



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA
ESCOLA DE COMUNICAÇÃO, ARQUITETURA, ARTES E TECNOLOGIAS DA
INFORMAÇÃO
MESTRADO EM PRODUÇÃO E TECNOLOGIAS DO SOM

MAPEAMENTO INTERATIVO DE ESPAÇOS AUDITIVOS VIRTUAIS EM ANDROID

Dissertação de Mestrado apresentada a provas públicas para a obtenção do grau de mestre em Produção e Tecnologias do Som, orientada pelo Professor Doutor João Manuel Marques Carrilho.

Pedro Francisco dos Santos Freire de Castro, nº 22109200

2024

www.lusofona.pt

Centro Universitário de Lisboa
Escola de Comunicação, Arquitetura, Artes e Tecnologias da Informação
Mestrado em Produção e Tecnologias do Som

Mapeamento Interativo de Espaços Auditivos Virtuais em Android

Versão Final

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona, Centro Universitário de Lisboa, no dia 5/03/2024, para obtenção do grau de mestre em Produção e Tecnologias do Som, perante o júri nomeado pelo Despacho de Nomeação No 596 /2024, 24 de março, com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutora Adriana Sá (CUL)

Arguente: Prof. Doutor António de Sousa Dias (FBA-UL)

Orientador: Prof. Doutor João Carrilho (CUL)

Pedro Francisco dos Santos Freire de Castro, nº 22109200

2024

www.ulusofona.pt

O ser humano pode fazer o que deseja, mas não pode desejar o que deseja.

- A. Schopenhauer, *Sobre a Liberdade da Vontade* (1841)

Dedicatória

À minha namorada, Ana Rita Dores: obrigado por tornares a jornada académica menos amarga, a tua presença tornou cada chávena de café numa dose de inspiração e foco. À minha prima, Catarina Leal: o teu encorajamento moral e material e a tua trajetória inspiradora foram pilares inabaláveis neste percurso. À minha tia, Ana Cabrita: o teu apoio constante na minha vida tem sido inestimável e fundamental. E à minha irmã, Sofia de Castro: o teu amor pela música tem sido uma inspiração constante desde a minha infância.

Agradecimentos

No domínio académico e técnico, começo por agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Carrilho, e ao coorientador, Professor Doutor Luís Cláudio Ribeiro. As suas orientações meticolosas e contribuições técnicas provaram ser indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo a minha gratidão a todos os professores do curso, aos investigadores e especialistas em áudio 3D e VR, aos autores de recursos educativos em plataformas digitais e aos programadores que disponibilizaram ativos e ferramentas gratuitas em repositórios digitais. Estes contributos constituíram um *corpus* instrutivo e inspirador, igualmente crucial para a concretização deste projeto.

Resumo

Neste trabalho de projeto, desenvolve-se uma aplicação móvel na plataforma Unity, otimizada para Android, focada na criação e exploração de Espaços Auditivos Virtuais (VAS). Este projeto, inserido no contexto acadêmico de Produção e Tecnologias do Som, explora a fronteira do áudio 3D e da arte sonora, permitindo a manipulação e a navegação em ambientes sonoros espacializados. Através do uso de Funções de Transferência Relativas à Cabeça (HRTFs), a aplicação proporciona uma experiência imersiva, enriquecendo a interação com o som no ambiente virtual tridimensional. Desenvolvimentos nesta área não apenas ampliam as fronteiras artísticas e criativas no campo sonoro, mas também abrem novas possibilidades em áreas como terapia sonora e desenvolvimento de jogos, marcando um avanço significativo na interseção entre tecnologia, virtualidade, arte, som e experiência imersiva.

Palavras-Chave: Áudio 3D, Paisagens Sonoras, Espaços Auditivos Virtuais, Imersividade, Android

Abstract

In this project, a mobile application is developed on the Unity platform, optimized for Android, focusing on the creation and exploration of Virtual Auditory Spaces (VAS). This project, situated in the academic context of Sound Production and Technologies, explores the frontier of 3D audio and sound art, allowing manipulation and navigation in spatialized sound environments. Using Head-Related Transfer Functions (HRTFs), the application provides an immersive experience, enriching the interaction with sound in the three-dimensional virtual environment. Developments in this area not only expand the artistic and creative frontiers in the sound field, but also open new possibilities in areas such as sound therapy and game development, marking a significant advancement in the intersection between technology, virtuality, art, sound, and immersive experience.

Keywords: 3D Audio, Soundscape, Virtual Auditory Spaces, Immersion, Android

Abreviaturas, siglas e símbolos

6dof	6 Graus de Liberdade
AR	Realidade Aumentada
CBA	Áudio Baseado em Canais
DSP	Processamento Digital de Sinal
GLRAM	Aproximações Simplificadas de Matrizes
HATS	Simulador de Cabeça e Tronco
HMD	Ecrã Montado à Cabeça
HOA	Ambisonics de Ordem Superior
HRIR	Resposta ao Impulso Relativa à Cabeça
HRTF	Função de Transferência Relativa à Cabeça
IA	Inteligência Artificial
IEM	Intra-auriculares de Monitorização
IID	Diferença de Intensidade Interaural
IoT	Internet das Coisas
IR	Resposta ao Impulso
ITD	Diferença Temporal Interaural
NPC	Personagem Não Jogável
OBA	Áudio Baseado em Objetos
OSC	Protocolo Open Sound Control
PCA	Análise de Componentes Principais
RPG	Role-Playing Games
SBA	Áudio Baseado em Cenas
SDK	Kit de Desenvolvimento de Software
SOFA	Formato Espacialmente Orientado para Acústica
UE	Unreal Engine
UI	Interface de Utilizador
Tensor-SVD	Decomposição Tensorial
VAD	Display Auditivo Virtual
VAS	Espaços Auditivos Virtuais
VR	Realidade Virtual
WFS	Síntese de Campo de Ondas

Índice

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO PROJETO	9
1.2. ESTRUTURA DA TESE	10
2. TECNOLOGIAS DE ÁUDIO 3D.....	11
2.1. INTRODUÇÃO AO ÁUDIO 3D E AOS VAS.....	11
2.2. EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ESPACIALIZAÇÃO SONORA	19
2.3. HRTFs	26
2.4. ÁUDIO ESPACIAL EM UNITY, ANDROID E VR	35
2.5. APLICAÇÕES DE ÁUDIO ESPACIAL	37
3. PERSPETIVAS FILOSÓFICAS SOBRE SOM E VIRTUALIDADE.....	42
3.1. TEORIAS DA NATUREZA DO SOM	42
3.2. O MATERIALISMO SONORO DE COX	44
3.3. REALIDADE E VIRTUALIDADE DELEUZIANAS	45
3.4. ARTE E VIRTUALIDADE: REFLEXÕES	50
3.5. POLÍTICA E VIRTUALIDADE: REFLEXÕES	53
3.6. VIRTUALIDADE SONORA EM GRIMSHAW E GARNER.....	59
4. METODOLOGIA.....	63
4.1. DESENVOLVIMENTO: ABORDAGEM E LIMITAÇÕES	65
4.2. EXECUÇÃO DO PROJETO E DESENHO DE UI	67
4.3. IMPLEMENTAÇÃO DE ÁUDIO ESPACIAL	69
5. DISCUSSÃO	72
5.1. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO.....	73
5.2. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79
6. CONCLUSÃO.....	85
Referências bibliográficas	87

Índice de Figuras

Figura 1: Cronologia de Tecnologias de Espacialização Sonora entre 1876-2012.....	21
Figura 2: Análise Comparativa de Algoritmos HRTF	28
Figura 3: Visualização Gráfica de HRTFs Inclinação.....	29
Figura 4: Representação Esquemática do Ouvido Externo	29
Figura 4: Análise de Magnitudes HRTF para $\Theta = \emptyset = 0^\circ$	31
Figura 6: Taxonomia Organizacional-Virtual	49
Figura 7: Modelo de Virtualidade Sonora	61
Figura 8: Esboço Inicial do Fluxo de Utilizador	65
Figura 9: Matriz Comparativa de Espacializadores Áudio	70
Figura 10: UI da Aplicação Móvel para Exploração de VAS	76
Figura 11: UI Noturna da Aplicação Móvel VAS.....	77

1. Introdução

Desenvolvido no âmbito do mestrado em Produção e Tecnologia de Som, este trabalho de projeto foca-se na criação e exploração de VAS, utilizando tecnologias de áudio 3D. Esta abordagem visa abrir novas perspectivas para a interação e experiência sonoras, estabelecendo-se como um campo de estudo de relevância e potencial inovador crescentes no panorama tecnológico, artístico e social contemporâneo. O projeto desenvolvido tem como objetivo criar uma aplicação digital para mapeamento sonoro, oferecendo um espaço virtual tridimensional que possibilita a exploração e manipulação de áudio 3D pelos utilizadores. Incorporando HRTFs, a aplicação proporciona uma experiência sonora espacializada em *smartphones* ou *tablets* Android, otimizada para o uso de auscultadores.

A compreensão e o desenvolvimento da temática são enriquecidos por três referências bibliográficas basillares, cada uma contribuindo de maneira distinta para o entendimento do fenómeno dos VAS. *Virtual Auditory Space: Generation and Applications* (1996), de Simon Carlile, oferece uma perspectiva abrangente sobre a geração e as aplicações dos VAS, destacando as implicações técnicas e experiências preceptivas associadas a estes ambientes. Esta obra serve como uma base fundamental para entender a complexidade e os desafios inerentes à criação de VAS, bem como as suas potencialidades. *Echoes of Other Worlds: Sound In Virtual Reality - Past, Present and Future* (2017) de Tom Garner, aborda a importância do som na VR numa perspectiva holística. Garner, neste livro, aborda uma integração multifacetada de tecnologia VR, considerando aspetos fisiológicos e psicológicos do utilizador, além de dimensões tecnológicas, históricas e socioculturais, explorando como o som em VR pode evocar variadas respostas num público diversificado. Em *Sonic Virtuality: Sound as Emergent Perception* (2015), Mark Grimshaw e também Tom Garner exploram o som em ambientes virtuais de uma perspectiva holística e ontológica. Desafiando a definição tradicional de som, a obra propõe o conceito de 'agregado sonoro' como uma entidade inerentemente virtual e emergente da perceção sonora. Além destas obras, a pesquisa pormenorizada sobre HRTFs desempenhou também um papel vital neste trabalho, devido à sua importância para a espacialização sonora em VR e especificamente em VAS. Estes estudos foram cruciais para desenvolver uma compreensão aprofundada dos mecanismos de espacialização sonora, contribuindo diretamente para a criação de uma experiência auditiva tridimensional imersiva.

1.1. Objetivos e Relevância do Projeto

Relativamente à sua relevância académica e prática, este projeto propõe-se como uma contribuição para o campo dos estudos de som, com especial enfoque no áudio 3D. Através de uma abordagem multidisciplinar, ambiciona-se estabelecer uma intersecção entre arte sonora e os conceitos de espaço, seja ele físico ou virtual, promovendo experiências imersivas e interativas.

O projeto em questão alinha-se com os objetivos do curso oferecendo uma perspetiva inovadora na intersecção entre arte sonora e tecnologia. Através do desenvolvimento da aplicação móvel otimizada para Android, utilizando a plataforma Unity, propõe-se a criação de um ambiente em que os utilizadores possam experimentar e manipular VAS de maneira intuitiva e imersiva. Esta abordagem integra princípios de engenharia de som, *design* interativo e experiência do utilizador, procurando contribuir para o desenvolvimento tecnológico e a expressão artística na área.

Com investimentos crescentes e uma tendência ascendente, o metaverso, resultante da fusão entre realidade aumentada, mundos virtuais e a internet, destaca-se pela sua capacidade imersiva, facilitando interações entre utilizadores e elementos digitais em diversos dispositivos, abrangendo áreas que vão do entretenimento a atividades profissionais e educacionais. Esta investigação, inserida num contexto de crescente influência da VR, prevê um impacto substancial da VR nos domínios artístico e social, com os VAS a emergirem como inovação redefinindo as interações sonoras e expandindo as fronteiras entre arte sonora e tecnologia, destacando a relevância do som em espaços virtuais, particularmente na criação de ambientes sonoros tridimensionais interativos, como um tópico de interesse emergente. A pandemia realçou a relevância das experiências auditivas virtuais, antevendo o potencial transformador do som em instalações sonoras interativas e espetáculos no metaverso.

A aplicação desenvolvida visa contribuir para este campo, explorando o potencial artístico e a capacidade de imersão que a espacialização sonora pode oferecer. Centrando-se no áudio tridimensional em ambientes virtuais, o projeto almeja explorar novas formas de expressão e experiência artística. É plausível considerar que o potencial dos desenvolvimentos nesta área possa ultrapassar as fronteiras académicas, estendendo-se a aplicações práticas em áreas como a psicoterapia e o desenvolvimento de jogos. A fusão entre arte sonora, tecnologia e espaço virtual não só responde às necessidades atuais por experiências auditivas imersivas, mas também contribui para o avanço de inovações expressivas e tecnológicas.

1.2. Estrutura da Tese

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, com o objetivo de abordar o tema de forma holística. A elaboração deste trabalho procurou um equilíbrio entre a componente teórica e a prática, visando oferecer uma análise aprofundada e abrangente sobre a criação e exploração de VAS.

Este primeiro capítulo serve como apresentação da temática, estabelecendo com clareza os objetivos e a relevância do presente estudo no campo da Produção e Tecnologia de Som e dos Estudos de Som. Delineia-se, neste capítulo, a importância da inovação na exploração de VAS.

O segundo capítulo, de enfoque teórico, explora a evolução das tecnologias de espacialização sonora, enfatizando os aspetos relacionados com HRTFs e discutindo a integração de áudio espacial em ambientes Unity, Android e VR, estabelecendo uma base sólida para compreender as potencialidades e limitações tecnológicas enfrentadas.

No terceiro capítulo, de forma a estabelecer um diálogo entre teoria e prática, exploram-se as perspetivas filosóficas sobre a natureza do som e a virtualidade, onde se destacam as reflexões deleuzianas sobre realidade e virtualidade e a perspetiva de Cox sobre materialismo sonoro, abordando ainda o conceito de virtualidade sonora proposto por Grimshaw e Garner.

O quarto capítulo, com uma orientação prática, detalha a metodologia utilizada no desenvolvimento da aplicação, abrangendo a abordagem de desenvolvimento, o *design* da UI, a implementação de áudio espacial, e os desafios e limitações encontrados. Este capítulo oferece uma visão detalhada sobre o processo criativo e técnico, permitindo uma compreensão clara das soluções implementadas.

No quinto capítulo, promove-se uma discussão crítica sobre o desenvolvido, onde se avaliam as soluções encontradas, e propõem-se, adicionalmente, direções para futuros desenvolvimentos, enriquecendo o diálogo académico e técnico em torno dos VAS.

Concluindo, o sexto capítulo sintetiza os resultados alcançados e as reflexões geradas ao longo deste percurso académico, oferecendo uma visão global do contributo desta pesquisa para o campo da produção e tecnologia sonora. A dissertação é complementada por apêndices, permitindo uma exploração mais profunda do projeto.

2. Tecnologias de Áudio 3D

Esta secção foca-se nas Tecnologias de Áudio 3D, essenciais na concepção dos VAS, abordando a sua evolução e importância na criação de ambientes sonoros imersivos. Enfatiza-se o papel das HRTFs na personalização da experiência auditiva e a sua integração com Unity e Android, fundamentais no desenvolvimento do projeto.

2.1. Introdução ao Áudio 3D e aos VAS

O som, intrinsecamente um fenómeno físico, manifesta-se como uma perturbação mecânica de pressão que se propaga através de meios elásticos. Esta transmissão ocorre quando as moléculas do meio, comumente o ar devido à sua ubiquidade e propriedades físicas, são deslocadas e geram ondas sonoras. Este processo, caracterizado pela variação de pressão e densidade das partículas no meio, permite que o som viaje em diferentes velocidades e intensidades, dependendo das características físicas e acústicas do ambiente em que se propaga. A sua propagação envolve uma alternância entre energia potencial e energia cinética, o que é fundamental para compreender a sua interação com diferentes meios (Pulkki & Karjalainen, 2015, p. 220).

Esta interação realça a conexão intrínseca entre som e espaço, na medida em que a existência do primeiro depende da sua capacidade de propagação no segundo (Rumsey, 2001, p. 14). O espaço influencia e é influenciado pelas características perçutuais do som, estabelecendo um intercâmbio que configura experiências sensoriais distintas e diversificadas. A temperatura do meio influencia a velocidade de propagação do som, enquanto a morfologia e as dimensões da fonte sonora são determinantes na configuração da geometria do campo sonoro, influenciando o padrão de dispersão das ondas sonoras no espaço. Em ambientes naturais, a percepção sonora engloba a dimensão espacial dos sons, a qual inclui a sua localização, bem como outros atributos espaciais menos evidentes, tais como a difusão sonora, a reverberação, a densidade do campo acústico, e a direccionalidade das ondas sonoras, fornecendo indicações auditivas tridimensionais de largura, altura e profundidade, que facilitam a experiência de sons oriundos de múltiplas direções (Rumsey, 2001, pp. 14-15).

Assim, cenários como a VR requerem modelações numéricas avançadas para simular adequadamente estas dinâmicas acústicas (Pulkki & Karjalainen, 2015, p. 27). O áudio 3D representa uma evolução tecnológica resultante da complexidade inerente à percepção auditiva, visando oferecer uma experiência sonora imersiva e realista, com aplicações notáveis em

videojogos e ambientes de VR (Begault, 2000, pp. 24-23). Esta imersão acústica desempenha um papel fundamental não só no reforço do sentido de presença do utilizador, mas também na melhoria da sua consciência situacional, permitindo uma interação mais natural e integrada com o ambiente virtual.

O áudio 3D emerge como uma evolução significativa face ao áudio 2D, incorporando o conceito de áudio posicional para promover uma experiência auditiva imersiva e tridimensional. Contrariamente ao áudio 2D, que depende de uma configuração fixa de canais para simular a localização sonora, o áudio 3D recorre a métodos sofisticados, criando um cenário sonoro envolvente, no qual o som é percebido de todas as direções, incluindo a vertical (Fonseca, 2023, p. 3). Nos contextos que utilizam áudio 3D, a mobilidade e mudança de orientação no espaço virtual alteram e enriquecem a perceção sonora, alinhando a experiência auditiva mais próxima da realidade física através de interatividade e movimento, ao passo que o áudio posicional simula precisamente a interação dos sons com o ambiente e a anatomia humana, resultando numa experiência auditiva natural e detalhada (Fonseca, 2023, pp. 30, 37, 38).

As técnicas de espacialização de áudio classificam-se em três princípios acústicos principais. Primeiramente, existe a reconstrução física do campo sonoro, exemplificada pelas tecnologias de Ambisonics e WFS, que visam recriar fielmente o campo sonoro numa região específica. Em segundo lugar, a abordagem que combina o campo sonoro e psicoacústica, como nos sistemas estereofónicos e multicanais tradicionais, procura simplificar a complexidade espacial do som, mantendo uma experiência auditiva rica e envolvente. Por último, a técnica binaural, incluindo os VAD que propiciam os VAS, foca em simular a experiência auditiva humana, proporcionando uma perceção tridimensional do espaço acústico. Os princípios desta última formam a base para a criação de experiências auditivas imersivas em aplicações móveis, permitindo um controle mais preciso sobre a espacialização sonora tridimensional e oferecendo uma experiência de áudio mais natural e envolvente para o utilizador (Xie, 2020).

No que toca à classificação das tecnologias, Sun (2021) identifica as várias categorias de sistemas de áudio imersivo, destacando a limitada personalização e interatividade do CBA, especialmente em VR e AR, enquanto ressalta a versatilidade superior do OBA e do SBA. O OBA oferece aos engenheiros de som a capacidade de criar cenas sonoras com metadados, independentemente dos dispositivos de reprodução, o que é útil para aplicações móveis, enquanto o SBA emprega técnicas de HOA para produzir campos sonoros tridimensionais, fundamentais na criação de ambientes sonoros em 3D. A integração desses sistemas

potencializa a evolução das paisagens sonoras virtuais, tornando-as mais interativas e imersivas, sublinhando a importância de entender o papel e as capacidades do áudio tridimensional (Sun, 2021, pp. 2-4).

As técnicas modernas de gravação e reprodução sonora têm-se adaptado a esta realidade, oferecendo uma panóplia de métodos que abordam tanto as dimensões físicas como perceptuais do som. No que concerne à gravação, métodos como a gravação estereofónica e *surround* mantêm-se como abordagens predominantes. Estas técnicas recorrem a configurações de microfones diversificadas, como pares coincidentes, pares espaçados, pares quase coincidentes e pares ORTF, ou conjugações como o *Decca Tree* ou *Double M/S*, para capturar de forma precisa as características espaciais do ambiente sonoro (Hong et al., 2017, p. 4). Por outro lado, a gravação Ambisonics distingue-se pela sua capacidade de capturar som em 360 graus, oferecendo uma representação sonora esférica detalhada, enfrentando contudo uma adoção limitada devido à sua complexidade técnica e aos custos elevados, dado exigir equipamento especializado e um conhecimento aprofundado para uma implementação eficaz.

No domínio da reprodução sonora, as estratégias modernas bifurcam-se em reconstrução física e perceptual do som. A primeira aspira a sintetizar o campo sonoro na área física de audição, empenhando-se em replicar o sinal sonoro original com elevada fidelidade, recorrendo a uma configuração avançada de altifalantes e tecnologias de processamento de sinal para emular a direccionalidade e dinâmica do som no espaço. Em contrapartida, a reconstrução perceptual, baseada em princípios psicoacústicos, visa criar uma experiência auditiva percebida como autêntica pelo ouvinte, apesar de não reproduzir exatamente o campo sonoro original, utilizando conhecimentos sobre como o cérebro humano processa informações sonoras e explorando características perceptivas do som, como localização, distância e profundidade, para gerar uma ilusão acústica convincente, adaptando-se às limitações dos dispositivos de reprodução e às condições auditivas do utilizador (Hong et al., 2017, p. 10).

Os sistemas multicanal, amplamente utilizados em cinema e televisão, bem como jogos para computador e consolas, proporcionam uma experiência imersiva, mas enfrentam desafios na adoção doméstica devido à necessidade de múltiplos altifalantes e um investimento significativo. Além disso, a qualidade auditiva destes sistemas depende da localização dos altifalantes, sendo influenciada pelas variações na propagação do som e pelas características acústicas do espaço. Sistemas avançados como Ambisonics e WFS, que empregam múltiplos altifalantes estrategicamente posicionados, procuram superar as limitações do som multicanal, gerando um campo sonoro mais envolvente e imersivo. Contudo, apesar das vantagens da

técnica ambisónica na reprodução de uma experiência auditiva espacialmente imersiva, esta enfrenta desafios significativos na adaptação a diversas plataformas e sistemas de reprodução, implicando um investimento ainda mais significativo.

