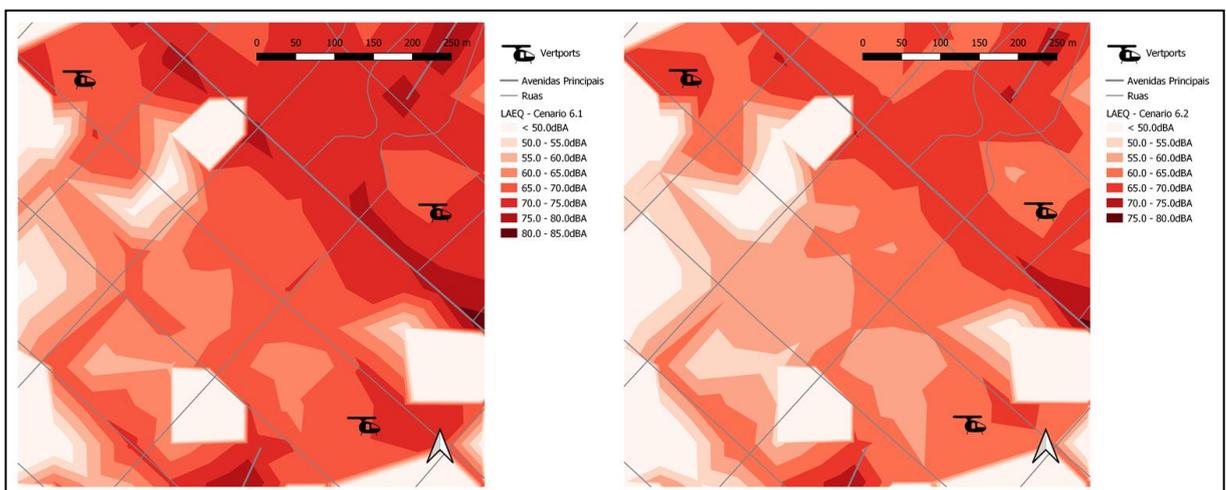
Fonte: Autora.

Figura 4-6: Mapas de ruído dos cenários C5



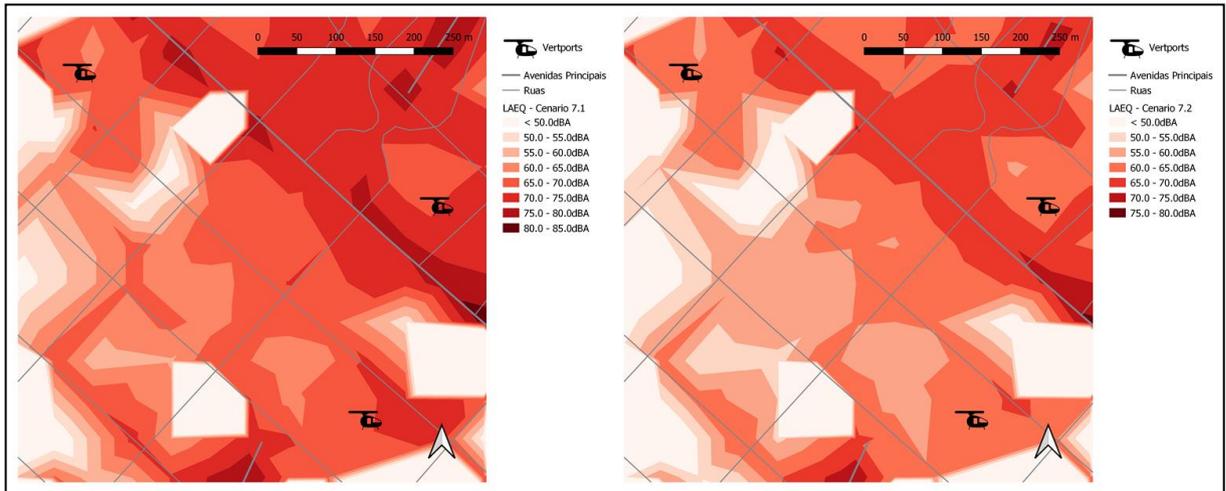
Fonte: Autora.

Figura 4-7: Mapas de ruído dos cenários C6



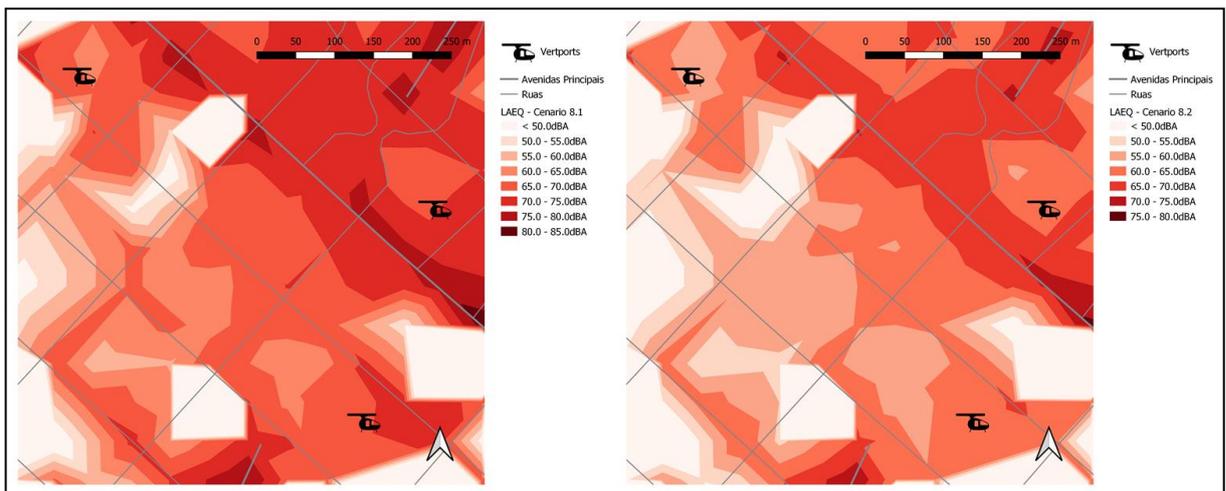
Fonte: Autora.

Figura 4-8: Mapas de ruído dos cenários C7



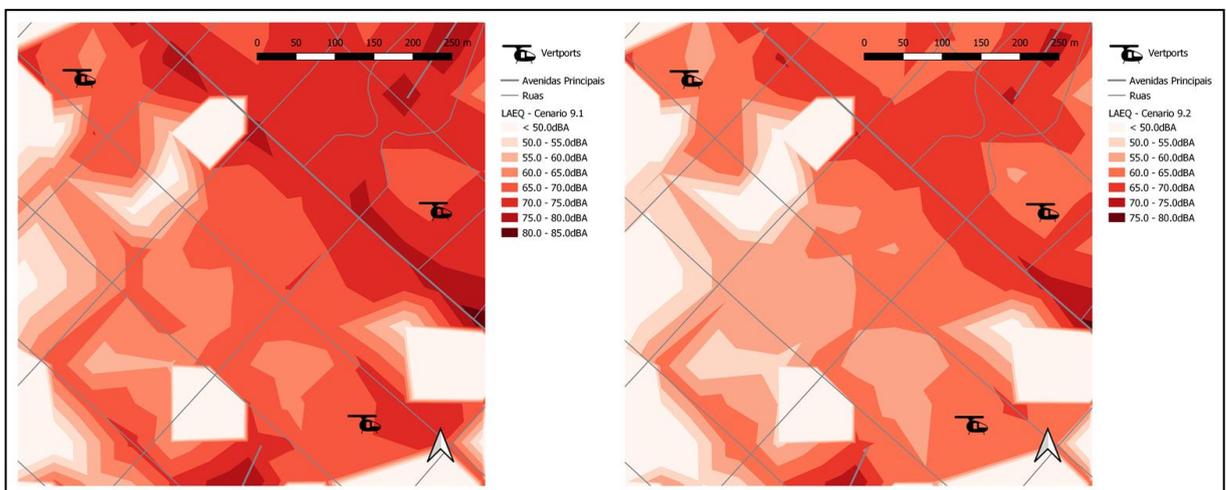
Fonte: Autora.

Figura 4-9: Mapas de ruído dos cenários C8



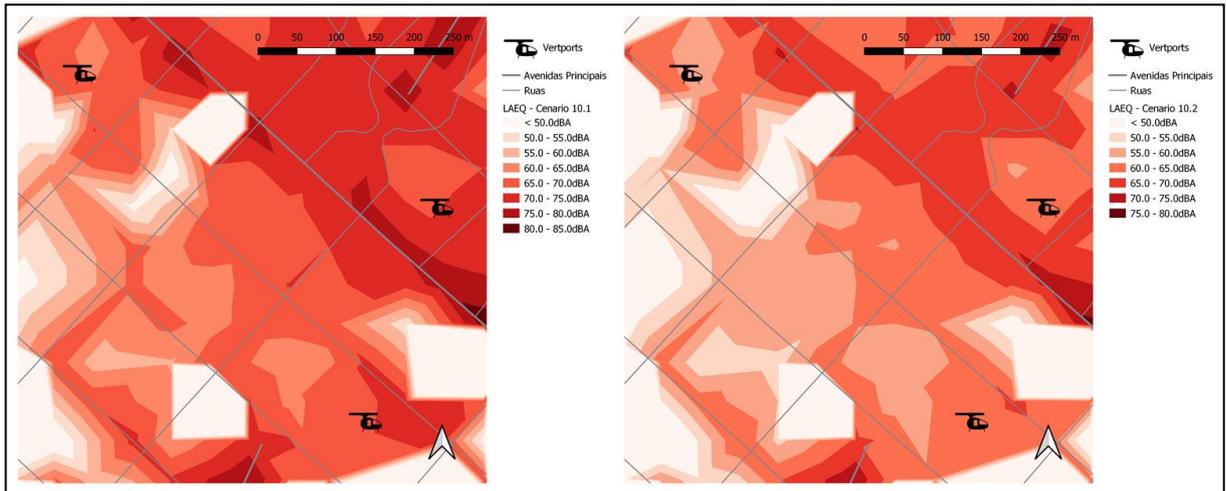
Fonte: Autora.

