



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Engenharia Urbana

Bruna Del Priore Croce

ANÁLISE DE FERRAMENTA DE REALIDADE VIRTUAL PARA
AVALIAÇÃO PARTICIPATIVA DO RUÍDO AMBIENTAL

Rio de Janeiro
2020

Bruna Del Priore Croce

ANÁLISE DE FERRAMENTA DE REALIDADE VIRTUAL PARA
AVALIAÇÃO PARTICIPATIVA DO RUÍDO AMBIENTAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Julio Cesar B. Torres

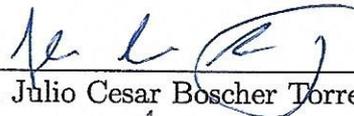
Rio de Janeiro
Março de 2020

ANÁLISE DE FERRAMENTA DE REALIDADE VIRTUAL PARA
AVALIAÇÃO PARTICIPATIVA DO RUÍDO AMBIENTAL

Bruna Del Priore Croce

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA – ESCOLA POLITÉCNICA,
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA URBANA.

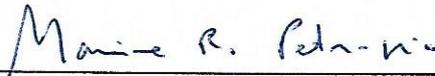
Aprovada por:



Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.



Prof. Michael Vorländer, Ph.D.



Profa. Mariane Rembold Petraglia, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2020

Croce, Bruna Del Priore

Análise de Ferramenta de Realidade Virtual para Avaliação Participativa do Ruído Ambiental/Bruna Del Priore Croce. – Rio de Janeiro: UFRJ/POLI, 2020.

XIII, 84 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Julio Cesar B. Torres

Dissertação (mestrado) – UFRJ/POLI/Programa de Engenharia Urbana, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 79 – 84.

1. Ruído Ambiental e Urbano. 2. Poluição Sonora. 3. Simulação Acústica. 4. Engenharia Urbana. I. Torres, Julio Cesar B.. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, POLI, Programa de Engenharia Urbana. III. Título.

*A minha família e amigos pelo
apoio incondicional e constante
incentivo*

Agradecimentos

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, agradeço ao Júlio, orientador sempre presente, por todo o conhecimento, empenho e sentido prático com que me orientou neste trabalho.

Aos demais professores do Mestrado em Engenharia Urbana da Escola Politécnica da UFRJ, pelo conhecimento transmitido e disponibilidade.

À professora Mariane Rembold Petraglia, do Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola Politécnica e Programa de Engenharia Elétrica da COPPE (PEE/COPPE).

Aos professores e colaboradores do Instituto Técnico de Acústica da Universidade RWTH Aachen, em especial Michael Vorländer, Jonas Stienen e Michael Kohnen.

Aos meus colegas do mestrado e, em especial a Gabriela Dantas, mestranda no Programa de Engenharia Elétrica da COPPE (PEE/COPPE), cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

À minha família e amigos pelo apoio incondicional que me deram ao longo da elaboração deste trabalho.

RESUMO

CROCE, Bruna Del Priore. **Análise de Ferramenta de Realidade Virtual para Avaliação Participativa do Ruído Ambiental**. Rio de Janeiro, 2020. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

Atualmente, o mapeamento de ruído é a principal ferramenta utilizada para elaboração de políticas públicas e de planos de ação para a gestão do ruído urbano. Trata-se de uma ferramenta para representação gráfica dos níveis de pressão sonora médios para áreas urbanas. Em muitos casos, no entanto, a informação numérica fornecida pelos parâmetros acústicos dos mapas diverge da percepção subjetiva do ruído por parte da população exposta. As tecnologias de Realidade Virtual (RV) surgem como ferramenta capaz de simular virtualmente ambientes visuais e sonoros, incluindo a reprodução dos sinais de áudio e os efeitos de propagação, a partir de técnicas de audibilização. Esta pesquisa tem por objetivo investigar a aplicabilidade de um sistema de RV não imersivo, associado à técnica de audibilização, como método participativo de avaliação sonora urbana. Para tanto, foi elaborado um modelo urbano virtual visual e sonoro simples, priorizando-se a avaliação dos veículos leves de passeio por serem as principais fontes de ruído nas cidades. As etapas metodológicas consistiram em revisão bibliográfica, medições e gravações com arranjo de microfones e cabeça artificial (*dummy head*), modelagem e síntese sonora, construção do modelo virtual, simulação sonora e aplicação de avaliações subjetivas com voluntários para verificação de atributos específicos nos áudios obtidos por gravação e simulação. Os resultados das avaliações mostram o potencial da ferramenta virtual para recriação de campos sonoros artificiais. São identificados pontos de melhorias para simulações sonoras mais fidedignas, bem como apresentados as vantagens e os desafios da aplicação e utilização da ferramenta na avaliação do ruído ambiental em apoio aos mapas de ruído.

Palavras-chave: Ruído Urbano, Poluição Sonora, Simulação Acústica, Engenharia Urbana, Audibilização.

ABSTRACT

CROCE, Bruna Del Priore. **Analysis of Virtual Reality Tool for Participative Evaluation of Environmental Noise**. Rio de Janeiro, 2020. Master Thesis. Urban Engineering Program, Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

Noise maps are descriptive tools for the assessment of urban environmental noise. They graphically display the average sound pressure level at given locations. Noise values shown on maps are the result of computer modelling or in-situ measurements and are commonly used to reveal compliance with regulatory obligations. Recently, noise maps are the main tool used by authorities on duty to elaborate urban noise policies, to assist stakeholders, experts and policy-makers to invest in noise reduction actions. However, technical data based on noise metrics not always coincide with residents' noise perception. An alternative approach to noise mapping are virtual reality (VR) systems capable to virtually simulate visual and sound environments, sound reproducing and propagation effects through auralisation techniques. The research project aims to evaluate the applicability of VR systems associated with auralisation techniques for assessing urban sound environments through public participation. For this purpose, a simple urban scenario was studied, aiming to evaluate vehicles pass-by noise. Methodological approaches for developing the virtual system consist in bibliographic review, microphone array measurements and binaural recordings with dummy head, sound synthesis, three-dimensional modelling of the analysed site and sound simulation. Subjective evaluations were conducted with a group of volunteers for validating both binaural recordings and simulated sounds. Results indicate the system's potential for recreating artificial sound environments. Improvements for enhancing realistic sound simulations are indicated, as well as presented benefits and challenges related to the use and application of the developed tool as a complementary approach for assessing traditional urban noise abatement methods.

Palavras-chave: Urban Noise, Noise Pollution, Acoustic Simulation, Urban Engineering.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Relevância	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Metodologia	5
2 Poluição Sonora, Ambiente e Saúde Coletiva	8
2.1 Definição de Som e Grandezas Associadas	8
2.2 A representação numérica do som	9
2.3 Definição de Ruído	10
2.3.1 Efeitos do ruído na saúde humana	11
2.3.2 O Ruído Urbano	12
2.4 Legislação Ambiental e Gestão do Ruído Urbano	15
2.5 Método Tradicional para Gestão do Ruído Urbano: Mapa Acústico	18
2.6 Métodos Alternativos para Gestão do Ruído Urbano: Ferramentas Participativas	19
2.7 Sistemas de Realidade Virtual (RV)	22
2.8 Técnicas de Audibilização	23
2.8.1 Reprodução Biaural	25
2.9 Sistemas de RV associados a técnicas de audibilização	26
3 Metodologia	33
3.1 Seleção da área de estudo	34
3.2 Registro, modelagem e síntese sonora	35
3.2.1 Medições sonoras	35
3.2.2 Gravações Biauriculares	36
3.2.3 Modelagem e síntese dos sinais sonoros	38
3.3 Configuração e associação dos objetos sonoros aos sinais sintetizados	39
3.3.1 Simulação Biauricular (VA)	41

4	Avaliação subjetiva	42
4.1	Áudios Gravados	42
4.1.1	Identificação de diferenças	44
4.1.2	Sentido da passagem do veículo	45
4.1.3	Localização da fonte frente/trás da cabeça	46
4.1.4	Percepção de aceleração	47
4.1.5	Percepção da velocidade	49
4.1.6	Distância fonte-receptor	51
4.2	Áudios Gravados × Simulados	53
4.2.1	Similaridade	54
4.2.2	Distância fonte-receptor	55
4.2.3	Avaliação da velocidade	57
4.3	Análise dos resultados	59
5	Conclusão	66
5.1	Limitações do estudo	67
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	68
A	Programas – Matlab	69
A.1	Compensação dos fones	69
A.2	Normalização dos áudios	69
A.3	Cálculo t90	70
A.4	Avaliação com áudios gravados	71
A.5	Avaliação com áudios gravados e simulados	74
	Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

3.1	Metodologia de desenvolvimento do modelo virtual	34
3.2	Localização do campus Xerém (Inmetro), com indicação do trecho viário avaliado	35
3.3	Vistas (a) de topo e (b) frontal do modelo urbano simulado.	36
3.4	Posicionamento da cabeça artificial (<i>dummy head</i>) para registro dos veículos de passeio	37
3.5	Imagens do trecho viário avaliado	37
3.6	Conteúdo espectral dos sinal sonoro sintetizado para veículo com velocidade de 50km/h	39
3.7	Configuração de parâmetros no software Unity 3D	41
4.1	Exemplo de apresentação dos áudios na avaliação subjetiva	43
4.2	Padrão de respostas do quesito “localização” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	48
4.3	Padrão de respostas do quesito “aceleração” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	50
4.4	Padrão de respostas do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	52
4.5	Padrão de respostas do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	53
4.6	Padrão de respostas do quesito “distância” na avaliação com áudios simulados	58
4.7	Padrão de respostas do quesito “velocidade” na avaliação com áudios simulados, em função do tipo de áudio	60
4.8	Padrão de respostas do quesito “velocidade” na avaliação com áudios simulados, em função da diferença absoluta de velocidades	60
4.9	Análise temporal dos áudios simulado e gravado para veículo com velocidade de 50km/h	62
4.10	Regiões de acertos e erros da avaliação com áudios gravados	63
4.11	Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de 30km/h	64

4.12 Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de	
50km/h	65
4.13 Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de	
70km/h	65

Lista de Tabelas

2.1 Principais bandas de oitava.	9
3.1 Descrição das configurações de gravação dos veículos, velocidades e sentido de passagem.	38
4.1 Identificação de diferenças nos áudios gravados.	45
4.2 Avaliação do quesito “sentido” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	46
4.3 Avaliação do quesito “localização” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	47
4.4 Avaliação do quesito “aceleração” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	49
4.5 Avaliação do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	51
4.6 Avaliação do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados	52
4.7 Avaliação do quesito “similaridade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados	55
4.8 Avaliação do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados	56
4.9 Avaliação do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados	58

Capítulo 1

Introdução

A complexidade inerente à gestão do ambiente urbano indica a necessidade de definição de diretrizes que contemplem princípios de eficiência econômica e prudência ecológica. A partir do século XX, a consciência ambiental aliada ao desenvolvimento econômico constitui uma preocupação central no debate das cidades contemporâneas. Diversos estudos relacionam a internacionalização da consciência ambiental à Conferência de Estocolmo de 1972 [1, 2] e à década de 1990, quando os problemas ambientais passaram a ser tratados em âmbito global. O instrumento jurídico formalizado a partir da Conferência de Estocolmo significou o início de uma era em que a qualidade e a preservação do meio ambiente passaram a assumir, gradativamente, uma importância global. A ideia de desenvolvimento econômico, desde então, passou a ser analisada sob a ótica ambiental [3]. Como consequência, os problemas ambientais tornam-se centrais nos debates político, econômico, social, acadêmico e organizacional.

Ainda, no contexto das diretrizes eficazes para a gestão do ambiente urbano, diversos instrumentos de planejamento preconizam a participação cidadã nos processos decisórios como forma de acesso democrático à cidade. Tomando o exemplo de casos brasileiros de formação de políticas públicas, a Agenda 21 é um instrumento participativo para o desenvolvimento sustentável que tem como eixo central a sustentabilidade, compatibilizando a conservação ambiental, a justiça social e o crescimento econômico. O documento é resultado de uma vasta consulta à população brasileira, de caráter fundamental para construção da democracia participativa, processos de união da sociedade, compreensão dos conceitos de cidadania ativa e de sua aplicação.

O desenvolvimento sustentável baseado na democratização da gestão urbana contribui para a mitigação dos impactos ambientais nas cidades com foco na qualidade de vida e saúde da população, ao promover ações de inclusão social.

Tomando o exemplo da metropolização das cidades brasileiras, os processos de crescimento demográfico e adensamento urbano estão associados a impactos ambi-

entais facilmente identificáveis, como a impermeabilização do solo, o aumento do tráfego, a diminuição dos espaços livres e da insolação, a alteração na dinâmica dos ventos e a criação de microclimas. A exposição da população urbana aos impactos ambientais é agravada por ações governamentais, na maioria das vezes, negligentes à opinião pública.

No rol dos problemas associados à expansão urbana, a poluição sonora, objeto desta pesquisa, apresenta-se como um dos principais problemas ambientais das grandes e médias cidades, afetando consideravelmente a qualidade de vida da população urbana [3]. A relevância da poluição sonora no meio urbano explicita-se, ao ser considerada o terceiro principal meio de poluição, logo após o ar e a água [4].

Atualmente, a principal ferramenta utilizada, globalmente, para avaliação sonora urbana é o mapeamento acústico. Os mapas são elaborados a partir de software específicos que permitem a representação gráfica dos níveis de pressão sonora para áreas urbanas e levam a resultados eficientes de análise objetiva. Portanto, ao tratar de aspectos objetivos da avaliação do ruído, o mapa acústico constitui-se uma ferramenta de avaliação, sobretudo, voltada para o cumprimento de parâmetros normativos. A utilidade dos mapas em orientar a mitigação e o controle do ruído urbano é irrefutável. No entanto, entende-se que a percepção humana do ruído urbano é muito complexa para ser descrita apenas a partir de dados acústicos e estatísticos, sendo os aspectos sociais e psicológicos influenciadores das reações humanas ao ruído, todavia, pouco compreendidos.

Estudos revelam que o nível de incômodo sonoro da população exposta ao ruído nem sempre coincide com os parâmetros acústicos definidos pelos mapas [5]. Em parte, isto pode estar relacionado ao descritor utilizado para avaliação sonora - o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado (L_{Aeq}), que é geralmente utilizado em Normas e legislações relativas à exposição ao ruído. O L_{Aeq} é uma métrica que, apesar de considerar a sensibilidade do ouvido humano, realiza uma média da energia acústica durante um determinado período de tempo. No caso dos mapas, essa média é feita ao longo de horas, conforme o período do dia a ser analisado. Dessa forma, é um parâmetro questionável para avaliar a perturbação causada por ruídos impulsivos de curta duração, por exemplo. Ao representar uma média temporal longa, tal como as 12 horas do período diurno, as variações de energia do ruído “diluem-se” no cálculo do nível médio temporal. Além do questionamento da eficácia da média temporal na representação subjetiva do incômodo, outro fator diz respeito à interpretação visual fornecida pela malha numérica de pontos que define os mapas acústicos. A interpretação visual pode não exprimir a real sensação sonora ao ouvinte, uma vez que esse estímulo deve ser dado ao sistema auditivo e não ao visual.

Sendo o mapa acústico, atualmente, o principal instrumento de gestão do ruído

urbano na elaboração de planos de ação para avaliação e mitigação de seus efeitos, o envolvimento da população pode ser comprometido pela falta de compreensão sobre as informações gráficas dos mapas e sobre a relação entre os valores e o incômodo. Este contexto indica que a pesquisa voltada para o ambiente sonoro urbano deve levar em consideração aspectos subjetivos da percepção humana ao ruído.

Uma abordagem alternativa à representação gráfica do ruído é, atualmente, já utilizada na avaliação acústica de salas, a partir de técnicas de processamento de sinais acústicos como a *audibilização*: a geração do som espacial, audível do ambiente simulado. O objetivo desta técnica é proporcionar ao ouvinte uma impressão de como o som se comporta dentro de um ambiente, conhecidas as características das fontes, dos receptores e do ambiente, mesmo que esse não exista fisicamente.

A audibilização é atualmente amplamente utilizada para avaliação da qualidade acústica de recintos fechados, existindo software específicos com resultados precisos e fidedignos. Para ambientes urbanos, a utilização desta técnica é, todavia, pouco difundida quando comparada ao uso dos mapas de avaliação acústica. Isto se deve, sobretudo, à complexidade de simulação dos ruídos característicos de situações urbanas, bem como dos fenômenos físicos inerentes à propagação sonora em meio urbano.

Paralelamente às pesquisas e avanços em técnicas de audibilização, os sistemas de Realidade Virtual (RV) se consolidam como uma tecnologia promissora: estão, cada vez mais, presentes em sistemas computacionais aplicados nas mais diversas áreas do conhecimento, como a medicina, a arquitetura, entretenimento e a educação. A realidade virtual se populariza em função da viabilidade econômica em hardware e software, acompanhada pelo aumento da qualidade e capacidade de processamento das novas tecnologias digitais. A realidade virtual é uma tecnologia que explora o desenvolvimento de uma importante habilidade cognitiva humana: a visualização espacial. Ao possibilitar a visualização espacial virtual representativa de um contexto real, a realidade virtual torna-se um instrumento de fácil acesso, cujo envolvimento é unicamente baseado na interação do usuário com os sentidos visual, tátil e auditivo. Consiste, portanto, em uma ferramenta democrática, sem o teor técnico de difícil entendimento dos mapas acústicos e instrumentos similares.

Nas tecnologias para realidade virtual desenvolvidas até o momento, a simulação de ambientes reais, frequentemente, explora com maior prioridade a produção da experiência visual da cena, proporcionando aos usuários uma maior definição de seus aspectos qualitativos (materialidade, textura, resolução, sentido de profundidade). A representação do campo sonoro no espaço depende de técnicas de audibilização capazes de caracterizar os objetos contidos na cena (fontes e receptores sonoros).

Esta pesquisa explora a combinação de uma tecnologia de visualização (realidade virtual) e sonorização (audibilização), propondo investigar a viabilidade da

associação entre ambas as técnicas na avaliação da qualidade sonora dos espaços urbanos.

1.1 Relevância

As políticas urbanas nacionais recentes têm incluído em seus debates a necessidade da formulação de planos de ação para gestão do panorama acústico urbano, onde tornam-se necessárias ferramentas de avaliação capazes de fornecer orientações adequadas aos órgãos responsáveis pelo planejamento urbano.

O Projeto de Lei (PL) 16.499/2016 [6], que obriga o Poder Executivo Municipal de São Paulo a elaborar um mapa de ruído da cidade, é um exemplo recente. O mapeamento proposto pelo PL tem por objetivo a identificação de áreas prioritárias para redução de ruídos e preservação de zonas com níveis sonoros apropriados. Trata-se de uma medida importante de apoio aos gestores urbanos no desenvolvimento de políticas urbanas coerentes com as emissões sonoras de cada região da cidade. Ainda na cidade de São Paulo, o Plano Diretor Estratégico (PDE) [7] do Município de São Paulo, de 31 de julho de 2014, é uma lei municipal que orienta o desenvolvimento e o crescimento da cidade até 2030. Elaborado com a participação da sociedade, o PDE direciona as ações dos produtores do espaço urbano, públicos ou privados, para que o desenvolvimento da cidade seja feito de forma planejada e atenda às necessidades coletivas de toda a população. O PDE visa garantir a construção do espaço urbano de forma inclusiva, ambientalmente responsável, produtiva e, sobretudo, com qualidade de vida à população.

Este panorama é associado ao advento de novas tecnologias em um contexto de progressivo avanço da computação e das tecnologias de visualização e sonorização espacial.

Existe, atualmente, o interesse crescente no uso de técnicas de realidade virtual, relacionado a uma gama extensa de recursos e tecnologias disponíveis. Diferentes técnicas e dispositivos podem ser utilizados para a interação com os ambientes 3D. Destacam-se ambientes virtuais cada vez mais sofisticados e os recursos multimídia envolvidos, bem como o uso de ambientes acústicos (campo sonoro tridimensional) para a exploração dos estímulos. Ao permitir a simulação virtual de cenários acústicos com grande realismo, a modelagem de ambientes com audibilização facilitam, por sua vez, a interação do usuário com a ferramenta de avaliação sonora.

Quando aplicadas na elaboração planos de ação e políticas urbanas, as ferramentas de realidade virtual podem tornar públicos e acessíveis os processos de gestão da qualidade acústica. Este contexto corrobora com a ideia de universalização e valorização dos princípios democráticos de construção do espaço urbano, gestão e planejamento das cidades.

Esta pesquisa discute sobre os métodos participativos capazes de fornecer aos órgãos responsáveis pelo planejamento urbano a orientação das possíveis intervenções para gestão da poluição sonora. Além de apresentar importantes estudos desenvolvidos na área, investiga a aplicabilidade de uma ferramenta participativa de RV associada às técnicas de audibilização para avaliação sonora urbana.

Neste trabalho, a interface de acústica virtual desenvolvida pelo Instituto Técnico de Acústica, da Universidade RWTH Aachen, é utilizada para simulação e reprodução dos sinais de áudio binaurais. A interface de acústica virtual disponibilizada pela Universidade RWTH Aachen consiste em uma estrutura de audibilização em tempo real, de código aberto. A interface pode ser utilizada em software de animação, permitindo, desta forma, a conciliação da reprodução dos sinais sonoros com ambientes visuais virtuais, representativos de um determinado contexto urbano. São apresentados as vantagens e os desafios da utilização da ferramenta.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem o objetivo de avaliar o estado da arte em soluções tecnológicas para audibilização de ambientes urbanos e a aplicabilidade de um sistema específico como ferramenta de avaliação participativa do ruído ambiental.

A ferramenta em análise é um sistema de RV não imersivo, baseado na combinação entre um ambiente de programação de jogos - O Unity3D e um *plug-in* de audibilização desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Instituto de Acústica Técnica da Universidade RWTH-Aachen.

O principal objetivo é avaliar, de forma subjetiva, o desempenho do sistema *Virtual Acoustics* (VA) em produzir uma audibilização de fontes sonoras veiculares em movimento. Deseja-se investigar se a percepção dos áudios sintetizados é comparável à dos áudios gravados em ambiente real. No contexto urbano, as principais fontes sonoras são os veículos. Por esse motivo, este trabalho limita-se a avaliar a percepção sonora da passagem de veículos em um ambiente simples, livre de efeitos de propagação que possam mascarar ou interferir na avaliação da percepção dos veículos.

Por fim, são feitas considerações quanto a possíveis dificuldades e/ou deficiências, bem como a proposição de melhorias ao sistema investigado.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada para verificar a aplicabilidade do sistema em avaliações participativas possui diversas etapas:

- **Seleção da área de estudo:** apresenta as características e as vantagens que justificam a escolha do ambiente avaliado. A seleção da área tem por critério principal a avaliação de um modelo urbano simples, considerando-se o objetivo principal da pesquisa em investigar a utilização da ferramenta com foco na simulação acústica (VA) e na capacidade do sistema para simulação fidedigna de campos sonoros.
- **Medições, modelagem e síntese dos sinais das fontes sonoras:** as medições foram realizadas com um arranjo de microfones na área urbana avaliada. Os áudios medidos com o arranjo foram processados para separar o som dos veículos conforme a direção relativa entre fonte e receptor (microfones). Após o processamento (modelagem), a etapa de síntese consistiu na filtragem de um ruído branco pelo padrão direcional obtido.
- **Gravações de áudio biauriculares:** têm por finalidade obter padrões de referência de audição de uma "pessoa" para comparação aos sons simulados pelo VA na cena virtual. As gravações foram realizadas a partir da utilização de uma cabeça artificial (*dummy head*) na área urbana avaliada.
- **Construção do modelo virtual da área urbana avaliada:** modelagem visual virtual realizada nos software Google Sketchup e Unity 3D, constituindo-se de um cenário simples, onde o ambiente ao redor do ouvinte não possui elementos capazes de afetar a percepção ou mascarar os efeitos que se desejou observar.
- **Simulação sonora (geração de áudios biauriculares pelo VA):** a modelagem visual é associada ao módulo de audibilização VA (*Virtual Acoustics*, para reprodução de campos sonoros fidedignos. Foram inseridos fontes e receptores, móveis e/ou estáticos, no ambiente virtual desenvolvido. Os sinais obtidos pela síntese sonora foram associados às fontes sonoras da cena virtual, bem como configurados os parâmetros dos receptores e da propagação sonora a partir do módulo VA. A simulação teve por finalidade produzir áudios biauriculares (com a influência da cabeça humana) comparáveis à algumas situações urbanas reais, para comparação com os áudios gravados com a cabeça artificial.
- **Comparação áudios medidos x simulados (avaliações subjetivas):** tem por finalidade avaliar o grau de similaridade e de plausibilidade entre os áudios simulados pelo VA, e aqueles gravados no local real objeto da avaliação. A investigação da percepção dos usuários às variáveis exploradas nos áudios foi realizada através da apresentação dos áudios gravados e simulados para um

grupo de voluntários, solicitados a identificar atributos específicos nos áudios e preencher fichas de avaliação.

- **Análise dos resultados e conclusões:** análise e discussão dos resultados das avaliações em função da proporção de acertos, identificando-se possíveis padrões de respostas para os atributos dos áudios avaliados. São identificados pontos de melhorias para simulações sonoras mais fidedignas, bem como apresentados as vantagens e os desafios da aplicação e utilização da ferramenta na avaliação do ruído ambiental.

Capítulo 2

Poluição Sonora, Ambiente e Saúde Coletiva

Nesse capítulo são apresentados os conceitos e definições fundamentais relacionados ao ruído, propondo o embasamento teórico da pesquisa desenvolvida. O capítulo introduz o conceito de audibilização e os avanços tecnológicos associados a esta técnica, bem como, de uma forma geral, as técnicas existentes de avaliação sonora participativa e o sistemas de Realidade Virtual.

2.1 Definição de Som e Grandezas Associadas

O som pode ser definido, fisicamente, como uma onda mecânica que se propaga em meio compressível, transportando energia, sem transporte de matéria. Trata-se do efeito audível produzido por movimentos de corpos vibratórios: a vibração das partículas de ar produz uma variação de pressão em relação à pressão atmosférica, que é “convertida” pelo sistema auditivo em som. A menor variação de pressão percebida pelos seres humanos é na ordem de 20×10^{-6} Pa ou 20μ Pa e a maior variação suportada (limite da dor) é de aproximadamente 200 Pa[8].

O processo de compressão e rarefação intrínseco ao deslocamento da camada de ar constitui o movimento ondulatório que define o som, percepção captada pelo sistema auditivo. A onda sonora é caracterizada por grandezas específicas, como intensidade (I), amplitude (A), frequência (f), período (T), comprimento de onda (λ) e velocidade de propagação (c).