Em contraste, o áudio 3D binaural, que simula um espaço tridimensional através de DSP, oferece uma alternativa mais flexível e acessível, independentemente da disposição de altifalantes. O áudio binaural utiliza filtros digitais para imitar as características das *pinnae*, modelando as ondas sonoras conforme interagem com a anatomia humana — cabeça, orelhas e tronco —, criando uma percepção tridimensional do espaço acústico mais completa do que o áudio estereofónico (Begault, 2000, pp. 8-9). O áudio 3D não se limita a reproduzir a direccionalidade dos sons, mas também simula a distância e o movimento, criando uma ilusão convincente de espaço tridimensional que induz o cérebro a interpretar os sons como emanando de locais específicos no ambiente envolvente (Xie, 2020, pp. 401-402).

Elementos como o efeito Doppler e a simulação da física das reflexões superficiais, quando meticulosamente reproduzidos em ambientes virtuais, contribuem significativamente para a imersão auditiva. O efeito Doppler é um fenómeno físico observável acusticamente, caracterizando-se por uma alteração na frequência do som percebida pelo recetor. Esta variação ocorre quando a fonte sonora, o recetor, ou ambos, estão em movimento relativo, resultando numa dinâmica de alteração da distância entre eles, com a frequência a parecer mais alta ao aproximar-se e mais baixa ao afastar-se. Por outro lado, a acústica de ambientes fechados é complexa, sendo influenciada não só pelo percurso direto das ondas sonoras, mas também pelas suas reflexões iniciais contra superfícies como paredes, teto e chão. Estas reflexões contribuem para a reverberação e a formação de padrões de interferência, que juntos moldam a textura sonora do espaço e afetam a clareza, a tonalidade e a percepção da direccionalidade do som (Pulkki & Karjalainen, 2015, pp. 34-36).

O som desempenha um papel crucial e fundamental na criação de uma sensação de imersividade, sendo um elemento-chave na configuração de ambientes virtuais ou experiências digitais, onde a sua presença, qualidade e manipulação cuidadosa contribuem significativamente para a profundidade e autenticidade da experiência imersiva percebida pelo utilizador. Segundo Dyson (2009), o som é o meio imersivo por excelência, caracterizado por ser tridimensional, interativo e sinestésico. As suas propriedades, como invisibilidade, intangibilidade, efemeridade e vibração, criam uma experiência perceptual única que envolve o ouvinte de forma abrangente (pp. 16-19). A natureza envolvente e imersiva do som é fundamental para o *design* acústico e destaca-se como um elemento crucial tanto em ambientes

reais quanto virtuais, evidenciando a qualidade da espacialização sonora como um dos desafios mais contemporâneos na progressão da tecnologia áudio. Esta qualidade não é apenas um objetivo a atingir na concepção de espaços auditivos reais, mas também um pilar essencial na criação de VAS, representando um campo de inovação e aplicação prática onde a fronteira do desenvolvimento tecnológico se encontra em constante expansão (Rumsey, 2001, p. 11).

A natureza imersiva do som, fundamental no *design* acústico tanto em ambientes reais quanto virtuais, é intrinsecamente dependente da percepção auditiva. Esta, sendo uma atividade interpretativa complexa, confere significado e contexto a cada som, organizando-os numa narrativa coerente que considera tanto a fonte como a localização espacial percebida de cada evento sonoro (Eisenberg, 2015, p. 193). Este processo interpretativo não é apenas funcional, mas crucial para a sobrevivência humana, visto que o cérebro tende a associar sons às suas fontes, facilitando a identificação rápida de ameaças e oportunidades no ambiente.

Para otimizar esta função perceptiva e interpretativa essencial, o sistema auditivo humano recorre a pistas auditivas específicas, como ITD e ILD. ITD refere-se às diferenças de tempo minúsculas na chegada de um som aos dois ouvidos, que são cruciais para a localização de sons no eixo horizontal. Por outro lado, ILD diz respeito às diferenças de intensidade do som quando chega a cada ouvido, influenciadas pela cabeça, que atua como uma barreira acústica, sendo este indicador particularmente útil para discernir a localização de fontes sonoras em altitudes variadas ou em situações onde o som apresenta frequências mais altas (Faller & Merimaa, 2004). Juntas, a ITD e a ILD são componentes fundamentais do que é conhecido como localização binaural, permitindo ao ser humano uma apreciação espacial refinada do ambiente sonoro que o rodeia.

A lateralização, que possibilita discernir a direção horizontal da origem de um som, é um processo influenciado por fatores como o ângulo de incidência do som e a ITD, os quais em conjunto contribuem para a precisão na localização das fontes sonoras no plano horizontal (Middlebrooks & Green, 1991, p. 87). A par disso, a percepção da altura e da profundidade do som são dimensões que complementam a experiência da audição espacial, estando estas dependentes de fatores como a posição vertical da fonte sonora e as características das reflexões acústicas do ambiente, que juntas formam a tridimensionalidade percebida do espaço sonoro (Zahorik, Brungart, & Bronkhorst, 2005, p. 105).

O sistema auditivo humano, na localização de fontes sonoras, não apenas utiliza pistas de ITD e ILD, mas também leva em consideração a coerência interaural. Este mecanismo fornece ao cérebro informações essenciais não só sobre a posição estática das fontes sonoras,

mas também acerca da sua quantidade e movimento no espaço circundante (Blauert & Braasch, 2011, pp. 3-4). Contudo, é importante notar que a precisão do sistema auditivo diminui na análise espacial de múltiplas fontes sonoras simultâneas (Santala & Pulkki, 2011, p. 20), enfatizando a relevância tanto da exatidão tecnológica quanto da capacidade humana de contextualizar e situar sons num ambiente tridimensional (Rumsey, 2001, p. 33).

Adicionalmente, Begault (2000) sublinha a complexidade adicional trazida pelo contexto ambiental e pela percepção da distância na audição espacial, destacando a quase necessidade de incluir efeitos de distância e contexto em sistemas de áudio 3D para manter o realismo entre fontes acústicas virtuais (pp. 77, 79). Por outro lado, a segregação auditiva, outro elemento crucial no processo auditivo, permite ao ouvinte distinguir diferentes fontes sonoras num ambiente complexo. Este processo é auxiliado por pistas como a direção, a frequência e o timbre dos sons, tornando-se particularmente importante em ambientes ruidosos ou com várias fontes sonoras, como em conversas em grupo ou concertos musicais (Bregman, 1994, p. 45; Cherry, 1953, p. 97).

A audição espacial desempenha assim um papel crucial na identificação da proveniência dos sons, mediante a interpretação de variações nas ondas acústicas recebidas pelos ouvidos. Este processo, ao ser decifrado pelo cérebro humano, converte-se numa representação auditiva do ambiente, potenciando uma interação e compreensão eficazes do meio, seja ele real ou virtual. A precisão desta interpretação, destacada por Grantham (1995, p. 9), é fundamental, influenciando diretamente a capacidade de orientação e interação com o ambiente. No contexto virtual, um estudo realizado por Fialho et al. (2021) realçou a relevância das pistas auditivas na navegação espacial em VR, revelando que os indivíduos são capazes de se orientar eficazmente em ambientes virtuais complexos, utilizando unicamente pistas sonoras, mesmo na ausência de informação visual. Este resultado sublinha a importância crítica das pistas auditivas no desenvolvimento da VR.

Para além de servir como um meio eficiente para a representação espacial, o som interativo demonstra também um impacto significativo no desenvolvimento de funções cognitivas básicas e competências temporais. De acordo com um estudo realizado sobre a utilização de ferramentas informáticas baseadas em som interativo em crianças invisuais, verificou-se que o som não só apoia o desenvolvimento de competências de representação espacial, mas também facilita o desenvolvimento de funções cognitivas básicas e competências temporais (Sánchez et al., 2002, p. 8).

No atual panorama de transformação das paisagens sonoras e da mediação das experiências auditivas, os VAS emergem como um marco tecnológico de grande relevância. Estes sistemas não só simulam ambientes auditivos que refletem espaços reais, mas também permitem a criação de cenários auditivos inteiramente sintéticos. A implementação dos VAS, apesar de sua concepção teoricamente simples, exige a superação de diversos desafios acústicos para assegurar a fidelidade acústica, um elemento crítico para a sua eficácia enquanto ferramentas de pesquisa e aplicação prática. A capacidade dos VAS de serem influenciados por uma variedade de fatores auditivos e não auditivos sublinha a sua importância como instrumentos de estudo da percepção auditiva, explorando a interação entre os estímulos sonoros e as respostas cognitivas e sensoriais (Carlile, 1996, pp. 12, 34).

A concepção de VAS visa simular um campo sonoro natural livre, através de sistemas de som fechados, como auscultadores, e de sistemas multicanal de campo livre, proporcionando um controlo quase absoluto sobre as dimensões espaciais do som, essencial tanto para a investigação em psicofísica como para aplicações práticas. Os VAS são ferramentas eficientes para investigar as limitações percecionais relacionadas com o DSP no contexto da recolha de informações auditivas espaciais, contribuindo assim para um melhor entendimento das capacidades e dos desafios associados à representação digital do som em ambientes tridimensionais. A elaboração de um sistema eficiente para a distribuição espacial e navegação em VAS exige um entendimento completo das necessidades específicas da aplicação em questão e da importância perceptual de diferentes pistas acústicas na percepção humana (Carlile, 1996, pp. 121, 198, 244).

Desenvolver sistemas de VAS exige um entendimento profundo das suas aplicações específicas, abrangendo desde a necessidade de alta-fidelidade acústica para simulações rigorosas até à transmissão eficiente de dados espaciais em situações onde o realismo pode não ser prioritário. A eficácia destes sistemas é reforçada pelo uso de HRTFs, que são fundamentais para criar uma representação acústica precisa dos VAS, ampliando a sua aplicabilidade para além da pesquisa auditiva, incluindo interfaces humano-máquina, aplicações em VR e teleoperação, proporcionando uma experiência mais intuitiva e imersiva. No campo do *design* acústico de edifícios, os VAS revelam-se extremamente úteis, facultando aos arquitetos a possibilidade de auralizar e avaliar espaços acusticamente antes da sua edificação, o que não só representa uma abordagem económica, como também uma metodologia de avaliação do design altamente eficiente. Além disso, os VAS são cruciais em estudos neurofisiológicos que

investigam a audição direcional, sublinhando a sua relevância transversal em múltiplas áreas de pesquisa e aplicações práticas (Carlile, 1996, pp. 5-8, 197-198, 240).

O ‘mapeamento interativo’ em VAS permite aos utilizadores manipular e posicionar sons em tempo real num ambiente virtual tridimensional, explorando novas formas de expressão artística, sonora e musical através da distribuição espacial dos sons. A espacialização sonora não é apenas um parâmetro musical, mas sim uma componente essencial da obra. O objetivo do protótipo desenvolvido é facilitar a disposição de sons no espaço 3D virtual para criar uma experiência auditiva imersiva, especificamente em dispositivos Android. O protótipo desenvolvido apresenta limitações ao não oferecer funcionalidades de mistura ou síntese de áudio, concentrando-se primariamente na distribuição espacial dos sons.

A investigação conduzida por Atau Tanaka (2019) acerca da *Embodied Musical Interaction* suscita uma reflexão profunda sobre o potencial da interação corporal na música, levantando questões pertinentes para o desenvolvimento de interfaces homem-máquina na criação musical e arte sonora virtual. Tanaka enfatiza a importância da experiência corporal e fenomenológica na interação musical, defendendo que a expressividade e a relação entre o músico e o meio de produção musical podem influenciar o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas e envolventes. Inspirada pelas ideias de Tanaka, a presente investigação procura integrar uma UI intuitiva para a criação de VAS, com especial enfoque na interação tátil com o ecrã, visando proporcionar uma abordagem inovadora à experiência sonora musical através da tecnologia, tendo em consideração também a influência a relação das HRTFs com a percepção sonora corporal.

A evolução na prática musical, de compor obras para inventar sistemas, destacada por Magnusson (2023), marca uma transformação essencial na criação sonora, motivada pela evolução das tecnologias computacionais. Neste paradigma inovador, a música supera a linearidade das gravações, adotando formatos como a música generativa, jogos de áudio, RVs e aplicações, facilitados pela capacidade de armazenamento digital e pela ergodinâmica dos dispositivos, que promovem interação, aprendizagem e evolução em sintonia com práticas performáticas. O protótipo desenvolvido ecoa este conceito, posicionando-se como um sistema criativo que propicia um espaço para experimentação e experiência sonora. A prática atual orienta-se para o desenvolvimento de sistemas exploratórios, ampliando as possibilidades de expressão musical e interação sonora e cultivando um laboratório de inovação e vivência auditiva. Este paradigma amplia o entendimento do que significa ser um ser sensível e parte da cultura humana no século XXI (Magnusson, 2023, pp. 11, 15).

A eficácia dos sistemas de áudio espacial, como os VAS, transcende a mera inovação tecnológica, residindo fundamentalmente na qualidade da experiência perceptual que oferecem. Esta intersecção entre a tecnologia e a percepção humana exige uma abordagem multidisciplinar que englobe acústica, psicofísica e *design* de interação. No desenvolvimento destes sistemas de áudio, a sinergia entre a precisão técnica e a interpretação humana dos estímulos auditivos é crucial, não apenas para imitar a realidade, mas também para ampliar a capacidade de interação e compreensão de ambientes complexos. Assim, a avaliação meticulosa da interação entre som e percepção torna-se imperativa para avançar na criação de experiências auditivas verdadeiramente imersivas e eficazes.

2.2. Evolução das Tecnologias de Espacialização Sonora

Este subcapítulo oferece uma descrição detalhada sobre a evolução das tecnologias de espacialização sonora, desde as experiências iniciais com áudio multicanal no século XIX, até às inovações do século XX em sistemas de som para cinema e videojogos, culminando nas aplicações contemporâneas. Este percurso histórico não só destaca avanços técnicos, mas também enfatiza os impactos culturais e as aplicações práticas que moldaram e foram moldadas por estas evoluções. A democratização do acesso ao áudio imersivo, um subproduto da digitalização, tem facilitado inovações técnicas significativas, permitindo um controlo mais rigoroso da espacialização sonora tridimensional. A emergência dos VAS como novos formatos de áudio sublinha a importância do espaço, por vezes considerado mais crítico do que a frequência e o tempo, na criação de experiências sonoras envolventes (Boren, 2017). Este progresso, que realça a complexidade e o fascínio das tecnologias de espacialização sonora, consolida o áudio imersivo como um elemento essencial no panorama tecnológico atual, ressaltando a sua relevância para o desenvolvimento de experiências profundamente imersivas.

A evolução da tecnologia de espacialização sonora ultrapassa os simples avanços técnicos, influenciando de modo significativo a interação e a experiência sonora em variados contextos. Diferentes espaços podem influenciar a música tanto na localização percebida dos sons como no domínio do tempo através de reflexos tardios e na frequência mediante a filtragem de conteúdo de alta frequência (Boren, 2017, p. 9). Desde espaços com características acústicas únicas, como igrejas com elevada reverberação, até aplicações de ponta em VR, a espacialização sonora tem-se afirmado como um elemento crucial para a criação de experiências imersivas. Este avanço redefine a relação humana com o som e estabelece novos paradigmas para a interação com ambientes digitais e físicos, posicionando a tecnologia de

especialização sonora como um pilar fundamental na construção de mundos virtuais e na ampliação da compreensão e manipulação do espaço sonoro.

A experimentação na relação entre som e espaço não é um fenómeno recente, mas sim uma constante ao longo da história humana e da evolução musical. Desde os primórdios da humanidade, o som tem sido experienciado de maneira intrinsecamente tridimensional. Os seres humanos primitivos encontravam-se imersos em paisagens sonoras complexas, quer em vastos campos abertos quer em cavernas ressonantes, onde as propriedades acústicas proporcionavam experiências auditivas multidimensionais (Boren, 2017, p. 3). Esta linha de continuidade estende-se às várias eras musicais e tecnológicas. A Renascença evidenciava já uma experimentação sonoro-espacial, especialmente em contextos eclesiásticos, nos quais a arquitetura e a acústica desempenhavam papéis fundamentais na construção da experiência musical, como ilustra a prática de coros polifónicos na Basílica de São Marcos em Veneza (p. 2). A era Barroca viu o surgimento de práticas como a música antifonal e a experimentação acústica em igrejas cristãs, que não só influenciaram a acústica dos próprios edifícios religiosos como também fomentaram avanços em técnicas de polifonia (p. 4). O período Clássico levou essa experimentação um passo adiante, com compositores como Mozart a explorarem a disposição da orquestra e as condições acústicas da sala para criar efeitos sonoros espaciais (p. 4). No período Romântico, essa exploração foi elevada a novos patamares, com compositores como Berlioz a utilizarem múltiplas orquestras e coros, criando paisagens sonoras ainda mais expansivas e envolventes (p. 5). Estas etapas históricas estabeleceram os alicerces fundamentais para a compreensão contemporânea do áudio tridimensional.

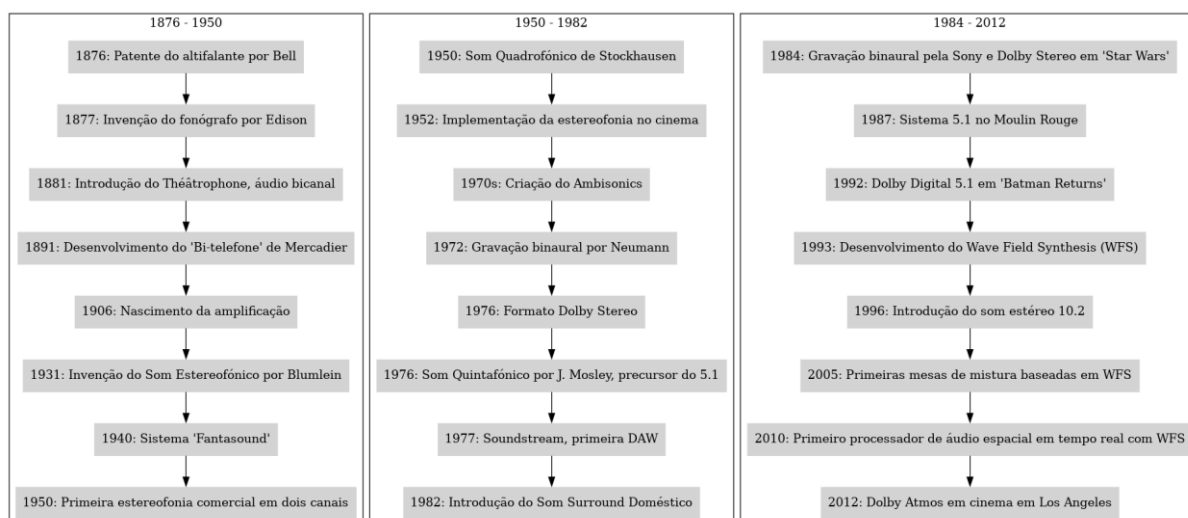


Figura 1: Cronologia de Tecnologias de Espacialização Sonora entre 1876-2012¹

A emergência da era eletrônica no final do século XIX marcou um ponto crucial no desenvolvimento das tecnologias de áudio, estabelecendo as bases para avanços tecnológicos que culminariam na evolução do áudio tridimensional. Criado em 1874, o Telégrafo Musical de Elisha Gray é reconhecido como o primeiro instrumento musical eletrônico, mas foi o fonógrafo de cilindro, desenvolvido por Thomas Edison em 1877, que marcou verdadeiramente o início da era da gravação mecânica de som, estabelecendo um precedente para futuras inovações em tecnologias de gravação, apesar das suas limitações, como a gravação em mono e a qualidade rudimentar (Salazar-Palma et al., 2009; Edison, 1888).

O inventor francês Clément Ader em 1881, realizou a primeira experiência com a transmissão de áudio multicanal, usando duas linhas telefônicas para transmitir performances de ópera e teatro do Palais Garnier para a Exposição Elétrica de Paris, que deu origem ao sistema de distribuição telefônica *Théâtrophone* (Garner, 2017, p. 208). A evolução na transmissão de som, que pavimentou o caminho para o aperfeiçoamento da reprodução sonora, culminou com a introdução do gramofone no final do século, um dispositivo que não só melhorou a qualidade do áudio, mas também permitiu a sua amplificação, expandindo as ondas sonoras no espaço físico e proporcionando uma experiência mais envolvente para o ouvinte (p. 207). Esta fase inicial da era eletrônica, marcada pela invenção e experimentação, pavimentou o caminho para avanços mais sofisticados na transmissão e reprodução de áudio.

No decorrer do século XX, a evolução do áudio estéreo foi marcada por figuras inovadoras como Alan Blumlein, engenheiro da Electric and Musical Industries. No início da década de 30, Blumlein evidenciou as limitações do áudio monofônico, especialmente no cinema, e respondeu com o desenvolvimento de métodos revolucionários que alteraram significativamente as técnicas de gravação e reprodução sonora. A sua abordagem binaural e a criação de um sistema complexo de gravação estereofônica enriqueceram a experiência auditiva, permitindo uma sincronização mais precisa do áudio com as imagens em movimento (Burns, 1999). Posteriormente, em 1933, os engenheiros do Bell Labs introduziram um sistema de som de três canais, um avanço crucial na história do som. Esta inovação, juntamente com outras, foi adaptada para o cinema, como demonstra o sistema Fantasound utilizado na *Fantasia* de Walt Disney na década de 1940, evidenciando a crescente complexidade e imersividade das tecnologias de áudio multicanal (Garner, 2017, p. 208).

¹ A figura ilustra alguns marcos importantes da evolução cronológica das tecnologias de espacialização sonora.

O fim da Segunda Guerra Mundial viu a reaplicação da tecnologia militar para aprimorar a amplificação de áudio em cinemas, culminando nas tecnologias Cinerama e Cinemascope dos anos 1950, que utilizaram áudio multicanal para revitalizar a indústria cinematográfica em face do surgimento da televisão (p. 209). Também na década de 1950, Morton Heilig introduziu inovações pioneiras no campo da VR, como o Sensorama, um sistema imersivo multimídia, e a Telesphere Mask, um HMD com altifalantes incorporados para uma experiência sonora aprimorada (p. 191).

Emergindo na década de 1970 como uma inovação revolucionária, a técnica de Ambisonics representou um salto qualitativo na captura e reprodução do som, configurando um campo sonoro tridimensional e imersivo numa esfera virtual, recriando com precisão a localização e direção das fontes sonoras, para proporcionar uma experiência auditiva detalhada e espacialmente coerente. Na década de 1990, com o advento da primeira geração de VR, esta técnica foi reconhecida como uma aplicação promissora, antecipando um futuro em que o áudio e a imagem se fundiriam numa experiência imersiva e holística (pp. 283-284). Esta abordagem foi posteriormente refinada nos anos 90 com a introdução dos HOA, que ofereciam maior precisão na localização espacial do som. Nos anos mais recentes, a Ambisonics ressurgiu com força na VR contemporânea, consolidando-se como uma estratégia dominante no *design* de áudio posicional (pp. 284-285).