Figura 4-10: Mapas de ruído dos cenários C9



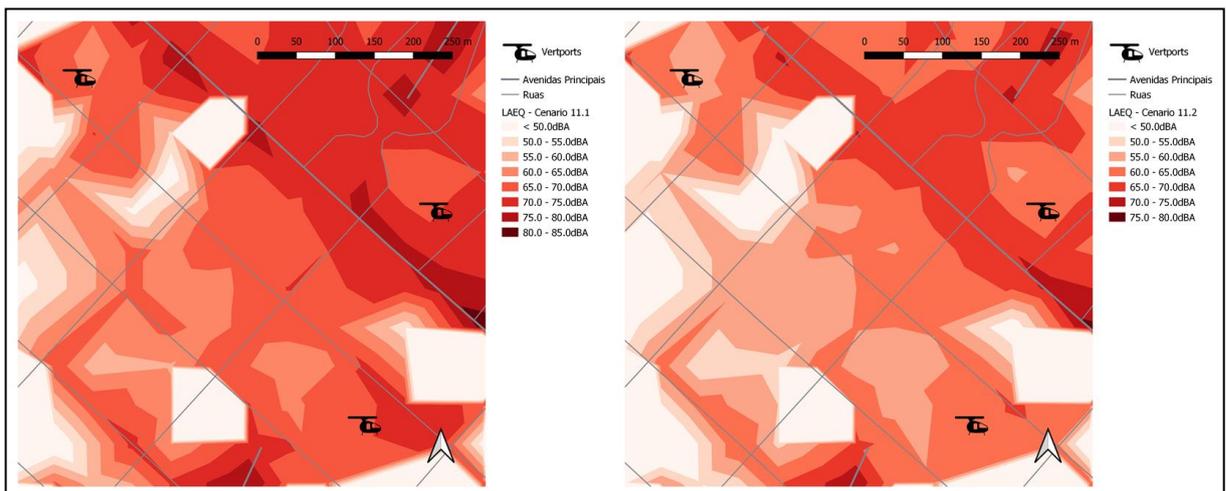
Fonte: Autora.

Figura 4-11: Mapas de ruído dos cenários C10



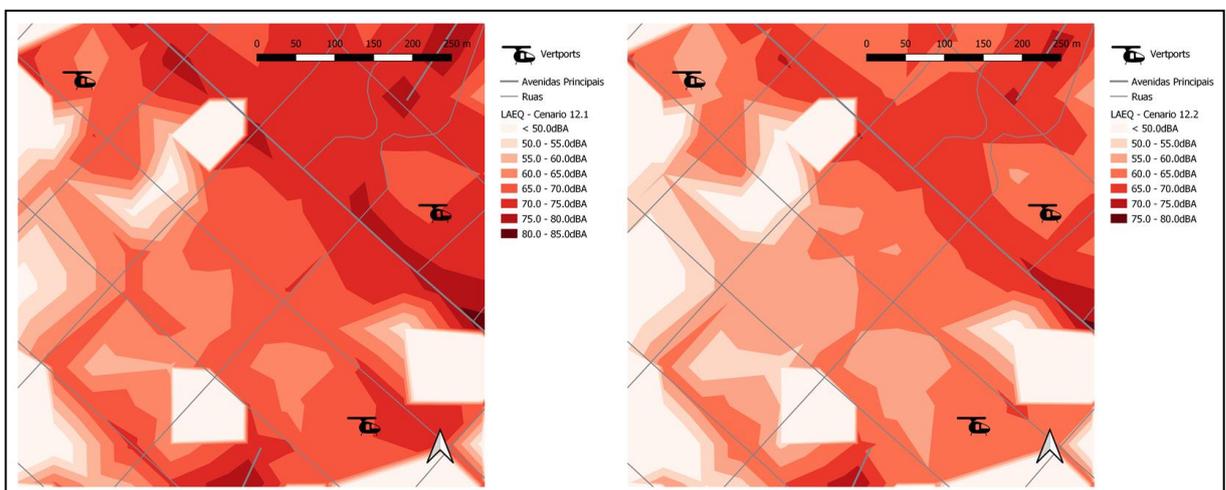
Fonte: Autora.

Figura 4-12: Mapas de ruído dos cenários C11



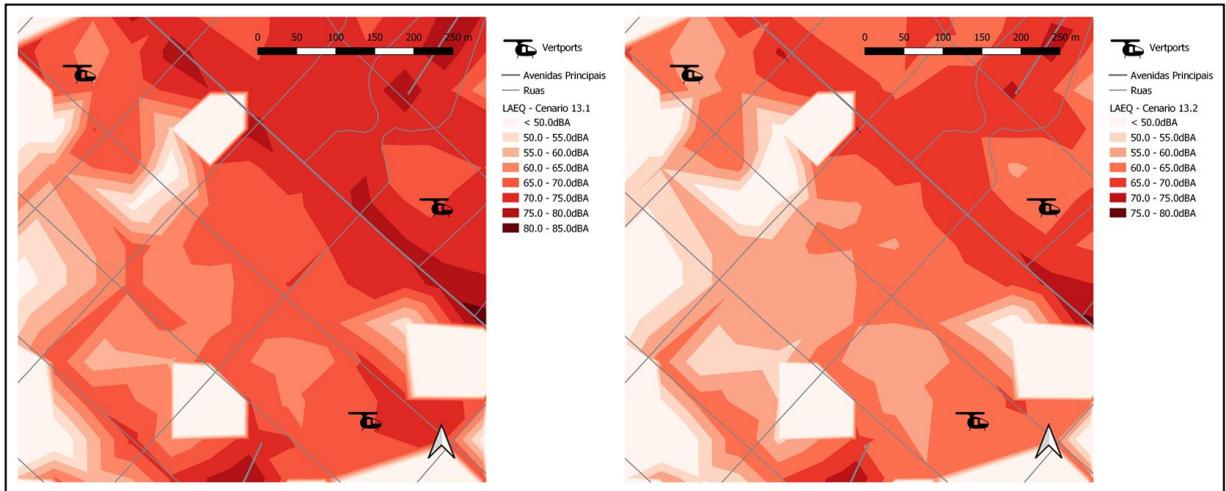
Fonte: Autora.

Figura 4-13: Mapas de ruído dos cenários C12



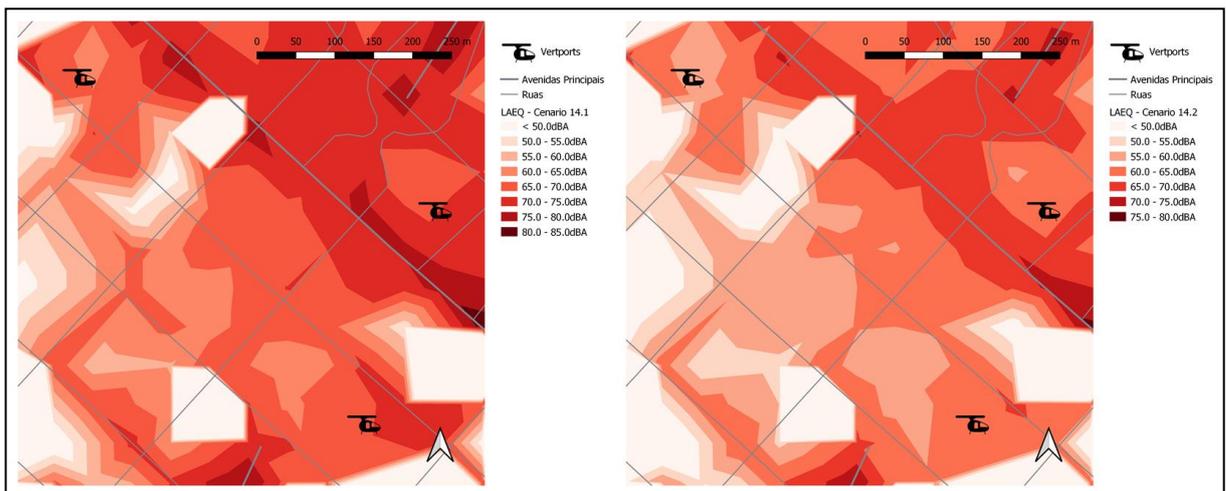
Fonte: Autora.

Figura 4-14: Mapas de ruído dos cenários C13



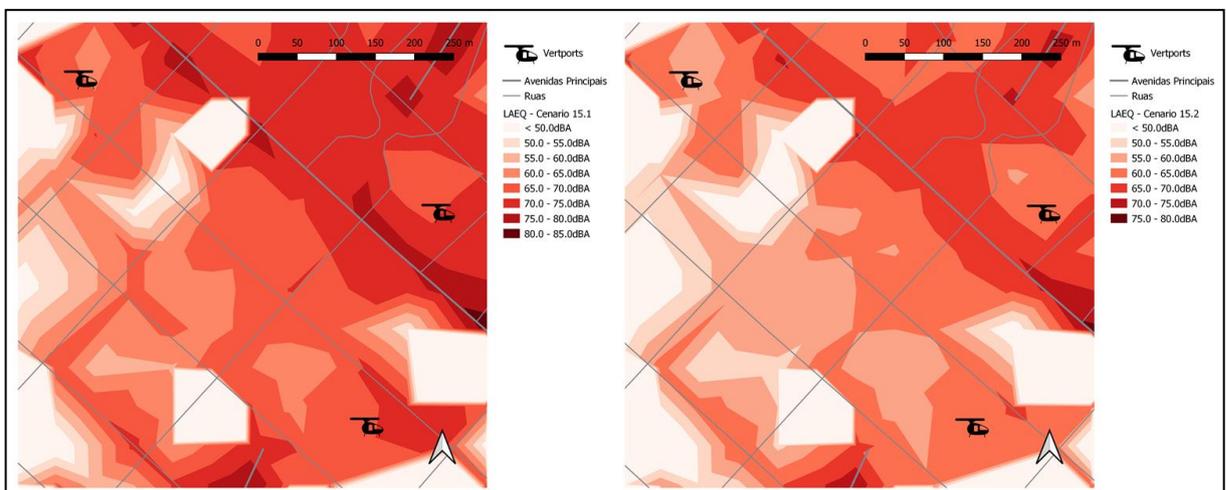
Fonte: Autora.

Figura 4-15: Mapas de ruído dos cenários C14



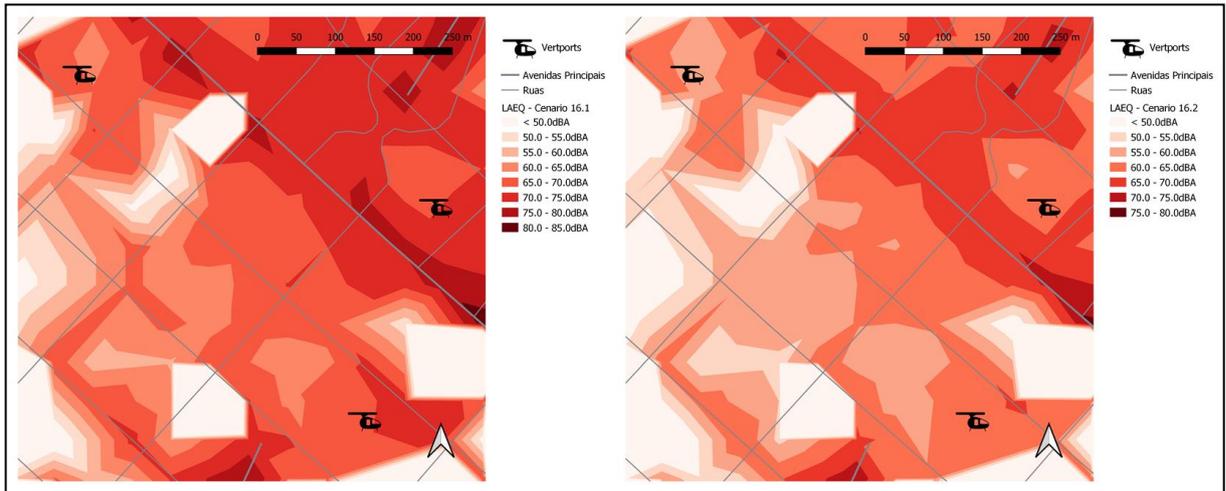
Fonte: Autora.