A intensidade sonora produzida por uma fonte, a uma certa distância, é a grandeza que nos permite caracterizar se um som é percebido como forte ou fraco, sendo dependente da energia sonora transferida pela onda. A grandeza pode ser definida fisicamente como a potência sonora recebida por unidade de área de uma superfície.

A frequência é a grandeza física do estudo da ondulatória que indica o número de

ciclos (oscilações completas) durante um período de tempo (t). A frequência é expressa em Hertz (Hz), em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz, caracterizada pelo inverso do período, conforme a equação (2.1):

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

A frequência e o comprimento de onda se relacionam conforme a equação (2.2), onde c é a velocidade de propagação do som (constante) em um dado meio.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

A faixa de audição média de um ser humano varia entre 20 e 20 kHz, sendo as frequências baixas associadas aos sons graves e as altas aos agudos.

Abaixo de 16Hz estão os infrassons (vibrações da água, batidas do coração, etc.) e acima de 20kHz estão os ultrassons (emitidos por alguns animais e insetos, sonares, aparelhos médicos e industriais). Os seres humanos podem distinguir a diferença entre um tom de 1000 Hz, e um de 1002 Hz, tendo em vista a resolução de frequência de 0,2%. Estes limites decrescem com a idade e com as condições de conservação do aparelho auditivo de cada indivíduo.

Os níveis sonoros podem ser determinados em faixas de oitavas do espectro sonoro, cujos centros das bandas de oitava são normatizados [9], como mostrado na tabela 2.1.

Frequências centrais (Hz)					
125	250	500	1k	2k	4k

Tabela 2.1: Principais bandas de oitava.

Esta conceituação nos permite classificar o som como grave, médio ou agudo. Cada frequência está associada a um comprimento de onda: baixas frequências apresentam comprimentos de onda grandes, enquanto as altas frequências apresentam comprimentos de onda pequenos, da ordem de centímetros ou milímetros.

2.2 A representação numérica do som

A representação numérica da percepção do som tem origem nos estudos dos físicos alemães Weber e Fechner no século XIX. Eles verificaram que as sensações humanas não possuíam uma relação direta com os estímulos provocados, mas que a resposta do indivíduo era proporcional a uma variação relativa do estímulo. Esta relação é dada pela equação (2.3):

$$S = K \log_{10} E + C \quad (2.3)$$

onde a sensação (S) é proporcional a uma função logarítmica do estímulo (E), corrigido por um fator K e uma constante C . Isto significa que, para se provocar variações lineares de sensação (progressão aritmética) é necessário variar o estímulo em progressão geométrica. A comparação entre uma potência medida (P) e uma potência de referência (P_0) é determinada pela relação denominada Bel (B), em homenagem a Alexander Graham Bell, conforme a equação (2.4):

$$B = \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (2.4)$$

É mais conveniente a utilização do decibel, submúltiplo do Bel, em função da faixa dos valores de pressões sonoras audíveis. Em acústica, a potência de um sinal é proporcional à sua energia, dada pela pressão quadrática: $P \propto p^2$. Substituindo P por p^2 e aplicando o decibel temos que o *Nível de Pressão Sonora* (NPS ou do inglês *Pressure Level* – L_P), em decibel, é dado por:

$$\text{NPS} = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}. \quad (2.5)$$

Considerando-se p_0 o limite mínimo da audição humana 20μ Pa, pode-se substituir a pressão de referência na equação, obtendo-se:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10}(p) + 94\text{dB} \quad (2.6)$$

2.3 Definição de Ruído

A definição de ruído é passível de interpretações diversas, sendo geralmente considerado um som ou conjunto de sons indesejáveis, desagradáveis ou perturbadores. O critério para sua definição é associado ao agente perturbador, cuja subjetividade envolve o fator psicológico de tolerância de cada indivíduo. É um conceito geralmente avaliado de forma negativa, como uma perturbação de ondas de forma não harmônica que causa incômodo ao ouvinte.

Ainda sobre o conceito do ruído, Chadwick definiu-o como qualquer som dissonante, discordante ou anárquico [10]. Stansfeld *et Al* acrescentam a presença de componentes psicológicos em seu discernimento [11], enquanto Catai *et Al* descrevem o ruído como um fenômeno físico vibratório, com características indefinidas de variação de pressão em função da frequência [12].

Do ponto de vista físico, o ruído pode ser considerado um som resultante da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes [13].

2.3.1 Efeitos do ruído na saúde humana

O comportamento humano está diretamente relacionado às condições de equilíbrio do ambiente em que se encontra, sendo o conceito de “conforto ambiental” utilizado para descrever um estado de satisfação do ser humano em um determinado espaço. Além das condições hidrotérmicas, visuais, de qualidade do ar e ergonômicas, que definem o “nível” de conforto de um ambiente, o ruído (manifestação incômoda do som) pode inviabilizar a comunicação verbal, bem como influir diretamente no comportamento emocional e fisiológico das pessoas.

O incômodo ao ruído, portanto, não apenas interfere na conversação e inteligibilidade da fala, como também, apresenta efeitos negativos comprovados na saúde humana. Tais efeitos podem ser considerados auditivos, associados à perda auditiva temporária ou permanente, ou extra auditivos, associados aos prejuízos físicos e mentais.

A perda auditiva pode ser causada pela exposição a níveis superiores a 85 dB por mais de oito horas, máxima exposição diária permissível para ruído contínuo ou intermitente [14]. No caso da perda auditiva temporária, os limiares auditivos geralmente retornam à normalidade após um período de silêncio de 11 a 14 horas [15]. Já a perda auditiva permanente pode ocorrer em função da intensidade do som, do tempo de exposição, do tempo de repouso (silêncio), dos anos efetivos de exposição e da suscetibilidade do indivíduo. A irreversibilidade da perda auditiva pode estar associada a eventos de curta duração (tiros ou explosões, por exemplo) ou pela exposição prolongada a ruídos considerados de risco, como, por exemplo, o ruído de máquinas e equipamentos em ambientes de trabalho e o ruído da operação de atividades aeroportuárias.

A influência negativa do ruído na saúde humana não é, no entanto, uma consequência única e diretamente associada à exposição ao ruído acima dos limites de ruído preconizados pela OMS. Existem efeitos extra auditivos, associados a prejuízos físicos e mentais, indicativos da subjetividade do incômodo. Dentre os efeitos extra auditivos do ruído, em virtude das reações fisiológicas associadas à exposição, podem-se citar as perturbações do sono e da saúde em geral, devido ao estresse ou perturbação do ritmo biológico, além de doenças cardiovasculares, sintomas psiquiátricos, efeitos psicossociais generalizados, redução no desempenho e na atenção, e um aumento do comportamento agressivo [16, 17]. Segundo a OMS, o estresse e a insônia, fatores de risco para hipertensão, úlceras e outras doenças, podem ser diretamente causados pelo ruído [3].

As leis e normas que tratam do ruído amparam-se, justamente, no incômodo ao som e na garantia da saúde para definir parâmetros de tolerância. Além dos critérios objetivos de tolerância máxima da exposição ao ruído, a saúde e o bem-

estar da população urbana devem ser garantidos igualmente a partir da subjetividade do incômodo. Os aspectos legislativos sobre o planejamento urbano e da gestão da poluição sonora no Brasil e no mundo são apresentados na seção [2.4](#).

2.3.2 O Ruído Urbano

Na forma como se manifesta no cotidiano dos habitantes de aglomerados urbanos, a poluição sonora é considerada uma forma de degradação da qualidade ambiental e constitui, atualmente, um problema global de saúde pública. O incômodo ao ruído em áreas urbanas impacta negativamente na qualidade de vida da população, com consequências diretas na saúde e no bem-estar.

A análise do ambiente sonoro urbano depende das características das fontes sonoras, do caminho de transmissão e dos receptores.

O estudo das propriedades e efeitos do ruído urbano sobre a população é relacionado a uma extensa variedade de fontes. Podem ser consideradas fontes de ruído urbano o ruído do tráfego rodoviário, composto por veículos leves, pesados (caminhões e ônibus) e motos, e os ruídos ferroviário e aeroviário. Além do ruído de tráfego, outros são igualmente capazes de afetar o estado de saúde das pessoas, como o ruído noturno de bares e restaurantes ou os relacionados às atividades da construção civil e de instalações industriais.

Dentre as fontes citadas, o ruído produzido pelo tráfego rodoviário é a principal fonte sonora de impacto nas grandes e médias cidades, sendo o mais citado em estudos e reclamações relativos à poluição sonora nas cidades [\[8, 18-22\]](#).

No Brasil, a falta de planejamento do uso do solo e o aumento da frota de veículos são fatores impactantes na mobilidade urbana e na poluição sonora. Embora a intensidade do ruído gerado pelos automóveis seja menor do que a dos demais grupos de veículos (aeronaves, trens, navios), os automóveis têm grande contribuição na emissão do ruído urbano, situação agravada em função da predominância deste tipo de transporte.

A geração do ruído de tráfego rodoviário está relacionada, sobretudo, aos modos de operação das fontes (automóveis). Em áreas urbanas consolidadas, a movimentação dos veículos dificilmente ocorre de forma contínua, devido às possibilidades de itinerário e aos cruzamentos semaforizados. O comportamento da frota de veículos nestas áreas consiste, geralmente, em velocidades baixas e médias, acelerações e desacelerações.

No caso de rodovias e vias expressas, o modo de operação é geralmente caracterizado por fluxo contínuo, tendo em vista a ausência de cruzamentos e paralisações do tráfego, com velocidades constantes médias e altas. Estas variáveis contribuem para emissões de ruído com magnitudes diferentes e faixas específicas de frequência.

Diversos autores estudam a influência dos componentes veiculares (motores, escapamento, suspensão, frenagem, choque de peças e atrito dos pneus com o solo) sobre o ruído total, para diferentes modos de operação das fontes de tráfego.

A velocidade, por exemplo, influencia diretamente no ruído gerado pelo tráfego. Em médias e altas velocidades (aproximadamente superiores a 40km/h para veículos leves e entre 70 e 80km/h para veículos pesados), o ruído do rolamento dos pneus na pavimentação (contato pneu-pavimento) é predominante sobre os demais. Aproximadamente 60 a 80 % do ruído de rolamento dos pneus na pavimentação é devido à vibração, caracterizada por uma frequência de emissão abaixo de 1000 Hz. Os ruídos de propulsão e de vibração do motor, por outro lado, são predominantes nas velocidades baixas [23].

Pacheco [24] classifica o processo de geração de ruído dos motores veiculares em dois tipos: de combustão e mecânico. Segundo ele, o ruído de combustão de veículos, que é a parcela do ruído do motor originado pela variação brusca da pressão dos gases dentro da câmara de combustão, é a principal fonte de ruído em certas condições operacionais do motor. A contribuição de todas as outras fontes do motor, menos influentes, é considerada ruído mecânico.

Stucklschwaiger *et al.* [25], ao verificarem as possibilidades do motor Diesel como alternativa atrativa para veículos SUV's (*Sport Utility Vehicle*), estudaram as influências do sistema de injeção e do trem de válvulas no ruído mecânico e no ruído de combustão. Os autores mostram que na condição de marcha lenta, os motores apresentam, quase que integralmente, ruído de combustão e muito pouco ruído mecânico. Nestes casos, o ruído de combustão se mostra predominante no ruído total. Os autores mostram que o ruído mecânico se faz mais presente em rotações e cargas maiores, onde a influência das partes girantes no ruído total é mais efetiva.

O incômodo associado ao ruído veicular depende das características do contexto urbano, que influenciam diretamente no caminho de transmissão sonora até o receptor. Estas características são os parâmetros das formas urbanas, avaliados, sobretudo, em termos de densidade construtiva, verticalização, relação gabarito e largura das vias (W/H), distância entre receptor e fonte sonora, características acústicas das superfícies, disposição e forma edilícia.

Em campo livre, onde a propagação sonora não é influenciada pelas reflexões sonoras, o decaimento sonoro varia em função da distância entre o receptor e a fonte sonora, sendo os níveis de pressão sonora menores à medida em que o receptor se afasta da fonte. Fontes sonoras pontuais, por exemplo, produzem uma propagação esférica, com atenuação de 6 dB a cada dobro de distância da fonte. Já vias de fluxo contínuo de veículos são tipicamente fontes lineares, que irradiam energia sonora de forma cilíndrica, sendo o decaimento na ordem de 3 dB a cada dobro de distância

da fonte, conforme a equação (2.7).

$$\Delta L_P = 10 \log_{10}(d^2). \quad (2.7)$$

Em áreas urbanas consolidadas, no entanto, o decaimento sonoro em função da distância pode ser pouco eficaz em função da quantidade de reflexões nas superfícies verticais, como as fachadas das edificações, no caminho de transmissão. Um exemplo disto são os “cânions urbanos”, formação urbana típica de cidades grandes, na qual edificações são dispostas paralelamente, frente à frente, separadas por um eixo viário de estreita dimensão [26]. Neste tipo de campo semi-fechado, no qual se estabelece um campo sonoro parcialmente difuso, a reverberação devido às múltiplas reflexões nas superfícies paralelas das edificações pode resultar na amplificação sonora das fontes urbanas típicas, como o ruído de tráfego. Em muitas situações urbanas, portanto, a geração do ruído é agravada pela configuração morfológica das cidades, que tem influência na propagação sonora.

A amplificação sonora pode ser evitada a partir da utilização de materiais com maior absorção sonora nas fachadas de barreiras acústicas, de estudos prévios sobre a disposição de novas edificações e pelo aumento da distância entre as vias e as edificações. Em áreas urbanas consolidadas, onde estas intervenções na forma e materialidade urbana são difíceis, as soluções para atenuação do ruído podem ser obtidas por medidas alternativas. As propriedades de pavimentações viárias, por exemplo, podem resultar em atenuação ou amplificação do nível sonoro, em função do tipo de material.

Em [27] é proposto um modelo para quantificar os níveis de pressão sonora na interface pneu-pavimento, a partir das características superficiais do revestimento asfáltico e da velocidade, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de pesquisas científicas para pavimentos silenciosos. Observou-se no estudo que o aumento do ruído é diretamente proporcional ao aumento da velocidade de tráfego, variando também com a mudança de características de revestimentos asfálticos, tais como o índice de vazios, a textura superficial e a irregularidade longitudinal.

Para Murgel, a principal origem do ruído veicular é o constante golpear da superfície do pneu com a rugosidade do solo [28]. Quanto menos rugoso o pavimento, melhor o desempenho acústico do conjunto, ou seja, o incômodo causado. Isto ocorre porque a quantidade de golpes diminui e, conseqüentemente, tornam-se menores a vibração, o nível de ruído e a sua frequência característica. Pavimentos asfálticos de baixa rugosidade apresentam bom desempenho acústico, porém, como a aderência com o pneu é menos eficiente, provocam sérios problemas de segurança, sendo recomendável, portanto, a aderência do pneu com pavimentos porosos.

Além dos estudos citados, notam-se, globalmente, atitudes voltadas para a

redução do ruído causado pelo tráfego ou a minimização de seus efeitos. Na Europa, a indústria automotiva vem adotando iniciativas para fabricação de motores que geram menos ruído. Destacam-se, igualmente, as iniciativas para desenvolvimento de alternativas de pavimentações viárias, tais como o projeto SILVIA (*Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*) desenvolvido pelo FEHRL (*Forum of European National Highway Research Laboratories*)[\[29\]](#).

Outro projeto é o SILENCE (*Quieter Surface Transport*)[\[30\]](#), co-financiado pela comissão europeia *Sixth Framework Programme of the European Commission*, que propõe uma metodologia integrada de controle do ruído, iniciando na fonte (propondo alternativas para as superfícies viárias), depois na propagação (caminho de transmissão), e, finalmente, no receptor.

A experiência apresentada em referências internacionais demonstra que a coibição dos excessos da poluição sonora, em especial do ruído de tráfego rodoviário, pode ser obtida a partir de medidas infraestruturais, tais como a alteração da pavimentação, a manutenção das vias, ou a inclusão de barreiras acústicas.

No Brasil, todavia, não existem projetos ou iniciativas contundentes relacionados à gestão e à mitigação do ruído de tráfego rodoviário.

2.4 Legislação Ambiental e Gestão do Ruído Urbano

Os instrumentos e políticas de planejamento urbano são compostos por ações preventivas que visam controlar os efeitos negativos dos investimentos público-privados sobre os recursos naturais das cidades e, conseqüentemente, sobre a saúde e qualidade de vida da população.

No Brasil, a Constituição Federal de 1988 atribuiu aos municípios a competência de “legislar sobre assuntos de interesse local” e promover “adequado ordenamento territorial mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano”. Os instrumentos de planejamento e gestão urbana atualmente praticados no Brasil, estão previstos no Estatuto da Cidade [\[31\]](#), que regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal. O Estatuto tem a função de estabelecer normas de ordem pública e de interesse social reguladoras do uso da propriedade urbana. Visa “ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana” [\[31\]](#) em prol do bem coletivo, da segurança, do bem-estar dos cidadãos e do equilíbrio ambiental. A Constituição determina, portanto, como uma finalidade da política urbana, o equilíbrio ambiental, da qual a gestão sonora urbana é parte.

Como diretriz para desenvolvimento das funções sociais da cidade e da proprie-

dade urbana, o Estatuto da Cidade propõe uma “gestão democrática por meio da participação da população e de associações representativas dos vários segmentos da comunidade na formulação, execução e acompanhamento de planos, programas e projetos de desenvolvimento urbano” [31].

Ao tratar dos instrumentos utilizados para alcance desses objetivos, o Estatuto da Cidade menciona os planos nacionais, regionais e estaduais de ordenação do território e de desenvolvimento econômico e social, o planejamento das regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e microrregiões, além do planejamento municipal.

Em nível municipal, o Plano Diretor contempla diretrizes gerais para promoção do desenvolvimento equilibrado das cidades. O Estatuto da Cidade indica que o Plano Diretor é obrigatório para cidades com mais de vinte mil habitantes. As diretrizes dos Planos Diretores levam em consideração o desenvolvimento socioeconômico e a organização espacial dos usos do solo urbano, das redes de infraestrutura e de elementos básicos da estrutura urbana. Consistem, sobretudo, em diretrizes para as políticas urbanas de habitação, saneamento ambiental, mobilidade e meio ambiente. A gestão acústica das cidades não é considerada no Plano, não sendo determinadas quaisquer diretrizes ou estratégias de planejamento urbano para controle e mitigação da poluição sonora de regiões metropolitanas.

A qualidade acústica do ambiente urbano, sobretudo em áreas de indução à ocupação especificadas pelos Planos Diretores, onde o aumento do fluxo de veículos resultará, muito provavelmente, na intensificação da poluição sonora, deveria ser melhor considerada nas decisões urbanas. Atualmente, no entanto, a normativa vigente de acústica ambiental no Brasil limita-se a avaliar o ruído urbano a partir da determinação de limites de ruídos para ambientes externos, conforme o uso e ocupação do solo. No entanto, devido ao efeito desagradável das fontes de ruído urbanas, mesmo em intensidades inferiores aos limites normativos, estas podem causar incômodo e serem considerados como poluição sonora. Devido ao caráter subjetivo desta percepção, não existem, todavia, instrumentos normativos que permitam a avaliação e controle do ruído baseado em aspectos qualitativos, para além dos quantitativos.

O controle da poluição sonora no Brasil é atualmente regulamentado por diretrizes federais, municipais e distritais. Em nível federal, a Lei 6.938/1981, relativa à Política Nacional do Meio Ambiente, confere ao CONAMA a competência para estabelecer “normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à qualidade de vida”. A Resolução 001/90 do CONAMA dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. Determina que sejam adotados os níveis limites de ruído externos a edificações estabelecidos na NBR 10.151 [32].

A NBR 10.151 é o instrumento normativo brasileiro específico para medição e

avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas. Estabelece os procedimentos e limites para avaliação dos resultados em função da finalidade de uso e ocupação do solo, bem como os procedimentos técnicos a serem adotados na execução de medições de níveis de pressão sonora em ambientes internos e externos às edificações. A publicação recente da norma, em 31 de maio de 2019, foi motivada pela necessidade de revisão e atualização de determinados critérios da edição anterior, de 31 de julho de 2000.

Dentre as motivações que levaram à revisão, está a necessidade de harmonização dos procedimentos técnicos aplicáveis nas medições dos níveis de pressão sonora em ambientes externos. Além disso, a revisão tem por objetivo apoiar o poder público no processo de gestão e fiscalização da poluição sonora e de orientar o planejamento urbano de uso e ocupação do solo, para efeito de controle da poluição sonora. Ainda que seu conteúdo não tenha valor de Lei e, portanto, seja informativo, a recomendação de aplicação desta norma aos municípios demonstra a importância da consideração de seus critérios nas políticas de ordenamento e ocupação do solo. Em nota presente na NBR 10.151, sugere-se: “Compete aos municípios estabelecerem o ordenamento e a ocupação do solo e sua compatibilização com esta Norma. Na ausência desta regulamentação legal, recomenda-se realizar levantamento das características predominantes de ocupação do solo para aplicação desta Norma”.

A NBR 10.151 baseia-se em descritores de níveis sonoros específicos em função do tipo de avaliação sonora. Para avaliação de sons contínuos e intermitentes, sons impulsivos [\[1\]](#) e para avaliação sonora ambiental em ambientes externos e internos às edificações, utiliza-se o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A ($L_{Aeq,T}$).

Outros descritores contidos na NBR 10.151 para avaliação do ruído em ambientes externos a edificações são o nível máximo de pressão sonora ponderada em A e em F - L_{AFmax} , utilizado para avaliação do som impulsivo, e o nível de pressão sonora contínuo equivalente em bandas proporcionais de 1/3 de oitava, para a avaliação do som tonal [\[2\]](#).

Dentre os descritores apresentados pela edição de 2019 da NBR 10.151, o L_{Aeq} é o descritor utilizado nos mapas acústicos. A métrica, utilizada para avaliação de fontes sonoras de diversos tipos, é média energética de pressão sonora ao longo de um período de tempo, conforme a equação [\(2.8\)](#):

¹A NBR 16.313 [\[33\]](#) define os sons contínuos como os sons presentes durante todo o período de observação e que não são sons intermitentes nem sons impulsivos, os sons intermitentes como os sons que ocorrem apenas em certos intervalos de tempo, regulares ou não, em que a duração de cada um é superior a 1 segundo, e o som impulsivo como o som caracterizado por impulsos de pressão sonora de duração inferior a 1 segundo.

²A NBR 16.313 [\[33\]](#) define o som tonal como o som caracterizado por uma única componente de frequência ou por componentes de banda estreita que se destacam em relação às demais componentes

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right], \quad (2.8)$$

onde T é o período de tempo entre dois instantes t_1 e t_2 , $p_A(t)$ é a pressão sonora instantânea ponderada em A e p_0 a pressão de referência ($20\mu\text{Pa}$).

Os mapas acústicos são atualmente a principal ferramenta para avaliação do impacto da poluição sonora nas cidades. Sua utilização é obrigatória na Europa, juntamente com a adoção de planos de ação para gestão da poluição sonora, em aglomerados com mais de 250.000 habitantes [34]. Apesar de fornecerem informações relevantes para a formulação de diretrizes e aplicação de planos de ação contra o ruído, os mapas acústicos falham em representar o real incômodo ao ruído pela população exposta. Isto ocorre, em parte, pelo descritor utilizado nas análises (o L_{Aeq}), como também pela representação dos resultados proposta pelas simulações.

As seções seguintes tratam de apresentar em detalhes os mapas acústicos e as diferentes abordagens que vem sendo aplicadas para a gestão da poluição sonora.

2.5 Método Tradicional para Gestão do Ruído Urbano: Mapa Acústico

O ruído em ambientes urbanos é geralmente avaliado a partir de mapas acústicos, que se baseiam em medições e modelagem computacional. Os resultados fornecidos pelos mapas determinam as zonas de conflito e a população afetada pelo ruído a partir da distribuição geográfica da poluição sonora. Ao indicarem visualmente a localização de pontos críticos, os mapas possibilitam a busca por soluções de mitigação e controle do ruído.

Os resultados dos mapas são obtidos a partir de modelos matemáticos de predição do ruído urbano, que dão suporte às simulações computacionais. Os modelos de cálculo mais populares são o RLS-90 (Alemanha), CNR (Itália), CoRTN (Reino Unido) e o TNM (Estados Unidos). No Brasil, a inexistência de um modelo de cálculo para predição do ruído ambiental implica a utilização de modelos internacionais, que nem sempre são compatíveis com o contexto brasileiro.

A metodologia de elaboração dos mapas é baseada no levantamento das fontes sonoras da área estudada, em medições *in-loco* para calibração do modelo, no levantamento de dados topográficos e na morfologia do ambiente construído. Produz-se, assim, uma simulação do ambiente urbano, na qual é possível identificar as áreas mais afetadas ou protegidas acusticamente. A avaliação do ambiente sonoro urbano é feita a partir dos resultados numéricos fornecidos pelo mapa, dados pelos indicadores de nível de pressão sonora por períodos de tempo (L_{Aeq}).

As diretrizes voltadas ao controle do ruído a partir dos mapas não necessaria-

mente resultam em uma melhora da qualidade de vida da população, ao não levarem em consideração questões subjetivas da percepção humana ao ruído. Isto se deve, principalmente, ao descritor utilizado nos mapas, o L_{Aeq} . Esta métrica, apesar de considerar a sensibilidade do ouvido humano, é obtida a partir de uma média da energia acústica temporal, em função do período de avaliação considerado. Embora a NBR 10.151 considere critérios de correção dos valores de L_{Aeq} medidos *in-loco* quando influenciados por componentes impulsivos e tonais, nos cálculos dos mapas acústicos estas correções não são previstas.

Esta pesquisa parte do princípio de que os mapas são capazes de caracterizar os parâmetros quantitativos, alcançados com o rigor científico, da qualidade acústica nas vizinhanças de fontes sonoras específicas. No entanto, a comunidade também deve dispor de parâmetros qualitativos, de caráter subjetivo, sobre a poluição sonora ambiental.

Além disso, a natureza técnico-científica da ferramenta limita a acessibilidade e o entendimento da população. Entende-se que a percepção humana do ruído urbano é muito complexa para ser descrita apenas a partir de dados acústicos e estatísticos e, portanto, a avaliação sonora do modelo simulado deveria ser idealmente exposta a partir de estímulo dado ao sistema auditivo e não ao visual.