Além da Ambisonics, outro método significativo de reconstrução de campos sonoros é a WFS. Desenvolvida no final dos anos 1980, a WFS reproduz campos sonoros através de uma combinação de ondas sonoras de um conjunto de alto-falantes. Semelhante à Ambisonics, a WFS pode reconstruir tanto ondas planas de fontes distantes quanto ondas esféricas de fontes próximas, oferecendo uma experiência auditiva autêntica e natural numa área razoável (Xie, 2020, pp. 401-402).

Em termos composicionais na música, a disposição espacial dos elementos sonoros e musicais experienciou também inovações notáveis, começando com Charles Ives em 1908, que, na sua obra *The Unanswered Question*, não só explorou o espaço como elemento composicional, simbolizando a distância cósmica entre humanidade e universo, mas também inovou na escrita da partitura com instruções específicas sobre a localização espacial dos músicos, essenciais para a realização da sua visão (McDonald, 2004). Henry Brant, influenciado por Ives, inovou na música espacial acústica, a partir de 1953, com *Antiphony I*, onde especificou posições precisas para diferentes grupos de instrumentos, integrando o espaço físico e a sua acústica como uma nova dimensão de liberdade composicional (Brant, 1978). Na década

de 50, ocorreram avanços tecnológicos significativos, incluindo a *Symphonie pour un homme seul* de Pierre Schaeffer e Pierre Henry, que utilizou um sistema multicanal tetraédrico, os *Vortex Experiments* de Henry Jacobs com 36 altifalantes para criar som rotativo, a distinta configuração sonora do Pavilhão Philips na Feira Mundial de Bruxelas de 1958, desenhada por Le Corbusier e Iannis Xenakis com 425 altifalantes, e a apresentação de *Kontakte* por Karlheinz Stockhausen entre 1958 e 1959, uma das primeiras obras a utilizar o sistema quadrofônico (Boren, 2017, p. 16). François Bayle introduziu o *Acousmonium* em 1974, um sistema orquestral de áudio composto por vários altifalantes de distintos tamanhos e características, estrategicamente distribuídos num espaço de concerto (Bayle, 1988).

O Dolby Stereo, notabilizado pelo filme *Star Wars*, constituiu um marco na evolução do áudio multicanal, incentivando a sua adoção generalizada em salas de cinema (Garner, 2017, pp. 209-210). No final do século XX, surgiram os sistemas de som *surround* 5.1 e 7.1, que aumentaram o número de canais e de caixas acústicas, criando um efeito mais envolvente e realista para o espectador. Em 2012, a Dolby lançou o Atmos com a estreia no filme *Brave* da Pixar, uma tecnologia que ultrapassa as limitações do áudio *surround* tradicional, empregando o conceito de OBA para permitir a manipulação de sons num espaço tridimensional, enriquecendo a experiência auditiva com uma dimensão vertical (Garner, 2017, p. 231). Através de plataformas como a Apple Music, a versatilidade do Atmos tem vindo a reformular a estética e o *design* composicional também da música popular, intensificando a expressividade artística e a interação entre intérprete e ouvinte, num desenvolvimento notável na indústria (Bresler, 2021, pp. 84-87).

Na era digital, a expansão do áudio imersivo foi notável, impulsionada por avanços em várias plataformas e tecnologias. Durante a década de 90, o som *surround* ganhou ímpeto com o sistema de sexta geração Dreamcast da Sega, que introduziu o áudio multicanal em tempo real (Garner, 2017, pp. 238-239), enquanto os computadores pessoais começaram também a adotar áudio multicanal em jogos, destacado pelo AudioPCI da Ensoniq em 1997 (Garner, 2017, pp. 238-239). Esta tendência solidificou-se com o DirectSound3D da Microsoft, que criou paisagens sonoras tridimensionais no início dos anos 2000, evoluindo depois para o som *surround* bidimensional (Garner, 2017, p. 239). A Sony, em 2006, reforçou esta evolução ao integrar suporte para som *surround* 7.1 na PlayStation 3, complementada por uma barra de som específica (Garner, 2017, p. 240).

Também o desenvolvimento de auscultadores tem acompanhado de perto as inovações tecnológicas, tanto no âmbito da investigação como no setor comercial, com avanços

significativos que refletem as mudanças, muitas vezes subtis, no *design* e na funcionalidade destes dispositivos ao longo do tempo (Garner, 2017, pp. 214-215). A história dos auscultadores modernos remonta ao TR-1 da Regency, introduzido em 1954, que marcou o início da era do áudio portátil, permitindo aos utilizadores uma experiência pessoal de audição pela primeira vez. Esta inovação desencadeou uma série de desenvolvimentos que culminaram no icónico Walkman da Sony, um símbolo cultural ao longo da década de 80 e início dos anos 90, que revolucionou a forma como a música era consumida, tornando-a uma experiência pessoal e móvel, acompanhando os ouvintes em qualquer lugar.

A evolução dos auscultadores continuou a ser impulsionada por melhorias tanto em termos de qualidade de áudio como de portabilidade, com empresas a investir em pesquisa para melhorar a experiência auditiva através de *designs* ergonómicos, redução de ruído, e qualidade de som superior. No contexto atual, a VR tem exigido avanços significativos em *hardware* de áudio para criar experiências imersivas convincentes. Empresas como a Oculus têm estado na linha da frente deste desenvolvimento, como demonstra o Rift HMD de 2016, que não só oferece uma experiência visual imersiva, mas também integra altifalantes estéreo que proporcionam um som espacialmente preciso, essencial para uma imersão completa (Garner, 2017, p. 274).

A evolução no setor dos auscultadores tem sido também marcada por inovações tecnológicas em termos de *software* que transformaram a experiência auditiva pessoal, destacando-se o lançamento do Dolby Atmos para Auscultadores em 2012, o 3D Audio da Sony PS5 em 2020, e o Spatial Audio da Apple no mesmo ano, que exemplificam essa progressão. Estas tecnologias utilizam estratégias inovadoras e complementares, como filtros de áudio direcionais e rastreamento dinâmico da posição da cabeça, para simular um ambiente sonoro tridimensional através dos auscultadores, aprimorando a localização do som no espaço e intensificando a sensação de imersão e a percepção de profundidade no campo auditivo (What Hi-Fi?, 2023).

Mais recentemente, o áudio espacial e a AR têm sido aplicados para auxiliar pessoas com deficiência visual na navegação e consciência espacial. Exemplos disso incluem o Microsoft Soundscape e o SonarVision internacionalmente, bem como iniciativas como Dreamwaves e WaveOut em Portugal. Estas aplicações combinam áudio 3D com orientação baseada em mapas e AR para facilitar a mobilidade segura em ambientes urbanos e outros. O objetivo é oferecer soluções inclusivas que superem os desafios de navegação enfrentados por indivíduos com deficiência visual. Outras aplicações destes desenvolvimentos incluem o

aprimoramento de sistemas de navegação por voz em ambientes urbanos complexos e a melhoria de dispositivos de assistência auditiva para uma percepção mais natural do ambiente sonoro.

No universo dos videogames, vários títulos exclusivamente sonoros² destacam-se pela sua versatilidade no uso do áudio 3D, enfatizando a importância do áudio na inovação dos jogos digitais, inclusive para pessoas invisuais. Exemplos de destaque incluem *A Blind Legend* e *The Vale: Shadow of the Crown*, que conduzem os jogadores em aventuras narrativas dependentes da audição. Jogos como *Papa Sangre* e *Wraith: The Oblivion* exploram o terror através de ambientes sonoros imersivos, enquanto *Chillingham* e *Real Sound: Kaze no Regret* oferecem narrativas ricas exclusivamente auditivas e *Paladin Of The Sky* é um RPG sonoro.

Nos jogos, a inteligência auditiva tem sido outro foco de inovação, permitindo que NPCs respondam a estímulos sonoros e à sua posição, como evidenciado em jogos como *Thief: The Dark Project* e *Alien Isolation* (Garner, 2017, p. 231; LoPiccolo et al., 1998; Hope et al., 2014). Também se têm verificado avanços na geração processual automatizada de VAS, expandindo as possibilidades no *design* de som em videogames, onde podem ser moldadas conforme o estado emocional pretendido para o jogador (Lopes et al., 2015). Recentemente a IA possibilita também que os NPCs gerem um diálogo dinâmico com o jogador, criando conversas mais imersivas e variadas, conforme o contexto e a personalidade dos personagens.

A integração da tecnologia sonora 3D com áreas emergentes, como a IoT, tem sido fundamental para enriquecer a experiência do utilizador e a acessibilidade, como demonstra o Kinect da Microsoft, lançado em 2010, que integra quatro cápsulas de microfone para reconhecimento e controlo por voz, juntamente com capacidades de localização de fonte acústica e supressão de ruído ambiente, facilitando interações sem a necessidade de *headset* (Garner, 2017, p. 252). Os avanços no áudio das câmaras 360° em sistemas de segurança doméstica, colunas inteligentes que ajustam o som conforme a acústica do espaço, e assistentes virtuais que adaptam volume e direccionalidade do som segundo a voz do utilizador, são outros exemplos esta tendência inovadora.

O conceito de som 4D tem ganho destaque, especialmente através do trabalho da 4DSOUND, um estúdio que, desde 2007, dedica-se à exploração inovadora da espacialização sonora, desenvolvendo sistemas integrados de *hardware* e *software* que proporcionam um ambiente sonoro omnidireccional. Em Berlim, o espaço MONOM funciona como um palco para

² Para uma consulta mais abrangente sobre jogos *áudio-only*, recomenda-se a lista disponível em audiogames.net.

performances experimentais e como um laboratório para o desenvolvimento de tecnologias de espacialização sonora, oferecendo uma plataforma de controlo flexível e intuitiva para artistas de diversas disciplinas.

Refletindo sobre a história abrangente das tecnologias de espacialização sonora, evidencia-se que as inovações neste domínio transcendem os meros avanços técnicos, representando revoluções na maneira como se experiencia e interage com o som em diversos contextos. Desde os primórdios da gravação mecânica até às modernas plataformas digitais, cada fase desta evolução contribui significativamente para uma compreensão mais aprofundada e uma aplicação mais eficiente do som no espaço. Este desenvolvimento, percorrendo várias eras e tecnologias, abre agora o caminho para um entendimento mais preciso e detalhado da forma como se processa e localiza os sons no ambiente circundante.

2.3. HRTFs

No cenário tecnológico contemporâneo, torna-se inegável a importância do áudio espacial e dos auscultadores para as experiências de VR, sendo estes um pilar fundamental para a imersão e a interatividade (Garner, 2017, p. 206). O áudio binaural, inserido na reconstrução perceptual do som, utiliza a captação ou simulação com microfones posicionados de forma a replicar a experiência auditiva humana, oferecendo uma localização sonora exata e criando uma experiência auditiva realista. A técnica de filtros HRTF, alinhada com o SBA, é crucial para aplicações de alta precisão em localização sonora, especialmente em VR, onde a sensação espacial de estar cercado por fontes sonoras específicas é essencial, contribuindo significativamente para a criação de experiências auditivas imersivas e precisas através do uso de filtros de áudio avançados no áudio binaural.

Na reprodução binaural, um elemento central do VAD, os sinais binaurais de uma fonte sonora em campo livre são sintetizados ao filtrar um estímulo mono com um par de HRTFs, reproduzindo assim o som por fones de ouvido. Com a utilização de HRTFs em posições correspondentes, é possível criar fontes sonoras virtuais em campo livre em várias posições, aumentando significativamente a imersão e o realismo acústico da experiência auditiva (Xie, 2020, pp. 401-402). Também é possível aprimorar esta simulação com algoritmos que contemplam a difração e a absorção sonora pelos diversos materiais presentes no meio virtual, possibilitando uma imersão mais acentuada.

Um estudo de Ferrand, Alouges e Aussal (2019) comprovou que as HRTFs fornecem uma orientação mais exata em relação à fonte sonora, comparativamente ao balanço estéreo,

tanto em cenários estáticos quanto dinâmicos, destacando a sua importância para a localização sonora precisa (Ferrand, Alouges & Aussal, 2019, pp. 4). As HRTFs, ao serem integradas com a tecnologia Ambisonics, potencializam experiências de áudio espacial mais ricas e imersivas em VR e AR, permitindo a utilização de conjuntos de HRTF de arquivos de áudio padrão ou medições específicas, o que aumenta a flexibilidade na personalização do áudio espacial (Binelli et al., 2018, p. 5).

Estes filtros são projetados para emular a percepção auditiva humana, especialmente no que toca à construção cerebral de ambientes sonoros tridimensionais. As HRTFs refletem as pistas de localização influenciadas pela geometria específica da cabeça, face e orelhas de cada indivíduo. Quando combinadas com auscultadores de alta qualidade, as HRTFs não só intensificam a sensação de presença espacial, mas também reforçam a interação multimodal com componentes visuais em experiências de VR, sendo cruciais para a localização exata de avatares e objetos 3D em cenários de VR (Collins, 2008; Cirone, 2017).

É fundamental reconhecer que o áudio binaural ultrapassa a simples técnica de gravação, estabelecendo-se como uma área de estudo rigorosa que engloba modelos sofisticados de DSP. A aplicabilidade destes modelos é vasta, estendendo-se desde os VAS até dispositivos de auxílio auditivo, e atualmente começam a integrar funções neurais avançadas, o que os torna substancialmente mais adaptáveis e eficazes. Esta integração confere uma maior versatilidade aos modelos, permitindo que se ajustem e respondam de forma mais eficaz às complexidades inerentes à percepção sonora humana. A investigação contínua nesta área antevê avanços significativos que prometem não apenas aprimorar a experiência auditiva em aplicações de VR, mas também enriquecer a compreensão global da cognição auditiva (Blauert & Braasch, 2011, pp. 1-6).

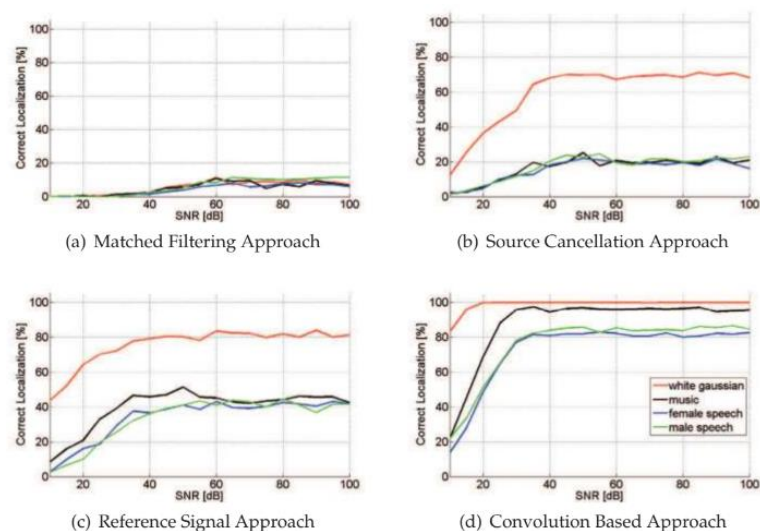


Figura 2: Análise Comparativa de Algoritmos HRTF³

Rothbucher et al. (2011) identificam quatro algoritmos principais para a localização sonora com HRTFs, detalhados na Figura 2: Filtragem Combinada, Cancelamento de Fonte, Sinal de Referência e Convolução. Cada um tem as suas vantagens e desvantagens, com a Convolução a destacar-se pela robustez ao ruído e eficácia na localização (Rothbucher et al., 2011, p. 5). As HRIRs, obtidas para simular direções sonoras específicas no ouvido humano, são análogas às IRs usadas para reverberação (Fonseca, 2023, p. 30). Essencialmente, as HRTFs e HRIRs estão interligadas, operando nos domínios da frequência e do tempo, respetivamente (Fonseca, 2023, p. 30; Cirone, 2017, p. 2). A técnica de convolução, aplicada às HRIRs, confere tridimensionalidade ao som, enquanto os ficheiros ‘.sofa’ armazenam as HRIRs, crucial para a precisão do áudio espacial e uma experiência auditiva imersiva (Cirone, 2017, p. 2).

O processo de obtenção das HRIRs é um passo fundamental para a aplicação das HRTFs. Este procedimento é comumente realizado em câmaras anecoicas para eliminar reflexões sonoras indesejadas. O indivíduo ou um HATS é posicionado com microfones *in-ear*, enquanto colunas de som circulam à sua volta, emitindo sons de referência em ângulos específicos. O som captado pelos microfones, após interação com a anatomia da cabeça e das orelhas do indivíduo, é registado e constitui a HRIR (Cirone, 2017, p. 1).

³ Adaptado de Rothbucher et al. (2011, p. 85).

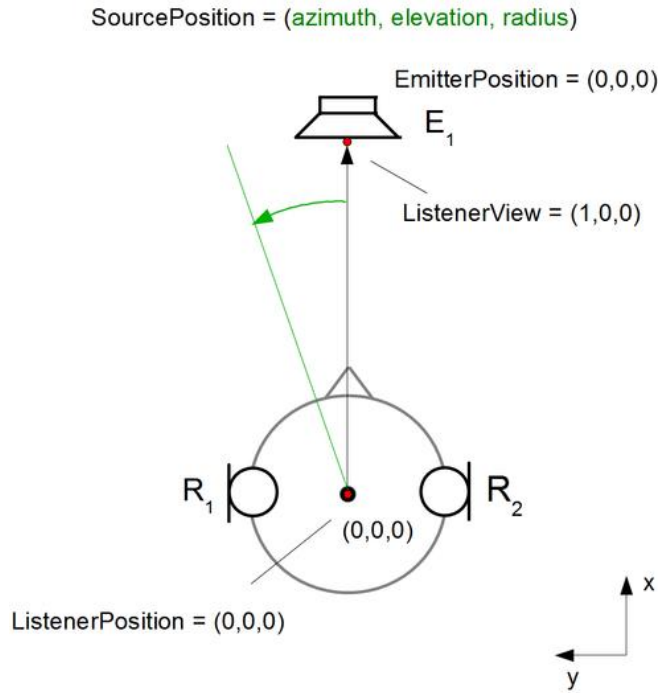


Figura 3: Visualização Gráfica de HRTFs Inclinados⁴

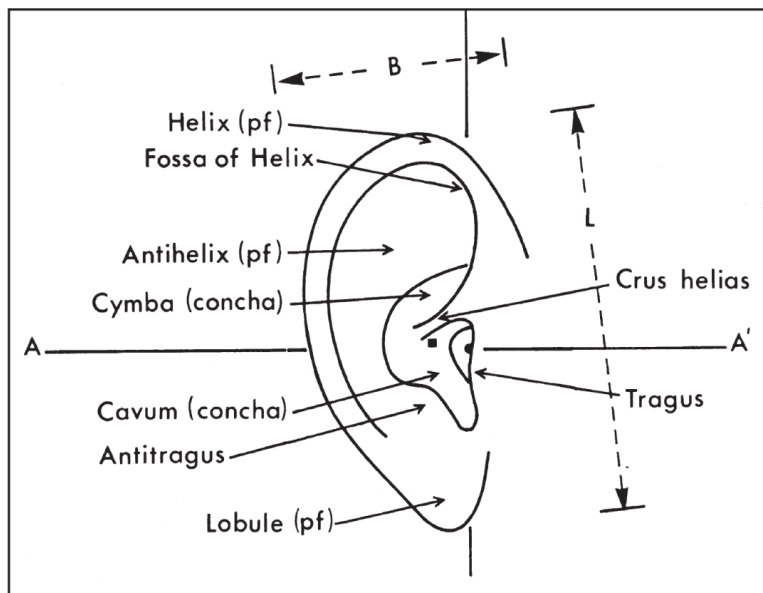


Figura 4: Representação Esquemática do Ouvido Externo⁵

- ⁴ Adaptado de Gebru et al., 2021. Gebru, I. D., et al. (2021). Implicit HRTF modeling using temporal convolutional networks. In *2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 3385-3389). Toronto, Canada.

⁵ Desenho esquemático das principais estruturas do ouvido externo, identificando: (a) a aba auricular com hélice, antihélice e lóbulo; (b) a concha, incluindo cimba e cavum; e (c) o canal auditivo ligando-se ao fundo da concha. Adaptado de Shaw, E. A. G. (1974). *Handbook of Sensory Physiology* (pp. 455-490). Springer-Verlag.

Na modelação de HRTFs, diversas componentes desempenham papéis específicos na localização sonora. O modelo da cabeça conforme apresentado na Figura 3 destaca o papel da morfologia craniana na percepção espacial do som, influenciando o ITD e o IID, através da criação de sombras acústicas por ondas sonoras mais curtas que a cabeça e a difração em ondas mais longas, enquanto o modelo da *pinna*, componente externo do ouvido representado na Figura 4, tem um papel fundamental na captação e direcionamento do som para o canal auditivo, sendo que a estrutura da *pinna*, caracterizada por curvas e sulcos distintos, afeta a percepção sonora ao filtrar e modificar as frequências dos sons, conforme a sua posição no espaço, permitindo que o ouvido interno processe as frequências essenciais para a interpretação auditiva.

Distinguem-se principalmente dois tipos de HRTFs: as genéricas e as personalizadas. Os HRTFs genéricos são concebidos para se adequarem a uma gama alargada de ouvintes, enquanto os HRTFs personalizados são moldados especificamente para as características únicas de um indivíduo. No entanto, a eficácia relativa entre estas duas categorias tem gerado resultados ambíguos na literatura científica, sendo que o estudo *Head-Related Transfer Functions for Dynamic Listeners in Virtual Reality* especificamente não identificou diferenças significativas na precisão da localização dinâmica ao comparar HRTFs genéricas com as individualizadas (Rummukainen, Robotham & Habets, 2021, p. 13).

As HRTFs genéricas, obtidas através da média de HRTFs existentes ou de dados recolhidos de um HATS, *e.g.* Neumann KU-100, apresentam limitações devido à variação das geometrias da *pinna*, o que afeta principalmente a precisão na localização vertical dos sons. Contudo, a eficácia destas HRTFs genéricas pode ser aprimorada através de métodos de treino ativo e *feedback*. Mendonça et al. (2012) destacam que tais abordagens podem melhorar a capacidade dos indivíduos de localizar fontes sonoras com precisão, mesmo quando se utilizam HRTFs não individualizadas (p. 6). Esta eficácia é corroborada por estudos que apontam para a plasticidade do sistema auditivo e a integração multissensorial como fatores de melhoria na localização da fonte sonora em HRTFs genéricas (Berger et al., 2018, p. 21).

Para além do treino ativo, técnicas matemáticas como a PCA têm sido aplicadas para refinar HRTFs genéricas. Esta abordagem decompõe as HRTFs em componentes fundamentais, permitindo a identificação e modificação das variáveis mais impactantes na localização sonora (Sodnik, Susnik & Tomazic, 2005). Rothbucher et al. (2011) expandem esta discussão ao apresentar outras técnicas de redução de dados, como a Tensor-SVD e GLRAM. Notavelmente, o método GLRAM, quando otimizado, mostrou-se superior ao PCA padrão em termos de taxa

de compressão (Rothbucher et al., 2011, p. 7). De acordo com estes resultados, a utilização de HRTFs genéricas, embora beneficiada por personalização, pode ser suficientemente eficaz para proporcionar uma experiência de áudio espacial precisa, especialmente quando complementada por técnicas de otimização e treino.