Figura 4-16: Mapas de ruído dos cenários C15



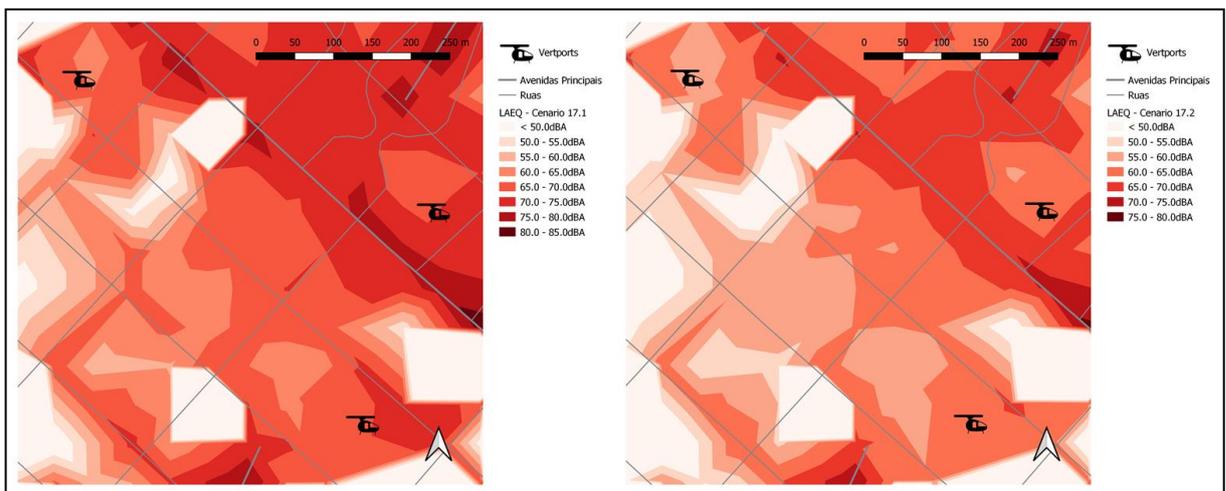
Fonte: Autora.

Figura 4-17: Mapas de ruído dos cenários C16



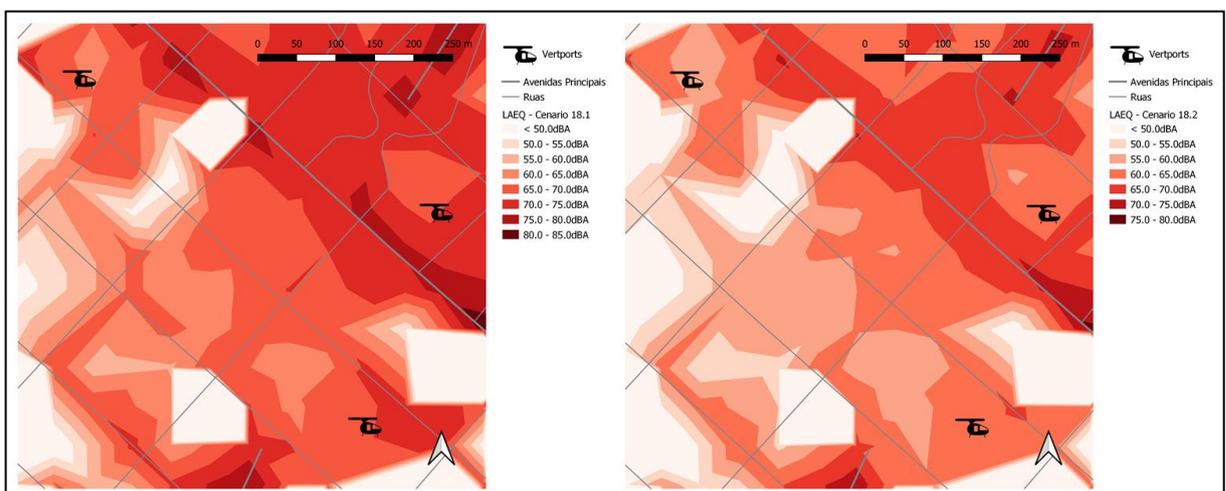
Fonte: Autora.

Figura 4-18: Mapas de ruído dos cenários C17



Fonte: Autora.

Figura 4-19: Mapas de ruído dos cenários C18



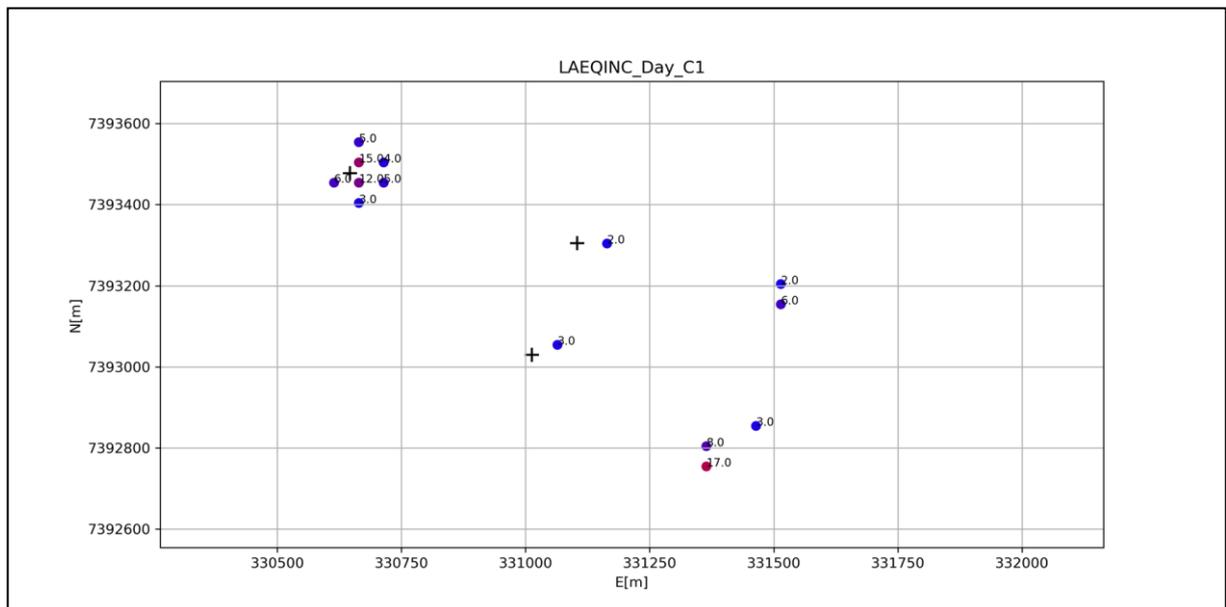
Fonte: Autora.

4.1.2.2 Percepção da Variação do Nível de Pressão Sonora

Os mapas de ruído são um formato de resultado que permite uma comparação visual não muito refinada, já que a variação entre as curvas de nível de pressão sonora equivalente é de 5dB. Entretanto, como discutido no item 2.3.1, o ouvido humano é capaz de detectar variações no nível de pressão sonora na ordem de 2 dB. Por esse motivo, a fim de analisar de maneira mais refinada quais fontes de ruído de fato gerariam uma variação na percepção da paisagem sonora e quais os receptores percebem essa variação, foi realizada uma comparação entre os valores de L_{Aeq} gerados para cada cenário e seu respectivo cenário base, para cada receptor. Dessa forma, foi possível detectar quais receptores, de quais cenários, perceberam alguma variação da paisagem sonora como consequência da operação dos eVTOLs.

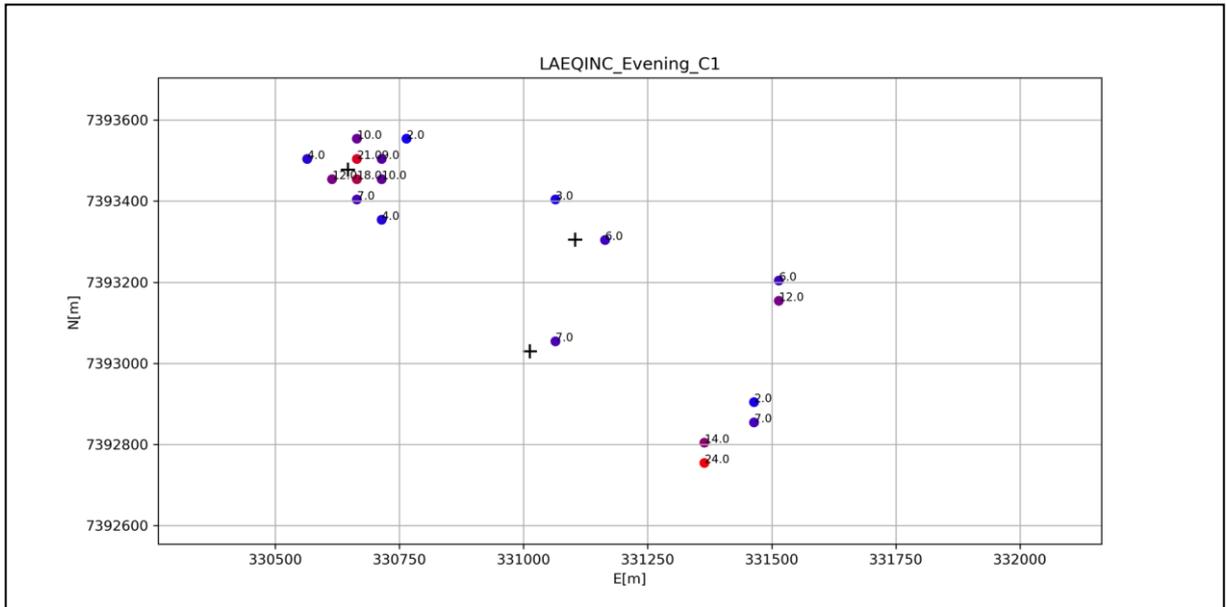
Os gráficos a seguir apresentam, para os mesmos cenários mostrados no item 4.1.2.1, os receptores que perceberam algum acréscimo do nível de ruído da paisagem sonora em decorrer da inserção das novas fontes de ruído, ou seja, os receptores para os quais a variação no nível de pressão sonora equivalente foi superior à 2 dBA. Para esses receptores, está também indicada na figura qual a variação de nível equivalente de pressão sonora, em dBA, experienciada. A cruz preta representa a posição dos vertipontos.