Dadas as limitações dos mapas acústicos, a citar a necessidade de consideração da percepção humana ao ruído (a subjetividade do incômodo) e o envolvimento da população local na avaliação projetual dos espaços urbanos [35], a seção 2.6 apresenta os instrumentos alternativos que preconizam estes dois aspectos, fundamentais da investigação sobre o tema.

2.6 Métodos Alternativos para Gestão do Ruído Urbano: Ferramentas Participativas

Uma alternativa às formas tradicionais do pensar a cidade é a inclusão da esfera social nas decisões políticas a partir de métodos participativos de planejamento urbano, constituindo-se uma potencial ferramenta para solução de conflitos socioambientais [36].

Os instrumentos e políticas de planejamento urbano e gestão sonora são baseados predominantemente em métodos científicos. A ciência é tida como única base racional para ação, deixando questões subjetivas de lado. Segundo Street: “Os modos científicos de análise permanecem no centro dos debates ambientais, ignorando as esferas de análise socioculturais (...). Problemas ambientais são problemas sociais, relacionados à população, seu mundo e realidade, suas condições sociais, culturais e políticas” [37].

As ferramentas participativas de planejamento urbano são embasadas na institucionalização da inclusão dos cidadãos na elaboração de planos de estruturação urbana. Street [37] afirma ser indispensável o envolvimento do público no processo de formulação de planos e políticas urbanas, tendo em vista as limitações das abordagens tradicionais das ações governamentais. Segundo ele, as abordagens políticas tradicionais que regulam o planejamento do uso do solo, investimentos em infraestrutura, operação de facilidades públicas, planejamento de transporte urbano, dentre outros processos, falham por estarem centrados exclusivamente em critérios técnico-científicos.

Seckin *et al.* [38] indicam a existência de falhas entre as experiências humanas e as ações tomadas pelas autoridades locais para melhoria acústica de ambientes urbanos [38]. Segundo eles, a avaliação sonora urbana deveria levar em consideração a sensibilidade auditiva de diferentes grupos de pessoas e a natureza subjetiva da percepção humana ao ruído.

Wilińska *et al.* [5] investigam as questões subjetivas da avaliação sonora relacionadas com os aspectos sociais da percepção ao ruído urbano. Os autores definem cinco níveis de envolvimento do público nos processos de tomada de decisão governamentais, baseando-se nas seguintes definições da Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico (OECD):

1. Informação e transação: o governo informa os cidadãos (método de uma única via);
2. Consulta pública: o governo consulta os cidadãos;
3. Envolvimento deliberativo: o governo envolve os cidadãos nos processos consultivos;
4. Iniciativa orientada pelo governo com vistas à participação ativa: o governo incentiva a consulta pública, mas retém o poder de decisão;
5. Iniciativa orientada pela população: a comunidade está ativamente engajada nos processos de tomada de decisão, juntamente com o governo.

Atualmente, pode-se verificar que a interação das autoridades locais com a comunidade, na maioria dos casos, limita-se aos níveis 1 ou 2 da classificação da OECD, mostrando que as políticas públicas de envolvimento e participação ativa dos cidadãos são dificilmente colocadas em prática.

Fundamentada a importância de incorporação do processo de gestão do ruído de forma sistemática pelas políticas de planejamento e ordenamento urbano no Brasil, objetiva-se que esta conduta seja realizada a partir de instrumentos reguladores e

planos de ação que informem e dialoguem com a população de uma forma clara, compreensiva e acessível.

Neste sentido, a construção de um sistema colaborativo em que a população aporta informação aos gestores públicos pode tornar as políticas de transformação urbana mais eficientes. O aperfeiçoamento das ferramentas atuais de gestão sonora urbana pode fornecer maior facilidade na identificação de conflitos e potencialidades, a partir de métodos de percepção sonora qualitativa.

São exemplos de métodos participativos desenvolvidos para análise da paisagem sonora:

- **Sistemas de Informação Geográfica com Participação Pública (PP-GIS):** a partir do uso de técnicas tradicionais de participação e envolvimento (*workshops*, grupos de estudo, entrevistas e exercícios de mapeamento), o PP-GIS envolve a comunidade na produção de dados GIS e processos de tomada de decisão na esfera urbana. Pesquisas recentes [5, 39] apresentam exemplos da elaboração de técnicas para avaliação sonora capazes de auxiliar os mapas acústicos a partir de uma plataforma de PPGIS.
- **Passeios sonoros ou *soundwalks*:** a exploração de um espaço sonoro é um ato que remete ao discurso da ecologia acústica dos anos de 1970, estudo difundido por Raymond Murray Schafer, tendo o conceito de “*soundwalking*” como origem [40]. O método consiste em caminhadas acústicas, através da passagem do ouvinte pela zona estudada, o qual é solicitado a identificar os estímulos sonoros específicos do local. Os participantes compartilham experiências sensoriais obtidas nos ambientes urbanos explorados, relacionando o ambiente construído, a infraestrutura urbana, o planejamento da cidade e suas paisagens sonoras. Pesquisas recentes partem do questionamento do uso exclusivo de mapas acústicos em análises acústicas urbanas e exploram as possibilidades no campo da ecologia acústica, apresentando suas possibilidades de representação [41, 42].
- **Realidade Virtual (RV):** as tecnologias de Realidade Virtual (RV) permitem a simulação audiovisual de cenários urbanos a partir de métodos computacionais, com os quais o usuário pode interagir em tempo real. A Realidade Virtual (RV) pode ser definida como uma forma de visualização, manipulação e interação em tempo real com ambientes tridimensionais obtidos por simulações computacionais.

Dentre as propostas recentes para técnicas participativas citadas, esta pesquisa tem como objeto de estudo a avaliação das potencialidades da tecnologia de RV da sua inclusão na dinâmica dos processos de estruturação e de gestão sonora urbana.

Parte do princípio de que a reprodução virtual das percepções visual e sonora de espaços urbanos pode proporcionar uma experiência representativa da realidade a partir da recriação fidedigna de um contexto e seus atributos físicos.

2.7 Sistemas de Realidade Virtual (RV)

As principais características da tecnologia de RV são [43]: a imersão e a interação.

A interação é a característica que relaciona a detecção dos comandos de entrada fornecidos pelo usuário com a modificação do ambiente sintético tridimensional em tempo real.

A experiência da imersão virtual vem sendo desenvolvida desde a década de 1990 [44] e consiste na sensação de envolvimento experimentada pelo usuário do sistema. A partir da experiência de imersão, o usuário sente-se “inserido” no ambiente virtual. O estímulo sensorial, nestes casos, é feito parcialmente a partir de óculos estereoscópicos e telas de grandes dimensões, ou integralmente a partir da utilização de dispositivos específicos como capacetes de visualização HMD (*Head-mounted display*), luvas de dados (*datagloves*) e auscultadores (*headphones*).

A evolução tecnológica contínua das tecnologias de RV possibilita níveis maiores de imersão devido à exploração dos estímulos visuais, táteis e sonoros. Este último, viabilizado pela transição dos sistemas mono auriculares (de apenas um canal) para sistemas multicanais, introduz maior informação espacial quanto à posição do objeto sonoro e a diretividade sonora do ambiente [45]. Neste contexto evolutivo das tecnologias de áudio, a associação de técnicas de sonorização espacial tridimensionais com sistemas multicanais viabilizam a modelagem de campos sonoros cada vez mais envolventes. Um exemplo de técnica audiovisual envolvente são os sistemas de RV imersivos do tipo CAVERNA Digital, do inglês CAVE (*CAVE Automatic Virtual Environment*).

A CAVERNA Digital consiste em uma sala cúbica cujas superfícies são telas de projeção. É um sistema integrado de multiprojeção estereoscópica para aplicações de tecnologias de Realidade Virtual Imersiva (RVI), onde as imagens projetadas permitem a interação e imersão completa dos usuários no ambiente virtual. Em ambientes CAVERNA Digital, são utilizados sistemas de rastreamento de posição, para controle de navegação e posicionamento do usuário. Os sistemas de rastreamento são capazes de detectar a posição e a orientação dos elementos do espaço tridimensional, localizando a cabeça do usuário para associar às projeções das imagens ao ponto de vista dele.

O gerenciamento de saída de áudio em ambientes de CAVERNA Digital consiste, geralmente, na geração sonora em caixas amplificadas distribuídas estrategicamente no espaço. A reprodução sonora também pode ocorrer a partir da utilização de fones

de ouvido sem fio, sendo o som gerado associado à posição do observador a partir de um sistema de rastreamento.

A limitação dos ambientes virtuais imersivos como a CAVERNA Digital fundamenta-se no alto custo de implementação e na necessidade de espaços grandes. Ademais, são tecnologias pouco acessíveis por não consistirem em sistemas portáteis.

Como alternativa à tecnologia de CAVERNA Digital, as técnicas de RV não imersivas consistem em tecnologias portáteis e com custos de implementação consideravelmente menores, associadas à software específicos. Em ambientes não-imersivos, as imagens virtuais são exibidas diretamente na tela de um computador. O software Unity 3D é uma das mais populares ferramentas para desenvolvimento e exibição de modelos virtuais não imersivos, muito utilizado no desenvolvimento de jogos e compatível com a maioria dos sistemas operacionais e suportando três linguagens de programação script: JavaScript, C# e Boo (Python). O software Unity 3D é utilizado para edição e otimização de cenários visando a criação de ambientes virtuais realísticos.

Para ambos os casos (técnicas imersivas ou não imersivas), a necessidade de aprimoramento do grau de interação e de imersão é o cerne dos debates para desenvolvimento das tecnologias de RV, sendo o objetivo da interface a reprodução realística das informações sensoriais.

O sentido da visão é explorado devido ao processo ser realizado a partir de simulação tridimensional, e o tato a partir da utilização de dispositivos com realimentação tátil *force feedback*. No caso do sentido da audição, os modelos virtuais geralmente deixam a desejar ao não representarem com fidelidade as características acústicas reais recriadas no ambiente simulado.

Nesta pesquisa, a qualidade sonora de tecnologias de RV não imersivas é explorada a partir da sua associação com técnicas audibilização.

2.8 Técnicas de Audibilização

Audibilização é o termo empregado em analogia ao conceito de “renderização” na visualização para descrever a simulação de campos sonoros artificiais. Vorlander define a audibilização como “técnica de criação de arquivos de sons audíveis a partir de dados numéricos (simulados ou gravados)” [46]. Stienen *et al.* definem a audibilização como um processo de criação de cenários acústicos virtualmente audíveis [47].

A audibilização associada a modelos geométricos virtuais permite simular uma sensação binauricular numa posição específica do ambiente virtual modelado. Busca reproduzir, com o máximo de realismo, os estímulos sonoros perceptíveis ao sistema auditivo do usuário em relação à fonte sonora. A partir de técnicas de audibilização,

é possível obter a caracterização artificial dos sinais produzidos pelas fontes sonoras e modificados pelos caminhos de propagação e transmissão do som em ambientes diversos.

As pesquisas em técnicas audibilização têm início na primeira metade do século XX, tendo como precursor Friedrich Spandock, o qual desenvolveu experimentos hoje considerados como as primeiras simulações aurais da acústica de salas [48].

Os estudos acústicos de Friedrich e sua equipe foram desenvolvidos a partir da maquete de uma sala em modelos de escala reduzidos. Amostras de sinais sonoros eram reproduzidas no interior deste modelo e, após gravadas, eram transferidas à escala real para novas reproduções. Os resultados trataram de comparar parâmetros de qualidade acústica de salas hoje largamente estudados, como a inteligibilidade da fala, entre o modelo de escala reduzida e a sala real.

Os modelos de predição acústica atuais naturalmente se desenvolveram desde os experimentos de Spandock, no contexto de desenvolvimento da tecnologia digital em paralelo às inovações tecnológicas para registro, síntese, codificação, distribuição, processamento e reprodução dos sinais sonoros. O desenvolvimento da tecnologia digital fornece atualmente mecanismos econômicos e eficientes para simulação acústica. A partir de programas computacionais específicos, é possível antever o comportamento acústico de ambientes a partir da modelagem virtual de seus atributos físicos.

Atualmente, no mercado, já encontram-se disponíveis sistemas computacionais para simulação acústica preview com módulos de audibilização, como os softwares ODEON e EASE. Estes software são específicos para avaliação acústica de salas, baseados em métodos híbridos de traçados de raios.

Os software permitem a audibilização e o cálculo de diversos parâmetros acústicos de uma sala, possuindo ampla biblioteca de dados para associação aos objetos simulados no modelo virtual.

As etapas da utilização dos software consistem na construção do modelo arquitetônico virtual, a atribuição dos materiais aos objetos e superfícies contidos no modelo, inserção das fontes sonoras e áreas ou locais onde se pretende desenvolver a avaliação sonora. Seguidamente à construção do modelo, procede-se aos cálculos dos parâmetros acústicos a partir do método de traçado de raios, que consiste na emissão pela fonte de um conjunto finito de raios representando as ondas sonoras.

Em ambientes urbanos, a utilização das técnicas de audibilização ainda é pouco comum, devido à complexidade do ambiente, como o tamanho, a quantidade de elementos e a movimentação da fonte e do receptor. Além disso, a audibilização depende do processamento prévio de sinais sonoros representativos dos ruídos urbanos, obtidos por técnicas de síntese sonora. A síntese da gama de ruídos urbanos é uma etapa complexa e longa deste processo, tendo em vista a variedade de fontes sonoras que caracterizam os espaços urbanos.

Diversos métodos de audibilização permitem a síntese de áudio espacial ou tri-dimensional, classificados em duas categorias principais que dependem do meio de renderização e reprodução utilizados: binaural e multicanal.

A audibilização binaural é caracterizada pela utilização de dois canais (direito e esquerdo) direcionados a cada um dos ouvidos. Já a audibilização multicanal é caracterizada pela renderização de sinais para matrizes de alto-falantes, dispensando o uso de fones de ouvidos, tornando-a adequada para a simulação de ambientes acústicos reais para mais de uma pessoa.

A seção [2.8.1](#) apresenta as características da audibilização binaural, método utilizado no presente trabalho.

2.8.1 Reprodução Binaural

O método binaural é caracterizado pela geração de dois canais de som, que contêm informações capazes de auxiliar o aparelho auditivo no reconhecimento da direção e localização de uma fonte sonora.

A localização de uma fonte no espaço é influenciada pelas variações no sinal sonoro em função das reflexões e difrações na cabeça, anatomia da cabeça, tronco e posicionamento dos aparelhos auditivos.

O filtro que simula as mudanças espectrais causadas pelos fenômenos de reflexão e difração sonora na cabeça é a chamada HRTF (*Head Related Transfer Function* ou funções de transferência relativas à cabeça). Uma HRTF, portanto, fornece as informações que possibilitam ao sistema auditivo identificar a direção específica dos sons.

Além disso, a percepção da localização da fonte é também influenciada pelas diferenças de tempo e de intensidade com que o sinal atinge cada um dos ouvidos.

O intervalo de tempo percorrido pelo som desde a fonte até cada canal auditivo é avaliado pela diferença de tempo interaural, o ITD (*inter-aural time difference*, ou diferença temporal inter-auditiva). O ITD consiste na diferença do tempo de chegada do som percebida entre um ouvido e o outro: um sinal que chega à cabeça humana primeiramente do lado esquerdo percorre uma distância maior para alcançar o lado direito. Por isso, é importante no processo de localização dos sons, fornecendo a informação da diretividade da fonte sonora em relação ao ouvinte.

A intensidade com que o som atinge cada ouvido é avaliada pela diferença de nível interaural, o ILD (*inter-aural level difference*). O ILD explora a diferença da intensidade com que o som chega em ambos os ouvidos.

O processo de localização de fontes sonoras é dependente de três parâmetros principais [\[49\]](#):

- Azimute: ângulo horizontal entre a fonte sonora e o centro da cabeça. As

variações de azimute podem ser verificadas por meio da ILD e ITD.

- Elevação: ângulo vertical entre a fonte sonora e o centro da cabeça. Pode ser calculada a partir de filtragem do sinal de entrada, por HRTFs.
- Distância ou Velocidade: distância entre a fonte sonora e a cabeça quando a fonte é estática ou velocidade, para fontes sonoras em movimento. No caso de fontes sonoras em movimento, pode-se verificar a velocidade e as mudanças de frequência a partir do efeito Doppler.

A presente pesquisa baseia-se na ideia de que sistemas concebidos para simulação virtual e reprodução de campos sonoros 2D baseados em técnicas de audibilização biaural podem apresentar resultados fidedignos na representação de ambientes sonoros. Parte do princípio de que o “grau” de realismo das técnicas de audibilização depende de aspectos que vão desde a gravação (registro) até a geração (síntese) e reprodução sonora no ambiente virtual, levando em consideração os parâmetros influentes na propagação sonora do ambiente simulado.

2.9 Sistemas de RV associados a técnicas de audibilização

Nesta seção, são apresentadas referências de aplicação dos sistemas de RV imersivos e não imersivos associados à técnicas de audibilização para avaliação do ruído urbano. Estas referências serviram de embasamento teórico e prático da pesquisa.

Sanchez *et al.* [50] apresentam os impactos ambientais associados ao contexto atual de expansão urbana e indicam a necessidade da elaboração de ferramentas para a avaliação dos efeitos da exposição ao ruído urbano. Os autores indicam os princípios da aplicação de técnicas de audibilização em cenários urbanos virtuais tridimensionais. Afirmam ser este o caminho para a elaboração de planos de ação para controle do ruído urbano a partir do envolvimento da população. Segundo os autores, as técnicas de audibilização aplicáveis em contextos urbanos vêm sendo desenvolvidas em função da demanda por simulações acústicas de qualidade e formas alternativas de representação do ruído urbano.

A estrutura da pesquisa é dividida pelos autores em três etapas: a criação dos sinais sonoros, a simulação da propagação sonora no ambiente virtual (incluindo os efeitos físicos da onda sonora) e a reprodução dos sinais para o receptor/usuário.

A reprodução dos sinais sonoros obtidos a partir da audibilização é sugerida de diversas formas, sendo indicada na pesquisa a reprodução biauricular com fones de ouvido para preservação das características perceptuais do sistema auditivo. Os autores apontam para os desafios da aquisição dos sinais sonoros e da geração de

simulações de alta qualidade. Recomendam, ainda, a investigação de novas formas de registro sonoro específicas para cada fonte sonora avaliada. Os autores concluem reiterando as vantagens das técnicas de audibilização para as áreas da psicoacústica e da audiologia, em respeito aos efeitos fisiológicos da exposição ao ruído.

O método desenvolvido por [50] consiste na recriação audiovisual de um contexto urbano a partir dos software 3D Studio Max e Unity3D. Consiste na simulação do ambiente sonoro associado a um ambiente visual tridimensional. Foi simulada visual e acusticamente uma área urbana, consistindo de uma passarela de pedestres sobre uma via expressa de tráfego rodoviário. A pesquisa propõe alterações no ambiente sonoro a partir da inserção de barreiras acústicas com diferentes alturas no modelo virtual. Trata, portanto, de verificar a viabilidade da ferramenta como técnica de predição.

A reprodução do cenário audiovisual foi realizada utilizando-se capacetes de visualização HMD, permitindo a experiência imersiva. Ao final do experimento, foram realizados testes com 71 usuários para avaliação dos efeitos e percepções a partir da experimentação do modelo virtual. Os participantes foram solicitados a avaliar a experiência audiovisual para o critério de conforto.

Os resultados mostram uma tendência de aumento do nível de conforto para menores níveis de ruído, ou seja, barreiras acústicas com alturas maiores. Ainda, os resultados mostram que o “grau” de conforto está associado ao aspecto visual do percurso, o qual tem influência significativa na experiência dos usuários. De uma forma geral, os participantes avaliaram a ferramenta como realística e imersiva.

Os autores concluem que o nível de conforto experimentado aumenta em função da combinação dos seguintes elementos: vegetação, tipo da barreira (aspecto visual e altura), redução do ruído e mobiliário urbano. A pesquisa mostra a importância, na prática de planejamento urbano, da associação das experiências visual e sonora, com papel significativo no bem-estar e conforto da população.

Outra iniciativa é o projeto de origem sueca *LISTEN*, que tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta demonstrativa para controle do ruído de tráfego rodoviário e ferroviário, baseada em técnicas de audibilização [51].

Nos experimentos foram utilizadas duas fontes que compõem o ruído veicular: o ruído gerado pela propulsão (que considera o ruído do motor, entrada e saída de ar, ventilação e compressores) e o ruído mecânico.

As simulações virtuais consideraram efeitos de propagação, de decaimento da amplitude sonora, da atenuação sonora no ar (predominante para frequências altas), da reflexão ou absorção devido à superfície do solo, e o efeito *Doppler* para as fontes em movimento. Foram utilizadas funções de transferência relacionadas à cabeça (do inglês, *Head-related transfer function* - HRTF) a partir de um manequim KEMAR

(*Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research*), que simula as características acústicas do sistema auditivo de um ser humano adulto normal.

A validação da ferramenta apresentada pelos autores foi realizada a partir de testes subjetivos para avaliação do “grau” de realismo, incômodo e de percepção da velocidade dos veículos.

No primeiro teste, pares de gravações contendo o ruído da passagem de veículos foram apresentados. Cada par contendo uma gravação real e uma audibilização. A tarefa do avaliador consistiu em identificar qual dos dois sons era o real. O segundo experimento propunha avaliar qual dos arquivos sonoros (real e simulado) era mais incômodo e em qual deles a passagem de veículo era percebida com maior velocidade.

Os resultados mostraram que os sons audibilizados foram considerados mais incômodos em aproximadamente 50% dos casos. O padrão de resultados para velocidade percebida foi similar ao padrão de incômodo percebido. Os autores concluem que os resultados dos testes para veículos de passeio demonstram uma técnica de audibilização bastante próxima ao desejado. Recomendam a audibilização como técnica complementar às metodologias computacionais de avaliação do ruído urbano existentes.

Outro método de avaliação participativa do ambiente sonoro urbano foi proposto a partir de uma ferramenta online baseada em técnicas de RV [52]. A ferramenta desenvolvida permite o reconhecimento visual e sonoro do espaço urbano, podendo ser acessada online a partir de navegadores padrões ou pelos próprios dispositivos eletrônicos dos usuários.

O recorte urbano escolhido para testes de aplicação da ferramenta foi a Piazza Vittoria, localizada em Nápoles, Itália. A ferramenta desenvolvida permite o movimento livre dos participantes no ambiente virtual.

O ambiente visual virtual da praça foi desenvolvido a partir do banco de dados disponibilizado pela plataforma SIG (Sistema de Informação Geográfica) obtidos online e por fotografias do local. Além disso, o modelo tridimensional foi desenvolvido a partir da utilização dos softwares Autocad 2012, SketchUp 8, 3ds Max 2012 e finalmente renderizados no Unity 5.3. Os elementos modelados consistem em edificações, ruas, pavimentações, mobiliário urbano, fontes, vegetação, veículos e pessoas. Na simulação, a movimentação das fontes (veículos de passeio) foi programada para os seguintes contextos: com e sem restrições de tráfego, com velocidades variando de 20km/h a 50km/h dependendo do trecho, e com reduções de velocidade nas curvas.

Para recriação do ambiente virtual, foram associados os elementos visuais inseridos no modelo aos respectivos elementos sonoros. Estes últimos foram gerados por diversos meios: no caso da voz humana, amostras de conversações foram registradas em câmara anecóica. Para simulação do ruído de fundo, amostras de ruído de tráfego

foram registradas no entorno da Piazza Vittoria. O ruído veicular (mecânico e de combustão) foi obtido a partir de sintetização no software Matlab. Outras fontes, como sons de pássaros, chafarizes e o som das ondas do mar foram obtidas a partir de amostras online no formato WAV.

Os autores avaliaram as 100 respostas dos testes online de participantes com idade entre 18 e 35 anos, e 36 a 65 anos. Um total de 62% dos participantes indicaram a parte visual como relativamente boa e realística, com pontuações iguais ou maiores do que 5. Com relação ao ambiente sonoro, houve menos aceitação com relação ao realismo das fontes simuladas, a citar: o ruído veicular com muita energia nas baixas frequências, a simplicidade do ambiente sonoro simulado, a predominância do ruído de tráfego sobre os demais ruídos do local e a percepção da atenuação sonora pouco eficiente. Poucos comentários foram feitos com relação à parte visual ou sobre as formas de utilização da ferramenta. De uma forma geral, os participantes indicaram ser a ferramenta um avanço em direção a processos de decisão mais eficazes.

Para evitar a sobrecarga computacional, indicada como aspecto de desafio pelos autores, foi necessário simplificar os processos de renderização e o conteúdo do ambiente virtual dentro dos limites mínimos de qualidade. Além disso, conforme sinalizado pelos autores, a simplicidade do ambiente sonoro está relacionada à utilização apenas de veículos de passeio na simulação, devido à dificuldade de produção das fontes sonoras de veículos de outros tipos.

Para Seckin *et al.*, o entendimento do ambiente urbano é compreendido atualmente, como uma experiência humana multissensorial[38]. Os autores indicam que sistemas de RVI podem ser utilizados para auxiliar no entendimento dos resultados fornecidos pelos mapas acústicos e assessorar o planejamento urbano.

A pesquisa apresentada pelos autores tem por objetivo demonstrar a aplicabilidade de uma técnica de avaliação urbana audiovisual multissensorial. A ferramenta desenvolvida emprega técnicas de RV e audibilização, apresentando os resultados obtidos da investigação realizada com os usuários para conclusões sobre o ambiente sonoro urbano apresentado.

O estudo de caso escolhido para aplicação da ferramenta desenvolvida foi o bairro histórico Triana de Sevilha, Espanha. A metodologia desenvolvida pelos autores envolveu, inicialmente, processos de renderização audiovisual para o ambiente virtual modelado, permitindo a representação de diferentes contextos urbanos. A pesquisa de campo consistiu na análise do local a partir de *soundwalks*, na monitoração das características acústicas e na gravação de sinais sonoros binaurais. Foram avaliados diferentes contextos urbanos para a análise: um cenário durante o dia e outros dois cenários durante a noite. Os estímulos sonoros foram obtidos a partir da extração de sinais representativos das gravações realizadas *in-loco*.

A técnica de audibilização proposta pelos autores contempla diversas amostras sonoras representativas das fontes do ambiente virtual. Para uma reprodução contínua e homogênea dos arquivos sonoros, utilizou-se o método de interpolação linear. A modelagem do cenário visual foi obtida por modelagem 3D a partir de software CAD, BIM ou GIS, levantamento fotográfico, de vídeos e renderização para aplicação das texturas no ambiente virtual. Ao final, todos os elementos foram associados para a definição do ambiente virtual final. A reprodução do modelo virtual da RVI foi realizada a partir da utilização de capacetes de visualização HMD, pela economicidade do método e facilidade de manuseio quando comparado ao método da CAVERNA Digital.