Rajguru, Obrist e Memoli (2020) apresentam um ponto de vista mais cauteloso. Segundo estes autores, mesmo com treinamento específico, a precisão na localização sonora em VAS continua a ser uma questão problemática. Apesar de uma diminuição nos erros de localização após múltiplas sessões de treinamento, a média de erros tende a manter-se considerável. Esta observação sugere que, apesar dos avanços em métodos de treino e na compreensão da plasticidade auditiva, ainda existem limitações intrínsecas na capacidade de localizar sons com precisão em VAS (Rajguru, Obrist & Memoli, 2020, pp. 8-9).

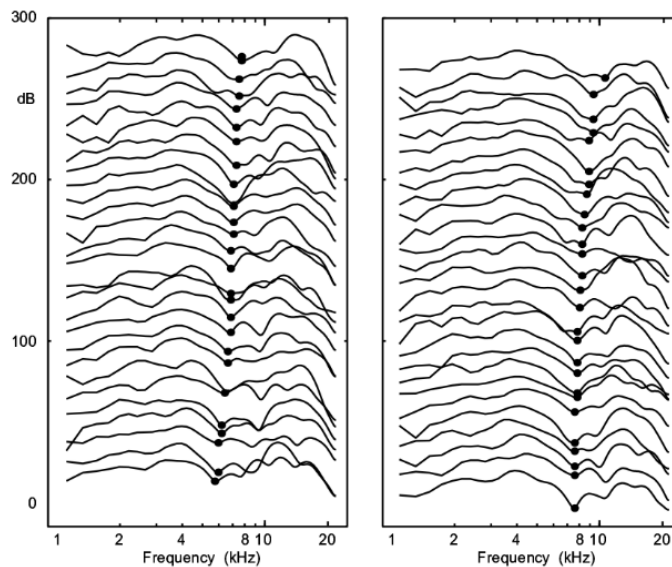


Figura 5: Análise de Magnitudes HRTF para $\Theta = \emptyset = 0^\circ$ ⁶

No âmbito das HRTFs e da sua relevância na localização sonora, Algazi et al. (2001) examinaram a base de dados CIPIC, observando uma ressonância significativa entre 3 e 4 kHz e um *notch* da *pinna* nas HRTFs, fatores cruciais para a percepção espacial do som, ilustrado na Figura 5. Este estudo também realçou que as características das HRTFs são fortemente indicadas pela largura da cabeça (Algazi et al., 2001, pp. 99-102). A personalização das HRTFs, adaptada às características antropométricas do utilizador, é essencial para uma experiência precisa e imersiva em VR, especialmente na percepção de elevação, como sublinhado por

⁶ A figura representa as magnitudes das HRTFs para um som posicionado ao nível do ouvido e diretamente à frente do ouvinte. Adaptado de Algazi, V. R., Duda, R. O., Thompson, D. M., & Avendano, C. (2001). The CIPIC HRTF database. Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (pp. 99-102). New Platz, NY, USA.)

Geronazzo et al. (2018, pp. 110-111). A utilização de HRTFs genéricas pode resultar em distorções perceptuais, afetando a localização sonora, por isso, as HRTFs individualizadas são necessárias para uma percepção exata da elevação de fontes sonoras estáticas (Algazi & Duda, 2001, p. 4).

O impacto da personalização das HRTFs no desempenho do utilizador, particularmente em aplicações de VR, é uma área de investigação crítica. Estudos têm demonstrado que a utilização de HRTFs individualizadas pode resultar em melhorias significativas no tempo de reação e na eficiência de movimento dos jogadores em ambientes de VR. Poirier-Quinot e Katz (2018, p. 3) sublinham que esta abordagem personalizada pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a imersão e a interatividade, elementos fundamentais para uma experiência de VR convincente.

A personalização das HRTFs, uma área em rápida evolução, não se restringe a métodos convencionais, conforme evidenciado por um estudo de Xie (2013, p. 12). Este processo abrange desde a medição acústica direta, que inclui a captura de IRs em ambientes controlados, até simulações numéricas que recriam as características acústicas do ouvido e da cabeça do indivíduo. Métodos indiretos, como o uso de dados antropométricos para estimar as HRTFs, também são relevantes. Além disso, o desenvolvimento de bases de dados de HRTFs acelera a personalização, oferecendo uma diversidade de HRTFs de diferentes indivíduos, o que pode eliminar a necessidade de medições acústicas demoradas. A correspondência rápida e eficiente com medições antropométricas através destas bases de dados torna o processo mais acessível e menos oneroso (Cirone, 2017, p. 2). A utilização de bases de dados públicas e fotografia para comparar e construir HRTFs com base em características geométricas específicas, como a forma da orelha, emerge como uma alternativa rápida e menos invasiva, embora possa não oferecer a precisão desejada para todos os utilizadores (Arámbula-Cosío et al., 2015). Cada uma destas abordagens apresenta vantagens e desvantagens distintas em termos de precisão, viabilidade prática e custo (Cirone, 2017, p. 2).

O setor tem assistido ao desenvolvimento de várias soluções de *software* que simplificam a personalização das HRTFs. Plataformas como o Vive Cinema da HTC e o Resonance Audio permitem aos utilizadores comparar e experimentar diferentes conjuntos de HRTFs, facilitando o carregamento destes a partir de um ficheiro de áudio padrão (Binelli et al., 2018, p. 3). Estas plataformas são particularmente valiosas para profissionais e entusiastas interessados numa abordagem mais técnica e detalhada na personalização do áudio espacial. Paralelamente, empresas como a Embodiment estão a inovar ao combinar visão computacional, IA,

computação em nuvem e engenharia acústica para criar HRTFs personalizadas. Este método, destacado por Medley (2021), representa uma alternativa eficaz às demoradas medições laboratoriais, tornando a personalização mais prática e rápida.

A Earfish, desenvolvida pela Universidade de Antuérpia, introduz um método inovador para a medição individual de HRTFs em casa, utilizando um rastreador de cabeça e microfones nas orelhas para capturar a percepção sonora única de cada pessoa, armazenando os dados no formato SOFA. Contudo, esta técnica enfrenta limitações, principalmente por não ser realizada em câmaras anecoicas, espaços concebidos para eliminar reflexos sonoros e interferências eletromagnéticas, o que pode levar a ruídos e reflexos externos que afetam a precisão das medições. Paralelamente, soluções como o *software* Immerse Virtual Studio da Steinberg e a tecnologia Exofield da JVCKenwood Corporation estão a tornar este processo mais acessível. O Immerse Virtual Studio possibilita a captura de imagens das orelhas com a câmara de um dispositivo móvel, gerando HRTFs personalizados com base nas dimensões fotográficas, enquanto a Exofield utiliza uma configuração 3D de microfones para medições rápidas e precisas das HRTFs, recorrendo ao método Kirkeby para criar um filtro inverso para cada ouvido (Binelli et al., 2018, p. 10).

O avanço na área de HRTFs tem sido impulsionado pela introdução de métodos de aprendizagem automática, que proporcionam uma maneira mais eficiente de adaptar estas funções às características individuais, como a morfologia da orelha e as dimensões da cabeça. Técnicas como árvores de decisão potenciadas, representações esparsas e redes neuronais são particularmente promissoras, demonstrando resultados positivos. Este progresso reflete o desenvolvimento tecnológico e a demanda crescente por métodos mais eficazes e personalizados na individualização de HRTFs, ressaltando as vantagens e limitações de cada abordagem.

Belloch et al. (2020) salientam a relevância dos modelos paramétricos HRTF paralelos, projetados para a arquitetura paralela dos GPUs em dispositivos móveis modernos, visando melhorar a eficiência no DSP e elevando a qualidade da experiência auditiva, enquanto atendem às exigências de consumo energético, essenciais em aplicações móveis. Esta estratégia representa um avanço significativo na otimização de experiências auditivas imersivas em dispositivos móveis, equilibrando qualidade sonora, eficiência e sustentabilidade energética.

Os sinais dinâmicos ligados ao movimento da cabeça são também essenciais, especialmente em VR, onde a mobilidade da cabeça é constante, contribuindo significativamente para uma percepção acurada da espacialização sonora (Algazi & Duda, 2001,

p. 3). A técnica de interpolação também desempenha um papel crucial na modelação do áudio espacial, preenchendo os ângulos intermédios entre os intervalos fixos amostrados nas HRIRs, o que é vital para assegurar transições sonoras suaves e movimentos contínuos de fontes sonoras em aplicações VR (Algazi & Duda, 2001, p. 5). Além disso, a simetria das HRTFs, frequentemente pressuposta, na realidade apresenta variações que influenciam a sua eficácia. Assim, a seleção do método de obtenção das HRTFs, que varia desde o uso de bases de dados humanas até medições personalizadas em câmaras anecoicas ou modelação individual com HATS, é decisiva para a precisão da localização sonora (Binelli et al., 2018, p. 2).

Contudo, a aplicação de HRTFs não está isenta de desafios. Um dos obstáculos práticos é a dificuldade em simular movimentos específicos ponto a ponto ou em ambientes sonoros complexos. Por exemplo, enquanto é relativamente simples programar movimentos sistemáticos, como círculos ou movimentos aleatórios, torna-se mais complexo quando se pretende simular trajetórias específicas ou movimentos acelerados. Estas limitações devem ser consideradas ao integrar HRTFs em sistemas de VR, onde a precisão na localização sonora é muitas vezes crítica para a imersão e a interatividade do utilizador. Além disso, é importante considerar os desafios computacionais associados ao seu uso. A obtenção de HRTFs personalizadas frequentemente requer sistemas de gravação especializados, que podem ser proibitivamente caros e complexos de operar. O processamento em tempo real de HRTFs também pode ser computacionalmente exigente, limitando assim a sua aplicação em dispositivos com capacidades de processamento mais modestas.

Em suma, realça-se a importância fundamental das HRTFs nas experiências imersivas de VR e AR. A aplicação destes filtros, que mimetizam a percepção auditiva humana, revela-se crucial para a localização sonora precisa e para a construção de ambientes sonoros tridimensionais. A seleção entre HRTFs genéricas e personalizadas permanece um tópico de debate, com estudos a indicar benefícios na personalização, embora métodos de otimização e treino possam aprimorar a eficácia das HRTFs genéricas. A evolução nesta área incorpora avanços tecnológicos e métodos de aprendizagem automática, refletindo o contínuo aperfeiçoamento da personalização e a adaptação às características individuais dos utilizadores. Contudo, persistem desafios práticos e computacionais, essenciais na integração de HRTFs em sistemas VR, onde a precisão e a imersão são determinantes para a qualidade da experiência do utilizador.

2.4. Áudio Espacial em Unity, Android e VR

O campo das aplicações de áudio espacial em *smartphones* destaca-se pelo seu dinamismo, focando-se em experiências sonoras tridimensionais pioneiras que integram elementos como AR e rastreamento de cabeça, alinhadas com a personalização do som e a sua harmonização com o ambiente do utilizador. Apesar dos progressos alcançados, subsistem desafios, entre os quais se inclui a exigência de competências avançadas em programação e a imprescindível otimização para sistemas operativos complexos, como o Android, destacando-se assim o considerável potencial de crescimento deste setor e a possibilidade de aprimorar a acessibilidade, bem como de diversificar as experiências auditivas disponíveis, o que representa uma abertura para novas formas de interação com tecnologias móveis.

A pesquisa de Sefercioğlu e Köse (2021) sublinha a crescente demanda por métodos e algoritmos eficazes em aplicações multimédia para dispositivos móveis, especialmente em VR, realçando o papel crucial do áudio na conceção de jogos móveis. O estudo focado num jogo de VR móvel com intensa componente auditiva, avaliado por 10 utilizadores, revelou que a integração de elementos sonoros pode não só intensificar a imersão, mas também alargar o alcance a uma audiência mais vasta. Esta tendência ganhou suporte com dispositivos que transformam *smartphones* em HMDs. A simplicidade de interação, caracterizada por mecanismos como interruptores deslizantes e foco fixo, mostrou-se particularmente eficaz em aplicações centradas no áudio.

No que diz respeito à qualidade sonora em dispositivos móveis, Uther e Banks (2017) apontam que esta é influenciada tanto pelo tipo de dispositivo utilizado como pelo contexto em que é usado. A diversidade de dispositivos e sistemas operativos nas plataformas Android constitui um desafio crucial para o desenvolvimento de aplicações com áudio espacial, exigindo que a otimização da qualidade auditiva seja adaptativa, levando em conta tanto as características do dispositivo como o contexto específico de utilização (Uther & Banks, p. 4). A utilização de bibliotecas especializadas, como o Google Resonance Audio, é essencial para superar os desafios da diversidade de dispositivos, permitindo a criação de experiências auditivas imersivas e precisas em diferentes plataformas (Binelli et al., 2018, p. 3). Além disso, a escolha de auscultadores como meio de reprodução sonora contribui para uma maior consistência na qualidade do áudio.

Memoli (2020) enfatiza como as estratégias de VAS redefinem a interação entre som e espaço, destacando os desafios na implementação em ambientes de VR e AR. A decisão do *designer* sobre o método de reprodução sonora, orientada por critérios qualitativos, é

complexificada por variáveis acústicas como eco e reverberação, afetando a percepção espacial do som (p. 7). A ausência de dados quantitativos para fundamentar esta escolha e os atrasos de processamento desestabilizam a sincronização entre estímulos visuais e auditivos em VR.

O conceito de VAS, cada vez mais relevante no meio acadêmico e prático, especialmente em aplicações de VR e AR, oferece oportunidades para redefinir a relação entre som e espaço, anteriormente limitada por constrangimentos históricos e tecnológicos. A simulação de áudio 3D no geral tem ganhado importância, com motores de jogo como a UE 4 a emergirem como plataformas chave, onde, apesar de limitações para simulações de alta-fidelidade, a integração de *middleware* especializado como o Wwise, conforme destacado por Firat, Maffei e Masullo (2022), pode levar a avanços significativos.

O Unity destaca-se neste contexto, oferecendo um leque variado de ferramentas e componentes desenhados especificamente para a construção de cenários sonoros tridimensionais. Nuryim et al. (2020) destacam que a implementação eficaz de VR no Unity, enriquecida com colisores e controladores disponíveis no Unity 3D, potencia a autonomia e interatividade, contribuindo para uma experiência auditiva mais cativante e imersiva (p. 540-541). No Unity, a integração de *middleware* de áudio como o FMOD, exemplificada por Holtum (2020) com a manipulação de parâmetros de áudio em tempo real através de um controlador PS4, não só melhora a experiência auditiva, mas também adiciona uma camada extra de interatividade e imersão sonora.

Na sua análise para a TechCrunch, Kamps (2023) observa que o mercado de VR, abrangendo tanto sistemas avançados como VR móvel, tem enfrentado uma diminuição do seu impacto, atribuindo essa redução à ausência de uma aplicação revolucionária e ao interesse crescente na AR, apesar de anteriormente ser considerada uma tecnologia promissora para experiências imersivas. O declínio da VR móvel, inicialmente inovadora, resulta de vários fatores interconectados, incluindo o desinteresse de empresas líderes como a Google, que se afastaram da tecnologia devido ao seu sucesso limitado e à resistência de consumidores e desenvolvedores em usar telefones para VR (Amadeo, 2021), bem como pela sua obsolescência diante da preferência da indústria pela AR. A resistência dos utilizadores ao uso de *smartphones* em VR, apesar da acessibilidade financeira proporcionada por soluções como o Google Cardboard, deve-se à complexidade de montar e desmontar o smartphone no HMD, ao consumo elevado de bateria e à inconveniência de uso dos comandos, fatores que comprometem a funcionalidade do dispositivo e inibem a adoção em larga escala (Hackaday, 2019).

A tecnologia de detecção de movimento em sistemas de VR móvel, restrita a experiências sentadas e sem 6dof, juntamente com a incapacidade de integrar controladores externos, diminuiu a imersão e a qualidade da experiência do utilizador. A introdução de dispositivos mais avançados, como o Oculus Quest de 2019, autónomo e sem fios, destacou ainda mais as limitações dos sistemas baseados em smartphones, que não conseguiram competir com a intensidade das experiências oferecidas por sistemas mais robustos como o Oculus Rift ou o HTC Vive, reduzindo o apelo da VR móvel (The Verge, 2019).

A obsolescência da VR móvel resulta de uma combinação de fatores como limitações técnicas, avanços em tecnologias concorrentes, desinteresse de grandes empresas e a transição para a AR. Apesar disso, o seu legado permanece como um marco inicial no desenvolvimento de HMDs de VR mais sofisticados disponíveis hoje. Porém, as experiências auditivas virtuais, como os VAS, ainda apresentam um potencial subaproveitado em *smartphones*, pois podem dispensar o uso de HMD e rastreamento da cabeça, abrindo caminho para novas formas de interação sonora e imersão sem a necessidade de *hardware* adicional complexo.

2.5. Aplicações de Áudio Espacial

No contexto dos desafios e oportunidades identificados, efetuou-se um levantamento de aplicações e projetos que incidem sobre o domínio do áudio espacial. A análise centrou-se primordialmente em aplicações gratuitas para iOS e em iniciativas em plataformas como Unity e WebVR. Contudo, a escassez de literatura académica sobre o tema limitou o escopo da revisão a um exame funcional, excluindo avaliações técnicas tanto para as aplicações móveis como para as plataformas de desenvolvimento mencionadas, sendo que, nos casos em que existe literatura, muitas vezes não se tem acesso às plataformas em questão.

A SpatialBliss, desenvolvida para iOS, oferece paisagens sonoras pré-definidas ajustáveis através de uma interface bidimensional, utilizando OBA para permitir a movimentação de fontes sonoras nos eixos X e Y, influenciando a direccionalidade do som percebido. Contudo, a ausência do eixo Z impede a regulação da profundidade sonora. A aplicação permite a adição de orbes de som a partir de um conjunto pré-existente de ruídos, apesar da impossibilidade de importar sons externos. A seleção existente é caracterizada pelo seu cariz relaxante, imitando com frequência sons naturais, tais como chuva, ruído branco ou sons ambientes.

A WalkThruMusic Experience, desenvolvida pela Music6D inc., empresa constituída por uma combinação de músicos, tecnólogos e engenheiros de gravação, configura-se como

uma abordagem inovadora à experiência sonora tridimensional através do recurso a técnicas avançadas de captação e renderização sonora em AR para iOS, visando a criação de experiências de escuta com 6dof. Utilizando a tecnologia patenteada WalkThruMusic™, esta aplicação introduz uma dimensão espacial à audição, proporcionando aos utilizadores a possibilidade de navegarem fisicamente através do VAS, posicionando-se entre os instrumentos em execução. A aplicação, fundamentada no ARKit da Apple, transforma o ambiente circundante do utilizador numa espécie de palco musical, no qual é possível explorar a música através do movimento. Adicionalmente, é providenciado um modo VR, permitindo uma exploração mais delicada através dos movimentos dos dedos. É recomendado o uso de auscultadores para maximizar a experiência de audição binaural. Inclui ainda uma biblioteca musical diversificada, de Nine Inch Nails a Beethoven, e emprega tecnologia GPS para acompanhar a movimentação do utilizador, proporcionando uma experiência sonora mais dinâmica. Portanto, a WalkThruMusic Experience combina tecnologias inovadoras com novas abordagens à produção musical, para criar uma experiência sonora verdadeiramente imersiva, redefinindo a interação do utilizador com a música.

A Odio, outra aplicação em análise para iOS, partilha semelhanças com a SpatialBliss no que respeita ao controlo do som em ambiente tridimensional através do uso de OBA. Contudo, a Odio limita o controlo áudio às direções frontal, traseira, esquerda e direita, excluindo a dimensão vertical. A aplicação permite aos utilizadores escolher e posicionar fontes sonoras de uma lista pré-definida, facilitando a criação de uma paisagem sonora personalizada. Estas fontes sonoras podem variar desde fundos sonoros até elementos que podem ser localizados em posições específicas. A Odio destaca-se ainda pelo recurso ao rastreamento de cabeça, disponível para alguns modelos de auscultadores, permitindo a adaptação da experiência sonora à orientação da cabeça do utilizador. Apesar de o armazenamento de sessões ser limitado aos sons disponíveis na aplicação, este recurso possibilita a revisitação de paisagens sonoras previamente criadas.

A PlugSonic Soundscape, destacada componente da suite PlugSonic, emerge do trabalho colaborativo entre investigadores nas áreas de tecnologia e engenharia acústica, propondo-se como uma solução integrada de plataformas web e móveis destinadas à manipulação de amostras sonoras e aplicação de efeitos de áudio (PlugSonic Sample), bem como à criação e fruição de paisagens sonoras e narrativas sonoras dinâmicas e navegáveis. Utilizando a Web Audio API para processamento de áudio e o 3D Tune-In Toolkit para renderização binaural, esta aplicação oferece uma imersão aprofundada em soundscapes através

do espaço físico, beneficiando da integração com o ARKit da Apple. O objetivo fundamental do PlugSonic radica na democratização do acesso à tecnologia de áudio espacial, proporcionando um amplo conjunto de ferramentas que dispensam a necessidade de dispositivos específicos, software/hardware externo, especialização técnica ou desenvolvimento à medida, sublinhando a capacidade desta tecnologia em se tornar acessível e compreensível para todos, visando a sua aplicação em contextos tanto criativos quanto investigativos, e redefinindo a interação dos utilizadores com o áudio em uma vasta gama de cenários, desde performances musicais imersivas até experiências de realidade aumentada. Em particular, a PlugSonic Soundscape sobressai pela sua funcionalidade de curadoria de soundscapes interativos, habilitando os utilizadores a configurarem minuciosamente as fontes sonoras em termos de posição, loop, alcance e interações com o ouvinte, além de permitir a exportação dos metadados da paisagem sonora para facilitar a sua partilha ou utilização em diversos contextos e plataformas. A inclusão de um modo de exploração através de dispositivos móveis, tirando partido das funcionalidades do ARKit para uma navegação intuitiva pelo espaço físico, reflete a visão ambiciosa dos seus desenvolvedores em integrar a tecnologia de áudio espacial nas práticas diárias dos utilizadores (Comunità, Gerino, & Picinali, 2022).

O projeto *3D Sound Virtual Environment* de WingyiC (2021), a aplicação *Trajectoires* de Garcia et al. (2016) e o projeto *aframe-soundscape* de Milena Zuccarelli (2021) exemplificam a aplicação prática de áudio espacial. O primeiro simula um ambiente urbano em Unity, incorporando elementos como um café, um parque e um supermercado para criar uma experiência sonora tridimensional. O segundo oferece aos compositores uma interface móvel para desenhar e editar trajetórias de fontes sonoras em tempo real, utilizando o protocolo OSC. O último, desenvolvido em WebVR, ativa sons pré-definidos mediante a interação do utilizador com formas geométricas, seja através do rato ou de dispositivos que transformam smartphones em HMDs.