Figura 4-20: Resultado do cenário C1.1



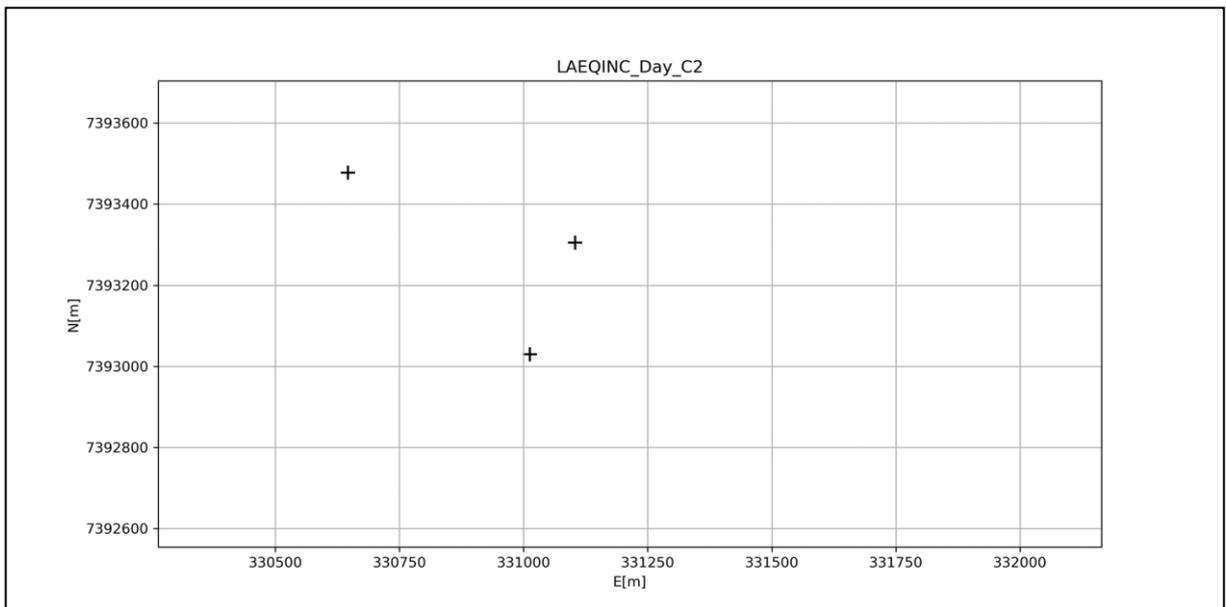
Fonte: Autora.

Figura 4-21: Resultado do cenário C1.2



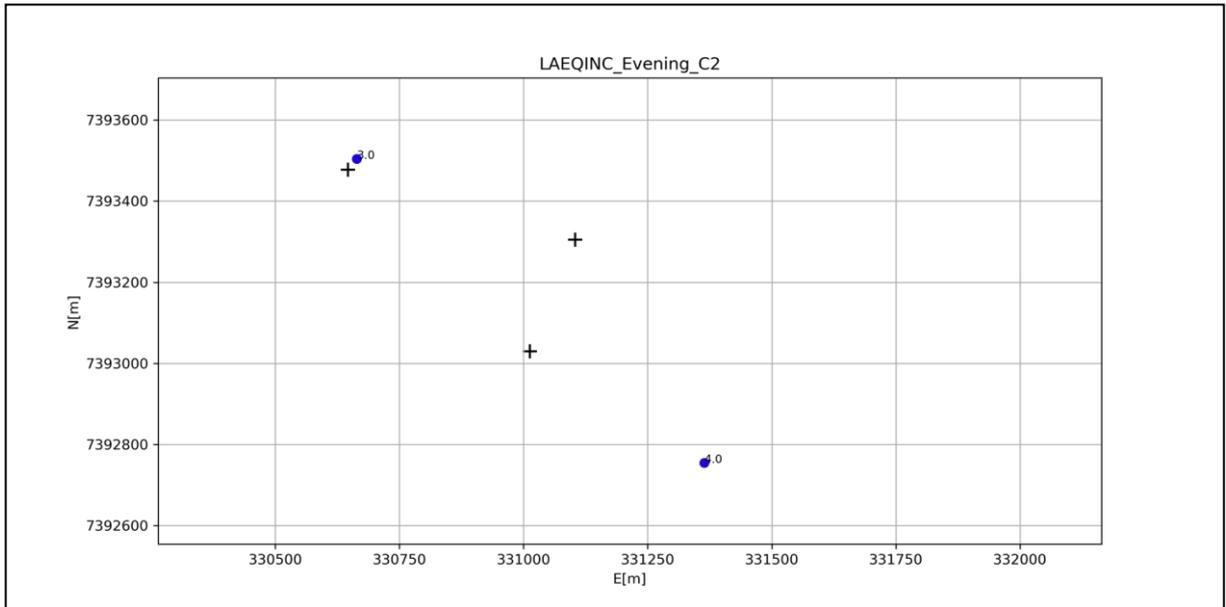
Fonte: Autora.

Figura 4-22: Resultados dos cenários C2.1



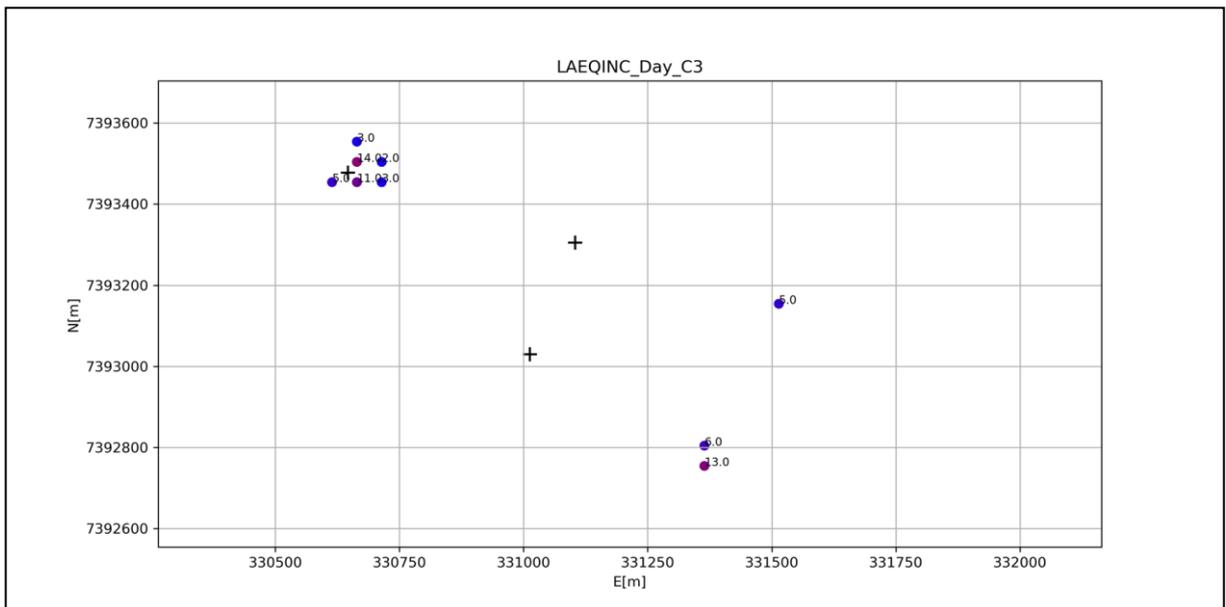
Fonte: Autora.

Figura 4-23: Resultados dos cenários C2.2



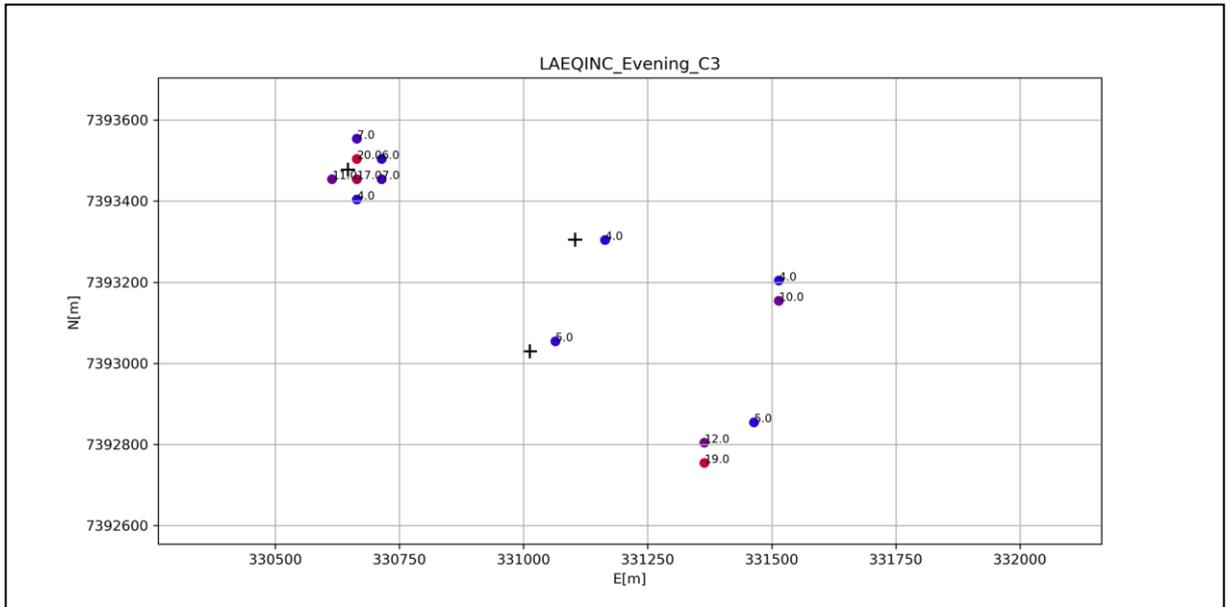
Fonte: Autora.

Figura 4-24: Resultado do cenário C3.1



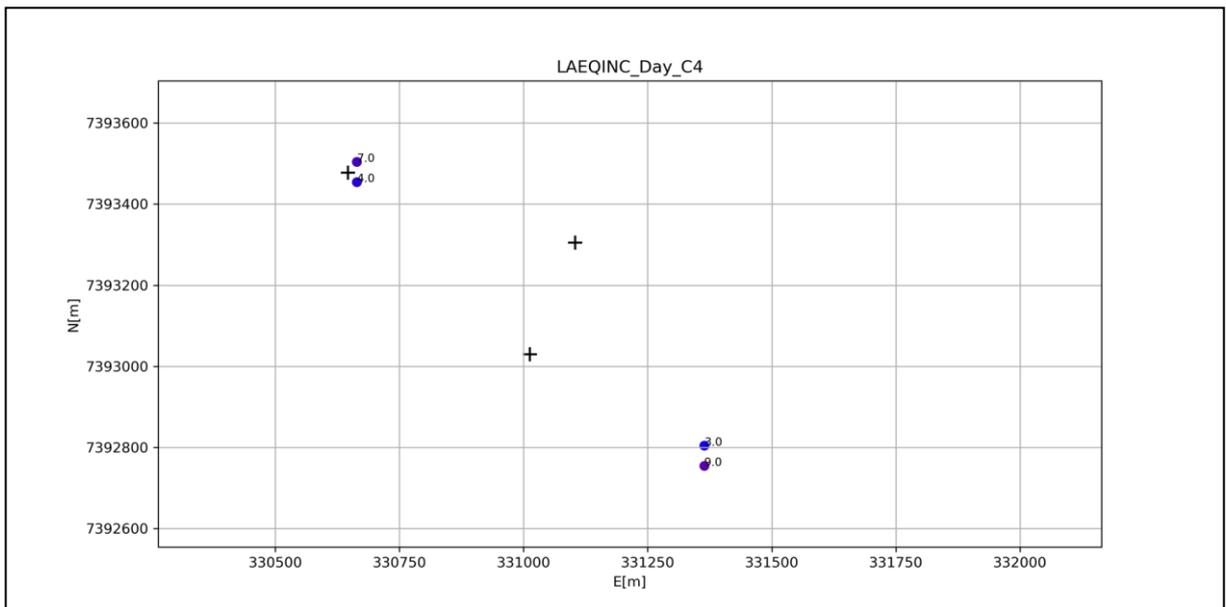
Fonte: Autora.