A interface de RVI foi apresentada aos usuários, procedendo-se à avaliação subjetiva a partir da análise das reações dos participantes diante dos estímulos da interface virtual. A avaliação subjetiva consistiu na verificação das preferências dos indivíduos para os elementos dos cenários virtuais e na satisfação geral a partir de questionários (aspectos de áudio e visuais). As diversas reações dos usuários foram interpretadas a partir do método de análise de variância (ANOVA).

Faria apresenta as principais técnicas de produção sonora espacial e audibilização disponíveis para ambientes audiovisuais, particularmente os sistemas de RV imersivos [45].

O trabalho desenvolvido teve por objetivo investigar a viabilidade, a complexidade e a validade do uso da audibilização em ambientes de RV. A autora apresenta uma arquitetura modular aberta em quatro camadas para produção de áudio espacial em ambientes audiovisuais imersivos, a partir de estudo de caso que considera a implementação de um audibilizador para CAVERNA Digital.

A autora indica que a CAVERNA Digital apresenta vantagens sobre as demais técnicas de sistemas de áudio imersivo, pois permite a navegação por ambientes virtuais tridimensionais e a tele presença. Além disso, possui um sistema de aglomerado de computadores que possibilita a investigação de processos computacionalmente pesados, como modelos acústicos complexos e algoritmos de codificação audiovisual em tempo real.

A autora indica como componentes principais do audibilizador: o modelador (*render*) acústico (responsável por calcular os sons ouvidos pelo usuário no ambiente virtual), e o codificador de áudio 2D/3D (responsável pelo processamento dos sons individuais de cada elemento sonoro com a informação temporal e espacial do som). A partir dos resultados da pesquisa, conclui-se que a audibilização permite fornecer uma perspectiva acústica realística do espaço, apresentando vantagens para a implementação de sistemas de áudio 2D/3D.

A pesquisa apresentada por Luigi *et al.* teve por objetivo verificar a validação

das técnicas de RVI como ferramentas de avaliação multissensorial aplicadas ao planejamento urbano [35]. Segundo eles, a percepção dos usuários destas ferramentas em relação aos ambientes virtuais deve ser ainda melhor investigada. Na pesquisa é proposta uma investigação subjetiva a partir de questionário dirigida a um grupo de voluntários solicitados a avaliar uma situação urbana real, enquanto outro grupo foi selecionado para explorar o cenário urbano virtual correspondente.

O experimento foi realizado com 40 habitantes da cidade de Nápoles, na Itália, sendo 20 para a investigação *in-situ* (cenário urbano real) e os demais para a investigação do cenário urbano virtual. A área urbana escolhida consiste em uma área de Nápoles próxima ao mar, utilizada pela comunidade local para atividades de lazer.

Tanto nas sessões reais quanto nas virtuais, foram aplicados questionários estruturados em três partes: qualidade global, qualidade sonora e qualidade visual associadas à percepção do ambiente. Para a avaliação real, foram realizadas medições dos níveis de pressão sonora e gravações com microfone e gravador portátil.

Para elaboração do ambiente virtual, o cenário 3D foi construído a partir do software *Google Sketchup*, sendo inseridos os elementos do trecho urbano investigado (estradas, calçadas, volumetria dos edifícios). O software utilizado para desenvolvimento da interface de RV foi *Worldviz Vizard v4.0*, utilizando-se capacetes de visualização HMD e sensores de orientação para explorar o ambiente virtual. Os estímulos de áudio e eventos visuais foram sincronizados.

A análise dos resultados das investigações do cenário real e virtual foi realizada a partir da metodologia ANOVA, para conhecimento dos efeitos das experiências real e simulada sobre os participantes. Foram investigadas as possíveis diferenças entre ambas as abordagens. A avaliação aplicada aos grupos da experiência real e da experiência simulada foi relacionada com questões como qualidade ambiental e a sensação de conforto no ambiente.

Os resultados da pesquisa não indicaram diferença significativa da percepção entre as experiências real e simulada: os grupos não indicaram diferenças significativas na percepção das características visuais e sonoras entre os modelos. Segundo os autores, isto pode ser atribuído ao nível de realismo do cenário simulado.

Na conclusão do estudo, afirma-se que o efeito dos estímulos visuais e sonoros na sensibilidade dos usuários pode mudar se tais aspectos são considerados separadamente, contrariamente a uma avaliação global, em que todos os efeitos são considerados conjuntamente.

Com base no referencial teórico apresentado no presente capítulo, nota-se que o avanço das tecnologias digitais é hoje uma realidade indissociável da maioria das áreas de conhecimento. Quando observadas as pesquisas relacionadas ao tema das interfaces de RV e RVI, são notáveis as potencialidades destas ferramentas na dinâmica

de processos de planejamento urbano.

Os capítulos seguintes tratam de descrever a metodologia utilizada para aplicação da interface de RV proposta nesta pesquisa, bem como os resultados da avaliação da método desenvolvido.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para avaliar a interface virtual VA (*Virtual Acoustics*) não imersiva usada para simular o som de um determinado ambiente urbano.

Considerando que o objetivo deste trabalho é investigar a capacidade do sistema em reproduzir as fontes veiculares, foi elaborado um cenário urbano simples, com apenas uma via, sem edificações ou elementos arquitetônicos que possam promover reflexões e difração do som e, eventualmente, alterar as características de percepção do som dos veículos.

As etapas para elaboração do cenário e da simulação com o VA estão descritas na figura [3.1](#).

Para a avaliação subjetiva, é necessário um áudio que corresponda ao som emitido por um veículo quando em movimento. A gravação no próprio veículo em movimento não é prática, pois requer a instalação de equipamentos de gravação em diversas partes do veículo, a fim de capturar o som de seus principais componentes (motor, rolamento do pneu, suspensão etc). Por isso, optou-se por utilizar um sistema estático de gravação para capturar o som da passagem dos veículos e posteriormente, separar os sons com processamento digital de sinais, através de um arranjo de microfones. O sinal obtido desse sistema de aquisição foi então utilizado como fonte sonora no sistema de realidade virtual para produzir o som biauricular, alvo da avaliação subjetiva. Para que o áudio biauricular pudesse ser comparado com um som de referência “real”, foram realizadas gravações com uma cabeça artificial concomitantemente às gravações com o arranjo de microfones. Por fim, a avaliação do sistema foi feita pela análise dos resultados obtidos de testes subjetivos auditivos, de comparação entre sons medidos e simulados.

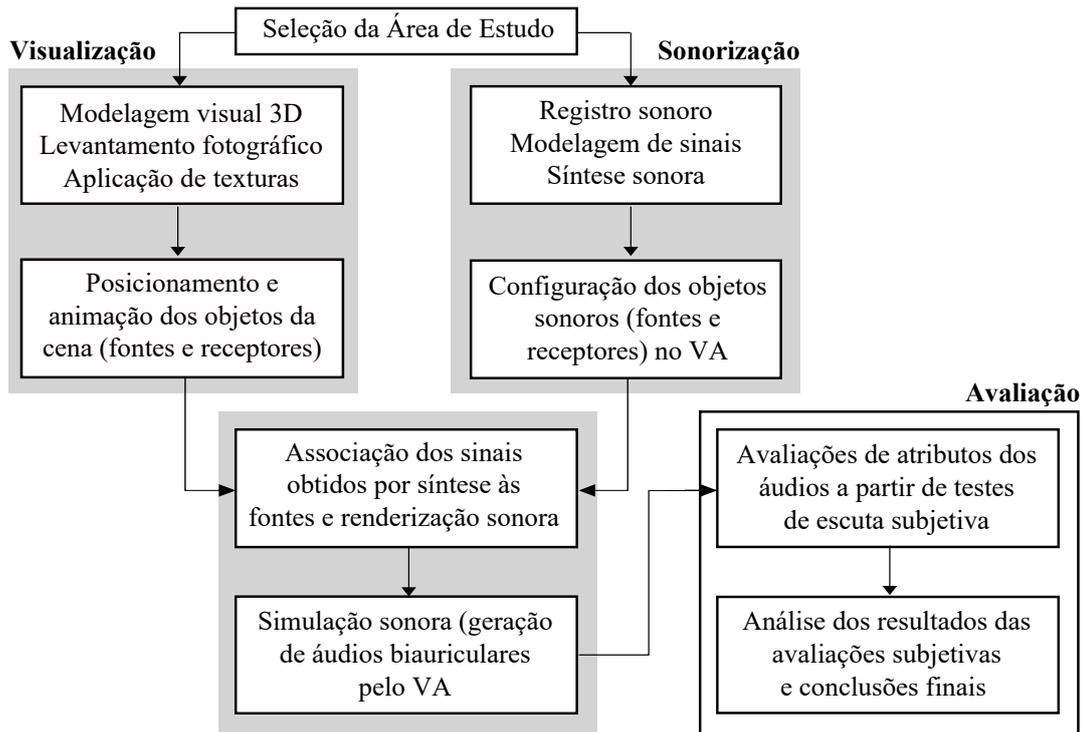


Figura 3.1: Metodologia de desenvolvimento do modelo virtual

3.1 Seleção da área de estudo

A área urbana selecionada para a avaliação está localizada dentro do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), campus Xerém, na cidade do Rio de Janeiro. O trecho avaliado consiste em uma via local, com baixo fluxo de veículos, constituída por pavimentação asfáltica, possuindo um total de 7,0 metros de largura e duas faixas de rolamento.

O ambiente sonoro da área é caracterizado pela passagem esporádica de veículos de passeio e ônibus para transporte de funcionários do Instituto, além de pássaros da região. O trecho em estudo possui edificações em apenas um dos lados da via, havendo no lado oposto uma mata tropical urbana. Durante todo o período de gravações o ruído de fundo se manteve aproximadamente constante, na faixa de 50 a 55 dBA.

A área selecionada apresenta vantagens sobre as típicas áreas urbanas consolidadas ao consistir em uma região sem a influência significativa de reflexões sonoras. O entorno da área de estudo é caracterizado por gramados, elementos arbóreos e pelas edificações de baixo gabarito do campus do Inmetro.

A figura 3.2 apresenta uma imagem da área em estudo, com a indicação do trecho viário avaliado.

A modelagem visual 3D da área de estudo foi realizada a partir de uma simulação



Figura 3.2: Localização do campus Xerém (Inmetro), com indicação do trecho viário avaliado

simples no software Google SketchUp, incluindo-se os objetos urbanos típicos do local avaliado (superfícies, trecho viário e vegetação). Após modelagem da geometria, o trecho urbano foi importado no software de animação Unity3D, onde foram aplicadas as texturas correspondentes aos objetos da cena. A figura [3.3](#) mostra o modelo virtual simulado nos software Google Skecthup e Unity 3D.

3.2 Registro, modelagem e síntese sonora

3.2.1 Medições sonoras

As medições de passagens de veículos foram realizadas no período da manhã do dia 29 de outubro de 2018. Consistiram no registro de veículos de passeio em condições diferentes, alterando-se as velocidades entre 30km/h e 70km/h, o sentido de passagem do veículo (da esquerda para a direita e vice-versa), presença ou não de aceleração e o modelo dos veículos. Os modelos dos veículos utilizados para rea-

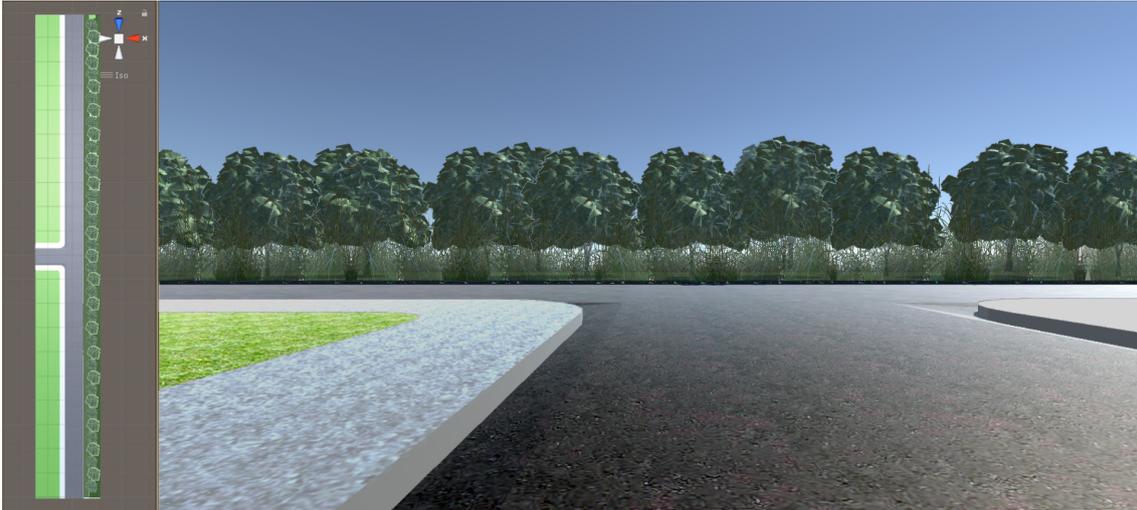


Figura 3.3: Vistas (a) de topo e (b) frontal do modelo urbano simulado.

lização dos testes foram: Jeep Renegade 1.8, Hyundai Creta 1.6, Mitsubishi ASX 2.0 e Volkswagen Gol 1.6. Somente o último possuía câmbio manual. Todos os registros sonoros foram realizados para a distância fonte-receptor de 3 metros.

Com auxílio do equipamento cedido pelo Laboratório de Instrumentação e Simulação Acústica (LISA) da UFRJ, e conforme metodologia detalhada por [53], foi utilizado um sistema composto por um arranjo de microfones para registro dos dados de áudio. O arranjo foi colocado sobre um suporte e erguido a uma distância de 1,26 m do chão, conforme a figura 3.5.

3.2.2 Gravações Biauriculares

Além do arranjo de microfones, os sinais sonoros foram registrados por uma cabeça artificial (*dummy head*), disponibilizada pelo INMETRO, fabricada pelo Instituto Técnico de Acústica da Universidade RWTH Aachen. As gravações com a cabeça artificial foram realizadas concomitantemente às medições com o arranjo de microfones. A cabeça artificial foi posicionada a uma distância de 1,0 metro do meio-fio, conforme as figuras 3.4 e 3.5. A gravação com cabeça artificial é feita por dois microfones montados em um torso e posicionados nos locais correspondentes às entradas dos canais auditivos de um ouvinte. O áudio biauricular capturado possui todas as características espaciais devido à difração das ondas pela cabeça e torso e às diferenças interaurais de tempo e de nível entre os sinais de cada ouvido artificial. Dessa forma, os áudios medidos e simulados podem ser comparáveis.

A tabela 3.1 apresenta as configurações usadas para registro dos sinais sonoros e a referência numérica dos arquivos de áudio. Os pares de áudio apresentados na última coluna da tabela correspondem à passagem dos veículos da esquerda para a direita e

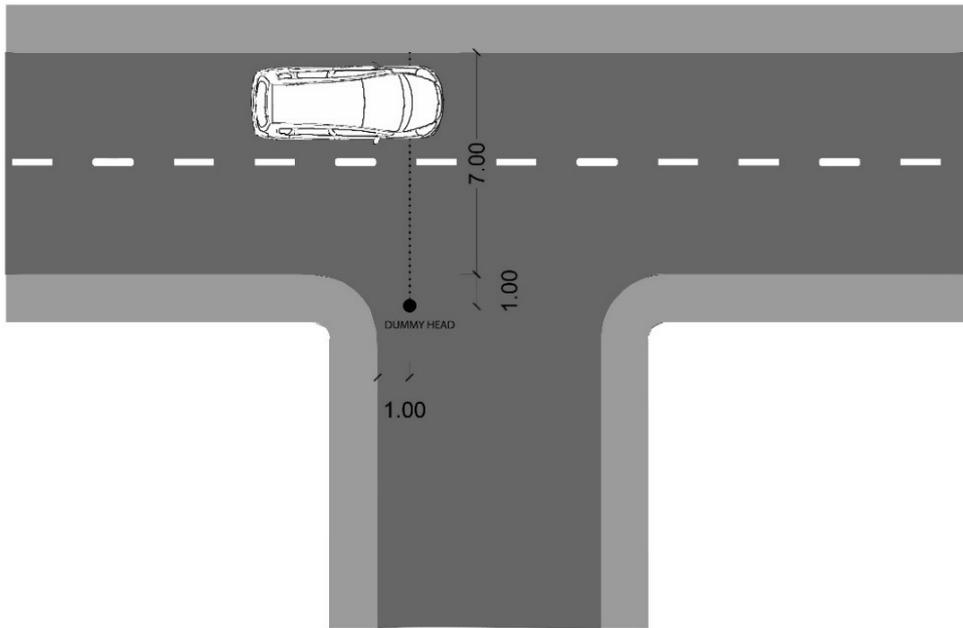


Figura 3.4: Posicionamento da cabeça artificial (*dummy head*) para registro dos veículos de passeio



Figura 3.5: Imagens do trecho viário avaliado

da direita para a esquerda, respectivamente, para cada velocidade avaliada. Na coluna “Velocidade”, são apresentadas as velocidades constantes registradas (30km/h, 50km/h, 60km/h e 70km/h), bem como os registros dos veículos com aceleração (AC). A velocidade dos veículos foi estimada a partir da posição de GPS a cada instante de tempo durante as passagens dos veículos pela via. Os motoristas foram orientados a manter constante a velocidade durante os testes, contudo o velocímetro do carro possui leitura com uma incerteza muito maior do que a velocidade obtida

pelo GPS. Assim, nem sempre foi possível manter a velocidade constante no valor pretendido, ficando variável em torno da meta.

Veículo	Velocidade (km/h)	Áudios
Jeep Renegade 1.8	30	1, 2
	50	3, 4
	60	5, 6
	70	7, 8
	AC	9, 10
Hyundai Creta 1.6	30	11, 12
	50	13, 14
	60	15, 16
	70	17, 18
	AC	19, 20
Mitsubishi ASX 2.0	30	21, 22
	50	23, 24
	60	25, 26
	70	27, 28
	AC	29, 30
Volkswagen Gol 1.6	30	31, 32
	50	33, 34
	60	35, 36
	70	37, 38
	AC	39, 40

Tabela 3.1: Descrição das configurações de gravação dos veículos, velocidades e sentido de passagem.

3.2.3 Modelagem e síntese dos sinais sonoros

O processamento dos sinais sonoros obtidos nas medições com o arranjo de microfones foi realizado a partir do software MATLAB, sendo possível estimar o posicionamento da fonte e obter as características espectrais dos sinais de áudio. Inicialmente, encontrou-se o ponto central da passagem do veículo em relação centro do arranjo, recortando-se o áudio simetricamente para duração de 3,0 segundos antes e após este eixo, totalizando 6,0 segundos. O processamento deste sinal foi realizado obtendo a sua representação no domínio da frequência através da Transformada de Fourier, resultando em um filtro com o conteúdo espectral da fonte sonora quando está mais próxima e em frente ao arranjo de microfones. Posteriormente, foi realizada a convolução desse filtro com um ruído branco. O filtro seleciona o conteúdo espectral associado à passagem do veículo, deixando passar as mesmas frequências emitidas pelo veículo e atenuando outras. Os arquivos gravados e sintetizados foram normalizados visando manter a mesma energia sonora. Um exemplo do espectro do áudio

sintetizado na velocidade de 50km/h é dado na figura [3.6](#).

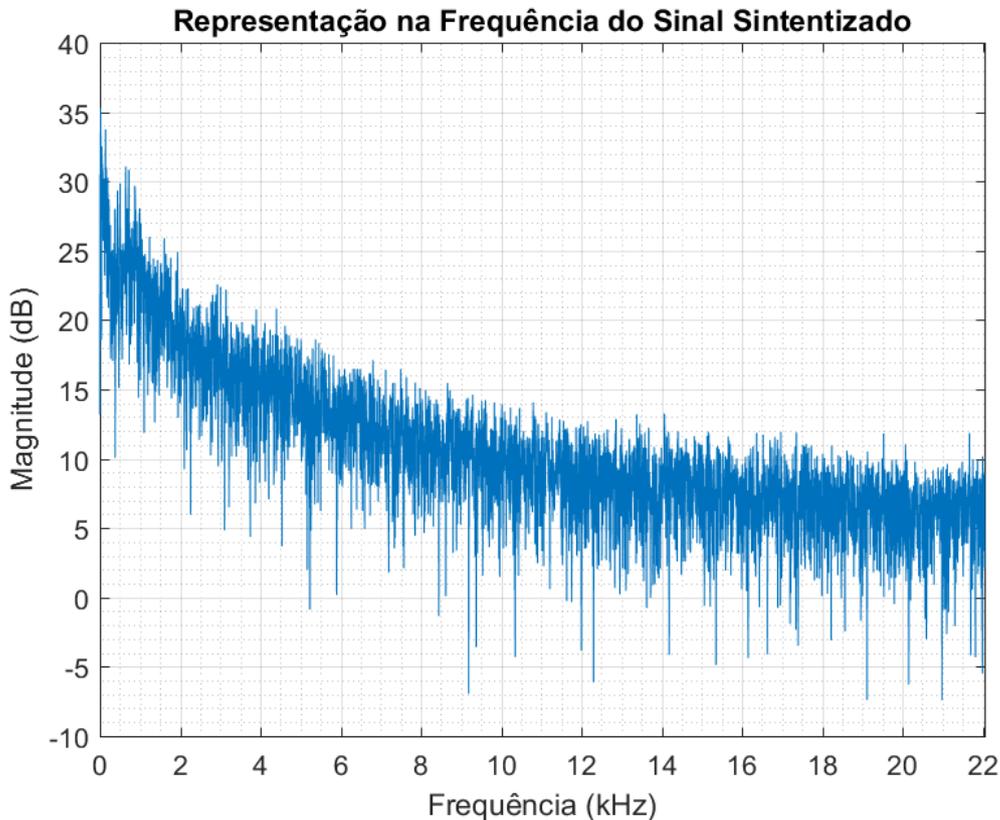


Figura 3.6: Conteúdo espectral dos sinal sonoro sintetizado para veículo com velocidade de 50km/h

3.3 Configuração e associação dos objetos sonoros aos sinais sintetizados

O módulo VA (*Virtual Acoustics*) para Unity3D, também denominado VAUnity, é uma plataforma de audibilização em tempo real disponibilizada pelo Instituto Técnico de Acústica da Universidade RWTH Aachen. O módulo é de livre acesso ao público, sendo utilizado para pesquisas acadêmicas. A interface entre o módulo VA e o ambiente Unity é feita através de códigos na linguagem C#, para conexão do servidor de audibilização com a cena virtual do Unity3D, de forma a criar um ambiente audiovisual que sincroniza renderização e reprodução sonora.

Os modos de audibilização controlam as fontes sonoras e receptores a partir do código VA Auralization. Portanto, inicialmente, a utilização do módulo VA na interface desenvolvida no software Unity 3D depende da inserção das fontes e receptores sonoros no ambiente virtual.

Para criação da fonte pontual (veículo), o comportamento físico do veículo foi definido a partir de códigos de programação do próprio software Unity 3D, ajustando-se as velocidades e posições com relação ao ouvinte. O objeto em movimento no modelo foi então vinculado ao código de programação *VAU Sound Source* do módulo VA, atribuindo-se ao código os áudios sintetizados, em formato .WAV, obtidos a partir dos áudios medidos conforme indicado na seção [3.2.3](#). Para o efeito *Doppler*, fenômeno que caracteriza diferenças na frequência emitida por uma fonte quando esta se encontra em movimento relativo ao observador, foi considerada a configuração padrão do VA.

Além da fonte pontual que se move numa trajetória retilínea para simulação da passagem do veículo, foram inseridas no modelo outras fontes pontuais para representação do ruído de fundo, correspondendo ao ambiente sonoro do local, descrito na seção [3.1](#). Os arquivos foram obtidos do site *soundbible* [\[54\]](#).

Os receptores sonoros do modelo virtual foram associados à câmera de visualização, objeto padrão do Unity3D responsável por capturar e exibir o modelo virtual. A câmera, neste caso, assume o papel também da cabeça humana/artificial, sendo responsável pela transmissão visual e sonora ao usuário da interface. Para configuração da câmera de visualização como receptor, esta é vinculada aos códigos de programação *VAU Listener* e *VAU Sound Receiver* do módulo VA.

Não foram consideradas no modelo as propriedades acústicas das superfícies (coeficientes de absorção das edificações, pavimentação e vegetação), apesar destas características levarem, possivelmente, a um maior realismo e sensação de imersão da ferramenta.

Para renderização biauricular, o percurso entre a fonte sonora e os ouvidos foi modelado considerando-se as Funções de Transferência Relativas à Cabeça, HRTFs (do inglês *Head-Related Transfer Functions*). Essas funções caracterizam como o som proveniente de cada direção do espaço ao redor do ouvido é processado (filtrado) pelos ouvidos. Os parâmetros da diretividade sonora foram definidos no código de programação *VAU Listener* do módulo VA utilizando-se banco de HRTFs com resolução angular de 1×1 grau, em formato .DAFF (*Open Directional Audio File Format*) do Instituto Técnico de Acústica da Universidade RWTH Aachen, disponibilizado no site *Open Daff* [\[55\]](#). Nessas funções espaciais já estão codificadas as diferenças de tempo e de nível, além das relacionadas à percepção auditiva em função da frequência do som.

Os aspectos audíveis das fontes e receptores sonoros (diretividade sonora, influência da cabeça humana, efeito doppler, parâmetros de renderização e reprodução sonora) são ajustados nos códigos do VA e na aba “Inspector” do software Unity 3D, conforme a figura [3.7](#).