SoundScaper de Laurence Cliffe (2021) propõe uma aplicação móvel em AR que permitiria aos utilizadores criar paisagens sonoras binaurais mapeadas em espaços reais. Contudo, o projeto ainda é meramente concetual, sem progresso concreto no GitHub.

O estudo de Ryskeldiev et al. (2008), focado em VAS em dispositivos iOS, serviu como inspiração para a necessidade de desenvolver soluções similares para o sistema Android, mais prevalente no mercado pelo seu preço. Embora o artigo não aborde explicitamente desafios como o acesso a ferramentas ou a exigência de habilidades avançadas de programação, estas questões emergem implicitamente. O trabalho sugere uma exploração mais aprofundada de

VAS em dispositivos móveis, desafio que o presente estudo visa abordar. Contudo, o artigo tem limitações, incluindo a sua brevidade e a falta de acesso à plataforma desenvolvida.

Takahashi e Yamamoto (2010) desenvolveram um sistema audiovisual 3D que integra dispositivos móveis, como smartphones, a PCs numa rede local. Através de um servidor central que simula um ambiente virtual e transmite os dados aos dispositivos conectados, estes ajustam em tempo real a distância e o volume do som, proporcionando uma experiência imersiva com áudio espacial. Este estudo é relevante como exemplo de aplicação pioneira de áudio espacial em ambientes virtuais através de dispositivos móveis acessíveis.

Uma contribuição notável em dispositivos móveis na área de áudio espacial foi feita por Etgar et al. (2013), que desenvolveram uma aplicação Android que oferece uma experiência imersiva em VAS. Utilizando tecnologia de som *surround* da Philips, a aplicação permite a manipulação de propriedades da sala virtual, como localização do subwoofer e iluminação. Tecnicamente robusta, a aplicação emprega OpenGL ES para renderização de gráficos 3D e integra sensores de acelerómetro para movimentos dinâmicos da câmara. Além disso, segue diretrizes para a configuração de uma sala de áudio 5.1. Contudo, enfrenta desafios de desempenho, devido à alta carga de recursos para renderização e processamento de áudio. A UI inclui um reprodutor de música da Philips com decodificador MPEG Surround.

Um outro exemplo relevante no domínio da geração de VAS é o estudo conduzido por Finney e Janer (2010). O modelo proposto pelos autores recorre a bases de dados sonoras não estruturadas e utiliza síntese concatenativa, um método que combina segmentos de áudio pré-gravados para criar ambientes sonoros, para a conceção de VAS. A metodologia sublinha a importância de uma estratégia de classificação para paisagens e fontes sonoras, fundamentada na taxonomia referencial de R. Murray Schafer. Uma avaliação subjetiva do modelo aponta para uma preferência geral pelas paisagens sonoras geradas, em detrimento de gravações reais, particularmente no que concerne aos aspetos de imersão e presença. Este estudo constitui um avanço significativo na área, fornecendo contributos valiosos para o desenvolvimento de ferramentas autónomas de geração de VAS (Finney & Janer, 2010, pp. 1-4).

A análise deste conjunto de projetos e estudos no âmbito do áudio espacial em dispositivos móveis revela um panorama em constante evolução, onde a inovação e a experimentação definem a trajetória do setor. As diversas abordagens, desde a criação de ambientes sonoros imersivos em AR até o desenvolvimento de sistemas integrados de som em redes locais, demonstram o vasto potencial e as oportunidades existentes neste campo. Contudo, também se evidenciam desafios, como a otimização de desempenho e a estabilidade do som,

que necessitam ser superados para maximizar a eficácia e a acessibilidade destas tecnologias. Este panorama reflete não só a complexidade técnica envolvida na criação de experiências sonoras ricas e envolventes, mas também a necessidade de continuar a explorar e a expandir as fronteiras da inovação no áudio espacial, visando um maior impacto e inclusão no contexto tecnológico contemporâneo.

3. Perspetivas Filosóficas sobre Som e Virtualidade

Nesta secção, examinam-se as implicações filosóficas e ontológicas emergentes da simulação de espacialização sonora e da conceção de VAS. A virtualidade é analisada à luz da teoria organizacional, com o intuito de compreender como as suas propriedades influenciam e moldam a experiência sonora no contexto digital.

3.1. Teorias da Natureza do Som

A omnipresença e complexidade do som, mesmo em ambientes aparentemente silenciosos, foi realçada por John Cage na sua experiência numa câmara anecoica, onde o conceito de silêncio absoluto se revelou ilusório (Campbell, 2017, p. 1). Esta compreensão sublinha a dificuldade de controlar o som por completo, um aspeto crucial no desenvolvimento de VAS. A teoria do plano de imanência de Deleuze e Guattari (Campbell, 2017, p. 5) oferece uma visão teórica importante nesta área, considerando o som como uma entidade autónoma, independente de estruturas ou sistemas externos. Esta perspetiva é reforçada por fenómenos como o som ilusório, o som lembrado ou imaginado, ou o zumbido típico do *tinnitus*, onde o som é percebido sem uma fonte física nem ondas sonoras (Garner, 2017, pp. 61-63), desafiando conceitos tradicionais de localização e origem sonora. Embora existam várias teorias, como as teorias do som Distais, Proximais, Mediais e *Aspatial*, persistem dúvidas sobre a abrangência necessária na definição do som, particularmente se todos os elementos do processo auditivo devem ser incluídos.

As teorias que consideram o som como um objeto sugerem que o som é uma entidade espacial ligada a um objeto específico. Por exemplo, o latido de um cão não é apenas um som, mas está intrinsecamente ligado ao cão como objeto. Estas perspetivas argumentam que o objeto é tanto o ‘o quê’ quanto o ‘onde’ do som, ligando a noção de som como objeto às Teorias Distais, que localizam o som na fonte (Garner, 2017, p. 50).

As teorias do som como evento, por sua vez, identificam o som como resultado da interação entre objetos físicos. Nesta visão, o som não é o cão, mas sim o latido, e está localizado em torno do objeto, em vez de nele. Estas teorias diferem ligeiramente das teorias do som como objeto ao posicionar o som em torno do objeto-fonte (p. 50).

Uma terceira perspetiva combina as anteriores, sugerindo que qualquer som ao qual se presta atenção está inerentemente associado tanto a um objeto quanto a um evento. Estas teorias sugerem que as leis da física insistem numa relação causal precisa entre as propriedades físicas

do objeto e do evento, de um lado, e as propriedades das ondas sonoras resultantes, do outro (p. 51). Segundo as Teorias Distais, o som é posicionado na sua fonte, a origem das vibrações sonoras, estando intrinsecamente ligado ao objeto ou evento que o produz.

Já as Teorias Proximais posicionam o som no local onde o ouvinte se encontra, argumentando que o som só pode ser ouvido no ouvido do ouvinte. De acordo com estas perspectivas, a percepção humana gera uma ilusão de localização, processando a onda sonora para determinar o seu ponto de origem. Estas teorias sugerem que o som é a audição de uma onda sonora no ponto de receção ou audição (p. 52).

Por outro lado, as Teorias Mediais colocam o som no espaço entre a fonte e o ouvinte. Estas teorias são mais amplamente aceites na comunidade académica e sugerem que o som é uma onda sonora que se propaga através de um meio, como o ar. As teorias sugerem que o som é uma propriedade de um meio acústico, que pode ser o ar ou qualquer outro meio que permita a propagação de ondas sonoras (p. 52).

Para além destas teorias que tentam localizar o som em termos espaciais, existem também as Teorias *Aspatial*, que argumentam que o som não ocupa qualquer localização dentro do espaço físico, estando efetivamente em lugar nenhum. Estas teorias desafiam as noções convencionais de espaço e tempo, sugerindo que o som pode existir num estado que transcende as coordenadas espaciais. Influenciadas por conceitos filosóficos que exploram mundos sem espaço, onde apenas o som poderia existir, o som é visto mais como um processo do que como um objeto, o que poderia ter implicações significativas para a compreensão da natureza do som em ambientes virtuais (p. 54).

A fenomenologia do som, ou abordagem ecológica, aborda o som de forma abrangente, integrando a fonte distal, a transmissão medial e a receção proximal (Garner, 2017, p. 55). Nesta visão holística, o som é visto como um fenómeno complexo e contínuo que transcende categorizações rígidas, fazendo parte de um sistema mais amplo que engloba tanto a sua fonte e propagação quanto a experiência do ouvinte, procurando conciliar diferentes teorias sobre a sua natureza e localização. Esta abordagem, alinhando-se com conceitos como o plano de imanência, destaca a complexidade e a interconexão da experiência sonora, desafiando a ideia de que uma única teoria pode capturar completamente a essência ou controlar o fenómeno do som. Contudo, esta abordagem suscita dúvidas sobre a definição exata de ‘som’, questionando a distinção entre as diversas fases desde a sua origem até à percepção. A perspectiva ecológica ilustra como é possível que duas pessoas, ao escutarem a mesma onda sonora ou

soundscape, ou mesmo um indivíduo em audições sucessivas, relatem experiências diferenciadas.

Ao considerar a complexidade dos *soundscapes*, tanto em ambientes reais quanto virtuais como nos VAS, percebe-se uma nova dimensão no entendimento do som, nos quais elementos socioculturais, estados psicológicos e o contexto acústico são integrados de forma intrínseca (Garner, 2017, p. 55). Esta complexidade do som, que reflete e é moldado por dinâmicas e interações que abrangem aspetos acústicos e cognitivos, sublinha a importância de uma abordagem que transcenda classificações rígidas e abarque um espectro mais amplo para a criação de simulações virtuais autênticas e imersivas. A eficácia dos VAS reside na compreensão de como o som, emitido por auscultadores, cria a ilusão de uma origem espacial tridimensional. O fenómeno em questão inevitavelmente levanta questões ontológicas sobre a espacialização sonora em ambientes virtuais.

A análise das teorias sobre a essência e localização do som revela uma complexidade que excede interpretações simplistas. A variedade dessas teorias, que vão desde a visão do som como intrinsecamente ligado a um objeto até à sua existência independente de localização espacial, evidencia a necessidade de um quadro teórico abrangente. A abordagem ecológica, procurando harmonizar diferentes perspetivas, destaca-se ao enfatizar a independência e as dinâmicas interativas do som, reconhecendo a sua complexidade e a riqueza da experiência sonora. Esta compreensão aprofundada do som como entidade autónoma e dinâmica abre o caminho para explorar a relação entre a perceção auditiva e a materialidade do som, o que permite aprofundar ainda mais a compreensão da natureza do som e da sua interação com o mundo físico.

3.2. O Materialismo Sonoro de Cox

O materialismo sonoro de Christoph Cox, tal como exposto no seu artigo *Beyond Representation and Signification: Toward a Sonic Materialism* (Cox, 2011), constitui uma rutura paradigmática na forma como o som é conceptualizado. Cox desloca o som do domínio da mera representação para o da materialidade objetiva, argumentando que o som é um evento dinâmico, um "tornar-se" (p. 13). Cox sugere que, ao contrário das abordagens fenomenológicas e estéticas centradas na experiência subjetiva, o som transcende o simbolismo, a perceção ou a abstração, manifestando-se como uma entidade tangível com presença física e impacto no ambiente.

A filosofia materialista sonora de Christoph Cox, que ressoa com as filosofias de Nietzsche e Deleuze pela ênfase na primazia do devir e da mudança, constitui um marco revolucionário no campo dos estudos sonoros. A teoria de Cox destaca o som como uma entidade física interativa com materialidade objetiva, transcendendo perspectivas antropocêntricas e a percepção subjetiva, ao enfatizar a sua influência e interação com o ambiente e os seres, além da sua dimensão auditiva ou cultural. Campbell (2020), com algumas reservas, realça a importância de abordar o som como uma realidade material dotada de propriedades objetivas, introduzindo um rigor acadêmico renovado na conceptualização do som e desafiando a sua limitação ao domínio da mera representação. A materialidade do som, tal como Cox a define, tem implicações práticas significativas que vão desde a criação de VAS em aplicações digitais até à engenharia acústica em espaços urbanos (Cox, 2011, p. 13).

No entanto, a abordagem de Cox, centrada na materialidade do som, é criticada por Campbell (2020) por negligenciar as dimensões subjetiva e social do som. Cox enfatiza excessivamente as características físicas, omitindo elementos sociais, políticos, estéticos e culturais importantes. Campbell defende uma visão pluralista do fenómeno sonoro, que integre não só a materialidade, mas também a subjetividade do ouvinte e a interdependência entre natureza, sociedade e subjetividade. Apesar das suas lacunas, o materialismo de Cox adquire importância ao dialogar com outras teorias, enriquecendo a compreensão do som. A necessidade de uma abordagem mais abrangente é reforçada pelo materialismo deleuziano, que oferece uma perspectiva holística e interconectada, considerando tanto variáveis subjetivas como sociais.

A compreensão da natureza multifacetada do som, conforme discutida acima, estabelece um contexto teórico robusto para o estudo subsequente na secção 3.4, dedicada ao conceito de virtualidade sonora de Grimshaw e Garner, onde as diversas teorias exploradas serão integradas para aprofundar a análise da fenomenologia sonora.

3.3. Realidade e Virtualidade Deleuzianas

A análise técnica do conceito de virtual tem sido tradicionalmente dominada por focos em tecnologias emergentes e nas suas aplicações práticas. Esta abordagem é exemplificada por Kim (2005), que define a VR como uma realidade sintetizada com um alto grau de realismo. Pimentel e Teixeira (1993) expandem esta visão, destacando a imersão e a interatividade como atributos essenciais da VR, posicionando-a como um ambiente dinâmico e adaptável ao utilizador, e Brooks (1999) leva esta discussão ainda mais longe, aludindo ao utilizador como

um participante ativo nesse universo virtual. Embora esta perspectiva técnica ofereça conclusões valiosas, particularmente no que toca à otimização da experiência do utilizador e à evolução das plataformas e ferramentas, Steuer (1992) argumenta que tal visão é limitada e apela a uma compreensão mais holística do virtual. Essa crítica ressalta a necessidade de transcender questões pragmáticas como funcionalidade, eficácia e escalabilidade, a fim de integrar uma análise mais abrangente que contemple tanto aspetos técnicos como implicações mais profundas.

David Chalmers desafia a conceção convencional da VR, frequentemente vista como mera ilusão. Na sua obra, Chalmers defende que a VR, apesar de distinta da realidade física, é uma realidade autónoma e que, segundo a fenomenologia da virtualidade, os utilizadores experientes tendem a percebê-la como um espaço tridimensional autêntico, e não como uma ilusão de um mundo físico. O autor defende que a VR, mais do que meramente funcionar como uma máquina de ilusão, ultrapassa esta faceta ao criar e possibilitar a perceção apropriada de mundos virtuais reais, desempenhando efetivamente o papel de uma ‘máquina de realidade’. (Chalmers, 2023, p. 218).

As realidades virtuais, diferenciando-se das não virtuais, consistem em objetos digitais constituídos por processos computacionais e bits. Estes objetos, como um sofá virtual, apesar de distintos dos objetos físicos feitos de átomos e *quarks*, são igualmente reais dentro do seu contexto, sendo a interação com estes padrões de bits uma forma de tangibilidade no ambiente digital. Assim, a VR não deve ser vista como uma 'realidade falsa', mas como uma 'realidade digital', onde tanto objetos virtuais quanto não virtuais coexistem com igual autenticidade e realidade (Chalmers, 2023, p. 30). Paralelamente, Castronova (2008) utiliza o termo ‘mundos sintéticos’ para enfatizar que os ambientes digitais, apesar de serem gerados por computador, detêm uma realidade própria, não menos real que o mundo físico, constituindo espaços regidos por regras e lógicas específicas que se diferenciam das normas do mundo tangível (p. 44).

Ainda, Mel Slater, psicólogo reconhecido no campo da VR, introduziu os conceitos de 'Ilusão de Lugar' e 'Ilusão de Plausibilidade'. A primeira descreve a sensação intensa de estar num local específico, apesar do conhecimento de que isso não corresponde à realidade física. A segunda refere-se à impressão de que eventos aparentemente reais estão a ocorrer, mesmo quando se tem consciência de que não é verdade. No entanto, Chalmers ressalta que, para utilizadores de VR experientes, estas experiências transcendem a mera ilusão, uma vez que eventos virtuais ocorrem efetivamente na VR e, portanto, a VR envolve perceções autênticas de uma VR concreta (Chalmers, 2023, p. 218). No caso específico dos VAS, esta abordagem

de Chalmers sugere que a espacialização virtual do som não é meramente uma representação ilusória, mas uma VR autêntica, onde a experiência auditiva em si ganha uma dimensão palpável e significativa, redefinindo a percepção de espaço e realidade sonora no ambiente virtual.

O conceito de imersão, conforme discutido por Carrilho (2018), é intrinsecamente ligado à evolução dos meios audiovisuais, particularmente na capacidade de criar experiências indistinguíveis da realidade. Esta ideia, alimentada pela crescente capacidade computacional, leva a questionar a distinção entre simulação e realidade, ressoando com a hipótese da simulação de Bostrom (2003), que sugere a possibilidade de a humanidade viver numa realidade simulada. Tal hipótese, embora fascinante, enfrenta desafios, como a questão da computação não ser uma representação completa do mundo físico (Penrose, 1994) e as implicações do princípio antrópico (Carroll, 2019). A virtualidade técnica, portanto, vai além de um debate tecnológico, contribuindo para discussões filosóficas profundas sobre a natureza da realidade e a percepção humana.

Como resultado das múltiplas dimensões desta temática, o interesse académico e profissional no 'virtual' originou duas análises principais: técnica e filosófica, metodologicamente distintas, mas complementares. Para explorar a fundo a virtualidade, é crucial ultrapassar as limitações tecnológicas, que se concentram nos aspetos práticos, e adotar uma perspetiva filosófica focada nas dimensões ontológicas e epistemológicas. Esta integração de abordagens enriquece a compreensão deste conceito, que assim transcende a ideia de uma simples simulação técnica ou realidade alternativa, estabelecendo-se como um domínio híbrido que combina técnica e filosofia, expandindo o seu impacto para além da arte e da experiência humana.

É crucial diferenciar a conceção tecnológica comum do virtual, geralmente ligada à tecnologia informática, da interpretação filosófica mais abstrata e profunda. Deleuze, figura proeminente da filosofia do século XX, propõe uma visão onde o virtual é um elemento constituinte da realidade, desafiando a noção tecnológica dum virtual distinto do real e inerentemente ligado à tecnologia informática (Garner, 2017, p. 36). Na visão de Deleuze, o virtual é entendido como um domínio ontológico repleto de possibilidades ainda não concretizadas, diferindo da interpretação instrumental que o limita a uma simples simulação ou alternativa à realidade (Deleuze, 2008; Linstead & Thanem, 2007, p. 11). No pensamento de Deleuze, o 'plano de imanência' é um espaço onde o virtual e o atual coexistem e se entrelaçam inseparavelmente, servindo como uma estrutura conceitual que facilita o processo de

'atualização', ou seja, a transição de potencialidades virtuais para a realidade concreta. Assim, a virtualidade deleuziana transcende a noção de uma realidade falsa, assumindo um caráter não ilusório e intrinsecamente criativo.

No contexto pré-socrático, já filósofos como Anaximandro, Heraclito e Parmênides indagaram sobre a existência e a natureza da realidade, lançando as bases para conceitos mais tarde desenvolvidos por Aristóteles. Anaximandro apresentou o '*ápeiron*' como um princípio originário indeterminado, possível precursor da noção de potencialidade infinita, enquanto Heraclito enfatizou a mudança constante, abordando a transição entre estados potenciais e atuais. Parmênides, ao distinguir entre o ser imutável e o mundo fenomênico em mutação, também aludiu indiretamente a estas ideias (Kirk, Raven & Schofield, 1983, p. 108, 116, 251). Aristóteles, posteriormente, aprofundou estas noções, diferenciando '*energeia*' – atualidade – de '*dynamis*' – potencialidade –, conceitos fundamentais para compreender a transição de estados de possibilidade para realização concreta, refletindo assim a influência duradoura do pensamento pré-socrático no desenvolvimento filosófico ocidental (Long, 1998). Na era contemporânea, além de Deleuze, outros filósofos influentes, tais como Bergson, Leibniz, Lévy e, em colaboração com Deleuze, Guattari corroboram este entendimento, explorando as nuances e implicações da virtualidade (Linstead & Thanem, 2007; Lévy, 1996).

O virtual para Lévy é reconhecido como uma realidade reconhecível e representável, com múltiplas manifestações, que, ao ser concebida como uma "entidade desterritorializada, [permite] o desprendimento do aqui e agora" (Lévy, 1996, p. 7). Um exemplo prático da virtualidade, conforme descrito por Lévy (1996), pode ser visto na experiência de uma chamada telefônica, representando um encontro virtual que ocorre num 'não lugar', um espaço não materializado onde a voz se separa do corpo que a emite, mas não em lugar nenhum (p. 14). Esta transição do real para o virtual possibilita um escape à mundanidade da realidade e permite a experiência da "unidade de tempo sem unidade de lugar" (p. 9). A perspectiva de Deleuze (2008) surge como uma resposta às postulações de Immanuel Kant acerca do tempo e do espaço. De acordo com a interpretação de Deleuze (2021), Kant argumentou que o tempo e o espaço constituem condições *a priori* da percepção, não tendo existência objetiva na realidade. Deleuze, no entanto, defende que tempo e espaço, em vez de estáticos ou imutáveis, são construções dinâmicas e relacionais, emergindo e transformando-se através das interações entre sujeitos e objetos (Deleuze, 2021, p. 177).