Figura 4-25: Resultado do cenário C3.2



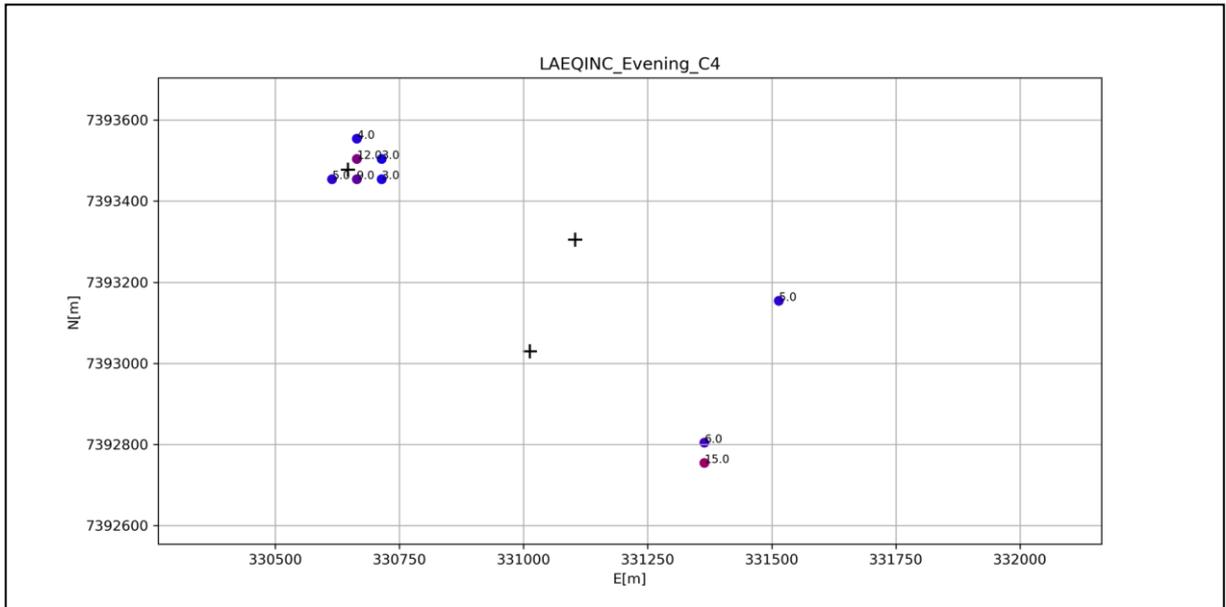
Fonte: Autora.

Figura 4-26: Resultado do cenário C4.1



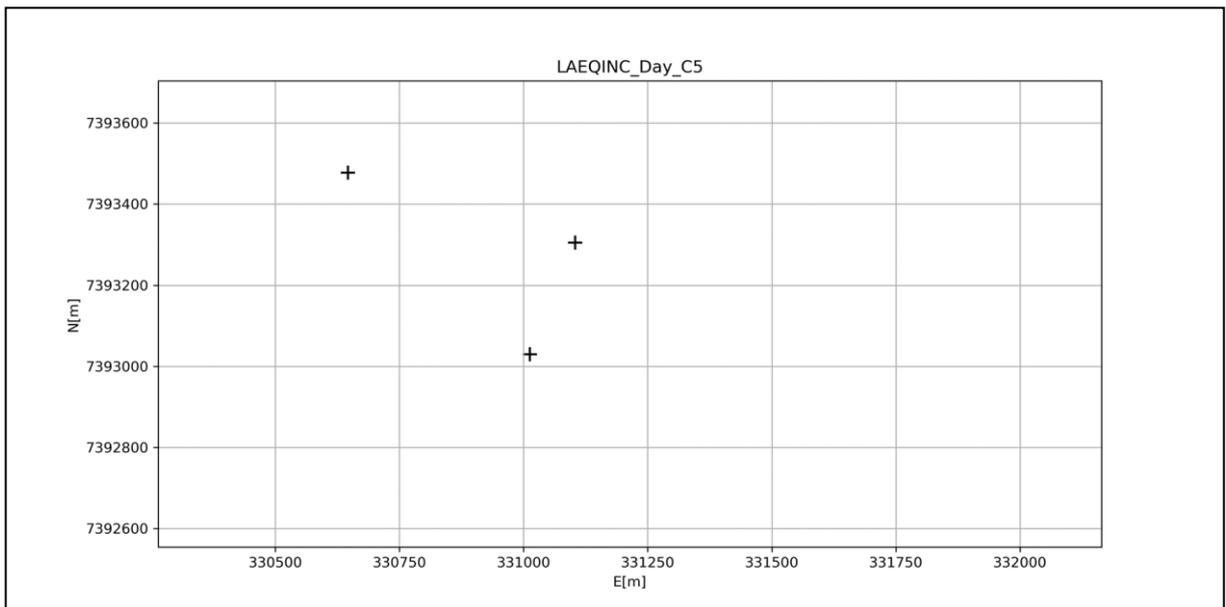
Fonte: Autora.

Figura 4-27: Resultado do cenário C4.2



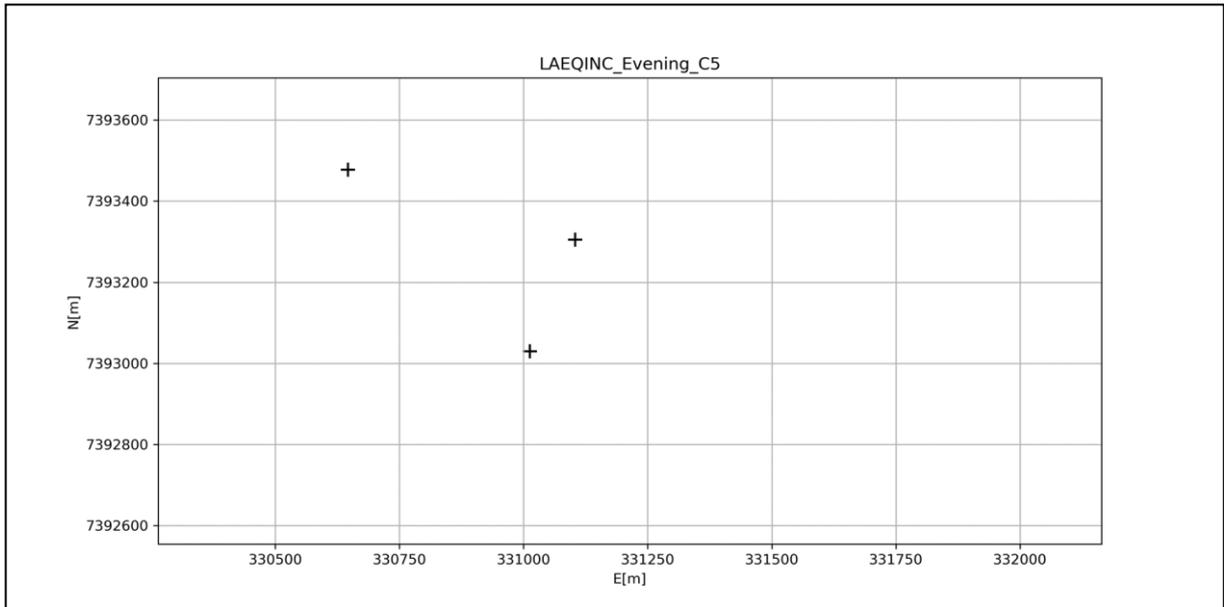
Fonte: Autora.

Figura 4-28: Resultado do cenário C5.1



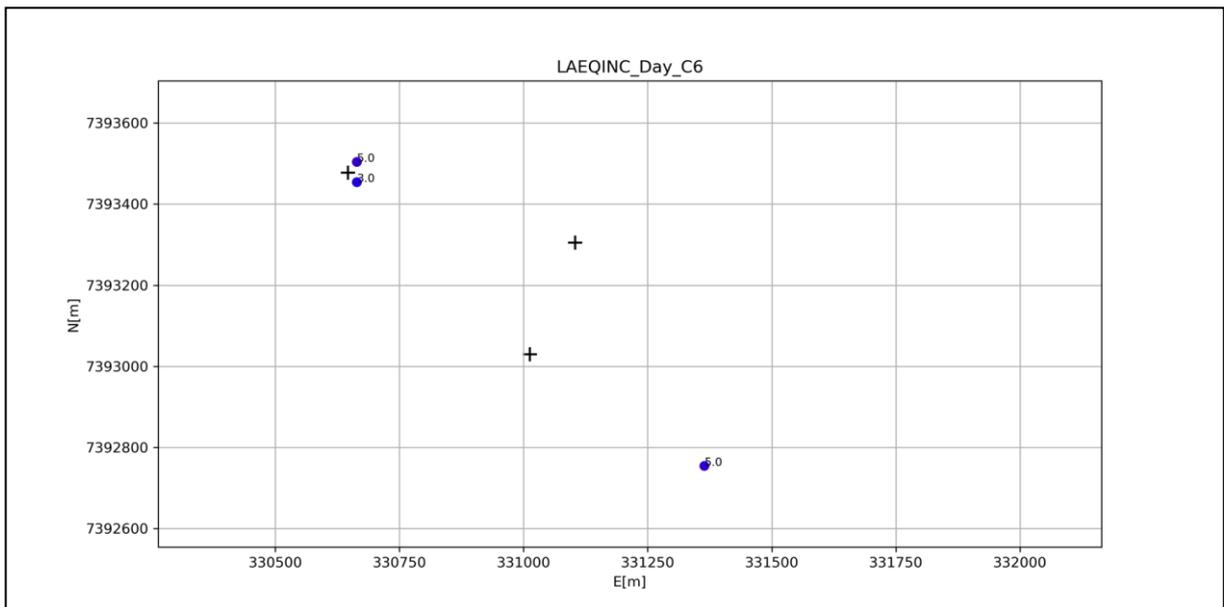
Fonte: Autora.