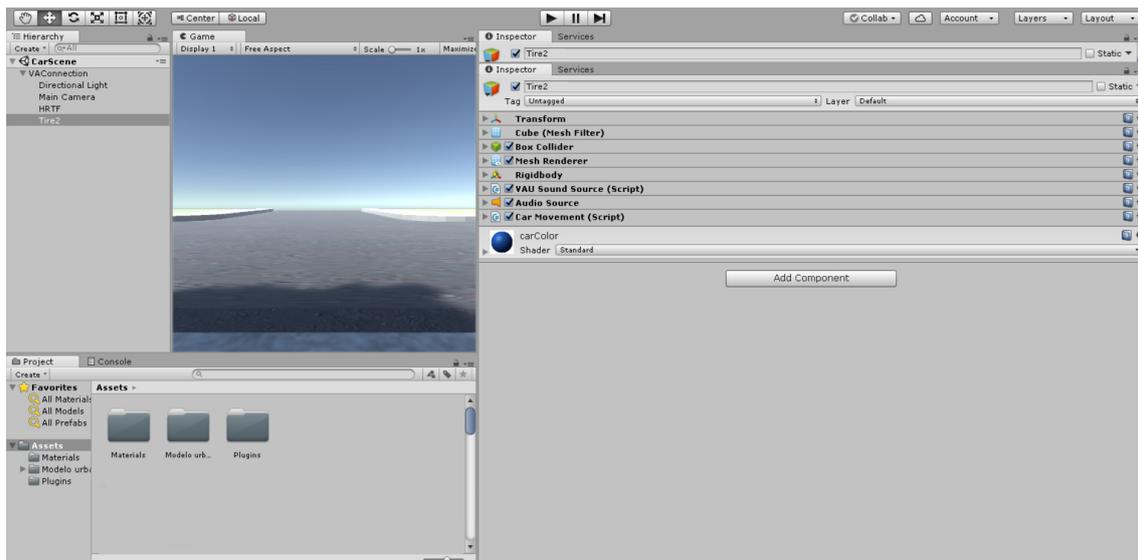


Figura 3.7: Configuração de parâmetros no software Unity 3D

3.3.1 Simulação Biauricular (VA)

Após configurados os parâmetros de fonte, receptores e propagação sonora no modelo virtual, utilizou-se o servidor do módulo VA para criação dos arquivos de áudio. Foram simuladas diferentes condições de velocidades, sentidos de passagem dos veículos, distância fonte-receptor, correspondendo às condições registradas *in-loco* com a cabeça artificial, conforme a seção [3.2.2](#).

A simulação teve por finalidade produzir áudios biauriculares (com a influência da cabeça humana) comparáveis à situação urbana real avaliada, descrita na seção [3.1](#). Os áudios biauriculares gerados em formato .WAV foram editados e normalizados para sincronização com os áudios gravados, de forma que as energias, sobretudo quando o veículo passa na frente do ouvinte, fossem equivalentes. Este processo foi realizado para que, na etapa de avaliação subjetiva, todos os áudios fossem equivalentes ou livres de diferenças entre níveis de gravação e simulação.

Da mesma forma como os áudios gravados, os áudios simulados foram editados para a duração total de 6.0 segundos, simetricamente dispostos em função do instante da passagem do veículo pelo ouvinte, considerando-se a duração de 3.0 segundos antes e após o ponto central.

Capítulo 4

Avaliação subjetiva

A seções [4.1](#) e [4.2](#) apresentam as etapas de avaliações com os áudios gravados e simulados.

Inicialmente, foram realizadas avaliações subjetivas apenas com os áudios gravados pela cabeça artificial, com a finalidade de avaliar a percepção auditiva das pessoas com relação aos mesmos. Para tanto, um grupo de voluntários foi solicitado a identificar atributos específicos nos áudios e indicar diferenças entre os sons gravados.

Em seguida, procedeu-se à comparação dos áudios biauriculares gravados com os simulados. Uma nova avaliação foi realizada com um grupo de voluntários com o objetivo de verificar o grau de similaridade ou de plausibilidade entre os áudios simulados e os gravados. O procedimento para verificação destes aspectos proporcionados pela simulação sonora foi realizado aplicando-se avaliações do tipo AB, onde atribui-se um grau para cada evento, comparando-se os casos A e B, ou que identifiquem se a pessoas percebem diferenças entre os áudios simulados e gravados e até que “grau” essas diferenças são ainda aceitáveis.

Os resultados da percepção dos áudios gravados são então comparados com os resultados da avaliação com áudios simulados. Caso os resultados da avaliação com áudios simulados seja pior, por exemplo, isso indicará um desempenho ruim do simulador.

4.1 Áudios Gravados

Os áudios gravados foram apresentados a partir do software Matlab, que fornece um ambiente de programação numa linguagem interpretada para desenvolvimento e simulação de aplicativos, além de ser compatível com diferentes sistemas operacionais, permitindo a portabilidade aos aplicativos gerados. O método de apresentação dos áudios permite ao usuário a realização dos testes de forma intuitiva, sendo facilmente manuseada e acessível.

Para a avaliação subjetiva com os áudios obtidos a partir de gravações com a cabeça artificial, os voluntários responderam a testes de audição, sendo cada teste constituído por um par de áudios (A e B) ou áudio único, em função do atributo avaliado, conforme exemplo apresentado na figura 4.1. Todas as informações dos participantes (nome, idade, profissão, endereço eletrônico para contato e gênero), bem como os resultados dos testes foram armazenados e computados automaticamente no decorrer da avaliação.

A avaliação foi realizada em uma mesma sala, com nível de pressão sonora e ruído de fundo em torno de 45 dBA. Para aplicação dos testes, foi utilizado notebook da marca Lenovo e fone de ouvido equalizado da marca Roland, modelo RH-5. A equalização do fone foi realizada a fim de remover a influência da resposta em frequência na cadeia de reprodução. O volume da placa de áudio foi o mesmo (máximo) durante a realização de todos os testes com as pessoas.



Figura 4.1: Exemplo de apresentação dos áudios na avaliação subjetiva

Esta seção apresenta os resultados da avaliação subjetiva aplicada a um grupo de 48 voluntários, dos quais 27 possuem idade menor ou igual a 30 anos e 21 idade maior do que 30 anos. Os testes aplicados visam estudar a percepção de atributos dos sons gravados com a cabeça artificial. A análise dos resultados dos testes aplicados baseia-se na avaliação da capacidade de diferenciação entre os áudios apresentados.

Foram apresentados 44 testes em combinações de pares ou áudio único, para cada uma das 6 perguntas direcionadas aos participantes. Os atributos avaliados foram:

- a percepção do sentido de passagem do veículo da fonte sonora: da esquerda para a direita e vice-versa, bem como pela frente ou por trás da cabeça;
- velocidades (30km/h, 50km/h, 60km/h e 70km/h);
- presença ou ausência de aceleração.

4.1.1 Identificação de diferenças

A primeira pergunta consistiu em identificar a existência de diferença entre os áudios apresentados, sem que fosse exigido do ouvinte definir “qual” diferença. Foram avaliados veículos com configurações diferentes de velocidade, aceleração e sentido, a partir da pergunta: **“Existe diferença entre os áudios?”**. Foram apresentadas 8 combinações de pares de áudios, onde as respostas possíveis eram: “Sim” (para o caso da identificação da diferença) e “Não”. No teste, 75% dos áudios possuíam diferenças, enquanto os demais eram iguais. A média de acertos para os testes de avaliação da identificação de diferenças nos áudios foi de 87% para todos os grupos etários.

A tabela [4.1](#) apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da identificação de diferenças entre os áudios. Na tabela, a coluna “Configuração” corresponde aos áudios cujos veículos apresentam sentido da esquerda para a direita (\rightarrow) e da direita para a esquerda (\leftarrow), juntamente com a velocidade, em km/h, ou a presença de aceleração (AC). Os testes identificados com o símbolo asterisco (*) contêm áudios exatamente iguais. A distância fonte-receptor é mantida igual (3 metros) em todos os áudios.

A finalidade destes testes foi de investigar a sensibilidade na percepção individual dos sons associados às diferentes velocidades dos veículos, aceleração e ao sentido da passagem. Caso identificadas dificuldades na percepção de diferenças gerais entre os áudios, isto indicará possíveis falhas no sistema de reprodução. Os resultados mostram médias de acertos altas, entre 94% e 96%, como esperado. O êxito nos testes iniciais mostra a capacidade das pessoas em perceber diferenças gerais nos atributos dos áudios apresentados.

Os únicos testes com menores acertos associados são os 2 e 6. Nestes testes, os sentidos de passagem dos veículos e as velocidades são mantidos iguais nos dois áudios avaliados. No entanto, diferentemente dos testes 3 e 8, em que essa configuração também ocorre, os registros sonoros são de diferentes passagens de veículos, alterando-se seus modelos, condutor e ruído de fundo. Caso estes parâmetros fossem

Teste nº	Configuração				Acertos por idade (%)		
	Áudio A		Áudio B		Todas	≤ 30 anos	>30 anos
	Sentido	Vel.	Sentido	Vel.			
1	→	70	→	30	98	100	95
2	→	50	→	50	67	59	76
3*	←	30	←	30	94	93	95
4	←	AC	←	70	100	100	100
5	→	30	←	30	93	100	86
6	→	60	→	60	52	56	48
7	→	30	←	30	98	100	95
8*	→	50	→	50	93	96	90

Tabela 4.1: Identificação de diferenças nos áudios gravados.

muito influentes na identificação de diferenças entre os áudios, as médias de acertos seriam próximas de 100%. Os resultados mostram que a variação destes aspectos não é percebida com precisão absoluta, tendo em vista que 67% e 52% das pessoas consegue identifica-los.

4.1.2 Sentido da passagem do veículo

A segunda pergunta avaliou a capacidade de percepção do sentido de passagem do veículo: **“Em qual dos áudios o veículo passa da esquerda pra direita?”**. A partir da comparação de 8 combinações de pares de áudios, a tarefa do ouvinte consistiu em identificar, dentre os áudios apresentados, em qual deles o veículo se direcionava do ouvido esquerdo para o direito e vice-versa. As respostas possíveis foram: “Áudio A”, “Áudio B”, “Ambos os áudios” e “Nenhum dos áudios”. A distribuição de opções para cada resposta foi de 25%. A média de acertos para os testes de avaliação da percepção do sentido de passagem do veículo foi de 95% para todos os grupos etários.

A tabela [4.2](#) apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva para percepção do sentido de passagem do veículo. Na tabela, a coluna “Configuração” corresponde aos áudios cujos veículos apresentam sentido da esquerda para a direita (→) e da direita para a esquerda (←), juntamente com a velocidade constante correspondente ao áudio, em km/h, ou a presença de aceleração (AC). Os testes identificados com o símbolo asterisco (*) contêm áudios exatamente iguais.

Os testes foram aplicados comparando-se áudios com sentidos de passagem ora iguais (testes 12, 13, 14 e 16), ora opostos (testes 9, 10, 11 e 15), com a finalidade de investigar possíveis falhas na percepção ou tendências nos resultados.

Os resultados mostram a facilidade das pessoas na identificação do sentido de passagem dos veículos, a qual parece independente das condições de velocidade,

Teste nº	Configuração				Acertos por idade (%)		
	Áudio A		Áudio B		Todas	≤ 30 anos	>30 anos
	Sentido	Vel.	Sentido	Vel.			
9	←	30	→	30	92	93	90
10	←	50	→	50	88	85	90
11	→	30	←	30	95	100	90
12*	→	70	→	70	98	100	96
13*	←	30	←	30	93	100	85
14	→	50	→	AC	98	100	95
15	→	AC	←	30	100	100	100
16*	←	30	←	30	100	100	100

Tabela 4.2: Avaliação do quesito “sentido” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

tendo em vista a similaridade no padrão dos resultados para todas as condições de velocidade avaliadas.

4.1.3 Localização da fonte frente/trás da cabeça

Assim como a percepção do sentido de passagem dos veículos (lados esquerdo/direito), o sistema auditivo é capaz de estimar a localização das fontes sonoras em outras dimensões: cima/baixo, frente/trás, bem como a distância em que a fonte sonora se encontra.

Esta pergunta teve por finalidade identificar a percepção da localização da fonte sonora em uma destas dimensões, tendo em vista um problema comum na reprodução de sons audibilizados com fones de ouvido: a confusão de localização do som frente/trás da cabeça humana [45, 56-58].

Para a indústria de entretenimento audiovisual, a exemplo dos sistemas de realidade virtual, este problema é facilmente corrigido com o uso de imagens: o uso de estímulos visuais pode ajudar na localização dos sons reproduzidos com fone de ouvido, pois, desse modo, o ouvinte consegue associar o som com a respectiva imagem.

Esta avaliação, no entanto, não recorreu ao uso da imagem, justamente pelo propósito de avaliar a percepção auditiva das pessoas com relação aos áudios gravados pela cabeça artificial, sem influências de outros estímulos sensoriais.

Os voluntários foram solicitados a responder a seguinte pergunta: “**Nesse áudio, o carro passou pela frente ou por atrás da sua cabeça?**”. Da mesma forma que os testes anteriores, foram apresentados pares de áudios, em um total de 8 combinações diferentes. As respostas possíveis foram: “Na frente da cabeça” e “Por trás da cabeça”. Nessa pergunta, todas as gravações foram feitas com os veículos

passando na frente da cabeça artificial. A média de acertos entre todos os grupos etários foi de 43%.

A tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva para percepção da localização do veículo passando pela frente ou por trás do ouvinte. Na tabela, a coluna “Configuração” indica as velocidades dos veículos apresentados em cada teste, em km/h.

Teste n ^o	Configuração	Acertos por idade (%)		
	Áudio A	Todas	≤ 30 anos	>30 anos
17	50	44	48	40
18	30	28	40	15
19	70	49	48	50
20	60	48	45	50
21	30	35	27	43
22	60	53	51	55
23	70	59	57	61
24	30	29	48	10

Tabela 4.3: Avaliação do quesito “localização” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

Os resultados dos testes são bastante diferentes da avaliação do sentido da passagem da esquerda para a direita e vice-versa, sendo significativamente piores.

O padrão de respostas para a maioria dos testes é similar: as médias próximas de 50% indicam que as respostas não foram norteadas por parâmetros objetivos, não indicando padrões de resposta e por isso possivelmente baseadas em “chute”.

Ainda assim, é possível identificar uma leve tendência que relaciona a percepção da localização do veículo com a sua velocidade. As pessoas têm maior dificuldade em perceber a localização espacial nos testes em que os veículos possuem velocidades mais baixas, de 30km/h, conforme identificado nos testes 18, 21 e 24. Da mesma forma, os maiores acertos estão associados aos testes 19, 20, 22 e 23, em que as velocidades são de 60 e 70km/h.

A figura 4.2 apresenta o padrão de respostas da avaliação do quesito “Localização da fonte frente/trás da cabeça”, considerando passagem do veículo pela frente ou por trás do ouvinte, em função dos pares de áudio de cada teste aplicado.

4.1.4 Percepção de aceleração

Na quarta pergunta, os ouvintes foram solicitados a identificar a presença de aceleração nos áudios: **“Identifique nos áudios A e B em qual dos dois o veículo está acelerando.”**. Foram avaliadas 8 combinações diferentes de pares de áudios.

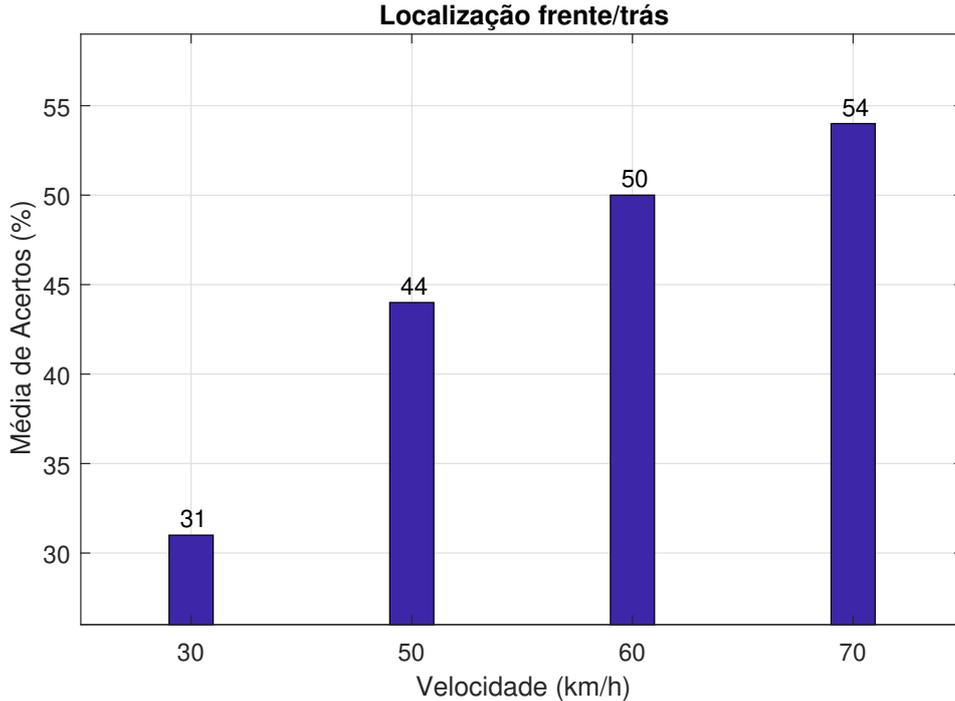


Figura 4.2: Padrão de respostas do quesito “localização” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

As respostas possíveis foram: “Áudio A”, “Áudio B”, “Ambos os áudios” e “Nenhum dos áudios”. A distribuição de opções para “Áudio A” e “Nenhum dos áudios” foi de 25% cada, para “Ambos os áudios” a proporção foi de 37.5%, e “Áudio B” de 12.5%. A média de acertos para todos os testes sobre “aceleração” foi de 79% para todos os grupos etários.

A tabela [4.4](#) apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da variável aceleração. Na tabela, a coluna “Configuração” corresponde aos áudios cujos veículos apresentam sentido da esquerda para a direita (\rightarrow) e da direita para a esquerda (\leftarrow), juntamente com a velocidade constante correspondente ao áudio, em km/h, ou a presença de aceleração (AC).

A maior quantidade de acertos ocorre quando há comparação de pares de áudio em que um veículo apresenta aceleração e o outro não, conforme observado nos testes 25, 27 e 31. O padrão de respostas destes testes é muito próximo, indicando a capacidade dos ouvintes na identificação da aceleração quando este atributo está presente em apenas um dos áudios. A média de acertos destes testes foi de 94%.

Para os testes em que são avaliados pares de áudios contendo veículos com aceleração (testes 28, 29 e 32), sendo “Ambos os áudios” a resposta correta, a média total foi de 75%. Nos 25% de erro, identificou-se que a tendência de respostas é direcionada para o áudio cujo veículo apresenta uma aceleração claramente audível, em condições de tempo e localização (duração e proximidade com o ouvinte) maiores.

Teste nº	Configuração				Acertos por idade (%)		
	Áudio A		Áudio B				
	Sentido	Vel.	Sentido	Vel.	Todas	≤ 30 anos	>30 anos
25	←	AC	←	50	91	96	86
26	→	60	→	50	58	67	49
27	←	30	←	AC	93	90	96
28	→	AC	←	AC	80	93	67
29	←	AC	←	AC	76	81	71
30	←	30	→	60	77	78	76
31	→	AC	→	70	92	93	90
32	←	AC	←	AC	68	78	57

Tabela 4.4: Avaliação do quesito “aceleração” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

No teste 28, por exemplo, embora a maioria das pessoas tenha percebido o veículo com aceleração (80%), uma parcela significativa dos participantes (19%) indicou como resposta o veículo do “Áudio A”. As condições de aceleração são diferentes nos áudios A e B, sendo associadas ao comportamento dos condutores dos veículos.

Os testes apresentando dois veículos sem aceleração (testes 26 e 30), apresentam média de acertos piores 68%. Nos 32% de erro, identificou-se uma tendência de respostas para o áudio cujo veículo apresenta maior velocidade.

A figura 4.3 apresenta os resultados da percepção da aceleração nos veículos. No eixo X, são apresentadas as combinações de áudios que consistem em, respectivamente: um áudio com aceleração e outro com velocidade constante (AC x CTE), dois áudios com aceleração (AC x AC), e dois áudios com velocidades constantes, porém diferentes (CTE x CTE).

Pode-se notar uma melhor percepção da aceleração quando o teste apresenta pares de áudios com um veículo com aceleração e o outro sem. A percepção da aceleração é menor quando os áudios possuem velocidades constantes e diferentes, ou quando ambos os áudios são de veículos acelerando. Neste último caso, identificou-se que a dificuldade de identificação da aceleração é condicionada ao comportamento do condutor, com instantes, durações e intensidades diferentes. Esta percepção foi relatada pelos voluntários durante a aplicação dos testes.

4.1.5 Percepção da velocidade

Na quinta pergunta, foi avaliada a percepção de velocidade dos veículos: “**Em qual dos áudios o veículo passa com maior velocidade?**”, a partir de pares de áudios em um total de 8 combinações. As respostas possíveis foram: “Áudio A”, “Áudio B” e “As velocidades são iguais”. A distribuição de respostas certas forma:

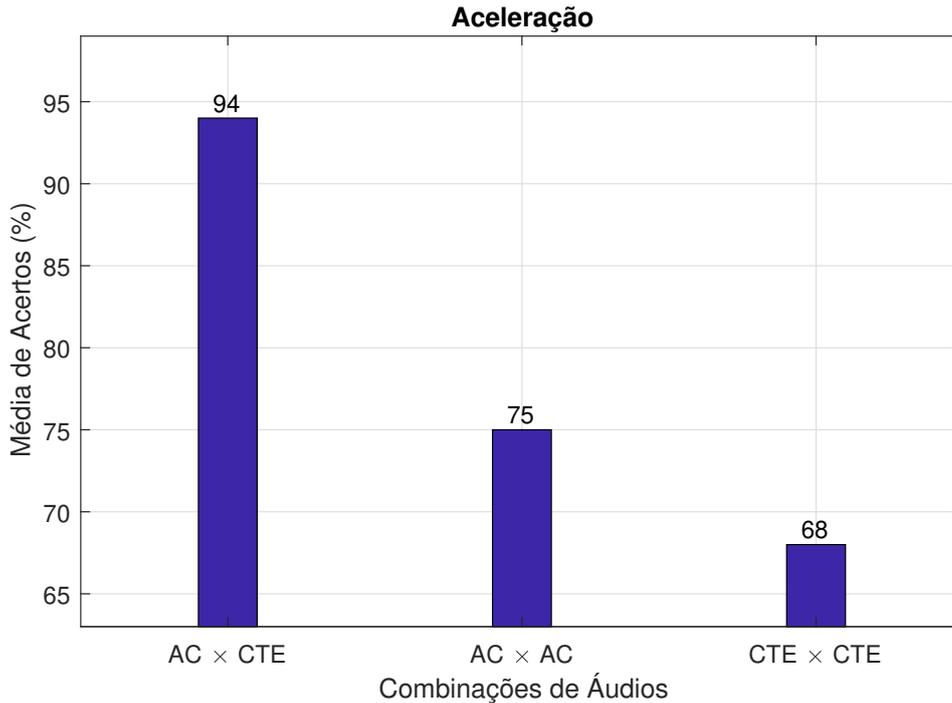


Figura 4.3: Padrão de respostas do quesito “aceleração” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

25% “Áudio B”, 37.5% para “Áudio A” e 37.5% para “As velocidades são iguais”. A média de acertos para todas as idades foi de 79%.

A tabela [4.5](#) apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da velocidade. A coluna “Configuração” corresponde aos áudios cujos veículos apresentam sentido da esquerda para a direita (\rightarrow) e da direita para a esquerda (\leftarrow), juntamente com a velocidade constante correspondente ao áudio, em km/h, ou a presença de aceleração (AC).

Nos testes 33 e 34 as velocidades entre os áudios eram iguais, de 30km/h. Os resultados destes testes são similares: respectivamente 67% e 65% das pessoas conseguem identificar que os veículos têm a mesma velocidade. Os 33% e 35% de erro ficaram distribuídos nas demais opções de resposta: no teste 33, por exemplo, 15% das pessoas respondeu “Áudio A” e 18% “Áudio B”. Como esperado, os resultados mostram que a percepção da velocidade dos veículos não parece influenciada pelas diferenças nos seus sentidos de passagem.

Quando apresentados dois áudios de veículos com velocidades diferentes, as pessoas identificam o veículo mais rápido nas situações em que a diferença absoluta de velocidades é maior. Esta tendência pode ser identificada nos testes 35, 36 e 40, que apresentam diferença absoluta de velocidades de 50km/h: 98% das pessoas é capaz de identificar o veículo mais rápido. Nos testes em que a diferença de velocidades é de 20km/h, por outro lado, os acertos caem para 72%, conforme resultados dos

Teste nº	Configuração				Acertos por idade (%)		
	Áudio A		Áudio B		Todas	≤ 30 anos	>30 anos
	Sentido	Vel.	Sentido	Vel.			
33	→	30	→	30	67	71	63
34	→	30	←	30	65	64	66
35	←	70	←	30	97	94	100
36	→	30	→	70	98	96	100
37	←	50	←	50	60	64	56
38	←	50	→	70	69	76	62
39	→	70	→	50	75	88	62
40	→	70	←	30	98	96	100

Tabela 4.5: Avaliação do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

testes 38 e 39. Os 28% de erro nestes testes mostram uma tendência predominante de respostas para “Ámbos os Áudios”, confirmando a dificuldade de identificação do veículo com maior velocidade quando a diferença de velocidade entre os veículos é pequena.

A maior dificuldade de percepção está associada aos áudios cujos veículos apresentam a mesma velocidade. Pode-se notar que, para avaliação da percepção da velocidade dos veículos, quanto maior a diferença absoluta de velocidades dos veículos, maior a proporção de acertos.

A figura 4.4 apresenta o padrão de respostas da avaliação da velocidade, em função da diferença das velocidades (km/h) entre os veículos.

4.1.6 Distância fonte-receptor

Na sexta e última pergunta, os ouvintes foram solicitados a identificar a distância da passagem do veículo: **“Ouça o áudio de referência e identifique: no Áudio A, o veículo passou mais próximo, na mesma distância ou mais distante?”**. Em cada teste, comparou-se um áudio com outro de referência, mantido sempre igual para todos os testes. As respostas possíveis eram: “Mais próximo”, “Mesma distância”, “Mais distante”. Nessa pergunta a resposta correta é sempre “Mesma distância”, pois todas as gravações foram feitas dessa forma. A média de acertos para todas as idades foi de 42%.