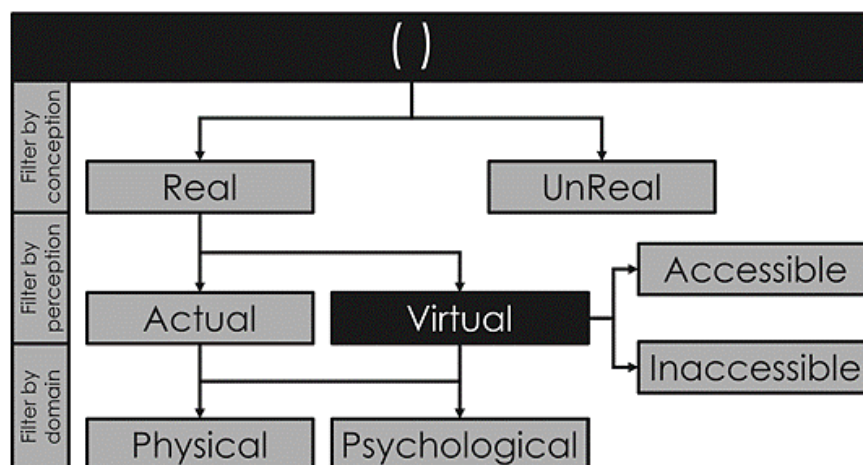


Figura 6: Taxonomia Organizacional-Virtual⁷

Deleuze (2008) define o virtual como um elemento intrínseco da realidade, permeando-a através de um princípio de conectividade e existindo até mesmo como pura visão, em contraste com o atual. Esta perspectiva, ilustrada na Figura 6, é descrita como uma matriz conceitual para a atualização das potencialidades virtuais, expandindo a compreensão da virtualidade além da mera simulação técnica e posicionando-a como um domínio fértil para o surgimento de novas realidades e percepções (Garner, 2017, p. 36). O virtual, conforme conceptualizado por Deleuze (1996) e Lévy (1996), é um universo de possibilidades, um campo onde o potencial para inovação e criação se manifesta, transformando a realidade para além dos limites do tempo real e permitindo que os objetos sejam vistos como potências a serem realizadas (Linstead & Thanem, 2007, p. 11; Lévy, 1996, p. 5). A virtualização é vista não apenas como uma solução para problemas existentes, mas como um componente essencial para abordar novos desafios, integrando o real e o virtual numa dinâmica contínua de oposição e complementaridade. Para Deleuze, o virtual é uma realidade autônoma, imbuída nos objetos reais, cujas potencialidades, ao se atualizarem, propiciam um devir que transfigura a realidade, impulsionando novidade, mudança, diferença e multiplicidade.

A dimensão virtual, profundamente interligada ao plano de imanência de Deleuze (1996), é vista como uma superfície inesgotável que forma a base de todos os processos vitais e cognitivos, fornecendo as condições necessárias para o nascimento de experiências e pensamentos. Este plano, apesar de sua fundamental importância, permanece essencialmente invisível e inacessível à percepção e experiência diretas, operando como uma estrutura subjacente que molda a realidade sem se manifestar explicitamente nela (p. 5).

⁷ Esta figura ilustra uma organização sistemática do virtual com base em teoria organizacional. Adaptado de Garner, T. (2017). *Echoes Of Other Worlds: Sound In Virtual Reality*, p. 34.

No âmbito do plano de imanência, o virtual emerge não como um elemento isolado, mas como parte integral de um tecido interconectado com as singularidades que o percorrem e definem. Esta noção de singularidade é crucial para a compreensão da transição do virtual para o atual, onde o virtual, habitando o domínio das possibilidades, permite sua concretização no atual, este último caracterizando-se como uma entidade individualizada e concreta (p. 5). Esta interação contínua entre o virtual e o atual cria um sistema dinâmico e interdependente. No seio deste sistema, o atual não apenas revela potencialidades ainda não exploradas, mas também remete ao virtual como sua origem, um estado de possibilidade que está constantemente a materializar-se (p. 10). Essa dinâmica reflete um processo de constante evolução e transformação, onde o virtual e o atual se influenciam mutuamente. Esta relação simbiótica sublinha a natureza fluida da realidade, onde o virtual, longe de ser uma abstração distante, é um componente ativo e fundamental na geração de novas experiências.

A noção de tempo de Deleuze diverge da visão tradicional de uma sequência linear, propondo em vez disso uma perspectiva que se caracteriza por um “emaranhado ucrónico de momentos passados e futuros” (Ott, 2017, p. 101). Nesta perspectiva, o tempo é visto como uma rede interligada de momentos simultâneos. A distinção entre o virtual e o atual revela-se como a cisão mais fundamental do Tempo, à medida que este avança diferenciando-se segundo duas grandes vias: fazer passar o presente e conservar o passado (Deleuze, 1996, p. 8). Os objetos residem num campo onde o passado e o futuro se entrelaçam, possibilitando a reativação de potencialidades passadas e a antecipação do futuro, o que estabelece uma dinâmica crucial entre o real e o virtual (p. 5).

3.4. Arte e Virtualidade: Reflexões

A arte e o virtual são temas que se cruzam na filosofia e na criação artística. Em *The Virtual as Precondition for Artistic Creation*, Ott (2019) argumenta precisamente que as práticas artísticas contemporâneas vão além da representação, criando realidades na interseção entre o virtual deleuziano e o real, um processo que a autora denomina "articulações ucrónicas" (p. 97). Inspirando-se em Deleuze, considera-se que a arte é uma expressão do virtual deleuziano, uma dimensão da realidade que é ideal, mas não abstrata, e que vai além da mera representação do real, explorando e alargando as fronteiras do virtual.

A criação artística é, portanto, uma expressão do virtual e uma exploração dos limites do real, trazendo à vida o que antes estava ausente e imerso no virtual. A arte moderna, em particular, tende a abandonar o domínio da representação para se tornar uma 'experiência', um

empirismo transcendental ou uma ciência do sensível (p. 63). Da mesma forma que o virtual se atualiza no atual, a arte também pode ser vista como um processo de dar forma à imaginação e às possibilidades latentes, transformando o invisível em visível, o ausente em presente e o intangível em tangível.

A arte empodera o artista a navegar e expressar o virtual, ultrapassando a simples imitação ou reprodução para desafiar e redefinir conceitos estabelecidos, criando realidades e perspectivas novas. Este processo artístico, ao transformar o potencial em realidade concreta, questiona as noções de 'original' e 'cópia' e desafia a ideia de uma posição privilegiada na percepção ou compreensão da realidade (Deleuze, 2008, p. 74).

As práticas artísticas contemporâneas, por meio da utilização de meios digitais, não se limitam a combinar sinais estéticos para expressões temporais heterogêneas futuristas, mas efetivamente produzem articulações audiovisuais que criam ou diversificam o tempo. Estas práticas evidenciam o caráter temporal e metamórfico da realidade, expandindo, consequentemente, a percepção do tempo (Ott, 2019, p. 95). Adicionalmente, estes processos não apenas combinam situações temporais heterogêneas para criar uma síntese do passado e do futuro, mas na verdade produzem imagens da realidade que criam ou diversificam o tempo (p. 97). Tais abordagens, *i.e.* a experiência cinematográfica, proporcionam uma sequência de imagens e sons que remetem para eventos imaginados, passados ou futuros, ilustrando a transição contínua entre o real e o virtual através do intercâmbio constante entre o atual e o virtual, que cria uma condição que torna estes dois elementos intercambiáveis e eventualmente indistinguíveis, refletindo a natureza multifacetada da realidade (p. 105).

A análise de Hasty sobre a intersecção entre som e virtualidade propõe uma nova interpretação da música no contexto deleuziano, enfatizando que a sua resistência à representação e natureza não-denotativa constituem um domínio singular de 'sonorização do virtual' (Hasty, 2010, p. 53). A música estabelece-se como um desafio intelectual, caracterizada simultaneamente como indomável e incontável, e, ainda assim, essencial para fomentar o pensamento criativo. Hasty argumenta que, no contexto temporal da música, a repetição não constitui um retorno ao mesmo, mas sim uma renovação contínua que propicia a emergência do novo e do inesperado, contrastando com a visão tradicional de que a repetição musical representa a reiteração de um elemento idêntico. Em vez disso, no contexto deleuziano, a repetição na música é vista como um processo dinâmico e criativo, onde o retorno a um tema ou motivo musical não é simplesmente uma repetição, mas uma reinvenção e uma oportunidade para a expressão de novas potencialidades musicais (Hasty, 2010, p. 54).

Transcendendo a sua função convencional enquanto instrumentos de expressão, a música e a arte sonora convertem-se em veículos para a exploração do virtual, um espaço onde as potencialidades sonoras latentes coexistem com o real, emergindo assim como agentes de experimentação e inovação, que, ao superarem o mero reflexo da realidade, atuam na criação de espaços e experiências que subvertem as percepções habituais. Também o som em ambientes virtuais ultrapassa a função de simular realidades existentes, tornando-se um agente na criação de novas realidades e percepções. Esta dinâmica, que entrelaça repetição, inovação, diferença, potencialidade e concretização, reflete a visão deleuziana do virtual, não como uma cópia do real, mas como um campo fértil de possibilidades e diferenciação.

Na realidade, o espaço para reflexão e simbolização cultural tem-se tornado mais diversificado, abrindo caminho para um equilíbrio entre a aceitação da sua suposta pré-existência e o anseio contemporâneo pela sua atualização e descoberta, ampliando assim as dimensões da realidade (Ott, 2019, p. 98). A arte contemporânea, profundamente moldada pela internet e pelos dispositivos móveis, não só revela as implicações na interação entre o mundo físico e o virtual, mas também, através da arte digital, acessível a qualquer momento e em qualquer lugar, desafia a distinção entre a existência concreta e a potencial, alterando a essência do objeto artístico que se liberta de uma ancoragem fixa no espaço e no tempo. A transição para a arte digital, inicialmente marcada por resistência, consolidou-se no final do século XX, dando origem a novas formas como o mapeamento de projeção e as criações de rede colaborativas, expandindo assim o espectro da expressão artística (Sales, 2019, p. 4-5). Sales (2019) aborda como a VR é utilizada por artistas contemporâneos como Marina Abramovic, Olafur Eliasson e Jeff Koons para desafiar as noções tradicionais de espaço, tempo e interatividade, permitindo uma imersão completa do utilizador em realidades tridimensionais geradas por computador (p. 5-6). A autora argumenta que a linguagem digital expande e promove processos de hibridização e contaminação entre diferentes meios criativos e linguagens, desafiando a linha ténue que separa a existência concreta da potencial (p. 8).

A arte sonora em ambientes virtuais, equiparada aos instrumentos musicais tradicionais, emerge como uma plataforma potente para a expressão artística. Tanaka (2006) realça que a música, independentemente de ser digital ou acústica, é intrinsecamente interativa, e que a interação observada na música pode contribuir significativamente para o *design* de novas tecnologias. Esta perspetiva ressalta o potencial da música digital em sistemas de VR e AR para proporcionar experiências imersivas e interativas. Os sistemas de música digital, ao serem comparados com instrumentos acústicos, não são apenas uma extensão tecnológica, mas

também uma nova forma de expressão artística, onde a riqueza da dinâmica criada no sistema utilizador-instrumento define a profundidade da experiência musical (Tanaka, 2006).

A transição da arte para o espaço virtual revela implicações significativas não só para a estética, mas também para a esfera política. Os objetos artísticos, antes limitados às circunstâncias físicas da sua criação e exibição, adquirem uma nova forma como dados desterritorializados, suscetíveis a reprodução infinita (Stiegler, 2014, p. 34). Este reenquadramento não só redimensiona o significado intrínseco da obra de arte, mas também tem um impacto subtil, porém poderoso, sobre as dinâmicas da memória coletiva e individual. As tecnologias de retenção terciária, que permitem um armazenamento externalizado da memória, influenciam tanto o engajamento estético quanto as formas emergentes de participação política (Stiegler, 2014, p. 34). A VR e a AR possuem o potencial de abordar questões políticas e sociais, estendendo o poder da arte em desafiar e subverter conceitos e posições estabelecidas (Modena et al., 2021, p. 2). A imersividade e a presença proporcionadas pela VR e pela AR podem servir como meios eficazes para questionar e reconfigurar as relações de poder e as estruturas sociais, tornando-as ferramentas não apenas para a expressão artística, mas também para o ativismo e a crítica social. Deste modo, o virtual torna-se um palco onde tanto a experiência estética como a ação política podem ser reconsideradas e reconfiguradas.

3.5. Política e Virtualidade: Reflexões

Na era atual, a interseção entre o digital, o virtual e a política é cada vez mais pronunciada, refletindo uma transformação fundamental na maneira como as dinâmicas políticas e sociais se desenvolvem e interagem. O espaço público das cidades ocidentais encontra-se em crise há bastante tempo, uma situação exacerbada por tendências privatizantes e mercantilizantes, pelo medo crescente do crime, pela desconfiança do outro, pelo confinamento dos locais de consumo em centros comerciais, e pela segmentação, redução e atomização dos espaços residenciais nos contextos urbanos e suburbanos (Graham & Auguri, 1997, p. 3). Na cidade pós-moderna, o espaço é simultaneamente um recurso e uma mercadoria, e verifica-se a necessidade de projetar espaços urbanos como produtos comerciais para atrair investimentos e turismo (pp. 6-7). Como consequência, assiste-se à emergência de ‘espaços públicos eletrónicos’ ou ‘ciberespaços públicos’, que complementam ou substituem os espaços públicos tradicionais da cidade, agora enfraquecidos (p. 1).

O mundo digital emerge então como um palco para a política pós-moderna, onde a ação coletiva se desvincula das restrições geográficas e temporais. Contudo, esta liberdade

aparente é paradoxal, visto que a digitalização política se encontra sujeita à lógica capitalista que predomina no ciberespaço, favorecendo a monetização da atenção e a conformação de bolhas informacionais (Pariser, 2011, p. 47). O capitalismo digital, ao remodelar as dinâmicas de poder na esfera pública, redefine também as noções de 'público' e 'privado', dado que as plataformas digitais influenciam profundamente a interação social e a disseminação de informações, estabelecendo novos paradigmas de acesso, controlo e monetização tanto da informação quanto da vida privada, e alterando a maneira como a informação circula e como as fronteiras entre o espaço pessoal e o coletivo são percebidas e geridas. Papacharissi (2002) destaca a complexidade adicional na esfera pública digital, emergente da dualidade entre o acesso facilitado à informação e a consequente fragmentação do discurso, postulando que esta acessibilidade pode simultaneamente incrementar a participação democrática e impor limitações devido à fragmentação e polarização dos diálogos (pp. 2-3).

A crescente influência do digital na forma como a vida é experienciada e a sua influência realça-se não só no caso das redes sociais digitais mas também nos domínios dos videojogos e simulações, onde a imersão e interatividade intensificam a fusão entre realidade e virtualidade, um fenómeno que ganha uma nova dimensão com o advento da VR e do multiverso, profundamente alterando a percepção e interação humanas com o mundo. A obra *Exodus to the Virtual World* de Edward Castronova (2008) aborda de forma detalhada o impacto crescente dos mundos sintéticos na experiência humana, tanto a nível empírico como político. Os jogos em mundos virtuais atraem não apenas jovens, mas também uma crescente audiência adulta, uma tendência que se tem intensificado nos últimos anos (p. 32) – o tempo e a atenção migraram do concreto para o virtual (p. 10). Com base nisso, o autor introduz o conceito de ‘evento atmosférico’ para descrever como os mundos sintéticos alteram significativamente as expectativas e comportamentos humanos, uma mudança que transcende a interação e percepção individuais, estendendo-se a implicações políticas e sociais, sugerindo que a crescente interação nesses espaços poderá influenciar progressivamente as normas e comportamentos no mundo concreto, e especificamente decisões políticas, que o autor acredita que terão de ser cada vez mais baseadas no conceito de ‘diversão’ (p. 14).

A teoria da migração (Bogue, 1969) oferece um quadro teórico para entender a transição entre dois espaços, podendo englobar também a migração para o plano virtual. Perante a hostilidade crescente do mundo físico, que se revela em fenómenos como o despovoamento, as calamidades, o desemprego e o pessimismo quanto ao futuro, bem como a ameaça iminente do fim da vida terrestre por uma catástrofe ambiental provocada pela produção humana

desenfreada, que acarreta o esgotamento dos recursos naturais e a destruição da atmosfera, a fuga para o virtual surge como uma inevitabilidade. Além destes fatores de expulsão que motivam a migração, existem ainda duas particularidades da migração virtual: os custos de mudança para um mundo virtual são insignificantes e a decisão é facilmente reversível, o que não acontece na migração física. Num contexto político de carência de alternativas, onde a resignação e o cinismo parecem ser as únicas atitudes viáveis, o virtual emerge como uma opção plausível e apelativa para quem procura o escapismo ou a ação política. Os mundos virtuais podem ser um espaço de fuga ou de intervenção.

No contexto da VR, Hillis (1999) analisa a transição da realidade material para espaços virtuais, salientando a substituição da presença física por representações visuais, que promovem uma expansão da imaginação livre das limitações da mobilidade corporal (p. 212), e argumenta que esta metamorfose na VR contemporânea é um reflexo da transcendência platônica, na qual se busca alcançar um estado idealizado, elevado e supramundano, orientando-se para uma realidade pura e superior, desvinculada das limitações do mundo físico e material (pp. 215-216). Esta evolução cultural propicia uma fuga irônica da realidade, permitindo um afastamento das ações e necessidades corpóreas (p. 17), enquanto as utopias digitais transferem o poder do concreto para o abstrato, criando espaços de redenção para o eu fragmentado, um conceito que se refere à perda de identidade e integridade do indivíduo numa sociedade complexa e digitalmente saturada, onde as múltiplas identidades *online* e *offline* levam a uma sensação de fragmentação do *self* (p. 221). Conforme Hillis discute, a priorização da consciência sobre a existência material conduz a uma desvalorização dos espaços físicos e tangíveis, privilegiando a construção de identidades desmaterializadas que são desvinculadas da realidade corpórea e enraizada, e que enfatizam uma existência mais centrada na mente e na virtualidade (p. 230).

Assim, a VR emerge como um palco para a negociação da relação entre o ser e o seu avatar, bem como entre o espaço vivido e o espaço simulado, constituindo-se como um refúgio da realidade tangível que facilita a concretização de desejos de escapismo e transformação do eu. Este escapismo permite uma fuga das limitações pessoais e uma oportunidade de imersão num coletivo, atenuando a singularidade do indivíduo. A VR permite a reconfiguração da aparência e das capacidades, promovendo a dissociação do *self* físico e a adoção de identidades alternativas (Garner, 2018, p. 157). A substituição e a assimilação surgem como processos distintos: o primeiro favorece a adoção de um novo *self* virtual, enquanto o segundo busca a expansão do *self* através da integração com o virtual (p. 163).

No caso do som, a discussão sobre VAS beneficia consideravelmente da abordagem de Schafer acerca da paisagem sonora, um conceito que desperta o interesse de acadêmicos e artistas desde 1993. Schafer propõe uma comparação entre paisagens sonoras de alta e baixa fidelidade, fundamentando-se na nitidez e na intensidade dos sons no ambiente. Em paisagens de alta-fidelidade, a distinção acústica é primordial; sons individuais são distintos, proporcionando uma experiência auditiva detalhada e profunda. Por outro lado, as paisagens de baixa fidelidade apresentam-se como uma mistura de sons que dificulta a identificação de elementos sonoros singulares. Schafer esclarece que numa paisagem de alta-fidelidade, "sons discretos podem ser ouvidos claramente devido ao baixo nível de ruído ambiente (...); os sons sobrepõem-se com menos frequência; há perspectiva – primeiro plano e plano de fundo" (Schafer, 1993, p. 43). Contrariamente, em paisagens de baixa fidelidade, "os sinais acústicos individuais são obscurecidos numa população superdensa de sons" e "a perspectiva é perdida" (p. 43).

Schafer também aborda o conceito de ‘imperialismo sonoro’ para descrever a predominância de paisagens sonoras de baixa fidelidade na sociedade contemporânea, marcada por um ambiente repleto de ruído proveniente de diversas tecnologias e atividades humanas (Schafer, 1993, pp. 90, 110-115). Este ambiente acústico atual, resultado da urbanização industrial e pós-industrial, tende a obscurecer sons naturais, criando uma desvinculação do ser humano com o ambiente sonoro natural e promovendo uma espécie de alienação acústica. Segundo Schafer, esta realidade reflete uma imposição de sonoridades, muitas vezes mecânicas e industriais, sobre o indivíduo, configurando uma usurpação da tranquilidade acústica existente anteriormente em ambientes naturais e urbanos menos densos (Schafer, 1993, pp. 122, 130-135).

Na segunda metade do século XX, as universidades começaram a focar-se em questões que, até então, eram apenas preocupações mediáticas ou de grupos de pressão. Este período foi marcado pelo avanço e disseminação de aparelhos de reprodução sonora, levantando debates sobre o ruído causado por estes novos dispositivos, especialmente devido à evolução do microfone e do altifalante. Estes equipamentos, essenciais na gravação e reprodução sonora, tornaram-se centrais na discussão sobre a poluição sonora urbana e a gestão do som em espaços privados e públicos (Ribeiro, 2021, p. 103).

Na obra *Sound Moves* (2007), Michael Bull investiga as consequências destas alterações nas paisagens sonoras ao analisar o impacto dos dispositivos portáteis de media, como o Walkman e o iPod, na experiência auditiva urbana, abordando o conceito de "dialética

do isolamento mediado" (p. 4). A pesquisa de Bull estabelece um paralelo entre o acesso facilitado à informação e a fragmentação do discurso no domínio digital e a forma como a tecnologia pode oscilar entre ser libertadora e restritiva, dependendo do contexto e do uso. A obra explora a tensão entre a busca por privacidade auditiva e o risco de isolamento social, salientando a criação de 'bolhas tecnológicas' de espaços auditivos personalizados que protegem os indivíduos da cacofonia urbana, mas ao mesmo tempo contribuem para a alienação e atomização social (p. 9). É argumentado que a experiência sonora mediada altera a percepção do espaço urbano de duas maneiras: substituindo a paisagem sonora representacional por um espaço privatizado e individualizado (p. 57) e ampliando sinesteticamente a experiência urbana, tornando-a um espaço hiper-real influenciado pela experiência sonora mediada (p. 58).

No artigo de O'Keeffe e Kerr (2015), que complementa a dialética de Bull (2007), a utilização de *media* móveis por adolescentes em Dublin para negociar a sua presença em espaços públicos é explorada, demonstrando como estes formam 'bolhas acústicas' com dispositivos sonoros móveis para sobrepor um espaço sonoro personalizado ao mundo físico (p. 5), uma prática que proporciona apropriação espacial, mas que também ecoa as preocupações sobre alienação e atomização social. O uso de *media* móveis pelos adolescentes individualiza e simultaneamente socializa a experiência sonora, variando conforme os contextos socio-espaciais e sonoros em que são utilizados, embora, como argumentam O'Keeffe e Kerr, essas bolhas acústicas, apesar de servirem como mecanismos de defesa contra a exclusão social e espacial, também possam levar a um maior isolamento dos adolescentes, afastando-os de um envolvimento significativo com o espaço público (p. 6).

No contexto atual dos *smartphones* e plataformas de *streaming*, como Spotify e Apple Music, o conceito da obra *Sound Moves* de Bull ganha maior relevância, visto que estes dispositivos facilitam mais ainda os refúgios sonoros em ambientes urbanos e reconfiguram a interação dos utilizadores com o espaço sonoro, enquanto a digitalização sonora, evidenciada em formatos como *podcasts* e música, emerge como um meio influente de expressão política e social. Os *podcasts* proporcionam uma plataforma acessível que não só dissemina ideias e promove debates, mas também fomenta a consciência sobre questões políticas e sociais, permitindo que uma gama diversificada de vozes, inclusive as frequentemente marginalizadas, contribua para a democratização do discurso político. Paralelamente, a música em plataformas digitais pode funcionar como um instrumento de protesto e representação cultural, influenciando a opinião pública e moldando movimentos sociais. É fundamental estar ciente de como os meios de comunicação, como plataformas de *streaming* de *podcasts* e música, podem

ser utilizados para controlar a narrativa, onde a seleção editorial pode, inadvertidamente ou intencionalmente, favorecer certas perspectivas em detrimento de outras, influenciando assim a percepção pública. Esta dualidade destaca a importância de uma abordagem crítica e consciente no uso da divulgação sonora digital, onde as suas potencialidades para a inclusão e expressão livre coexistem com o risco de manipulação e controlo da informação.