Figura 4-29: Resultado do cenário C5.2



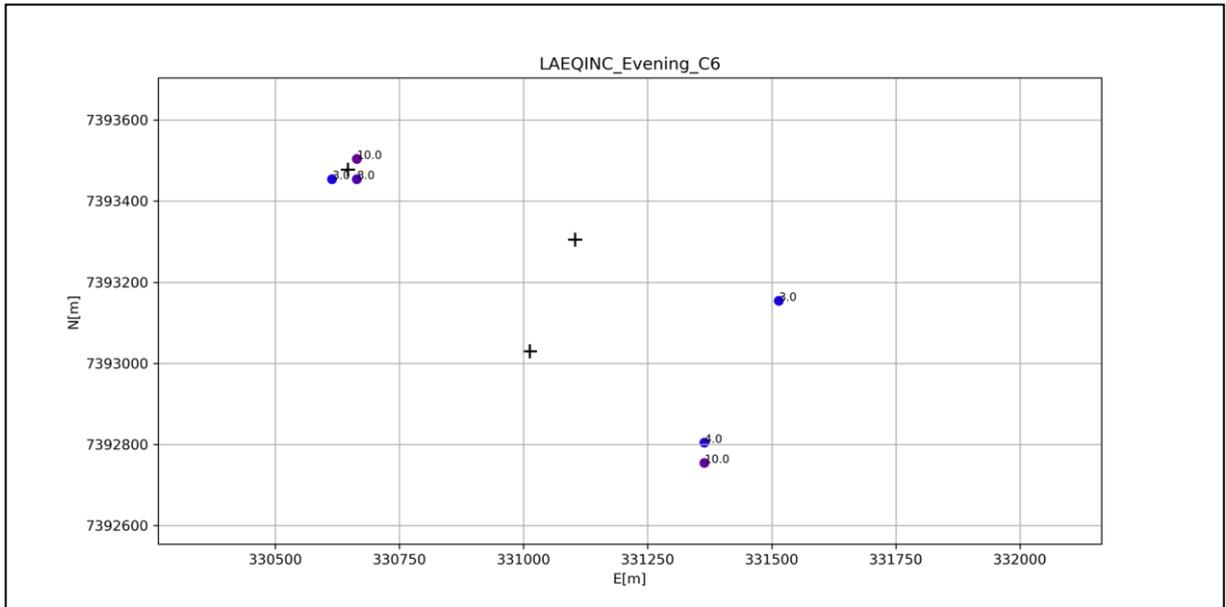
Fonte: Autora.

Figura 4-30: Resultado do cenário C6.1



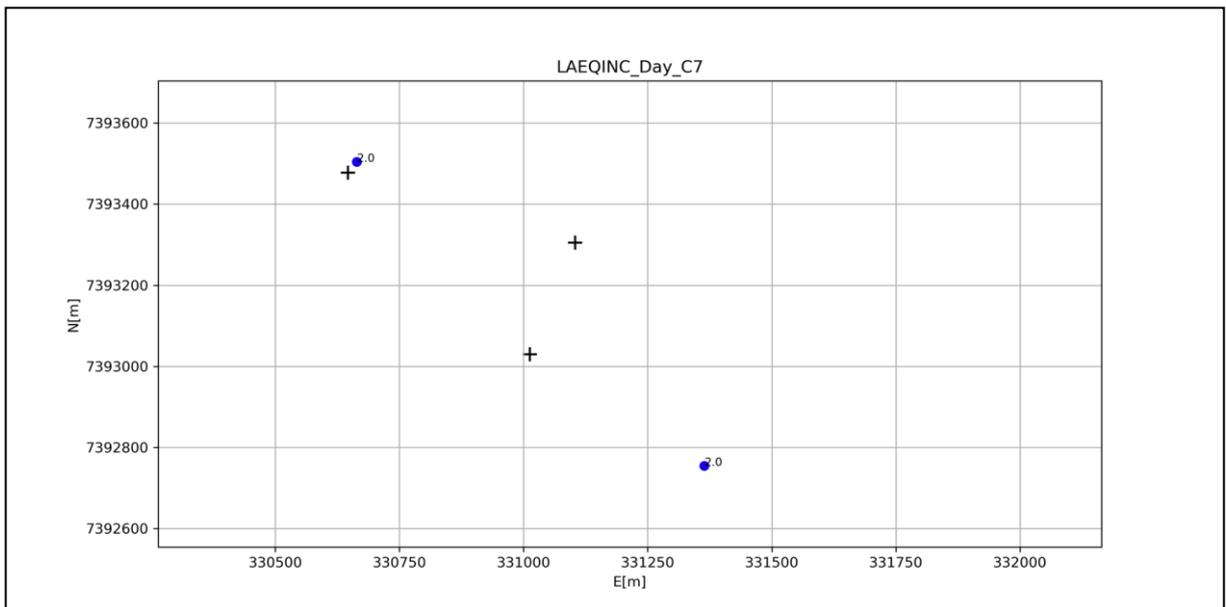
Fonte: Autora.

Figura 4-31: Resultado do cenário C6.2



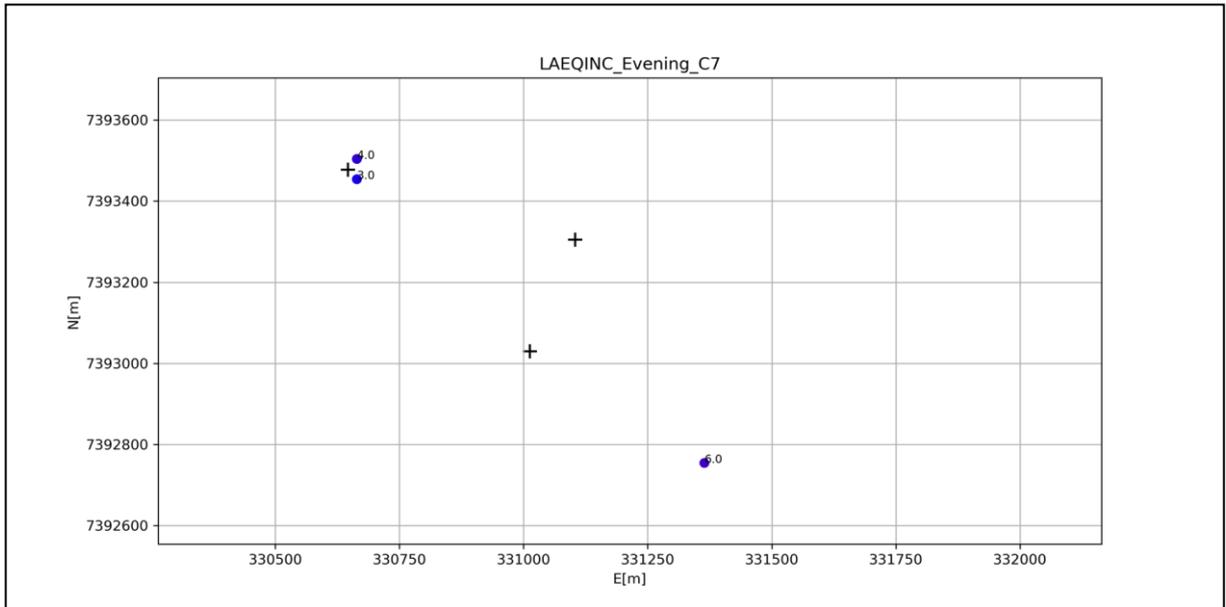
Fonte: Autora.

Figura 4-32: Resultado do cenário C7.1



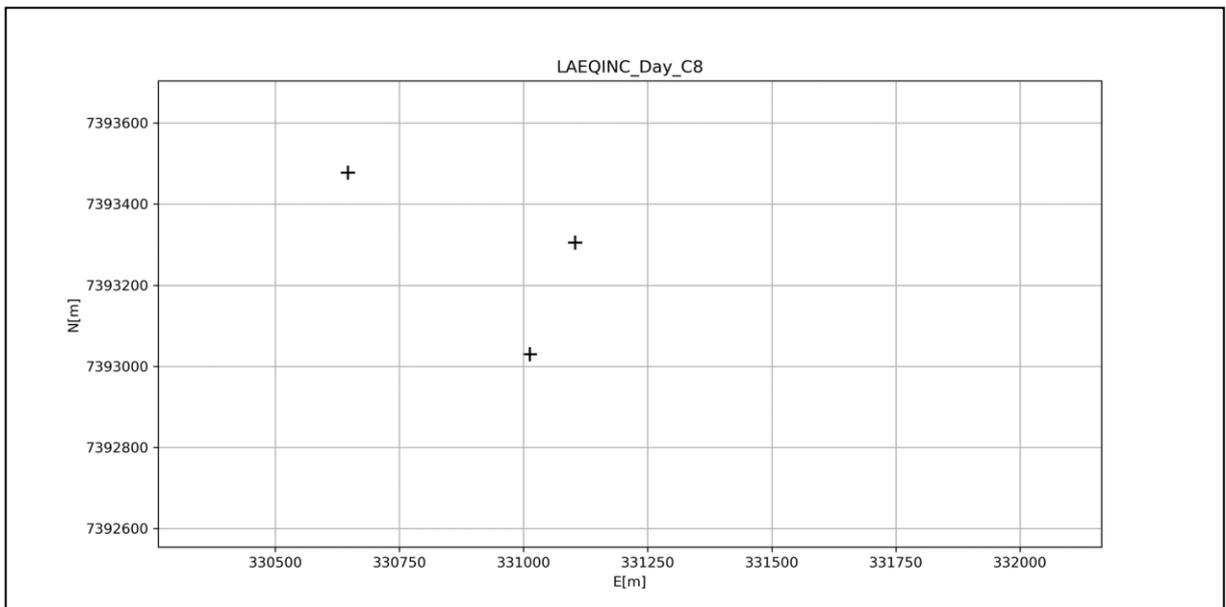
Fonte: Autora.

Figura 4-33: Resultado do cenário C7.2



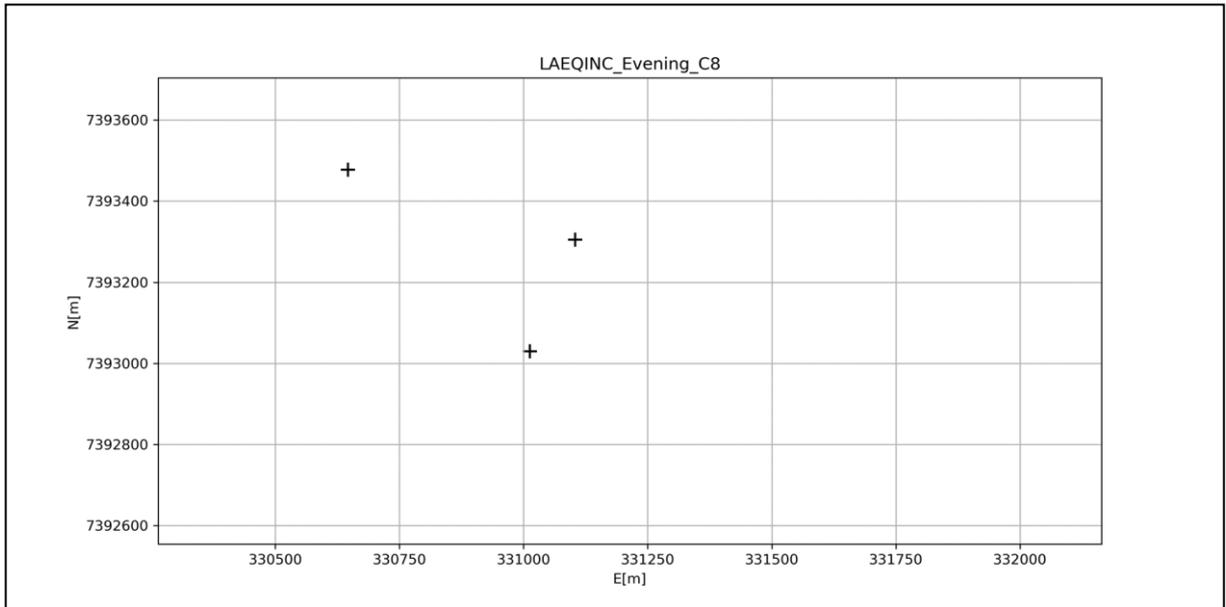
Fonte: Autora.