A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da distância fonte-receptor. Na tabela, a coluna “Configuração” corresponde aos parâmetros dos veículos avaliados, especificamente o sentido da esquerda para a direita (→) e da direita para a esquerda (←), juntamente com a velocidade constante correspondente ao áudio, em km/h. O áudio de referência é o mesmo para todos

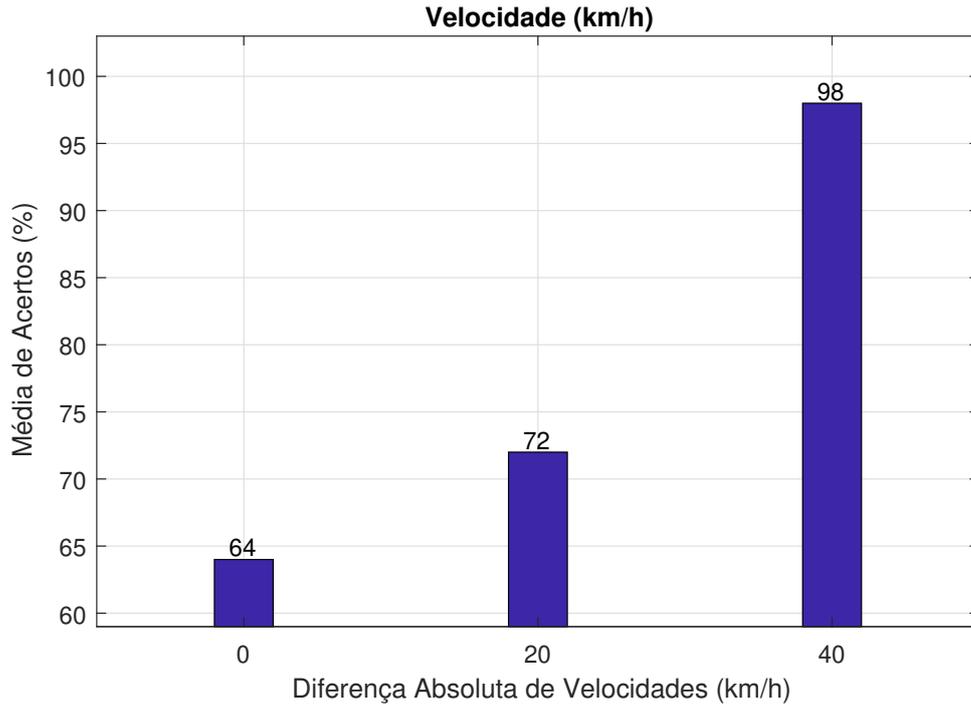


Figura 4.4: Padrão de respostas do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

os testes, consistindo em um áudio gravado, estando o veículo distante 3,00 metros do ouvinte, com velocidade constante de 30km/h. A distância fonte-receptor dos veículos apresentados em todos os testes é, assim como o áudio de referência, de 3,00 metros, alterando-se apenas as velocidades dos veículos.

Teste nº	Configuração				Acertos por idade (%)		
	Áudio A		Áudio B		Todas	≤ 30 anos	>30 anos
	Sentido	Vel.	Sentido	Vel.			
41	←	30	→	30	58	59	57
42	←	30	→	30	66	56	76
43	→	50	→	30	27	30	24
44	→	70	→	30	15	15	14

Tabela 4.6: Avaliação do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

Os maiores erros nestes testes estão associados aos áudios cujos veículos avaliados possuem velocidades maiores do que o veículo do áudio de referência. Isto ocorre nos testes 43 e 44, em que as velocidades dos veículos são de 50km/h e 70km/h. No teste 44, por exemplo, apenas 15% das pessoas foram capazes de identificar a distância do veículo, enquanto 82% responderam “Mais próximo”.

A distância fonte-receptor é melhor percebida quando os veículos avaliados possuem a mesma velocidade do veículo de referência, de 30km/h, como observado nos testes 41 e 42. A diferença nos resultados destes testes é pouco significativa (7%), podendo ser justificada pelo comportamento do condutor ou diferentes sentidos de passagem dos veículos. Nenhum destes quesitos, no entanto, parece influenciar expressivamente os resultados.

A figura 4.5 apresenta o padrão de respostas da avaliação da variável distância, em função da velocidade (km/h) dos veículos apresentados nos áudios A e B.

Pode-se notar que, quanto maior a velocidade do veículo apresentado no “Áudio A” com relação ao áudio de referência, as pessoas percebem a distância fonte-receptor como mais próxima.

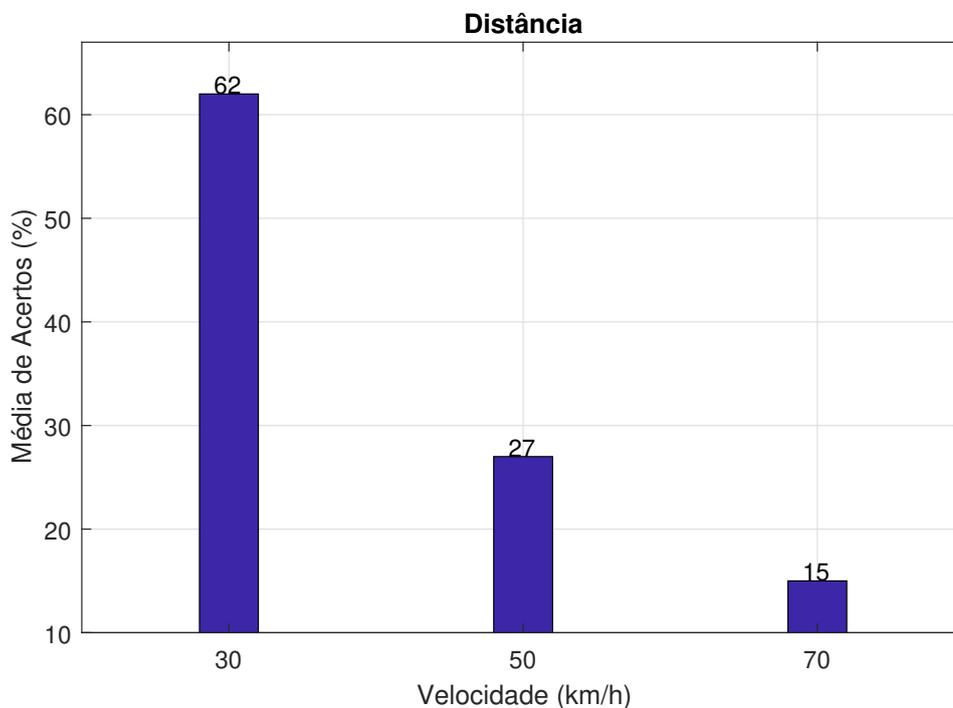


Figura 4.5: Padrão de respostas do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios gravados

4.2 Áudios Gravados × Simulados

Uma segunda rodada de testes subjetivos foi aplicada a um grupo de 45 voluntários, dos quais 25 possuem idade menor ou igual a 30 anos e 20 idade maior do que 30 anos. Os testes aplicados visam estudar a similaridade entre os áudios simulados e gravados. A análise dos resultados dos testes aplicados baseia-se na avaliação da capacidade dos ouvintes em identificar diferenças entre os sons gravados, obtidos

com cabeça artificial, e áudios simulados. Foram considerados nessa avaliação a percepção dos parâmetros: velocidade e distância fonte-receptor, apresentando-se 24 testes em combinações de pares ou áudios únicos.

O sentido da passagem foi um quesito facilmente identificado na avaliação apenas com áudios gravados, considerando-se dispensável a repetição de testes subjetivos para este atributo. Da mesma forma, não se repetiu a avaliação da capacidade em localizar a fonte frente/trás da cabeça, tendo em vista que as dificuldades associadas à sua percepção fogem do escopo desta pesquisa.

Desconsiderou-se, igualmente, a avaliação da aceleração, limitando-se a avaliar a percepção das velocidades dos veículos. Na avaliação com áudios gravados, identificou-se que a percepção da aceleração parece condicionada ao comportamento do condutor, o que resulta em condições de aceleração (instantes, durações e intensidades) diferentes. Estas condições não foram controladas e, por isso, os resultados da avaliação com áudios simulados não seriam comparáveis com os áudios gravados. Além disso, o modelo de síntese de fonte sonora, descrito na seção 3.2.3 e utilizado nos testes, não considera aceleração. Por tal seria necessário desenvolver outro modelo de fonte sonora, o que também não está no escopo deste trabalho.

A aplicação dos testes, incluindo os equipamentos, o ambiente e as fichas de avaliação, foi realizada da mesma forma que os testes com áudios gravados somente, conforme apresentado na seção 4.1.

A seguir estão apresentados os resultados da avaliação subjetiva realizada com os áudios gravados e simulados.

4.2.1 Similaridade

Na primeira pergunta, foram apresentados 8 áudios individuais. Os participantes foram solicitados a identificar o tipo de áudio apresentado: **“Ouça o áudio e responda: o áudio é gravado ou simulado?”**. As respostas possíveis eram: “Gravado” e “Simulado”, onde foram apresentados 3 áudios gravados e 5 simulados. A média de acertos para todos os grupos etários foi de 63%.

A tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva do grau de similaridade dos áudios, ou “grau de realismo”. Na tabela, a coluna “Configuração” apresenta a seguinte notação para identificação dos atributos dos áudios avaliados: se o áudio é simulado (S) ou real (R), se o sentido da passagem do veículo é da esquerda para a direita (\rightarrow) ou da direita para a esquerda (\leftarrow), e a velocidade do veículo em km/h.

O resultado esperado dos testes 1 a 8 era de que os áudios simulados fossem indicados como sons reais em 100% das vezes, ou seja, que as médias de acerto para os testes em que são apresentados áudios simulados se aproximassem de 0%.

Teste nº	Configuração			Acertos por idade (%)		
	Áudio A					
	Tipo	Sentido	Vel.	Todas	≤ 30 anos	>30 anos
1	R	→	30	65	71	58
2	S	→	30	69	76	61
3	S	←	70	66	81	51
4	R	→	70	65	78	52
5	R	→	50	60	67	52
6	S	→	50	63	74	52
7	S	←	50	53	67	39
8	S	→	70	60	62	58

Tabela 4.7: Avaliação do quesito “similaridade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados

No entanto, mais da metade das pessoas (62%) conseguem identificar a simulação, indicando que os sons simulados são tidos como reais em 38% das vezes.

Um desempenho ruim do simulador seria comprovado caso as respostas dos testes em que se avaliam sons reais fossem próximas de 100%, indicando não haver dúvidas quanto aos sons reais. No entanto, os erros desta avaliação não estão associados apenas à percepção dos áudios simulados. Quando apresentados sons reais, as pessoas têm a mesma dificuldade na sua identificação: em média 37% das pessoas percebem o som real como simulado. Os resultados mostram a dificuldade na precisão de quais são os sons reais e os simulados, indicando não haver parâmetros objetivos na escolha dos resultados, possivelmente baseadas em “chute”.

Com a finalidade de avaliar a capacidade de identificação dos áudios gravados e simulados, descartando-se possíveis influências das velocidades dos veículos, este parâmetro foi alterado entre os testes 1/2, 4/8 e 5/6. As médias de acertos para cada par de testes foram muito similares, independentemente das condições de velocidade.

Da mesma forma, não observou-se a influência do sentido de passagem dos veículos na identificação do som real ou simulado, como era esperado: quando avaliados áudios simulados com a mesma velocidade e sentidos diferentes, a proporção de acertos é similar: testes 3 e 8, com 66% e 60% de acertos, e testes 6 e 7, com 63% e 53% de acertos.

4.2.2 Distância fonte-receptor

Na segunda pergunta, os ouvintes foram solicitados a identificar a distância da passagem do veículo: **“Ouça os áudios e responda: em qual dos veículos está passando mais perto?”**. A avaliação foi realizada a partir de pares de áudios em um total de 8 combinações, variando entre áudios gravados e simulados

com distâncias fonte-receptor entre 3 e 12 metros. As respostas possíveis eram: “Áudio A” e “Áudio B”. A distribuição de opções foi de 25% para “Áudio A” e 37.5% para “Áudio B”. Para o restante das perguntas, ambos os áudios apresentam veículos com a mesma distância em relação ao ouvinte, de 3 metros.

Os áudios usados nesta avaliação não foram normalizados, tendo em vista a importância da amplitude dos sons na percepção da distância fonte-receptor.

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da variável distância. Na tabela, a coluna “Configuração” apresenta a seguinte notação para identificação dos atributos dos áudios avaliados: se o é áudio simulado (S) ou real (R), a distância fonte-ouvinte (em metros), e a velocidade do veículo, em km/h.

Teste nº	Configuração						Taxa de Acertos (%)
	Áudio A			Áudio B			
	Tipo	Vel.	Dist.	Tipo	Vel.	Dist.	
9	R	30	3	S	30	12	90
10	S	70	12	S	30	3	92
11	S	50	12	S	70	3	90
12	R	50	3	S	50	12	88
13	R	30	3	S	30	3	51
14	S	70	3	S	50	3	59
15	S	30	12	R	30	3	87
16	S	70	3	S	50	3	56

Tabela 4.8: Avaliação do quesito “distância” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados

Quando avaliados pares de áudios cujas distâncias fonte-receptor são diferentes, a maioria das pessoas consegue identificar o veículo que está passando mais perto, conforme indicado nos resultados dos testes 9 a 12 e do teste 15.

A identificação da distância independe dos tipos de áudio avaliados (gravado ou simulado), como esperado: para os testes em que ambos os áudios são simulados (testes 10 e 11), a média de acertos total é de 91%. Para os testes que apresentam um áudio simulado e o outro gravado (testes 9, 12 e 15), a média de acertos total é de 88%. Estes resultados indicam uma boa percepção da distância tanto na avaliação em que se comparam som gravado com simulado, quanto na comparação de dois sons simulados.

Nos testes 13, 14 e 16, a distância dos veículos é a mesma. Não há resposta correta para estes testes, tendo em vista a inexistência da opção “A distância é igual”. O objetivo destes testes foi avaliar a existência de possíveis padrões nas respostas: caso as respostas fiquem distribuídas igualmente entre as opções “Áudio A” e “Áudio B”, isto indicará que as respostas foram baseadas em “chute”, conforme esperado. Caso contrário, se identificada a predominância de respostas para “Áudio A” ou “Áudio

B”, deverão ser investigados os motivos que determinaram esta possível tendência. A predominância de respostas que associam os veículos simulados com menores distâncias em relação ao ouvinte, por exemplo, poderá indicar um desempenho ruim do simulador. No entanto, como esperado, os resultados foram bastante similares, aproximando-se de 50%.

No teste 13, são apresentados pares de áudio gravado e simulado, com velocidades e distância iguais. O resultado esperado para este teste é de que a percepção da distância não seja influenciada pelo tipo de áudio. O resultado do teste foi de 51%, indicando que praticamente metade das pessoas percebe o áudio simulado como mais próximo e a outra metade, o áudio gravado. Estes resultados indicam o êxito do sistema simulador na reprodução de áudios similares aos sons reais.

Nos testes 14 e 16 são apresentados o mesmo par de áudios: os áudios A e B representam veículos simulados, com distâncias iguais em relação ao ouvinte, e velocidades de 70km/h e 50km/h, respectivamente. Os resultados dos testes foram de 59% e 56%, identificando-se uma leve tendência de associação da proximidade fonte-receptor com o veículo com maior velocidade.

A figura 4.6 a seguir apresenta o padrão de respostas da avaliação da variável “distância”. No eixo X, são apresentadas as combinações de áudios que consistem em, respectivamente: pares de áudios com um áudio real e um áudio simulado, com distâncias diferentes – $R \times S (\neq d)$, pares com dois áudios simulados com distâncias diferentes – $S \times S (\neq d)$ e pares de áudios simulados ou gravados com distâncias iguais – $R \times S (= d)$.

Na configuração $R \times S (= d)$, apenas para fins de avaliação, foram considerados como resposta “correta” o Áudio A. Os testes associados a este grupo são os testes 13, 14 e 16.

4.2.3 Avaliação da velocidade

Na terceira e última pergunta foi avaliada a percepção de velocidade dos áudios: **“Ouça os áudios e responda: qual dos veículos está mais rápido?”**. A avaliação foi realizada a partir de pares de áudios em um total de 8 combinações, variando entre áudios gravados e simulados, e velocidades em 30km/h, 50km/h e 70km/h. As respostas possíveis eram: “Áudio A” e “Áudio B”. A distribuição de opções foi de 25% para “Áudio A” e de 37.5% para “Áudio B”. Para o restante das perguntas, os áudios apresentaram veículos com velocidades iguais.

A tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos a partir da avaliação subjetiva da variável velocidade.

Pode-se notar o êxito na percepção da velocidade nos pares em que se comparam dois áudios gravados, comprovando os resultados obtidos na avaliação com áudios

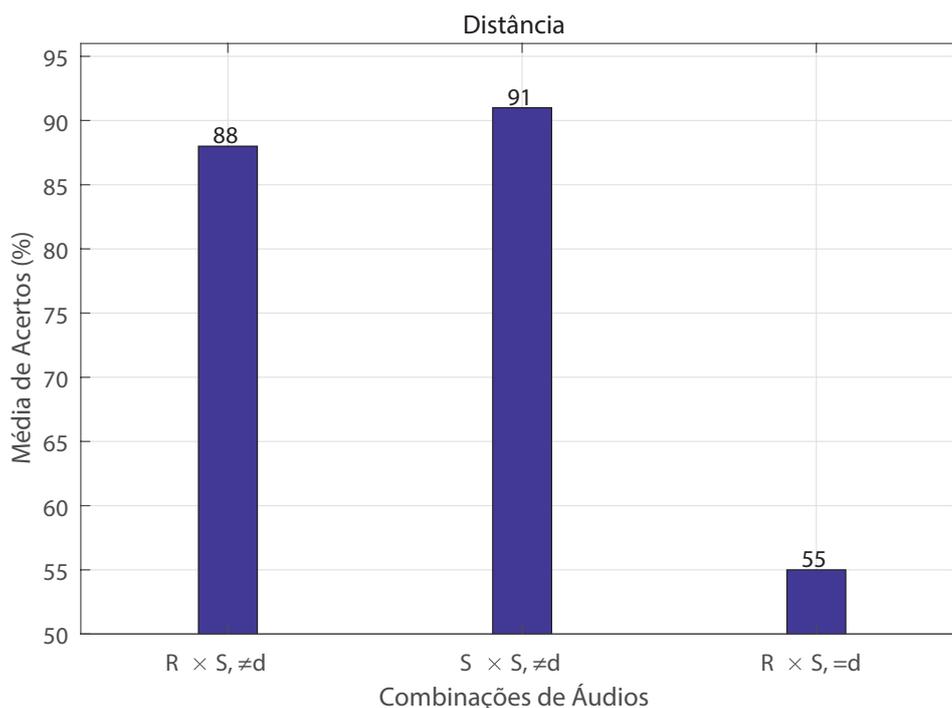


Figura 4.6: Padrão de respostas do quesito “distância” na avaliação com áudios simulados

Teste nº	Configuração						Taxa de Acertos (%)
	Áudio A			Áudio B			
	Tipo	Vel.	Dist.	Tipo	Vel.	Dist.	
17	R	→	30	R	→	50	92
18	S	→	70	R	→	70	66
19	S	←	50	S	←	30	85
20	S	←	30	S	←	70	95
21	S	→	50	R	→	50	67
22	S	→	70	R	→	70	64
23	R	→	50	R	→	30	86
24	S	←	30	S	←	70	90

Tabela 4.9: Avaliação do quesito “velocidade” nos resultados dos testes subjetivos com áudios simulados

gravados somente. Esta tendência é observada nos testes 17 e 23, que são idênticos, apenas alterada a ordem dos áudios apresentados. A repetição destes testes teve por objetivo verificar se as respostas foram baseadas em “chute”: isto não ocorreu, tendo em vista que os resultados dos testes foram similares (92% e 86%, respectivamente).

Da mesma forma, identificou-se a facilidade na percepção da velocidade nos pares em que se comparam dois áudios simulados (testes 19, 20 e 24). A média de acertos foi de 85%, 95% e 90%, o que mostra a boa percepção da velocidade nos

áudios. Identificou-se uma leve tendência nas respostas que associa a maior diferença absoluta de velocidades à facilidade de identificação do veículo mais rápido, tendo em vista as médias de acerto mais altas nos testes 20 e 24, em que as diferenças absolutas de velocidades são de 50km/h.

Foram igualmente comparados veículos simulados e gravados com velocidades iguais nos testes 18, 21 e 22. Não há resposta correta para estes testes, tendo em vista a inexistência da opção “A velocidade é igual”. O objetivo destes testes foi avaliar a existência de possíveis padrões nas respostas: caso as respostas fiquem distribuídas igualmente entre as opções “Áudio A” e “Áudio B”, isto indicará que as respostas foram baseadas em “chute”, conforme esperado. Os resultados mostram resultados acima de 60% para o veículo simulado, respectivamente de 66%, 67% e 64% para os testes 18, 21 e 22, mostrando que a maioria das pessoas percebe o áudio simulado como o veículo com maior velocidade. Essa tendência indica que a síntese do áudio da fonte sonora pode estar produzindo características temporais e/ou espectrais diferentes daquelas presentes nos sinais gravados.

A figura 4.7 apresenta o padrão de respostas da avaliação da variável “velocidade”. No eixo X, são apresentadas as combinações de áudios que consistem em, respectivamente: pares de áudios onde um áudio real e o outro é simulado (R x S), pares com dois áudios simulados (S x S) e pares com dois áudios reais (R x R).

Na combinação de áudios real e simulado (R x S), apenas para fins de avaliação, foram considerados como resposta “correta” o Áudio A. Esta combinação está associada aos testes 18, 21 e 22.

Foi igualmente identificado um padrão de respostas que se relaciona com a diferença absoluta de velocidades dos veículos, conforme a figura 4.8. Pode-se notar, similarmente aos resultados da avaliação com áudios gravados somente, a maior facilidade na percepção da velocidade dos veículos quanto maior a diferença absoluta de velocidades.

4.3 Análise dos resultados

Esta seção resume e compara os resultados obtidos nas duas avaliações realizadas.

Na avaliação com áudios gravados somente, os maiores acertos estão associados às perguntas 1 e 2, cujas médias foram de 87% e 95%, respectivamente. Este desempenho pode ser identificado na figura 4.10, em que os quadrados brancos e pretos representam, respectivamente, regiões de maior e menor acertos.

Os resultados indicam a facilidade na percepção da identificação de diferenças gerais nos áudios, e do sentido da passagem do veículo do ouvido esquerdo para o direito e vice-versa. O sentido da passagem do veículo não foi avaliado isoladamente na comparação dos áudios gravados e simulados, mas sim considerado nos áudios

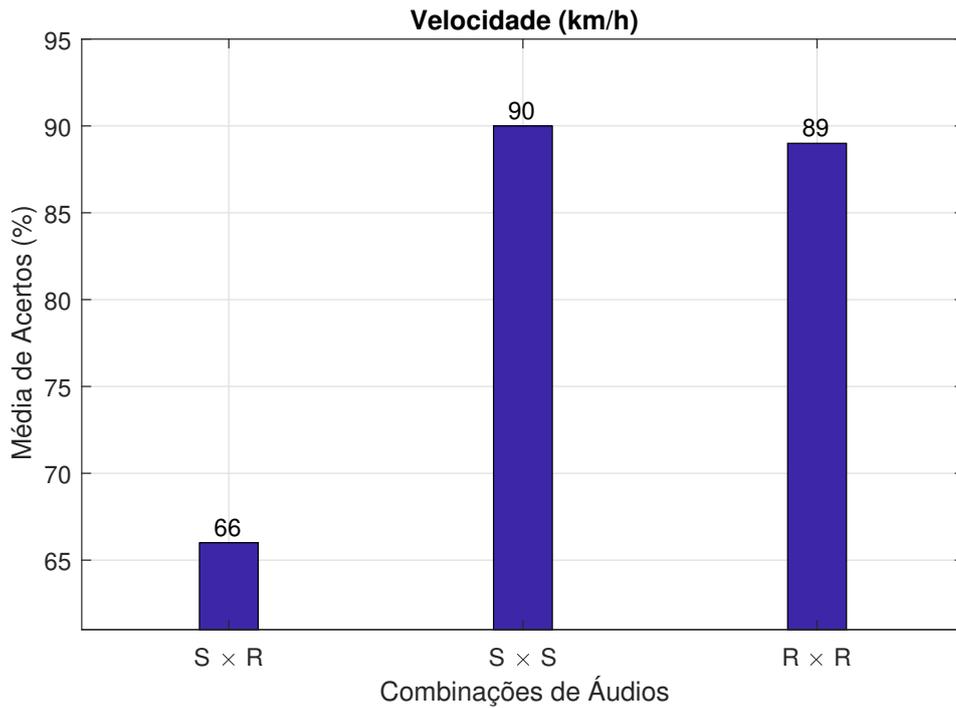


Figura 4.7: Padrão de respostas do quesito “velocidade” na avaliação com áudios simulados, em função do tipo de áudio

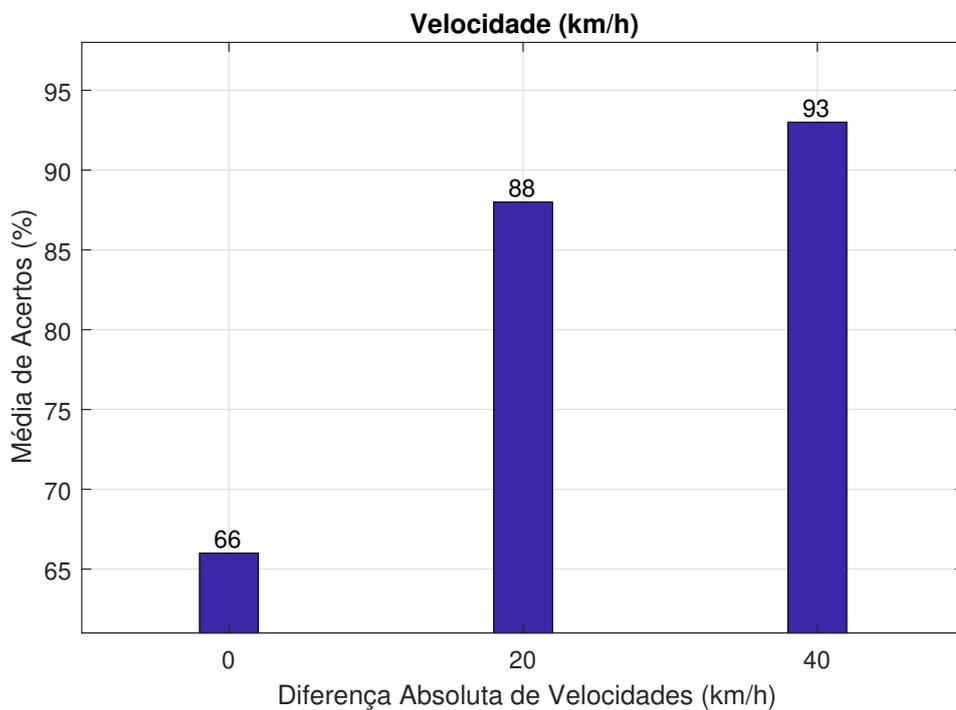


Figura 4.8: Padrão de respostas do quesito “velocidade” na avaliação com áudios simulados, em função da diferença absoluta de velocidades

apresentados para reconhecimento de possíveis influências nos padrões de resposta.