No âmbito da virtualidade como conceito filosófico, o ambiente político contemporâneo já se encontra embebido numa lógica de virtualidade que vai além da mera digitalização das relações sociais ou bolhas acústicas. Seguindo a perspectiva de Baudrillard em *Simulacros e Simulação* (1991), a realidade política é cada vez mais uma hiper-realidade composta de símbolos e signos, mais do que eventos concretos, criando um ambiente político em que as representações e as narrativas se tornam mais influentes do que os factos, levando a uma distorção da percepção da realidade e à dificuldade em distinguir entre o real e o simulado. Este fenómeno ecoa as preocupações de Berardi sobre o efeito paralisante das estruturas vigentes na capacidade humana de desafiar o *status quo* (Berardi, 2011, p. 24). Berardi argumenta que o foco do sistema socioeconómico atual na produtividade e eficiência restringe tanto a criatividade individual como coletiva, limitando a capacidade de pensar criticamente e agir inovadoramente, enquanto salienta o papel das pressões por conformidade e da saturação de informação digital na criação de um estado de exaustão mental, o qual diminui significativamente a possibilidade de imaginação radical e de ação política transformadora.

O enfraquecimento do potencial transformador da política, num contexto dominado pelo neoliberalismo e pela democracia liberal, conforme identificado por diversos autores, propicia a reavaliação do virtual na teoria organizacional, agora entendido como um palco de potencialidades ainda não concretizadas. Esta estagnação ideológica é evidenciada pela incapacidade de articulação de uma realidade política concreta, um fenómeno que Fukuyama descreve como um período em que “não restam concorrentes ideológicos sérios à democracia liberal” (Fukuyama, 1992, p. 239). Neste contexto, a política converte-se num jogo de simulações, onde a falta de alternativas tangíveis conduz a uma espécie de paralisia ideológica. Fisher também alerta para esta condição, mencionando a deflação das expectativas e o “cancelamento do futuro” como traços distintivos do período histórico atual (Fisher, 2014, p. 18-19). A predominância do símbolo sobre a substância no mundo político provoca a erosão do potencial para uma mudança verdadeira e restringe as possibilidades para uma ação política significativa. Como Berardi sugere, mesmo quando surgem tentativas de oposição ou crítica,

estas são frequentemente absorvidas pelo sistema vigente, tornando-se parte da mesma hiper-realidade que procuravam desafiar (Berardi, 2011, p. 26).

Se o capitalismo tardio, como o semiocapital de Berardi (2011, p. 25) sugere, transcende a noção de capital como representação simbólica de formas clássicas de produção, o mesmo ocorre com a política, que se torna num campo de potencialidades indeterminadas mais do que um espaço de ação e decisão. A política não é apenas mediada por símbolos e signos; converte-se, ela própria, num sistema de fluxos potenciais que dificilmente se cristalizam em ações concretas, o que resulta numa dialética complexa onde, por um lado, a virtualização oferece uma multiplicidade de possibilidades de ação, mas por outro, estas possibilidades frequentemente permanecem no domínio do virtual, nunca se atualizando em mudanças políticas tangíveis.

A reflexão sobre a interseção entre o digital, o virtual e a política, como apresentada neste subcapítulo, evidencia uma mudança paradigmática na forma como se experiencia e interage com o mundo. O avanço tecnológico e a emergência de espaços virtuais reconfiguram não apenas as práticas sociais e políticas, mas também a própria concepção de realidade. A política, embebida numa lógica de virtualidade, transforma-se num campo de simulações e hiper-realidades, onde o real e o simbólico se entrelaçam de maneira complexa. Neste âmbito, a arte assume um papel crucial como meio de exploração e expressão das potencialidades latentes do virtual, especialmente num ambiente político marcado por um impasse ideológico. Ao oferecer alternativas criativas e imaginativas, a arte desafia as limitações impostas pela realidade política contemporânea e abre espaço para novas formas de pensamento e ação. Assim, na confluência entre a política, a arte e a virtualidade, revela-se um terreno fértil para a reimaginação e reinvenção do social e do político, destacando a necessidade de abordagens mais críticas em face dos desafios do presente.

3.6. Virtualidade Sonora em Grimshaw e Garner

A contribuição de Garner e Grimshaw (2015) para o campo da virtualidade sonora representa um desafio à perspectiva tradicional que prioriza a modalidade visual em estudos relacionados à experiência imersiva e à VR. Estes autores têm-se destacado ao explorar as ecologias acústicas em contextos diversos, tais como jogos eletrônicos e produções musicais. Ao considerar o som como uma entidade temporal e multidimensional, esta abordagem teórica amplia significativamente o escopo da pesquisa na área, conferindo-lhe um estatuto que transcende o mero papel de complemento ao visual, uma posição secundária na literatura sobre

virtualidade, e permite uma reflexão mais aprofundada sobre o seu papel na construção da experiência imersiva.

Garner (2017) analisa extensivamente o conceito de que o todo de um sistema ou processo natural excede a soma das suas partes (pp. 69-71), argumentando que uma compreensão completa do som em ambientes virtuais necessita de uma análise holística que considere a complexa interação entre múltiplas variáveis. De acordo com Grimshaw e Garner (2015, p. 16), a percepção sonora ultrapassa uma mera receção passiva, assumindo a forma de uma emergência ativa do som, caracterizada por um fluxo espaço-temporal moldado por conjunções e disjunções. Esta ideia evoca Heráclito, ao proporem que, tal como um rio que se renova a cada imersão, cada experiência sonora é singular e não pode ser replicada. Na análise destes autores, a percepção emergente é central, não se restringindo a um mero componente do processo perceptivo, mas emergindo como uma nova entidade, resultante da totalidade das características do processo, embora não limitada a estas. Portanto, o som, entendido como uma percepção emergente, não se limita a surgir de sistemas complexos, mas também contribui significativamente para enriquecer tanto a dinâmica como a complexidade da experiência auditiva em contextos virtuais, ampliando a profundidade e o alcance da interação sonora nesses ambientes (pp. 24, 70).

Conforme explicado por Garner (2017), o som é uma entidade em permanente transformação, cujo significado e posição se redefinem ininterruptamente pelas variações no processamento perceptivo, evidenciando a sua natureza dinâmica e emergente e contrariando a ideia de uma definição estática ou de um posicionamento fixo num determinado espaço perceptivo. Influenciado por uma multiplicidade de fatores como o contexto acústico e o estado emocional do ouvinte, o som proporciona uma experiência em constante transformação, ultrapassando definições limitadas e emergindo como um fenómeno em evolução, adaptando-se e reconfigurando-se a cada nova interação perceptiva (pp. 24, 70).

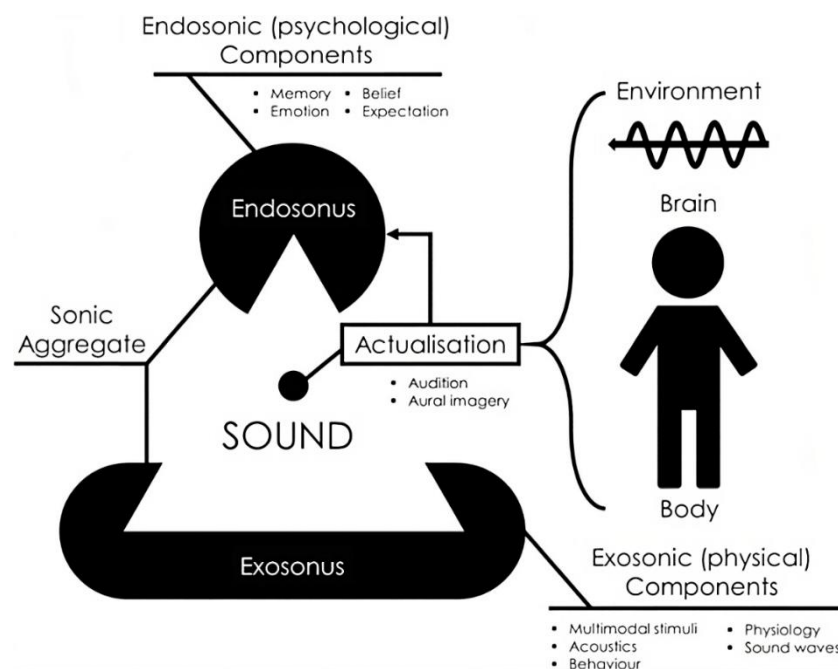


Figura 7: Modelo de Virtualidade Sonora⁸

A analogia do Triângulo de Kanizsa, ilustrada na Figura 7, proporciona uma representação esquemática que enfatiza a complexidade da percepção sonora e é fundamental para sustentar o argumento dos autores sobre a primazia do som na percepção da VR, servindo como um lembrete da natureza multifacetada da experiência sensorial, a qual ultrapassa a compreensão quando confinada a uma única modalidade. O conceito de virtualidade sónica ressoa com a noção deleuziana de virtualidade e desafia as concepções tradicionais que localizam o som em termos limitados e pontos específicos, propondo em vez disso que o som emerge como a atualização de um 'agregado sónico' (Garner, 2017, p. 70), composto por componentes exossónicos e endossónicos (p. 68). Neste modelo, o fenómeno da atualização é incorporado como um elemento crucial, abrangendo tanto a audição quanto a imagética aural, sendo mediado por uma variedade de fatores, incluindo o ambiente, o cérebro e o corpo do ouvinte.

Os elementos exossónicos, que incluem aspetos materiais e sensoriais como a acústica e outros estímulos multimodais, constituem os fundamentos físicos que conferem ao som as suas propriedades tangíveis, permitindo assim a sua medição e manipulação. Por outro lado, os componentes endossónicos, relacionados com elementos imateriais e não sensoriais como memória, emoção e outros fatores cognitivos, são intangíveis mas essenciais para a interpretação e internalização do som, constituindo uma dimensão que vai além dos limites da física acústica.

⁸ Adaptado de Garner, 2017, p. 71.

Primeiramente, a teoria da cognição incorporada sugere que todos os processos cognitivos estão contextualmente e ambientalmente situados, rejeitando o dualismo cartesiano e afirmando que a mente e o corpo não podem ser separados do mundo (Wilson, 2002). Esta perspectiva revela-se de particular relevância para a compreensão da influência do corpo e do ambiente na experiência sonora, reforçando a noção de que o som é inseparável do ser humano, do seu corpo e do contexto físico envolvente (Garner, 2017, p. 68).

Em segundo lugar, a teoria do nível de construção sustenta que as percepções e interações com o mundo encontram-se restringidas pela distância psicológica egocêntrica. Tal implica que o mundo é percebido e interpretado primordialmente em relação ao próprio sujeito, levando em conta dimensões como o espaço, o tempo, a identidade e a pertinência contextual (Trobe & Liberman, 2010). Esta teoria pode enriquecer a compreensão da experiência sonora em ambientes virtuais, onde a percepção do som pode ser fortemente influenciada pela relação do ouvinte com o espaço virtual. O modelo de Chion, que compreende três modos de escuta - causal, semântico e reduzido - oferece uma estrutura útil para entender como diferentes ouvintes podem ter diferentes focos durante o processo de audição (Chion, 1994). Estes modos de escuta podem variar de acordo com a atenção, intencionalidade e disposição do ouvinte, e podem ser categorizados em modos experienciais, denotativos e reflexivos, cada um exigindo diferentes níveis de processamento cognitivo.

O campo da arte sonora, ao investigar as intersecções entre virtualidade, materialidade e subjetividade, posiciona o som como um fenómeno efêmero e imaterial, num *continuum* entre o ser e o não-ser, o que o destaca como um objeto de estudo intrigante na fenomenologia. Paralelamente, a música, com seu carácter lírico e emocional, emprega elementos como melodia, harmonia e ritmo para nos transportar a espaços e temporalidades alternativas, enriquecendo assim a experiência sensorial e cognitiva, enquanto provoca uma reflexão sobre a natureza da existência e da percepção.

Em suma, a virtualidade sonora emerge como uma abordagem multifacetada que desafia as tradicionais fronteiras disciplinares, incorporando uma riqueza de variáveis que vão desde a materialidade pura até à subjetividade, passando pelas dimensões sociais e culturais. Este paradigma proporciona novas perspectivas para o entendimento e a criação do som, oferecendo ferramentas úteis para desafiar e expandir os limites da arte sonora.

4. Metodologia

O estudo do som, intrinsecamente complexo e multifacetado, exige uma metodologia rigorosa e bem fundamentada. Conforme apontado por Voegelin (2021), existem duas abordagens metodológicas primordiais: o caminho conceptual e o caminho da escuta (p. 270). No primeiro, enfoca-se o estudo dos artefactos e contextos sonoros como entidades culturais; no segundo, prioriza-se a audição do próprio material, em referência ao seu fluxo virtual ou poder afetivo (p. 271). Este estudo incorpora ambas as perspectivas, na medida em que, segundo Eng (2017), "o desejo pelo som ainda é um desejo teórico - um desejo de e para teoria" (p. 317).

O presente estudo, ao alinhar-se com as reflexões de Voegelin (2021), reconhece a complexidade inerente ao campo sonoro e, por conseguinte, a necessidade de uma metodologia que transcenda abordagens tradicionalmente empíricas. Voegelin argumenta que o som não deve ser confinado a categorias visuais ou métricas, mas deve ser entendido como uma prática que ocorre no 'espaço invisível' entre diferentes elementos, sejam eles humanos ou não-humanos (p. 272). Esta perspectiva ressalta a necessidade de uma abordagem crítica que vá além das categorias tradicionais e que possa revelar as relações de poder inerentes ao campo sonoro (p. 273). A importância desta metodologia para o estudo em questão advém da sua aptidão para registar a transitoriedade e a complexidade do som, aspetos que são muitas vezes subestimados em abordagens metodológicas convencionais, as quais se apoiam habitualmente em testes técnicos ou inquéritos.

Esta abordagem está em sintonia com as críticas à metodologia tradicional apresentadas por Cobussen (2021), que argumenta que métodos rígidos e prescritivos podem ser limitantes na investigação artística, especialmente quando se trata de som e arte sonora (Cobussen, 2021, pp. 285-286). Optando por uma metodologia exploratória, centrada na descrição e reflexão, reconhece-se não apenas a complexidade do objeto de estudo, mas também se cria espaço para formas de conhecimento frequentemente marginalizadas em abordagens mais quantitativas.

Ao adotar uma postura de audição genuína, conforme sugerido por Voegelin (2021), privilegia-se a sonoridade em detrimento da mensagem, exigindo uma linguagem que reconheça e revele as suas próprias limitações e deformações (Nancy, 2007, p. 5), e que esteja ciente da sua contextualização e da construção linguística da realidade (Cobussen, 2021, p. 286). Em linha com Ferrara (1991), o método deve fomentar a abertura e o envolvimento, numa interação entre o sujeito e a liberdade do objeto de se revelar (p. 46). Esta perspectiva é reforçada por Cobussen (2021), que sugere que a investigação em arte sonora pode beneficiar de uma

abordagem mais flexível e adaptável, que permita uma maior abertura às possibilidades e complexidades do campo sonoro (Cobussen, 2021, p. 286).

Na aplicação da metodologia específica a esta pesquisa, adotou-se uma abordagem que entrelaça teoria e prática. Inicialmente, a pesquisa começou com uma profunda exploração das teorias sonoras e uma revisão literária abrangente para estabelecer uma base teórica sólida, seguida, na fase de desenvolvimento, por um foco na criação de protótipos na plataforma Unity, que envolveu uma série de testes práticos, ajustes e refinamentos contínuos. Este processo metodológico não só permitiu a exploração e integração de novos conhecimentos, mas também evidenciou a natureza dinâmica e exploratória da abordagem adotada.

Em suma, o presente trabalho adota uma metodologia exploratória, fundamentada na complexidade e efemeridade inerentes ao campo sonoro. Esta metodologia, que vai além dos métodos empíricos tradicionais e se mostra particularmente relevante dada a natureza imaterial e complexa do som e a sua relação complexa com o ambiente, centra-se na formulação e no desenvolvimento contínuo de questões de investigação ao longo do estudo, em vez de procurar a validação empírica de hipóteses pré-estabelecidas. Este enfoque não só possibilita uma compreensão mais aprofundada do objeto de estudo, mas também acolhe formas de conhecimento frequentemente excluídas em metodologias quantitativas, tornando-se assim um instrumento crítico e reflexivo que eficazmente aborda a complexidade e a multiplicidade do campo sonoro.

4.1. Desenvolvimento: Abordagem e Limitações

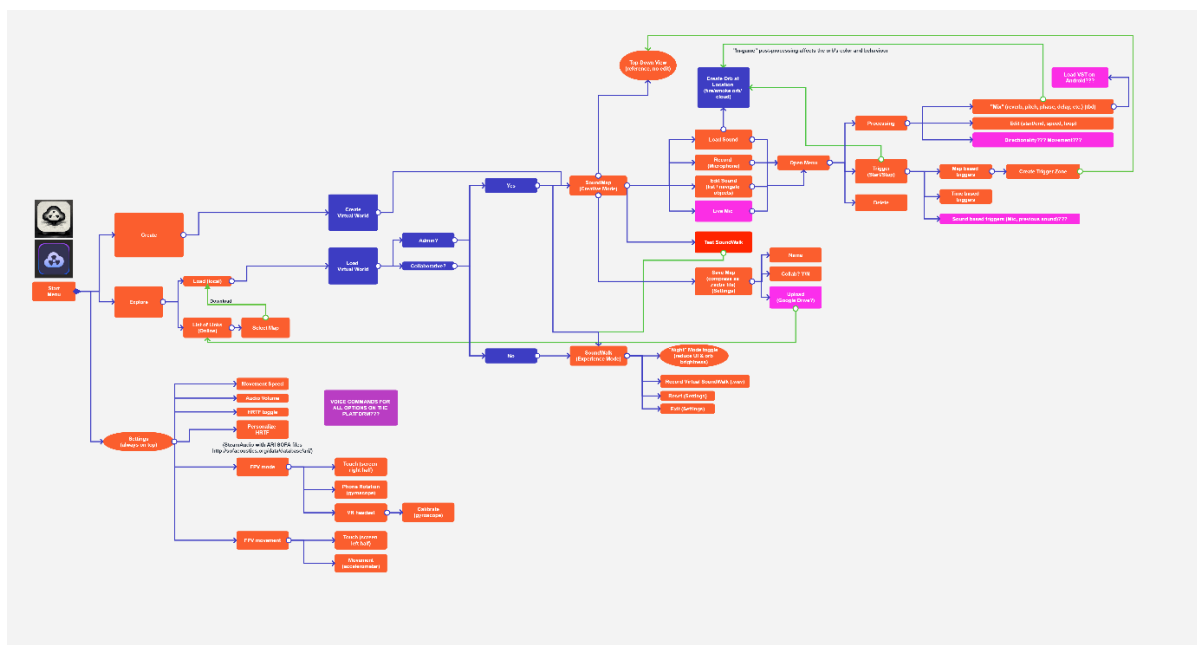


Figura 8: Esboço Inicial do Fluxo de Utilizador⁹

A presente investigação centrou-se na exploração do potencial artístico e imersivo de dispositivos móveis na criação e exploração de VAS, visando compilar e contribuir para o avanço do estado da arte. A pesquisa envolveu a integração do SDK Google Resonance Audio para a localização tridimensional do som em ambientes virtuais e a utilização de bibliotecas específicas para Unity, permitindo uma manipulação eficiente de elementos sonoros, combinando conhecimentos de síntese binaural com parâmetros físicos e psicoacústicos. O objetivo final consistiu em criar uma aplicação que simulasse com precisão VAS, proporcionando aos utilizadores uma interação intuitiva.

Durante o desenvolvimento, emergiram diversas possibilidades criativas, algumas demonstradas na Figura 8, como a aplicação de efeitos sonoros e métodos variados de criação de som, incluindo carregamento de áudio, gravação via microfone e síntese sonora; estas, juntamente com a implementação de funcionalidades para upload, gravação, síntese e efeitos sonoros individualizados, constituíram desafios técnicos significativos, complementados pelo desenvolvimento complexo de funcionalidades de movimento com compatibilidade giroscópica e controlo tátil. Um desafio adicional foi a otimização da renderização áudio em tempo real para Android, equilibrando limitações de processamento e memória, assegurando assim uma experiência imersiva de alta-fidelidade acústica. Devido às limitações temporais

⁹ Versão do fluxograma em alta-definição disponível em <https://postimg.cc/YLc6Nfbq>.

impostas pela dissertação de mestrado, o foco recaiu principalmente na conceptualização e na prototipagem inicial da aplicação, com funcionalidades adicionais planeadas para futura implementação, conforme discutido no ponto 5.1.

A aplicação foi otimizada para o sistema operativo Android e testada num *smartphone* OnePlus Nord N10 5G, bem como na plataforma de teste Unity Device Simulator. Na fase crítica de testes acústicos da aplicação, a seleção estratégica de equipamentos auditivos incluiu os Moondrop Chu, IEMs de alta-fidelidade, pela sua resposta linear de frequência, e os Anker SoundCore Q30, com capacidades de cancelamento de ruído e modo de transparência, oferecendo assim análises acústicas complementares e contrastantes. O cancelamento de ruído possibilitou uma avaliação em ambiente controlado, focando na imersão e clareza do campo sonoro, enquanto o modo de transparência ofereceu uma experiência de AR sonora, combinando de forma sinérgica o som virtual gerado pela aplicação com o ambiente acústico real, ampliando assim a experiência de imersão em VAS para um conceito possivelmente designado como AAS – ‘Espaço Auditivo Aumentado’¹⁰.

Para o desenvolvimento, optou-se pela plataforma Unity, que recorre à linguagem de programação C#, incorporando diversos recursos e bibliotecas gratuitos disponíveis na Unity Asset Store e no GitHub. A Unity é uma plataforma robusta para o desenvolvimento de jogos e experiências interativas, valorizada pela sua flexibilidade e pela capacidade de exportação para diversos sistemas operativos e dispositivos, incluindo Android, e oferece uma interface intuitiva e um motor gráfico avançado que facilita a criação de ambientes tridimensionais ricos e dinâmicos. A Unity permite a programação em C#, uma linguagem moderna e orientada a objetos, desenvolvida pela Microsoft como parte da plataforma .NET. C# é reconhecida pela robustez e eficiência, sendo uma escolha popular entre os programadores de jogos devido à sua sintaxe clara e ao vasto conjunto de funcionalidades que simplificam a implementação de lógicas complexas.