Figura 4-34: Resultado do cenário C8.1



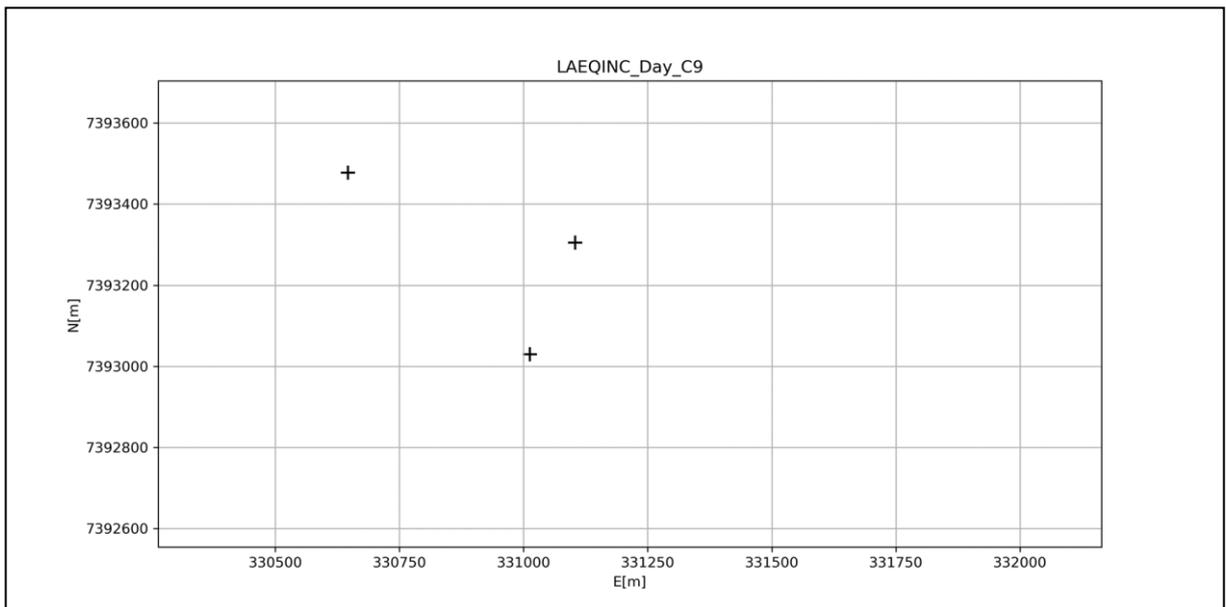
Fonte: Autora.

Figura 4-35: Resultado do cenário C8.2



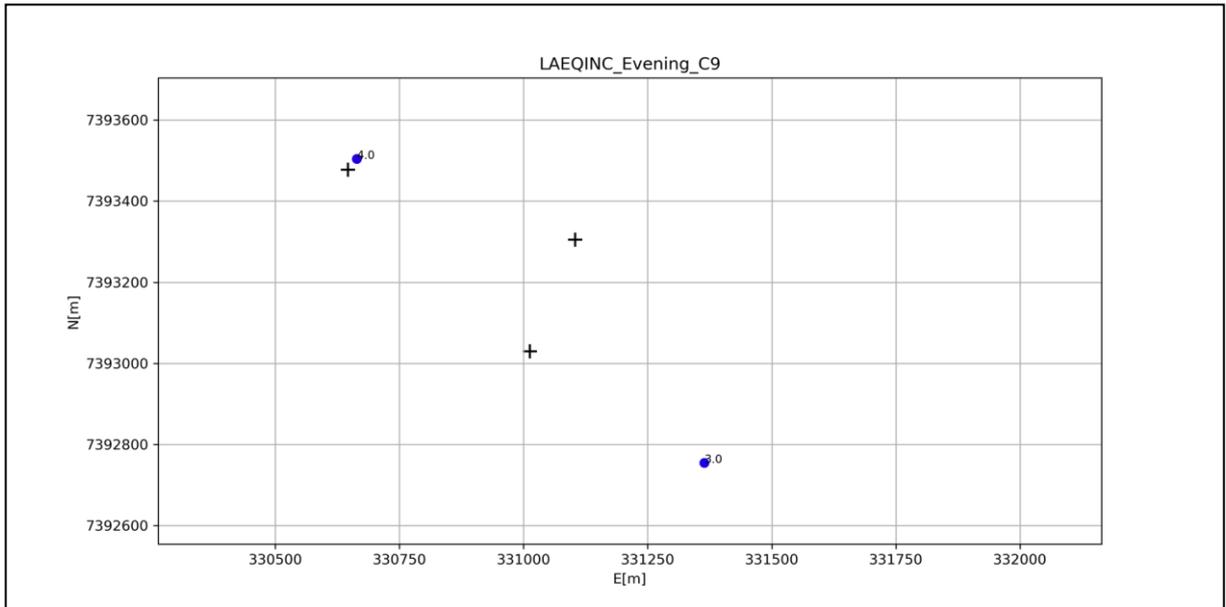
Fonte: Autora.

Figura 4-36: Resultado do cenário C9.1



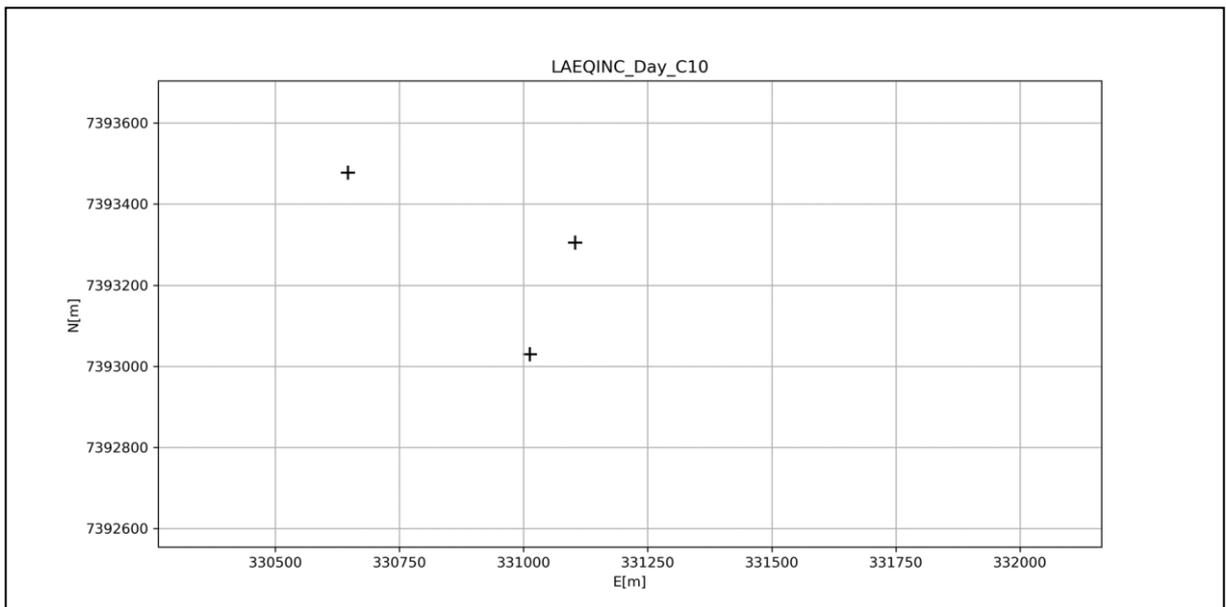
Fonte: Autora.

Figura 4-37: Resultado do cenário C9.2



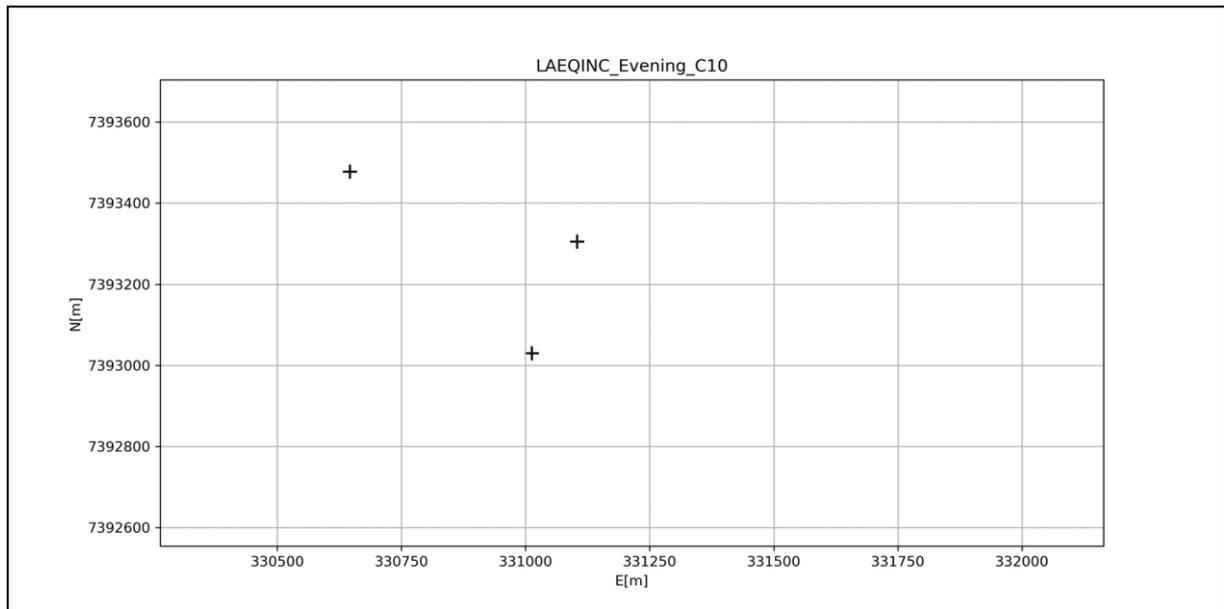
Fonte: Autora.

Figura 4-38: Resultado do cenário C10.1



Fonte: Autora.

Figura 4-39: Resultado do cenário C10.2



Fonte: Autora.