Em seguida, pode-se identificar maiores acertos correspondentes à percepção da aceleração e das velocidades dos veículos. Na avaliação com áudios gravados somente, esta tendência corresponde às questões 4 e 5, conforme indicado na figura 4.10.

Para o quesito velocidade, os resultados da avaliação apenas com áudios gravados foram bastante próximos da avaliação com áudios gravados e simulados, sendo as médias de acertos de 79% e 80%, respectivamente.

Em ambas as avaliações, identificou-se um padrão de respostas que relaciona a maior diferença absoluta de velocidades dos veículos com a melhor percepção de suas velocidades. Na avaliação com áudios gravados, esta tendência ocorre de forma mais significativa.

Ainda, na comparação de áudios gravados com simulados, identificou-se a melhor percepção da velocidade dos veículos quando se comparam dois áudios simulados ($S \times S$) ou dois gravados ($R \times S$). Na comparação entre áudio gravado e simulado ($R \times S$) com velocidades iguais, 66% das pessoas percebem o áudio simulado como o veículo com maior velocidade.

A figura 4.9 mostra a variação da amplitude no tempo para os áudios simulado e gravado do veículo com 50km/h. Nota-se uma maior atenuação da energia sonora antes e após o instante da passagem do veículo no áudio simulado, podendo justificar a percepção dos ouvintes de que o veículo simulado possui maior velocidade.

Na avaliação com áudios gravados somente, os maiores erros correspondem às perguntas 3 e 6, cujas médias de acertos foram de 48% e 42%, respectivamente. Essas perguntas avaliaram a localização frente/trás da cabeça e a distância fonte-receptor. Identificou-se uma relação da percepção destes quesitos com a velocidade dos veículos: melhor a percepção da localização frente/trás quanto maior a velocidade do veículo e menor a percepção da distância fonte-receptor quanto maior a velocidade do veículo avaliado em comparação ao áudio de referência.

A percepção distância fonte-receptor na comparação de áudios gravados e simulados apresentou média de acertos de 77%, significativamente maior quando comparada à avaliação com áudios gravados somente. Os resultados indicam uma boa percepção da distância tanto nas comparações entre sons gravados com simulados, quanto de dois sons simulados: a percepção da distância não é influenciada pelo tipo de áudio, indicando o êxito do sistema simulador na reprodução de áudios similares aos sons reais.

Similarmente à avaliação apenas com áudios gravados, identificou-se na comparação dos sons simulados e gravados uma tendência de respostas que relaciona a proximidade fonte-receptor ao veículo com maior velocidade. Esta tendência é da

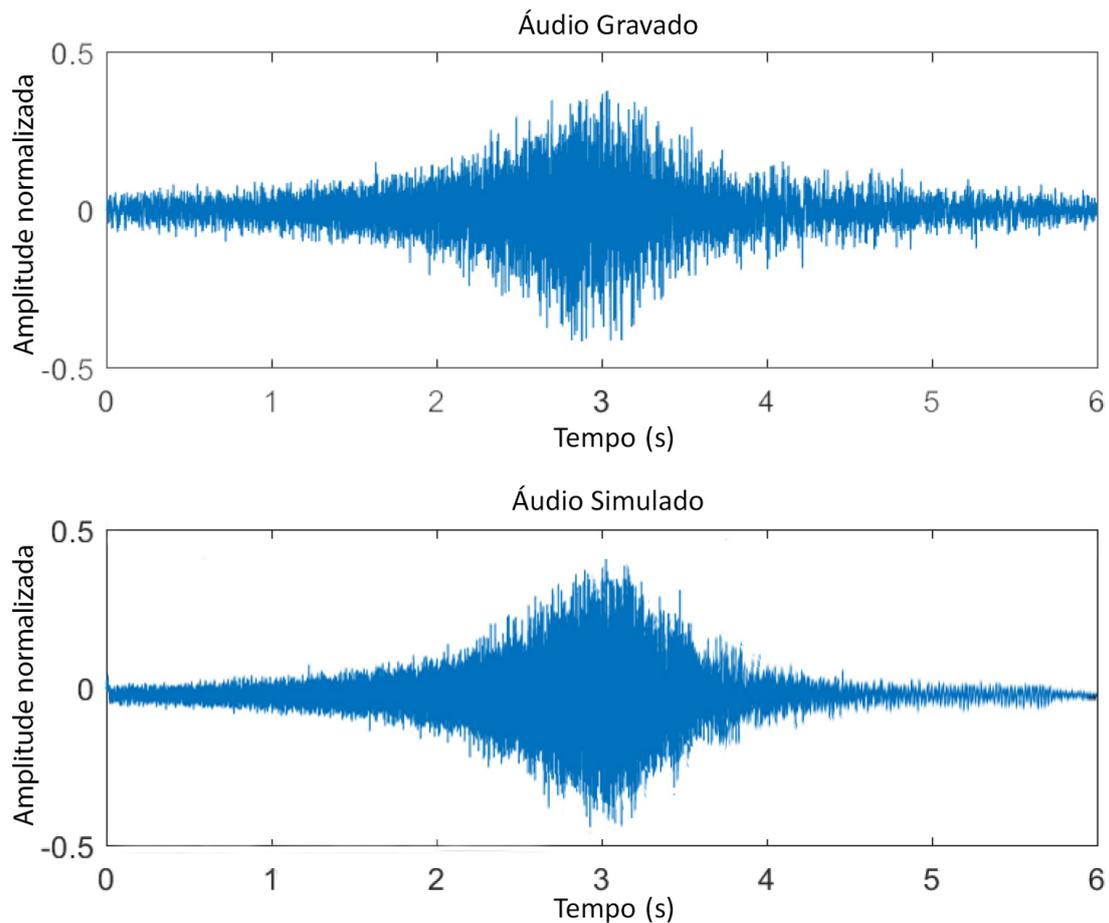


Figura 4.9: Análise temporal dos áudios simulado e gravado para veículo com velocidade de 50km/h

ordem de 75% e 58%, respectivamente para as primeira e segunda avaliações.

Na avaliação da similaridade dos áudios simulados com os sons reais, o número elevado de erros mostra que os áudios simulados são percebidos como sons reais em 38% das vezes. Idealmente, este valor aproximaria-se de 100%, indicando a similaridade dos sons simulados com os reais. No entanto, notou-se que as pessoas têm a mesma dificuldade de identificação dos sons reais, tendo em vista que 37% das pessoas percebem o som real como simulado. Os resultados mostram que as pessoas têm dificuldades na identificação das simulações e gravações.

Pode-se concluir que as etapas de gravação, modelagem, síntese, simulação e reprodução sonora atenderam satisfatoriamente à representação do campo sonoro avaliado, tendo em vista o grau de similaridade entre as simulações e os sons gravados. No entanto, devido a algumas taxas de acerto próximas de 60%, toda a cadeia de processamento deve melhor investigada para identificar possíveis melhorias, tais como melhor síntese da fonte sonora, incluir modelo de aceleração e padrão de diretividade dos respectivos veículos.

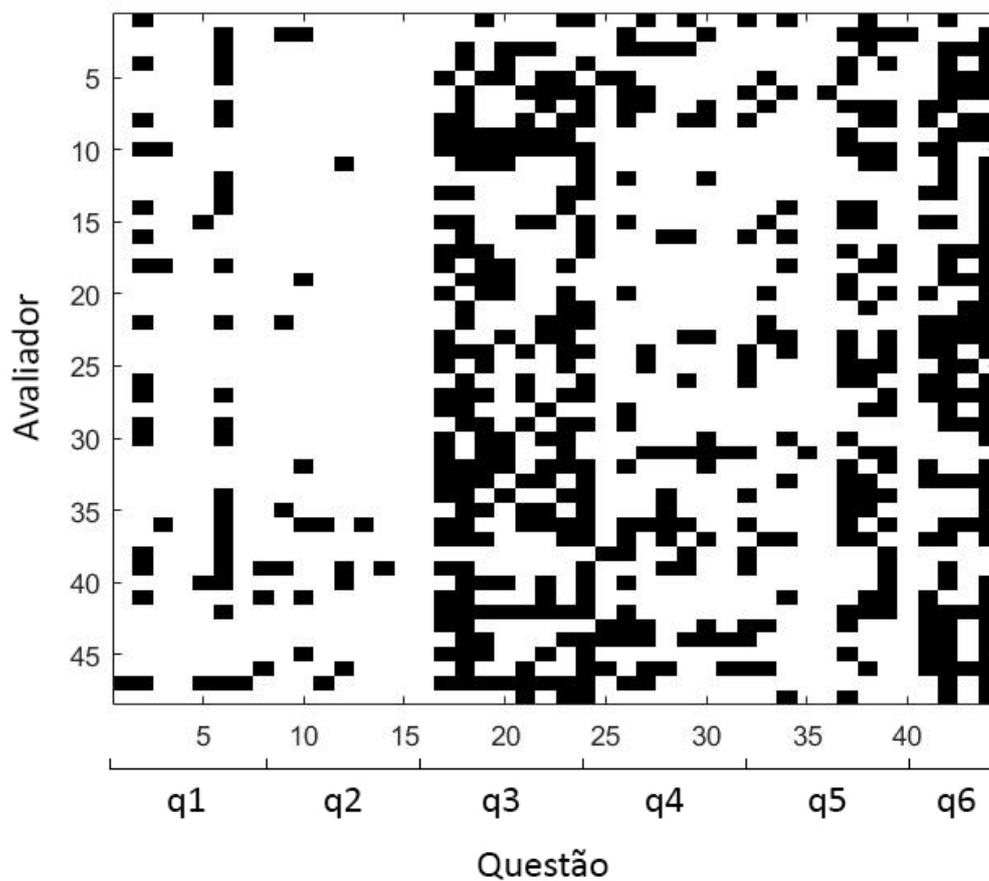


Figura 4.10: Regiões de acertos e erros da avaliação com áudios gravados

As figuras [4.11](#), [4.12](#) e [4.13](#) apresentam o conteúdo espectral dos áudios simulados e gravados, referentes ao ouvido esquerdo. Identificou-se nos áudios conteúdos espectrais diferentes, sobretudo, para as velocidades de 50km/h e 70km/h: os áudios simulados são caracterizados por regiões com maior concentração de energia sonora para determinadas frequências, quando comparados aos gravados. Esta tendência é identificada entre 6kHz a 12kHz, intervalo claramente audível pelo ouvido humano, e de 16kHz em diante (não percebidas pelo ouvido). Para audibilizações mais fidedignas, é necessário compreender os motivos destas diferenças. O comportamento dos áudios aproxima-se para a velocidade de 30km/h.

Para todas as velocidades, o conteúdo espectral entre os áudios simulados e gravados é similar no intervalo de frequências de 0 a 5kHz.

Por último, outro aspecto identificado por algumas pessoas como deficiente nos áudios foi o ruído de fundo. Os áudios gravados apresentam ruído de fundo similar, característico do período de gravação, que tem como maior contribuição o canto de pássaros da região. Este ruído cria um padrão reconhecível nos áudios gravados, tornando-se um “gatilho” para sua identificação. O mesmo ocorre entre os áudios

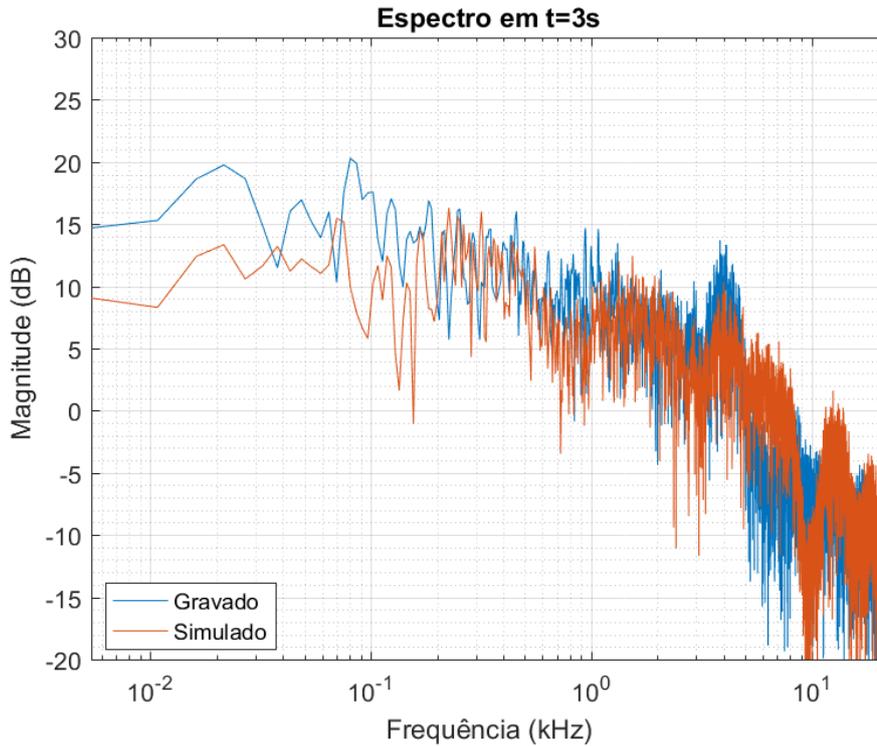


Figura 4.11: Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de 30km/h

simulados, tendo em vista que na interface de VA foram inseridas fontes pontuais às quais associaram-se arquivos sonoros que continham sons similares aos reais. No entanto, da mesma forma que os áudios gravados, a repetição deste padrão sonoro pode ter contribuído para a identificação dos áudios simulados.

Igualmente identificados como aspectos a serem aperfeiçoados na audibilização são os ruídos específicos do contato pneu-pavimento, causados pela irregularidade da superfície viária, ou pela presença olhos-de-gato, pedras e galhos na pista. Estes ruídos são facilmente identificados nos sons reais, enquanto que nas simulações não foram representados.

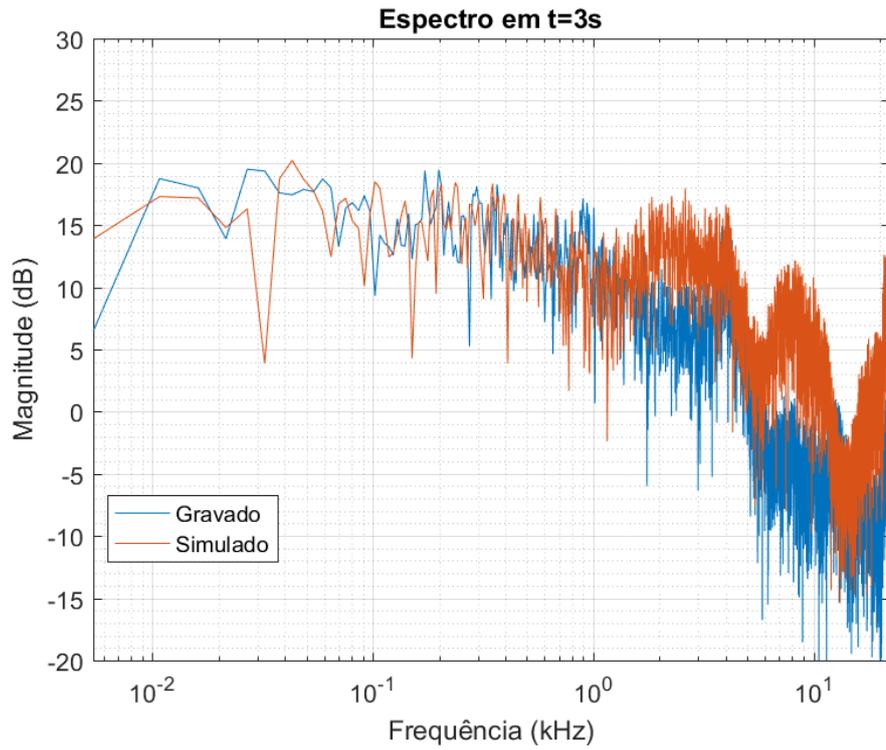


Figura 4.12: Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de 50km/h

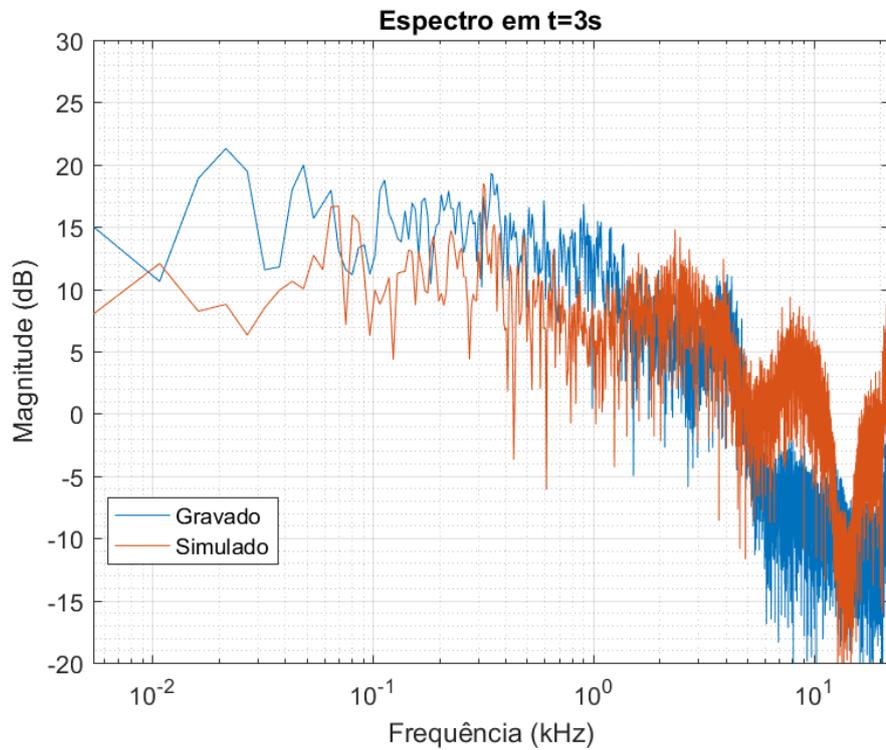


Figura 4.13: Conteúdo espectral dos veículos gravado e simulado na velocidade de 70km/h

Capítulo 5

Conclusão

Esta pesquisa surgiu da necessidade de um estudo mais detalhado da aplicabilidade de uma ferramenta participativa de RV associada às técnicas de audibilização para avaliação sonora urbana. Parte do princípio de que a gestão do ruído relaciona-se não apenas à tolerância dos níveis sonoros, como também à subjetividade do incômodo, propondo investigar um método de avaliação a partir de estímulos auditivos, em apoio aos métodos tradicionais, limitados aos estímulos visuais.

Como estudo de caso, foi escolhida uma área urbana simples no município de Duque de Caxias, no Estado do Rio de Janeiro, onde foram registrados os sinais sonoros de veículos em diferentes condições. Os registros sonoros foram realizados a partir de medições por um arranjo de microfones e gravações biaurais com uma cabeça artificial. A pesquisa não se propôs a simular e avaliar modelos urbanos complexos, tendo em vista o objetivo principal em avaliar a utilização da ferramenta para simulação acústica (VA) e a capacidade do sistema para simulação das fontes sonoras veiculares.

Nos capítulos iniciais, buscou-se apresentar uma revisão teórica dos conceitos fundamentais sobre acústica, o ruído urbano e seus efeitos, apresentados os instrumentos de planejamento urbano no Brasil e as limitações na incorporação de métodos eficazes para gestão da poluição sonora. Foram apresentadas referências de pesquisas relacionadas ao tema proposto e uma introdução às técnicas de RV associadas a técnicas de audibilização.

O objetivo principal da investigação proposta foi avaliar se o sistema de VA, que inclui as etapas de gravação, processamento, síntese e simulação sonora, é capaz de sintetizar áudios cuja percepção seja fiel à dos áudios gravados em ambiente real.

As gravações biauriculares e a simulação sonora, obtida a partir da interface de RVA, foram avaliadas por um grupo de voluntários, a partir da análise das reações dos participantes diante de estímulos sensoriais específicos. O fone de ouvido utilizado nas avaliações foi equalizado, a fim de remover a influência da resposta em frequência na cadeia de reprodução.

Os resultados das avaliações subjetivas mostraram que as simulações não tiveram resultados excelentes: a similaridade entre os sons reais e simulados não foi identificada com facilidade pelas pessoas. No entanto, tendo em vista que a percepção dos atributos específicos avaliados nos áudios não foi significativamente influenciada pela simulação, pode-se afirmar que atenderam ao objetivo esperado, mas requerem ainda maior análise e melhoramentos. De uma forma geral, os resultados demonstram a capacidade da simulação sonora em reproduzir, a partir de fones de ouvido, as sensações auditivas que o ouvinte tem em um ambiente real.

Tendo por base a recriação virtual de um modelo urbano simples, feitos os ajustes propostos para audibilizações mais fidedignas, esta pesquisa indica ser viável a incorporação dos estímulos auditivos obtidos a partir da técnica utilizada, como forma de apoio às ferramentas de análise visual utilizadas na avaliação do ruído ambiental.

Com relação à forma utilizada para apresentação dos resultados, pode-se afirmar que foi bem sucedida, demonstrando seu potencial como método de avaliação participativa: o usuário interage livremente com o sistema de avaliação, além do que, beneficia-se com a portabilidade do sistema, podendo responder às avaliações em horário e local de sua escolha.

Estas conclusões indicam o potencial da sistema simulador e do modelo de apresentação dos estímulos sonoros em informar aos cidadãos e permitir a sua participação nas decisões sobre as características sonoras de uma determinada situação urbana, podendo auxiliar as políticas de planejamento urbano.

5.1 Limitações do estudo

Os principais desafios para as interfaces de RV com módulos de audibilização são:

- A carga computacional para renderização em tempo real de modelos urbanos complexos;
- A inexistência de fontes sonoras em formatos padronizados obtidas por síntese, representativas de fontes de ruído típicas de áreas urbanas, para utilização no modelo virtual;
- A impossibilidade de controle dos equipamentos e configurações de áudio utilizados pelos usuários: nesta pesquisa, os testes foram aplicados em condições controladas (um único notebook, fone de ouvido, mesma sala e áudios ajustados em igual volume para todos os participantes). A portabilidade do sistema, no entanto, permite que (idealmente) o sistema seja reproduzido em condições definidas pelo próprio usuário, o que pode resultar em diferenças na percepção dos áudios.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Esta pesquisa teve por objeto o desenvolvimento de um modelo virtual urbano simples. Como indicação para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de modelos virtuais para áreas urbanas complexas, considerando a inserção de uma maior quantidade de objetos móveis e estáticos. Tais modelos podem contemplar uma maior diversidade de fontes sonoras urbanas como, por exemplo, veículos pesados (ônibus, caminhões), motos, a conversação de pessoas, e outras típicas da situação urbana retratada.

Outra indicação é investigar a tendência, na comparação de um áudio simulado e um gravado, em associar o veículo simulado com uma maior velocidade, apesar das velocidades serem idênticas. Esta tendência indica que a síntese do áudio da fonte sonora pode estar produzindo características temporais e/ou espectrais diferentes daquelas presentes nos sinais gravados.

Recomenda-se, igualmente, investigar a capacidade do sistema simulador na reprodução de veículos com aceleração, o que possivelmente dependerá da realização de registros sonoros em condições controladas, comparáveis com as simulações.

Com relação às fontes estáticas incluídas no modelo virtual para representação do ruído de fundo, indica-se que sejam utilizados registros sonoros obtidos pela cabeça artificial no local avaliado. Desta forma, os áudios simulados conterão um padrão de ruído de fundo similar aos áudios gravados.

Por último, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas que utilizem conjuntamente tecnologias de RVA e mapas acústicos na avaliação sonora urbana. Será possível comparar os resultados da simulação sonora aos do mapeamento sonoro, integrando os parâmetros de análise qualitativos e quantitativos. Tal pesquisa trataria, portanto, de investigar se os resultados da avaliação por estímulos auditivos correspondem aos da avaliação por estímulos visuais.

Apêndice A

Programas – Matlab

A.1 Compensação dos fones

```
1 lista = dir('*.wav');
2 h = load('roland_inv.txt');
3 for n=1:length(lista)
4     [x,fs] = audioread(lista(n).name);
5     y = fftfilt(h,x);
6     nome = sprintf('%s_EQ.wav',strtok(lista(n).name, '.wav'))
7     audiowrite(nome,y,fs);
8 end
```

A.2 Normalização dos áudios

```
1 % Lê os arquivos de áudio
2 allFileNames = dir('.././data/head/*.WAV');
3 totalAudios = length(allFileNames);
4 % Busca áudio com valor máximo
5 audioIndex = 1;
6 % Lê primeiro audio
7 filename = allFileNames(audioIndex).name;
8 [s, fs] = audioread(['.././data/head/', filename]);
9 % Guarda valor máximo encontrado
10 maxNivel = max(abs(s(:)));
11 while audioIndex < totalAudios
12     % Seleciona próximo áudio
13     audioIndex = audioIndex + 1;
14     filename = allFileNames(audioIndex).name;
15     [s, fs] = audioread(['.././data/head/', filename]);
16     % Verifica se máx. do áudio atual é maior do que o máx.
       guardado
17     if maxNivel < max(abs(s(:)))
```

```

18     maxNivel = max(abs(s(:))); % Substitui valor máximo
19     maxName = filename;
20     end
21 end
22
23 nivelRuido = zeros(1, totalAudios);
24 % Varre todos os áudios, normaliza pelo valor máx. encontrado
25 % Corta prox. do instante da passagem do veículo
26 for audioIndex = 1 : totalAudios
27     % Seleciona o arquivo a ser lido
28     filename = allFileNames(audioIndex).name;
29     [s, fs] = audioread(['../data/head/', filename]);
30     % Nível do ruído de fundo
31     nivelRuido(audioIndex) = 10*log10(sum(s(1 : fs*5, 1).^2
        )/(fs*5)); % 5s iniciais. Salva como vetor, plota gráf.
32     % Normaliza o áudio
33     s = s/maxNivel;
34     % % Play
35     % sound(s, fs);
36     % Corta áudios
37     tCentral = calc_t90(s(:,1), fs);
38     cutLength = 6; % Comprimento em seg. do áudio cortado;
39     sCut = s(tCentral - cutLength*fs/2 : tCentral +
        cutLength*fs/2, :);
40     % Salva o áudio cortado e normalizado;
41     % audiowrite(['cortados/cut_', filename], sCut, fs);
42 end
43 plot(nivelRuido)
44 xaxis('áudios')
45 yaxis('ruído ambiente')

```

A.3 Cálculo t90

```

1 function n90 = calc_t90(x1,fs)
2 N_janela = 1024;
3 [S, F, t, P] =
4     spectrogram(x1,hamming(N_janela),N_janela/2,N_janela,fs,'yaxis');
5 totalBins = N_janela/2;
6 f_min = round(500 * totalBins / fs * 2 + 1);
7 f_max = round(1000 * totalBins / fs * 2 + 1);
8 % Media da energia para freqs. influenciadas pelo ruído veicular.
9 % Restrição das freqs. para evitar outros ruídos.
10 P_avg = mean(P(f_min : f_max, :));
11 [~, maxEnergyIndex] = max(P_avg); % Índice de maior energia FFT
12 t90 = (maxEnergyIndex * t(end)) / length(t);
13 n90 = round(t90*fs);

```

A.4 Avaliação com áudios gravados

```
1 function varargout = aval_gravados(varargin)
2 gui_Singleton = 1;
3 gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
4                   'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
5                   'gui_OpeningFcn', @aval_gravados_OpeningFcn, ...
6                   'gui_OutputFcn',  @aval_gravados_OutputFcn, ...
7                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
8                   'gui_Callback',   []);
9 if nargin && ischar(varargin{1})
10     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
11 end
12 if nargout
13     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
14 else
15     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
16 end
17 % --- Executes just before aval_gravados is made visible.
18 function aval_gravados_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
19     varargin)
20 % Choose default command line output for aval_gravados
21 handles.output = hObject;
22 handles.controle = load('controle.txt');
23 handles.resposta = zeros(length(handles.controle),1);
24 display(handles.resposta)
25 for teste=1:size(handles.controle,1)
26     nome = sprintf(' ../audios cortados
27                 finais/audios_cortados_6s_15-01-2019/audios_selecionados/
28                 audio%.2d.wav',handles.controle(teste,1))
29     [handles.A{teste}.audio,handles.A{teste}.taxa] = audioread(nome);
30 end
31 for teste=1:size(handles.controle,1)
32     nome = sprintf(' ../audios cortados
33                 finais/audios_cortados_6s_15-01-2019/audios_selecionados/
34                 audio%.2d.wav',handles.controle(teste,2));
35     [handles.B{teste}.audio,handles.B{teste}.taxa] = audioread(nome);
36 end
37 disp('carregou audios')
38 % valores default
39 handles.uipanel1.Visible = 'on';
40 handles.pushbutton3.Visible = 'off';
41 handles.uibuttongroup1.SelectedObject = '';
42 %handles.NumTestes = 3;
43 handles.NumTestes = size(handles.controle,1);
44 handles.atual = 1;
45 handles.text2.String = sprintf('teste 1');
```

```

43 handles.text_question.String = sprintf('Existe diferença entre os á
    udios?');
44 % Update handles structure
45 guidata(hObject, handles);
46 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
47 function varargout = aval_gravados_OutputFcn(~, eventdata, handles)
48 % Get default command line output from handles structure
49 varargout{1} = handles.output;
50 % --- Executes on button press in pushbutton1.
51 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
52 clear sound
53 sound(handles.A{handles.atual}.audio,handles.A{handles.atual}.taxa);
54 sprintf('tocando arquivo %d',handles.controle(handles.atual,1))
55 % --- Executes on button press in pushbutton2.
56 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
57 clear sound
58 sound(handles.B{handles.atual}.audio,handles.B{handles.atual}.taxa);
59 sprintf('tocando arquivo %d',handles.controle(handles.atual,2))
60 % pushbutton7 (botão Enviar Dados)
61 % --- Executes on button press in pushbutton7.
62 function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
63 handles.uipanel1.Visible = 'off';
64 handles.pushbutton7.Visible = 'off';
65 handles.editNome.Visible = 'off';
66 handles.editEmail.Visible = 'off';
67 handles.editProfissao.Visible = 'off';
68 handles.popGenero.Visible = 'off';
69 handles.popIdade.Visible = 'off';
70 handles.editData.String = date;
71 c=clock;
72 handles.editHorario.String = sprintf('%.2d:%.2d',c(4),c(5));
73 handles.participante = {handles.editNome.String ;
74                         handles.editEmail.String ;
75                         handles.editProfissao.String;
76                         handles.popGenero.String;
77                         handles.popIdade.String;
78                         handles.editData.String;
79                         handles.editHorario.String};
80 guidata(hObject, handles);
81 % pushbutton3 (botão próximo)
82 % --- Executes on button press in pushbutton3.
83 function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
84 clear sound
85 if handles.atual < handles.NumTestes
86     if ismember(handles.atual, [8 : 15])
87         handles.text_question.String = sprintf('Em qual áudio o
            veículo passa da esquerda para a direita?');

```

```

88     handles.radiobutton4.Visible = 'on';
89     handles.radiobutton5.Visible = 'on';
90     handles.radiobutton2.String = 'Áudio A';
91     handles.radiobutton3.String = 'Áudio B';
92     handles.radiobutton4.String = 'Ambos os áudios';
93     handles.radiobutton5.String = 'Nenhum dos áudios';
94     elseif ismember(handles.atual, [16 : 23])
95         handles.text_question.String = sprintf('Neste áudio, o
          veículo passou na frente ou por trás da cabeça?');
96         handles.pushbutton2.Visible = 'off';
97         handles.radiobutton4.Visible = 'off';
98         handles.radiobutton5.Visible = 'off';
99         handles.radiobutton2.String = 'Na frente da cabeça';
100        handles.radiobutton3.String = 'Por trás da cabeça';
101    elseif ismember(handles.atual, [24 : 31])
102        handles.text_question.String = sprintf('Em qual áudio o
          veículo está acelerando?');
103        handles.pushbutton2.Visible = 'on';
104        handles.radiobutton4.Visible = 'on';
105        handles.radiobutton5.Visible = 'on';
106        handles.radiobutton2.String = 'Áudio A';
107        handles.radiobutton3.String = 'Áudio B';
108        handles.radiobutton4.String = 'Ambos os áudios';
109        handles.radiobutton5.String = 'Nenhum dos áudios';
110    elseif ismember(handles.atual, [32 : 39])
111        handles.text_question.String = sprintf('Em qual dos áudios
          o veículo passa com maior velocidade?');
112        handles.radiobutton5.Visible = 'off';
113        handles.radiobutton2.String = 'Áudio A';
114        handles.radiobutton3.String = 'Áudio B';
115        handles.radiobutton4.String = 'As velocidades são iguais';
116    elseif ismember(handles.atual, [40 : 43])
117        handles.text_question.String = sprintf('Ouça o áudio de
          referência e identifique: no Áudio A, o veículo passou
          mais próximo, na mesma distância ou mais distante?');
118        handles.pushbutton6.Visible = 'on';
119        handles.radiobutton5.Visible = 'off';
120        handles.pushbutton2.String = 'Referência'; %
121        handles.radiobutton2.String = 'mais próximo'; %
122        handles.radiobutton3.String = 'mesma distância';
123        handles.radiobutton4.String = 'mais distante';
124    end
125    opResposta = [handles.radiobutton2.Value,
        handles.radiobutton3.Value, handles.radiobutton4.Value,
        handles.radiobutton5.Value];
126    [~, indexResposta] = max(opResposta);
127    handles.resposta(handles.atual) = indexResposta;

```

```

128     handles.atual = handles.atual + 1;
129     handles.text2.String = sprintf('teste %d',handles.atual);
130 elseif(handles.atual == handles.NumTestes)
131     opResposta = [handles.radiobutton2.Value,
132                 handles.radiobutton3.Value, handles.radiobutton4.Value,
133                 handles.radiobutton5.Value];
134     [~, indexResposta] = max(opResposta);
135     handles.resposta(handles.atual) = indexResposta;
136     handles.atual = handles.atual + 1;
137     fid1 = fopen('participantes.txt','at');
138     fprintf(fid1,'%s ',handles.editNome.String);
139     fprintf(fid1,'%s ',handles.editEmail.String);
140     fprintf(fid1,'%s ',handles.editProfissao.String);
141     fprintf(fid1,'%s ',handles.popGenero.String);
142     fprintf(fid1,'%s ',handles.popIdade.String);
143     fprintf(fid1,'%s ',handles.editData.String);
144     fprintf(fid1,'%s ',handles.editHorario.String);
145     fprintf(fid1,'\n');
146     fclose(fid1);
147     fid2 = fopen('resultados.txt','at');
148     fprintf(fid2,'%d ',handles.resposta);
149     fprintf(fid2,'\n');
150     fclose(fid2);
151     handles.pushbutton3.Visible = 'off';
152     handles.textFim.Visible = 'on';
153 end
154 handles.pushbutton3.Visible = 'off';
155 handles.uibuttongroup1.SelectedObject = '';
156 guidata(hObject, handles);
157 % --- Executes on button press in uibuttongroup1.
158 function uibuttongroup1_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata,
159     handles)
160     handles.pushbutton3.Visible = 'on';

```

A.5 Avaliação com áudios gravados e simulados

```

1 function varargout = aval_simulados(varargin)
2 gui_Singleton = 1;
3 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
4     'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
5     'gui_OpeningFcn', @aval_simulados_OpeningFcn, ...
6     'gui_OutputFcn',  @aval_simulados_OutputFcn, ...
7     'gui_LayoutFcn',  [] , ...
8     'gui_Callback',   []);
9 if nargin && ischar(varargin{1})
10     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});

```

```

11 end
12 if nargin
13     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
14 else
15     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
16 end
17 % --- Executes just before aval_simulados is made visible.
18 function aval_simulados_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
    varargin)
19 handles.output = hObject;
20 handles.controle = load('controle.txt')
21 handles.resposta = zeros(length(handles.controle),1);
22 display(handles.resposta)
23 for teste=1:size(handles.controle,1)
24     nome = sprintf(' ../gerados jul e cortados finais -
        r01/audios_selecionados/
25     audio%.2d.wav',handles.controle(teste,1))
26     [handles.A{teste}.audio,handles.A{teste}.taxa] =
        audioread(nome);
27 end
28 for teste=1:size(handles.controle,1)
29     nome = sprintf(' ../gerados jul e cortados finais -
        r01/audios_selecionados/
30     audio%.2d.wav',handles.controle(teste,2));
31     [handles.B{teste}.audio,handles.B{teste}.taxa] =
        audioread(nome);
32 end
33 disp('carregou audios')
34 % valores default
35 handles.uipanel1.Visible = 'on';
36 handles.pushbutton3.Visible = 'off';
37 handles.uibuttongroup1.SelectedObject = '';
38 %handles.NumTestes = 3;
39 handles.NumTestes = size(handles.controle,1);
40 handles.atual = 1;
41 handles.text2.String = sprintf('teste 1');
42 handles.text_question.String = sprintf('Ouça o áudio e responda: o
        áudio é real ou simulado?');
43 handles.pushbutton2.Visible = 'off'; % Botão para ouvir áudio B
44 handles.radiobutton2.String = 'Real';
45 handles.radiobutton3.String = 'Simulado';
46 guidata(hObject, handles);
47 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
48 function varargout = aval_simulados_OutputFcn(~, eventdata,
    handles)
49 varargout{1} = handles.output;
50 % --- Executes on button press in pushbutton1.

```

```

51 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
52 clear sound
53 sound(handles.A{handles.atual}.audio,handles.A{handles.atual}.taxa);
54 sprintf('tocando arquivo %d',handles.controle(handles.atual,1))
55 % --- Executes on button press in pushbutton2.
56 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
57 clear sound
58 sound(handles.B{handles.atual}.audio,handles.B{handles.atual}.taxa);
59 sprintf('tocando arquivo %d',handles.controle(handles.atual,2))
60 % pushbutton7 (botão Enviar Dados)
61 % --- Executes on button press in pushbutton7.
62 function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
63 handles.uipanel1.Visible = 'off';
64 handles.pushbutton7.Visible = 'off';
65 handles.editNome.Visible = 'off';
66 handles.editEmail.Visible = 'off';
67 handles.editProfissao.Visible = 'off';
68 handles.popGenero.Visible = 'off';
69 handles.popIdade.Visible = 'off';
70 handles.editData.String = date;
71 c=clock;
72 handles.editHorario.String = sprintf('%.2d:%.2d',c(4),c(5));
73 handles.participante = {handles.editNome.String ;
74     handles.editEmail.String ;
75     handles.editProfissao.String;
76     handles.popGenero.String;
77     handles.popIdade.String;
78     handles.editData.String;
79     handles.editHorario.String};
80 guidata(hObject, handles);
81 % pushbutton3 (botão próximo)
82 % --- Executes on button press in pushbutton3.
83 function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
84 clear sound
85 if handles.atual < handles.NumTestes
86     if ismember(handles.atual, [8 : 15])
87         handles.text_question.String = sprintf('Ouça os áudios e
88             resposta: qual dos veículos está passando mais perto?');
89         handles.pushbutton2.Visible = 'on';
90         handles.radiobutton4.Visible = 'off';
91         handles.radiobutton5.Visible = 'off';
92         handles.radiobutton2.String = 'Áudio A';
93         handles.radiobutton3.String = 'Áudio B';
94     elseif ismember(handles.atual, [16 : 23])
95         handles.text_question.String = sprintf('Ouça os áudios e
96             resposta: qual dos veículos está mais rápido?');
97         handles.pushbutton2.Visible = 'on';

```

```

95     handles.radiobutton4.Visible = 'off';
96     handles.radiobutton5.Visible = 'off';
97     handles.radiobutton2.String = 'Áudio A';
98     handles.radiobutton3.String = 'Áudio B';
99     elseif ismember(handles.atual, [24 : 27])
100         handles.text_question.String = sprintf('Obrigada!');
101         handles.pushbutton6.Visible = 'off';
102         handles.radiobutton5.Visible = 'off';
103         handles.pushbutton2.String = 'off';
104         handles.radiobutton2.String = 'off';
105         handles.radiobutton3.String = 'off';
106         handles.radiobutton4.String = 'off';
107     end
108     opResposta = [handles.radiobutton2.Value,
109                 handles.radiobutton3.Value, handles.radiobutton4.Value,
110                 handles.radiobutton5.Value];
111     [~, indexResposta] = max(opResposta);
112     handles.resposta(handles.atual) = indexResposta;
113     handles.atual = handles.atual + 1;
114     handles.text2.String = sprintf('teste %d',handles.atual);
115 elseif(handles.atual == handles.NumTestes)
116     opResposta = [handles.radiobutton2.Value,
117                 handles.radiobutton3.Value, handles.radiobutton4.Value,
118                 handles.radiobutton5.Value];
119     [~, indexResposta] = max(opResposta);
120     handles.resposta(handles.atual) = indexResposta;
121     handles.atual = handles.atual + 1;
122     fid1 = fopen('participantes.txt','at');
123     fprintf(fid1,'%s ',handles.editNome.String);
124     fprintf(fid1,'%s ',handles.editEmail.String);
125     fprintf(fid1,'%s ',handles.editProfissao.String);
126     fprintf(fid1,'%s ',handles.popGenero.String);
127     fprintf(fid1,'%s ',handles.popIdade.String);
128     fprintf(fid1,'%s ',handles.editData.String);
129     fprintf(fid1,'%s ',handles.editHorario.String);
130     fprintf(fid1,'\n');
131     fclose(fid1);
132     fid2 = fopen('res_simulados.txt','at');
133     fprintf(fid2,'%d ',handles.resposta);
134     fprintf(fid2,'\n');
135     fclose(fid2);
136     handles.pushbutton3.Visible = 'off';
137     handles.textFim.Visible = 'on';
138 end
139 handles.pushbutton3.Visible = 'off';
140 handles.uibuttongroup1.SelectedObject = '';
141 guidata(hObject, handles);

```

```
138 % --- Executes on button press in uibuttongroup1.
139 function uibuttongroup1_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata,
    handles)
140 handles.pushbutton3.Visible = 'on';
141 %\lstinputlisting{programas/plota_graficos.m}
```

Referências Bibliográficas

- [1] MARTINS, R. “O debate internacional sobre desenvolvimento sustentável: aspectos e possibilidades.” *Aurora - Revista de Discentes do Programa de pós-graduação em Ciências Sociais da Unesp, Marília*, 2007.
- [2] JUNIOR, A. S. M., SILVA, R. A. M. S. “Do impacto da poluição sonora no meio ambiente urbano”, *XIII Fórum Ambiental*, jul. 2017.
- [3] OMS. *Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe*. Relatório técnico, Organização Mundial da Saúde, 2011.
- [4] OMS. *Résumé D’orientation Des Directives De I’oms Relatives Au Bruit Dans l’environmental*. Relatório técnico, Organização Mundial da Saúde, 2003.
- [5] WILIŃSKA, A., KAŹMIERCZAK, J., NIESPOREK, A. “Participatory approach to noise mapping and acoustic climate management”. In: *Proceedings - European Conference on Noise Control*, Christchurch, New Zealand, jun. 2012.
- [6] SÃO PAULO. “Lei Municipal Nº 16.499”, *Diário Oficial do Município de São Paulo*, jul. 2016.
- [7] SÃO PAULO. “Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 - Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo”, jul. 2014.
- [8] CALIXTO, A. *O Ruído Gerado pelo Tráfego de Veículos em “Rodovias-Grandes Avenidas” Situadas dentro do Perímetro Urbano de Curitiba, Analisado sob Parâmetros Acústicos Objetivos e seu Impacto Ambiental*. Tese de Mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, COPPE - Universidade Federal do Paraná, 2002.
- [9] IEC. “Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications”, *IEC 61260-1*, pp. 1–88, feb. International Electrotechnical Commission, 2014.

- [10] CHADWICK, D. L. “Music and hearing”. In: *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, v. 66, pp. 1078–1082, nov. 1973.
- [11] STANSFELD, S. A., SHARP, D., GALLACHER, J., et al. “Road traffic noise, noise sensitivity and psychological disorder”, *Psychological Medicine*, v. 23, n. 4, pp. 977–985, nov. 1993.
- [12] CATAI, R. E., PENTEADO, A. P., DALBELLO, P. F. “Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico.” *17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil*, p. 12, nov. 2006.
- [13] BISTAFA, S. R. B. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. 2ª ed. São Paulo, 2006.
- [14] BRASIL. “Norma Regulamentadora NR-15, Atividades e Operações Insalubres”. Ministério do Trabalho, Brasília, 2015.
- [15] SALIBA, T. M. *Curso Básico de Higiene Ocupacional*. São Paulo, 2004.
- [16] STANSFELD, S. A., HAINES, M., BROWN, B. “Noise and health in the urban environment”, *Reviews on Environmental Health*, v. 15, pp. 43–82, jan-jun 2000. ISSN: 2191-0308.
- [17] OMS. *The world health report 2001 - Mental Health: New Understanding, New Hope*. Relatório técnico, Genf, Schweiz, 2001. Disponível em: <http://www.who.int/whr/2001/en/index.html>.
- [18] MORAES, E., LARA, L., TOGUCHI, L., et al. “Mapa de Ruídos da Zona Comercial de Belém, uma Parcela do Mapa de Ruídos da Cidade de Belém - Brasil”. In: *34º Congresso Espanhol de Acústica, Tecniacustica*, Bilbao, Espanha, nov. 2003.
- [19] PAZ, E. C. *Estudo de um Modelo de Avaliação e Predição Acústica para o Ruído de Tráfego*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [20] GUEDES, I. C. M. *Influência da Forma Urbana em Ambiente Sonoro: Um Estudo no Bairro Jardins em Aracajú (SE)*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- [21] MARDONES, M. D. M. *Mapeamento dos Níveis de Ruído em Copacabana, Rio de Janeiro, Através de Simulação Computacional*. Tese de Mestrado,

Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

- [22] COSTA, C. A., GARAVELLI, S. L., SILVA, E. F. F., et al. “Barreiras Acústicas como Medida de Mitigação dos Ruídos Gerados pelo Tráfego Rodoviário: Setor Noroeste - DF”. In: *19º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito*, Brasília, 2013.
- [23] CANESTRARI, F., PARTL, M. *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. Dordrecht (Holanda), 2016. ISBN: 9789401773423.
- [24] PACHECO, E. A. *Quantificação do ruído de combustão em um motor ciclo Otto usando diferentes combustíveis de competição através da técnica de intensidade sonora*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2002.
- [25] STUCKLSCHWAIGER, W., HARGREAVES, N., BEIDL, C. “NVH considerations to make modern Diesel engines in a attractive alternative for SUV powertrains”, *Journal of Passanger Cars*, v. 108, n. 6, pp. 2859–2865, SAE International, Graz (Austria), 1999.
- [26] BERANEK, L. L., VÉR, I. L. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. Nova Iorque (EUA), 1992.
- [27] CABRAL, M. F. F., ALBUQUERQUE, F. S., NETO, O. F., et al. “Estudo dos mecanismos de geração de ruído de tráfego na interface pneu-pavimento.” *TRANSPORTES*, v. 22, n. 1, pp. 1–20, dez. 2014. ISSN: 2237-1346 (online).
- [28] MURGEL, E. “Especificação do pavimento como agente de controle de ruído do tráfego.” In: *XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. SOBRAC.*, pp. 276–281, Belo Horizonte, nov. 2000.
- [29] FEHRL. “SILVIA. Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces.” FEHRL report 2006/02, Forum of European National Highway Research Laboratories, Bruxelas (Bélgica), 2006.
- [30] “Silence (Quieter surface transport)”. 2005. Disponível em: <<http://www.silence-ip.org/site/>>.
- [31] BRASIL. “Lei 10.257 de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).” *Congresso Nacional, Brasília*, 10 de julho de 2001.

- [32] ABNT. “NBR10151: Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral”, pp. 1–24, mai 2019.
- [33] ABNT. “NBR16313: Acústica - Terminologia”, pp. 1–11, nov. 2014.
- [34] Directive 2002/49/EC. . Relatório técnico, European Parliament and Council of the European Union, Luxembourg, jun. 2002.
- [35] LUIGI, M., MASSIMILIANO, M., ANIELLO, P., et al. “On the Validity of Immersive Virtual Reality as tool for multisensory evaluation of urban spaces”. In: *6th International Building Physics Conference (IBPC)*, Torino (Itália), 2015.
- [36] ZELLHUBER, A. “Métodos Participativos no Planejamento Ambiental no Contexto de Ocupações Informais: Possibilidades e Limitações.” *Sociedade, Contabilidade e Gestão*, v. 3, n. 2, jul-dez 2008.
- [37] STREET, P. “Scenario workshops: A participatory approach to sustainable urban living?” *Futures*, v. 29, n. 2, pp. 139–158, mar 1997.
- [38] SECKIN, B., MAFFEI, L., MASULLO, M. “Soundscape approach for a holistic urban design”. In: *Proceedings - AESOP 26th Annual Congress*, Ankara (Turquia), 2012.
- [39] SANTOS, G. S., GOMES, R. A., SANTOS, E. A. “PPGIS as an urban planning tool around airports”, *Journal of Air Transport Management*, v. 69, pp. 269–278, Jun 2018.
- [40] SCHAFER, R. M. *The New Soundscape: A Handbook For the Modern Music Teacher*. Toronto (Canadá), 1969. ISBN: 9780911320916.
- [41] HOLTZ, M. C. B. *Avaliação qualitativa da paisagem sonora de parques urbanos. Estudo de caso: Parque Villa Lobos, em São Paulo*. Tese de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2012.
- [42] NISENBAUM, M., KÓS, J. R., BOAS, N. B. V. “O estudo das paisagens sonoras por meio de soundwalks: estratégias e possibilidades de representação”. In: *Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.*, Porto Alegre, jul. 2016.
- [43] BURDEA, G. AND COIFFET, P. *Virtual reality technology*. 2ª ed. New York, 1994. ISBN: 978-953-307-518-1.

- [44] GOBIRA, P., MOZELLI, A. “As interfaces de realidade virtual no século XXI”, *Revista do Programa Avançado de Cultura Contemporânea*, mai. 2016.
- [45] FARIA, R. R. A. *Auralização em ambientes audiovisuais imersivos*. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [46] VORLÄNDER, M. *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlim (Alemanha), 2008. ISBN: 978-3-540-48830-9.
- [47] STIENEN, J., VORLANDER, M. “Auralization of Urban Environments – Concepts towards New Applications”. In: *Euronoise*, Maastricht (Holanda), nov. 2003.
- [48] BARRON, M. “Objective measures of spatial impression in concert halls”. In: *1th International Congress on Acoustics*, v. Paper 7.2.22, Paris (França), 1983.
- [49] ROADS, C. *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, Feb. 1996. ISBN: 9780262181587.
- [50] SANCHEZ, G. M. E., RENTERGHEM, T. V., SUN, K., et al. “Using Virtual Reality for assessing the role of noise in the audio-visual design of an urban public space”, *Landscape and Urban Planning*, 2017.
- [51] PELOW, A., FORSSÉN, J., LUNDÉN, P., et al. “Exterior Auralization of Traffic Noise within the LISTEN Project”. In: *Forum Acusticum*, Aalborg (Dinamarca), 2011.
- [52] JIANG, L., MASULLO, M. A., MAFFEI, L., et al. “A demonstrator tool of web-based virtual reality for participatory evaluation of urban sound environment”, *Landscape and urban planning*, v. 170, pp. 276–282, 2018. ISSN: 0169-2046.
- [53] DANTAS, G. R. *Estimação das direções de chegada de fontes sonoras veiculares usando arranjo de microfones*. Tese de Mestrado, Programa de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [54] SOUNDBIBLE. “Free Sound Clipes, Bits, Effects”. Acesso em: 22 de junho de 2018. Disponível em: <<http://soundbible.com/>>.
- [55] ITA-RWTH. “OpenDAFF - an open source file format for directional audio content”. Acesso em: 15 de maio de 2019. Disponível em: <<http://www.opendaff.org/>>.

- [56] COUTO, H. M. *Sistema Computacional de Avaliação de Síntese Biaural para Sinais Sonoros de Fala com Head Tracker*. Tese de Mestrado, Programa de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, dez. 2014.
- [57] CASALEIRO, R., DIAS, P., CAMPOS, G., et al. “Auralização em Tempo Real num Ambiente de Realidade virtual”. In: *3ª Conferência Nacional em Interação Pessoa-Máquina*, out. Aveiro (Portugal), 2008.
- [58] JUNIOR, C. L. F. *Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação do Departamento de Semicondutores Instrumentos e Fotônica da Universidade de Campinas, jul. 2005.