A partir do Cenário 11, tanto para ruído de fundo correspondente à movimentação de carros durante o dia quanto para ruído de fundo correspondente à movimentação de carros durante o entardecer, nenhum dos receptores percebeu algum acréscimo do nível de ruído da paisagem sonora em decorrer da inserção das novas fontes de ruído

4.1.3 Discussões

A comparação dos mapas de ruído compreendidos entre a Figura 4-2 e a Figura 4-19 e seus respectivos cenários bases, bem como a análise dos gráficos observados da Figura 4-20 a Figura 4-39, pode-se fazer algumas observações.

Primeiramente, nota-se que apenas os receptores mais próximos das fontes (vertiportos) perceberam alterações na paisagem sonora;

Pode-se notar, também, que a distribuição espectral do ruído emitido pelas fontes influencia na propagação desse ruído e, conseqüentemente, na percepção dos receptores no entorno. Para um mesmo LAeq, percebe-se que a fonte de ruído que mais impactou a paisagem sonora foi aquela cujos níveis de pressão sonora são iguais, para todas as bandas de oitava. A fonte com segundo maior impacto foi aquela que apresenta maiores níveis de pressão sonora para as bandas oitava de menor frequência, enquanto que as fontes cujos maiores níveis de pressão sonora se encontram nas maiores bandas de oitava provocaram modificações bem mais reduzidas na paisagem sonora.

Além disso, como esperado, um maior número de fontes provocou variações na paisagem sonora nos cenários em que o ruído de fundo era correspondente à movimentação de veículos durante o entardecer. Como o ruído de fundo considerado era menor, em comparação ao correspondente à movimentação de veículos durante o dia, é necessário um menor valor de pressão sonora equivalente para que o receptor perceba variações na emissão de ruídos, considerando-se a tolerância de 2 dBA.

Para o cenário analisado, fontes com nível de potência sonora igual ou menor a 90 dBA, independentemente do espectro de emissão, não provocam modificações na paisagem sonora. Isso indica, para essa paisagem sonora, e esse posicionamento das fontes, operações de eVTOLs com esse nível de pressão sonora equivalente tenderiam a ser aceitas pela comunidade.

É importante ressaltar que o resultado citado acima, que determina 90 dBA como o teto para L_{Aeq} da emissão de ruído de eVTOLs está intimamente atrelada tanto à região escolhida, que determina o ruído de fundo, quanto ao posicionamento das fontes. Como a região escolhida para as análises deste estudo, adjacente à Av. Paulista, é caracterizada por uma alta movimentação de veículos, é razoável concluir que eVTOLs que emitam ruídos com pressões sonoras equivalentes elevadas conseguem operar sem causar variações na paisagem sonora. Outro fator que contribui para que aeronaves com altos níveis de pressão sonora equivalente sejam aceitos, é a grande densidade de prédios, que atuam como obstáculos à propagação de ruído.

Portanto, outros cenários, por exemplo em regiões do subúrbio, com menor movimentação de veículos e grande densidade de casas, provavelmente levariam a resultados em que o nível de pressão sonora equivalente aceitável fosse significativamente menor.

5 Conclusões

Frente aos objetivos propostos por esse Trabalho de Graduação, pode-se afirmar que a utilização da metodologia baseada em modelos de simulação de ruídos permite analisar a sensibilidade da variação da paisagem sonora urbana à introdução de novas fontes de ruído e, conseqüentemente, definir os limites de emissão sonora que aeronaves destinadas à mobilidade aérea urbana deveriam atender, a fim de serem aceitas pela comunidade.

No que diz respeito ao planejamento desse novo sistema de transporte urbano, metodologias semelhantes podem ser utilizadas para auxiliar a locação de vertiportos e os horários de operação e também para nortear os fabricantes de aeronaves a respeito de um dos requisitos que deve ser cumprido para que seu produto seja amplamente aceito no mercado.

5.1.1 Limitações e Melhorias Futuras

Devido ao fato de que tanto o conceito de mobilidade aérea urbana quanto as aeronaves que o tornarão possível ainda estarem em fase de desenvolvimento, há uma escassez de informações a respeito destes. Por esse motivo, para a realização desse estudo, foi necessário fazer suposições a respeito de possíveis espectros de emissão de ruído para esses veículos. No futuro, quando uma maior quantidade de informações a respeito dos eVTOLs estiver amplamente disponível, há a possibilidade de utilização da mesma metodologia proposta nesse estudo, para a avaliação do impacto de aeronaves já existentes na paisagem sonora dos centros urbanos.

Além disso, a impossibilidade de utilizar o *software* selecionado para analisar, simultaneamente, ruído proveniente das vias e de fontes pontuais, foi outra limitação encontrada para a realização de uma modelagem mais fiel à realidade. Modelos de simulação de ruídos mais sofisticados poderiam ser utilizados para possibilitar essa análise.

Outra possibilidade, a fim de se complementar esse estudo, seria analisar regiões distintas, para verificar o impacto da inserção de novas fontes de ruído em regiões mais afastadas dos centros das grandes cidades, caracterizadas por menores ruídos de fundo. Tal análise seria especialmente relevante considerando-se que essas regiões menos ruidosas, predominantemente residenciais, são um destino final dos passageiros e, portanto, a possibilidade de operação de aeronaves em tais regiões implicaria em maior comodidade.

Referências

ACÚSTICA EM FOCO. Frequências e Banda de Oitava. Site da Acústica em Foco.

Disponível em: <<https://acusticaemfoco.com.br/artigo/frequencias-e-banda-de-oitava/>>

Acesso em 6 nov. 2021.

ANAC. Nível de Ruído Médio Dia-Noite. Site da Agência Nacional de Aviação Civil

(ANAC). Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr2749.htm> Acesso

em 7 nov. 2021.

ANAC. RBAC 161, EMD 03, 2021.

BRASÍLIA AMBIENTAL. Parâmetros acústicos: definições, 07 mar. 2018. Disponível em:

<<https://www.ibram.df.gov.br/parametros-acusticos-definicoes/>> Acesso em 7 nov. 2021.

CLINIMED JOINVILLE. Entenda os efeitos do ruído sonoro no organismo. Disponível em:

<<https://clinimedjoinville.com.br/entenda-os-efeitos-do-ruído-sonoro-no-organismo/>> Acesso

em 31 out. 2021.

EVEREST, F. A. Master Handbook of Acoustics, 4th Edition, McGraw-Hill, 2001.

FAA. Aviation Environmental Design Tool (AEDT). Site da Federal Aviation Administration.

Disponível em: <<https://aedt.faa.gov/>> Acesso em 7 nov. 2021.

FAA. Integrated Noise Model (INM). Site da Federal Aviation Administration (FAA), fev.

2019. Disponível em:

<https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/inm_model/

> Acesso em 7 nov. 2021.

GENIE ACOUSTIQUE. Tableau des Pondérations Physiologiques. Disponível em:

<<http://www.genie-acoustique.com/spip.php?rubrique41>> Acesso em 7 nov. 2021.

Marie-Agnès Pallas, John Kennedy, Ian Walker, Roger Chatagnon, Michel Berengier, et al. Noise emission of electric and hybrid electric vehicles: deliverable FOREVER (n° Forever WP2_D2-1-V4). [Research Report] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2015, 134 p. hal-02177735

NOISEMODELLING. NoiseModelling User Guide. Site do NoiseModelling, 2002.
Disponível em: <<https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/index.html#>> Acesso em 7 nov. 2021.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica, Volume 2, Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor, 4ª Edição. [S.l.]: Editora Blucher.

PIERRE AUMOND, L. J. A. C. Probabilistic modeling framework for multisource sound mapping. Elsevier, 139, 2018.

RAYMOND A. SERWAY, J. W. J. J. Physics for Scientists and Engineers, 8th Edition. Belmont, CA: Brooks/Cole, 2010.

RESNICK, H. &. Fundamentos de Física, Volume 2, Gravitação, Ondas e Termodinâmica, 9ª Edição. [S.l.]: LTV, 2012.

SIMON J. SHILTON, F. A. L. H. V. L. Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU, 31 mai. 2015.

STYLIANOS KEPHALOPOULOS, M. P. F. A.-L. Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU). HAL, 2012. 180 p.

THOMAS KUPPER, P. J. V. S. A. S. V. D. G. Does Modern Helicopter Construction Reduce Noise Exposure in Helicopter Rescue Operations? The Annals of Occupational Hygiene, Volume 57, Issue 1, 24 set. 2012.

UBER ELEVATE. Fast Forwarding to a Future of on Demand Air Transport, 2016.

UFMG. Frequência da voz. Site do Observa Voz, UFMG. Disponível em:
<<https://www.medicina.ufmg.br/observavoz/dicionario/frequencia-da-voz/>> Acesso em 7 nov. 2021.

UFRGS. O decibel e os sons. Site do Prof. Portosil, UFRGS. Disponível em:
<<http://www.mat.ufrgs.br/~portosil/passa1f.html>> Acesso em 7 nov. 2021.

WG-AEN, Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, 2006.

WIEAND, J. Congress Considers a New York City Helicopter Ban. Site da Business Jet Travaler, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.bjtonline.com/business-jet-news/congress-considers-a-new-york-city-helicopter-ban>> Acesso em 7 nov. 2021.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">19 de novembro de 2021</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-095/2021</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">70</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Estudo dos efeitos da operação de aeronaves eVTOL na paisagem sonora de uma região urbana</p>			
6. AUTOR(ES): <p>Amanda Trópia Resende</p>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(ÃOS) INTERNOS/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA</p>			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>1. Ruído. 2. Simulação. 3. UAM.</p>			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>Aeronaves de decolagem vertical; Ruído de aeronaves; Simulação; Geradores de ruídos; Mobilidade urbana; Transportes.</p>			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional			
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr Evandro José da Silva. Publicado em 2021.			
11. RESUMO: <p>O desenvolvimento do conceito de <i>Urban Air Mobility</i> (UAM) e sua iminente aplicação nos centros urbanos vêm levantando discussões a respeito de quais requisitos as aeronaves de decolagem e pouso vertical (eVTOL) e seus respectivos locais de embarque e desembarque de passageiros (vertiportos) precisam atender para que sua operação em larga escala seja aceita pela população. Em geral, entende-se que esse novo sistema de transporte deve se adaptar ao meio urbano, não trazendo prejuízos para a qualidade de vida de seus ocupantes. Nesse contexto, o presente Trabalho de Graduação se propõe a definir quais níveis de intensidade e espectro de ruído gerado por eVTOLs podem ser tolerados, supondo-se aceitáveis ruídos que não causem alterações perceptíveis na paisagem sonora da região. Para isso, é aplicada uma metodologia baseada em um modelo de simulação de ruídos que utiliza como ferramenta o software <i>NoiseModelling</i>, a fim de comparar o ruído de fundo de uma área selecionada antes e depois da inserção dessas novas fontes de ruído. Os resultados mostram quais níveis de intensidade e espectro de ruído geram perturbações significativas na paisagem sonora e que, portanto, não seriam aceitos pela população. Estes resultados podem ser utilizados como referência para o planejamento do UAM, para auxiliar decisões de locação de vertiportos e para indicar aos fabricantes de aeronaves os requisitos mínimos que devem ser cumpridos para que seus produtos sejam amplamente aceitos.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO</p>			