A Unity Asset Store é um repositório *online* onde se podem adquirir ativos digitais como modelos 3D, animações, bibliotecas e *scripts*, essenciais para enriquecer projetos sem necessidade de desenvolvimento do zero. Grande parte destes recursos são disponibilizados gratuitamente, o que é particularmente vantajoso para projetos com orçamentos restritos. Paralelamente, o GitHub serve como uma plataforma colaborativa de hospedagem de código, onde é possível encontrar uma multiplicidade de bibliotecas e ferramentas partilhadas pela comunidade de programadores, incentivando a partilha de conhecimento.

¹⁰ Em inglês, Augmented Auditory Space.

No que se refere às HRTFs, o uso do Resonance Audio, uma ferramenta otimizada para dispositivos móveis, foi uma solução determinante. Esta escolha, discutida em detalhe no ponto 4.3, permitiu uma implementação eficiente dos HRTFs, crucial para a experiência imersiva pretendida. O Resonance Audio oferece um balanço ideal entre a qualidade sonora e a eficiência no processamento, adequado para a variedade de dispositivos Android.

A gestão de recursos foi também um aspeto fundamental neste projeto. Cada adição em termos de recursos externos foi cuidadosamente ponderada, garantindo que cada elemento incluído fosse estritamente necessário. Para assegurar a eficiência do projeto, foi utilizado um *asset* específico que permite a remoção de todos os recursos e ficheiros que não estavam a ser utilizados em nenhuma parte da aplicação. Esta abordagem assegurou um uso otimizado dos recursos, vital para o desempenho em dispositivos móveis.

4.2. Execução do Projeto e Desenho de UI

A metodologia empregue no desenvolvimento deste protótipo de aplicação privilegiou uma abordagem exploratória, orientada para desenvolvimentos nas práticas criativas com áudio 3D. O processo começou com uma fase de pesquisa e conceção, dedicada ao aprofundamento das teorias e técnicas relativas ao som em ambientes auditivos virtuais, estabelecendo as bases para o *design* da aplicação, e seguiu-se com uma fase de desenvolvimento técnico caracterizada por um ciclo iterativo de implementação e aperfeiçoamento das funcionalidades.

Ao longo do desenvolvimento do projeto, a plataforma Unity foi fundamental para a construção e aprimoramento do protótipo, devido à sua habilidade em criar ambientes virtuais interativos e detalhados. Este processo iterativo, composto por testes e ajustes contínuos no sistema Android, garantiu que o protótipo atendesse aos objetivos do projeto e preservasse a qualidade da experiência auditiva pretendida.

Um dos desafios mais significativos no desenvolvimento desta aplicação foi garantir a interoperabilidade entre os diversos dispositivos Android, um problema que vai além do desempenho e abrange especialmente a adaptação da UI à diversidade de tamanhos de ecrãs. Um objetivo essencial era ter uma UI minimalista, para que o foco dos utilizadores estivesse mais no aspeto auditivo do que visual, mantendo, no entanto, todas as funcionalidades necessárias da aplicação. Esta abordagem equilibrada entre simplicidade visual e riqueza auditiva foi um desafio em si, exigindo uma atenção cuidadosa no *design* de UI para garantir que a experiência auditiva não fosse ofuscada por elementos visuais desnecessários, mas que a aplicação permanecesse intuitiva e acessível. Ocasionalmente, a UI enfrentava problemas de

compatibilidade e legibilidade em diferentes dispositivos, levando à utilização de funções que determinam o tamanho do ecrã do dispositivo e possibilitam a adaptação dos elementos da UI de acordo com este tamanho, além do emprego do Unity Device Simulator, uma ferramenta integrada no próprio Unity, que não apenas facilita o teste da aplicação numa ampla gama de tamanhos de ecrã, mas também replica as informações específicas de sistema e *hardware* de cada plataforma, uma etapa crucial para assegurar uma experiência de utilizador consistente e otimizada.

No decurso deste projeto, confrontou-se a tendência que habitualmente coloca o visual em primeiro plano, optando-se por uma abordagem que eleva o som a protagonista na conceção e vivência de espaços virtuais. O desenvolvimento focou-se numa plataforma onde o som, ao invés de ser um mero complemento, é o centro da experiência, suportado por uma interface visual simples mas intuitiva, promovendo uma imersão diferenciada onde a simplicidade visual realça a perceção auditiva e estimula a criatividade no manejo do espaço sonoro. A simplicidade do *design* visual da plataforma reflete a intenção de não se sobrepor à experiência auditiva, mas sim de complementá-la, assegurando que a essência do projeto permanecesse fiel à visão original de valorização do som no universo dos ambientes virtuais.

O projeto em questão distingue-se por conceder ao utilizador a capacidade de se movimentar livremente pelo espaço virtual, contrastando com a abordagem mais comum que consiste em manipular a posição dos sons assumindo uma posição estática. Esta abordagem não só potencia uma exploração auditiva mais orgânica e intuitiva, como reforça a imersão, proporcionando uma perceção tridimensional do som que se molda à deslocação do utilizador. A aplicação expande significativamente o seu potencial criativo e exploratório ao oferecer a possibilidade de carregar e alterar sons personalizados, permitindo assim que cada indivíduo crie e explore um universo sonoro único, democratizando a conceção de VAS. Ao permitir a introdução de material sonoro externo, a aplicação convida à experimentação e à personalização, enriquecendo a experiência acústica e visual no seio de um ambiente virtual que se desdobra em resposta à interação do utilizador.

A prototipagem foi essencial, permitindo a materialização das ideias num ambiente virtual onde a manipulação do som se tornou intuitiva e envolvente. A fase de avaliação centrou-se na experiência de interação com a aplicação, levando a ajustes e melhorias na UI e nas ferramentas de áudio para aprimorar a experiência acústica. Este processo permitiu não apenas a criação de um espaço virtual para a exploração sonora, mas também uma reflexão sobre as capacidades e o potencial da aplicação em contextos diversificados.

4.3. Implementação de Áudio Espacial

No domínio da manipulação de som em espaços tridimensionais, que tem vindo a ganhar relevância na criação de ambientes sonoros imersivos, especialmente em aplicações móveis, a seleção de uma técnica adequada para a implementação de áudio 3D é uma consideração fundamental. A escolha de auscultadores como meio de implementação de áudio tridimensional é viável, não apenas pela sua eficácia em termos de custo, mas também pela sua capacidade de eliminar o *crosstalk*, um fenómeno que ocorre quando a informação destinada a um canal ou ouvido infiltra-se no outro, comprometendo a integridade espacial da reprodução. Contudo, a escolha entre auscultadores e colunas para a entrega de som em ambientes virtuais continua a ser uma matéria em aberto e sujeita a debate académico. Embora os auscultadores possam favorecer a imersão ao excluir ruídos externos, essa vantagem não constitui um consenso definitivo e carece de investigação adicional (Rajguru, Obrist & Memoli, 2020, pp. 5-6). Conforme mencionado na secção 2.4, a utilização de auscultadores nos dispositivos móveis garante uma qualidade de áudio mais uniforme face à diversidade do *hardware*, embora persistam discrepâncias entre diferentes modelos de *headphones*.

O Unity, motor de jogos amplamente utilizado, apresenta um modelo padrão para a localização de fontes sonoras em contextos tridimensionais, fundamentando-se principalmente no princípio da atenuação em função da distância. De acordo com este modelo, o volume sonoro diminui à medida que a distância entre a fonte e o ouvinte se amplia. Contudo, esta estratégia não abarca fenómenos acústicos complexos como a oclusão, a difração, a reverberação ou os efeitos binaurais, elementos cruciais para a implementação adequada do áudio 3D. Por esse motivo, a adaptação de uma biblioteca externa de HRTFs torna-se essencial na criação de áudio tridimensional, demonstrando ser uma estratégia eficiente e promissora para a implementação de áudio 3D na aplicação em desenvolvimento. No âmbito do projeto em curso, embora a oclusão e a difração não se revelem necessários, os efeitos binaurais são fundamentais.

A preferência pelo sistema de HRTF em vez do padrão Unity advém da necessidade de criar uma experiência auditiva mais genuína e envolvente, na qual variáveis como a IID e o ITD desempenham um papel crucial. O modelo padrão disponibilizado pelo Unity não integra adequadamente estas variáveis, essenciais à construção de uma simulação sonora convincente, principalmente mediante a utilização de auscultadores. Os fenómenos de IID e ITD originam-se no atraso e na diminuição da intensidade do som que atinge o ouvido mais longe da fonte, em contraste com o ouvido mais próximo. Esta alteração nas relações de distância amplifica os efeitos do sombreado da cabeça, intensificando a IID. Simultaneamente, a estrutura

espectral pode ser moldada pela morfologia individual da cabeça e do ouvido externo, enquanto o ITD se mantém praticamente inalterado com a aproximação da fonte sonora.

	Google Resonance	Steam Audio	Microsoft Audio	Oculus Spatializer	Qualcomm Audio	dearVR Unity
Doppler Effect	4.1	2.1	0	0	0	2.2
Sound Reflections	2.5	3.85	2	3	3.25	3.5
Near Effect	3.6	4.25	2	3	3.87	4.5
Far Effect	3.6	4.25	2.5	3	3.37	4.5
Left and Right	4.6	4.5	3	4	3.37	4.5
Upward Imaging	2	4.125	2	1.5	2	3.5
Downward Imaging	3.6	3	1.5	0	3	3
OVERALL RATING	3.43	3.73	1.86	2.07	2.69	3.67

Figura 9: Matriz Comparativa de Espacializadores Áudio¹¹

A espacialização sonora em Unity para aplicações Android pode ser efetuada através de SDKs de terceiros, tais como Microsoft Spatializer, Project Acoustics da Microsoft, Oculus Spatializer, Qualcomm 3D Audio Plugin, Steam Audio, Vive 3DSP Audio SDK e Resonance Audio da Google. Estes plugins viabilizam medições objetivas de atributos espaciais sonoros, fundamentais para a investigação em tecnologia sonora. A Figura 9 apresenta uma matriz comparativa de desempenho entre diversos espacializadores áudio, avaliando-os em múltiplas dimensões acústicas, o que permite uma análise pormenorizada e um entendimento abrangente das suas capacidades e limitações no contexto de produção e tecnologia sonora.

Ao longo deste processo, foram testadas várias alternativas. O SDK de Espacialização de Áudio da Unity foi considerado devido à sua integração nativa com o ambiente Unity e à sua capacidade de fornecer controlos avançados para a espacialização do áudio. No entanto, foi descartado devido à sua complexidade e à necessidade de um entendimento profundo dos metadados da fonte e do ouvinte para uma implementação eficaz. O Chunity, que combina ChucK com Unity, surgiu como uma opção, mas foi rapidamente afastado devido à dificuldade e tempos associados ao domínio de duas linguagens de programação diferentes. O Steam Audio, embora atraente pela capacidade de utilizar ficheiros SOFA e ser considerado uma das melhores opções, revelou-se excessivo e complicado na sua implementação, além de não ser otimizado para Android. O SOFAlizer, apesar de seriamente considerado, foi igualmente rejeitado pela excessiva oferta de ficheiros SOFA e potenciais limitações na flexibilidade da aplicação.

¹¹ Adaptado de Conquest VR. (s.d.). *Selecting an Audio Spatializer*. Consultado em 15 de setembro de 2023, de <https://conquestvr.com/blogs/new-blog/selecting-an-audio-spatializer>

A escolha do Google Resonance Audio SDK para este projeto decorreu de uma análise rigorosa e está fundamentada em diversas vantagens técnicas e funcionais. Este SDK não só oferece uma gama abrangente de funcionalidades avançadas em engenharia de áudio, como renderização Ambisonic e processamento HRTF para áudio 3D binaural (Gorzel et al., 2019), mas também se destaca pela sua eficiência em dispositivos móveis e pela sua integração multiplataforma. Mediante a aplicação dos filtros HRTF, o som é renderizado por meio do Ambisonics, que constitui uma modalidade de OBA. Estas características são particularmente relevantes no contexto do projeto em questão, visto que se destina a plataforma Android. É de salientar que, embora a biblioteca do Resonance Audio para Unity tenha sido atualizada pela última vez no GitHub em 16 de setembro de 2018, há já cinco anos, apenas foram necessários ajustes menores ao nível das funções para garantir a sua operacionalidade com versões mais recentes do Unity.¹²

¹² Conforme acesso a 16 de Dezembro de 2023.

5. Discussão

Neste trabalho, são abordados os aspetos relacionados com o desenvolvimento e as potencialidades de uma aplicação móvel destinada aos VAS, evidenciando a sua relevância para os estudos de som. O estudo alinha-se com as competências esperadas no âmbito do mestrado, revelando como a interação do som com variadas plataformas de criação e entretenimento pode ser tanto inventiva quanto acessível. O uso de dispositivos comuns, como os smartphones, para explorar ambientes auditivos virtuais, representa um passo importante na democratização do acesso à tecnologia de espacialização sonora, ampliando a sua disponibilidade. Com desenvolvimentos nesta democratização, a tecnologia eleva-se além da sua função instrumental, tornando-se um veículo para a expressão artística. Esta aplicação alia tecnologia e arte, proporcionando uma nova perspetiva sobre a espacialidade e interatividade sonoras.

A aplicação sobressai pela sua abordagem diferenciada na interação e navegação dos utilizadores através de espaços sonoros, marcando um contraste com as experiências auditivas mais passivas típicas de músicas binaurais ou Atmos, ao proporcionar uma navegação ativa e imersiva que enriquece a experiência auditiva de forma significativa, permitindo uma ampla gama de interações com sons ambientais, instrumentais ou músicas completas, transformando a experiência auditiva ao intensificar o envolvimento e a profundidade percebida pelo utilizador. Este projeto contribui para o avanço do conhecimento sobre a espacialidade sonora, explorando a navegação intuitiva e imersiva nos VAS. Esta abordagem enriquece a experiência do utilizador e revela novas perspetivas sobre a natureza e a perceção do som em ambientes virtuais, estimulando uma análise mais profunda da relação entre o ouvinte e o espaço sonoro e questionando as conceções tradicionais de som e audição.

Os VAS apresentam um potencial diversificado, aplicando-se tanto à psicoterapia, onde a exposição a sons relacionados com traumas oferece uma alternativa mais suave e menos intrusiva do que a exposição visual, quanto ao desenvolvimento de jogos, facilitando a prototipagem sonora e permitindo aos criadores experimentar com diferentes elementos sonoros antes da sua implementação em projetos mais complexos. A sua utilização em terapias sonoras representa uma abordagem inovadora no tratamento de condições psicológicas, utilizando o som como uma ferramenta terapêutica, exemplificando a capacidade da tecnologia sonora de se estender para além da arte e integrar-se em possíveis soluções em diversos campos. Adicionalmente, destaca-se o seu potencial para simulações, particularmente em treinos para profissões e atividades de alto risco, como aviação e condução, onde a integração de VAS com

elementos visuais aprofunda a sensação de presença e imersão, sublinhando a importância do som nestes ambientes simulados.

A elaboração desta aplicação levou a descobertas significativas sobre o papel do espaço na música e na arte sonora. A investigação académica associada aprofunda conceitos teóricos essenciais, incluindo a virtualidade segundo Deleuze e os aspetos da virtualidade sonora. Estas considerações teóricas permitem uma compreensão mais abrangente do som nos VAS, indo além das meras vibrações físicas e influências ambientais. O som em contextos virtuais revela-se como uma entidade complexa, influenciada por fatores psicológicos, psicoacústicos, emocionais, culturais e simbólicos. Esta perspetiva ampliada sobre o som nos VAS enriquece as potencialidades de expressão artística e interação sonora em tais ambientes. O projeto destaca-se não apenas pela criação de uma experiência sonora imersiva, mas também pela exploração da capacidade expressiva do som em contextos virtuais. Esta faceta é fundamental para a compreensão da relevância do projeto no panorama artístico e social contemporâneo. O som, neste ambiente, ultrapassa a sua função convencional de mero acompanhamento, assumindo um papel determinante na definição da experiência e influenciando a perceção e interação com os ambientes virtuais.

5.1. Descrição do Protótipo¹³

O protótipo desenvolvido representa um avanço na interação e exploração de espaços auditivos virtuais através de dispositivos Android. Incorporando uma combinação de tecnologias, a aplicação facilita uma experiência sonora imersiva e interativa, aproveitando ao máximo as funcionalidades dos smartphones contemporâneos. Os utilizadores podem navegar pelo espaço virtual tanto através de input tátil quanto utilizando o giroscópio, permitindo um movimento intuitivo e natural dentro do ambiente virtual. A integração com o SDK Google Resonance Audio oferece uma espacialização sonora de alta qualidade, melhorando significativamente a perceção de presença e imersão no espaço auditivo. A aplicação permite a captura de sons através do microfone do dispositivo ou a utilização de arquivos sonoros previamente armazenados, proporcionando aos utilizadores a liberdade de personalizar a sua experiência auditiva. Uma UI simplificada e adaptada para Android facilita a interação com a aplicação, destacando-se por elementos visuais estilizados que potenciam a imersão sem sobrecarregar o utilizador. Funcionalidades como sistema de play/pause para sincronização

¹³ Vídeo demonstrativo disponível em <https://youtu.be/7A92wuLIImw>, carregado a 21/03/2024.

sonora e configurações adicionais, incluindo controle de iluminação, ajuste da qualidade gráfica e opções relacionadas ao uso do giroscópio, garantem uma experiência personalizável e acessível. A UI, representada na Figura 10, inclui um menu de definições no canto superior esquerdo, um ícone de luz no canto superior direito para ajustar a estimulação visual mantendo o espaço virtual às escuras, e no canto inferior direito, um botão dedicado à colocação de sons no ambiente virtual, que, ao ser pressionado, apresenta opções para gravação ou carregamento de sons, enriquecendo a interatividade e a capacidade de moldar a paisagem sonora ao gosto do utilizador.

Este protótipo apresenta-se como uma evolução significativa nas aplicações WalkThroughMusic e Plugsonic Soundscape, ambas desenvolvidas com o Apple ARKit e reconhecidas pelas suas inovadoras contribuições à exploração sonora e imersão virtual. Ao facultar aos utilizadores a capacidade de criarem os seus próprios ambientes sonoros virtuais adaptativos, mediante o carregamento de sons personalizados, promove-se uma experiência auditiva interativa e profundamente imersiva. Uma particularidade deste projeto é a sua interface de utilizador e a manipulação do espaço virtual, que expandem as possibilidades para além das oferecidas pelo Plugsonic, cuja abordagem é mais conservadora, tendendo a uma experiência mais limitada no que concerne ao movimento tridimensional da cabeça e dos objetos no espaço. Inspirado pelas plataformas mencionadas, o desenvolvimento orientou-se para uma solução adaptada às especificidades dos dispositivos Android, contribuindo assim para o enriquecimento do ecossistema de ferramentas destinadas à criação e exploração de ambientes auditivos virtuais, e instigando a inovação tecnológica neste domínio. Contudo, enfrentam-se desafios inerentes à diversidade de hardware e às limitações de processamento de alguns dispositivos Android, que foram atenuados com recurso a otimizações técnicas, apesar da variabilidade destes dispositivos permanecer como uma consideração relevante no design e implementação de aplicações desta índole. Reconhece-se o valor e a inspiração provenientes de WalkThroughMusic e Plugsonic Soundscape, cujas realizações pavimentam o caminho para democratizar o acesso a tecnologias avançadas de espacialização sonora, promovendo VAS mais acessíveis e envolventes.

O início do projeto focou-se na elaboração da cena principal, programando-se um *shader* que emula um estilo néon num plano ornado com uma grelha, e ajustando-se o fundo panorâmico de forma a harmonizar-se com o ambiente estético predefinido. Paralelamente, implementou-se um mecanismo de salvaguarda automática do desenvolvimento, uma medida crucial para prevenir a perda de progresso, particularmente útil em situações onde potenciais

erros de código pudessem comprometer o funcionamento do Unity. A cena foi aprimorada com efeitos visuais sofisticados no *shader* para prevenir uma aparência excessivamente estática, aplicando-se um efeito de desfocagem que variava conforme a distância. Ainda, configurou-se a câmara para acompanhar o avatar do jogador, aprimorando a experiência com a adição de iluminação dinâmica que seguia a câmara.

No âmbito do projeto, considerou-se inicialmente a utilização do GPS para mapear sons no mundo real, assim como no projeto SoundScaper, visando criar uma forma de AR, contudo, a limitada precisão do GPS em smartphones revelou-se um impedimento, como evidenciado na aplicação WalkThroughMusic; esta, de forma inovadora, recorre à câmara do telemóvel ou tablet iOS para o reconhecimento de movimento, substituindo o uso do GPS, o que possibilita um mapeamento e reconhecimento de movimentos mais precisos e eficazes. Contudo, decidiu-se abandonar a integração do movimento físico do dispositivo, concentrando-se, em vez disso, no movimento virtual por controlo tátil.

Com a evolução do projeto, adicionou-se botões de interação. Realizaram-se otimizações técnicas para aprimorar o desempenho e importaram-se elementos visuais dinâmicos, como efeitos de luz e partículas, para adicionar vitalidade à cena. Desenvolveu-se uma interface tátil para a aplicação, deliberadamente concebida para dispensar HMDs ou técnicas de rastreamento de movimentos, focando-se numa experiência auditiva imersiva controlada de forma tátil, uma abordagem pensada para superar as limitações dos sistemas de VR móvel que dependem de HMDs e oferecer uma alternativa de imersão acessível e viável através de smartphones, capitalizando o som como elemento central e tornando o uso de auscultadores suficiente para uma experiência imersiva.

Refinou-se a interação com a implementação de movimento do utilizador e ajustes na câmara, optando-se por uma perspetiva em primeira pessoa para uma experiência mais envolvente, complementada pela integração de um *joystick* virtual. Melhorias contínuas foram aplicadas ao movimento e à orientação da câmara, e desenvolveram-se interfaces para funções adicionais, como o controlo da iluminação e o acesso a configurações. A experiência de navegação foi ainda enriquecida com a opção de utilizar o giroscópio, oferecendo uma alternativa para uma rotação de câmara mais fluida e intuitiva.

Posteriormente, procedeu-se ao desenvolvimento de um painel de configurações, incorporando opções ajustáveis, entre as quais se inclui a ativação ou desativação do giroscópio. Foi programada uma funcionalidade específica para a colocação e manipulação de sons no espaço virtual, assegurando uma interação precisa e intuitiva. Com o intuito de assegurar uma

integração eficiente com o sistema operativo Android, importaram-se ferramentas especializadas e desenvolveu-se uma UI simplificada, o que visou garantir uma operação fluida e eficiente na plataforma móvel, fundamental para a usabilidade e acessibilidade da aplicação em dispositivos móveis.

Uma das ferramentas do Unity são os *prefabs*, objetos que podem ser instanciados várias vezes com as mesmas propriedades e componentes, permitindo criar elementos complexos e reutilizáveis que podem ser facilmente modificados e atualizados. O projeto utiliza *prefabs*, que mantêm a sua configuração original em múltiplas instâncias, facilitando a alteração do *prefab* original e a aplicação das mudanças a todos os seus clones, o que melhora a programação e a consistência do projeto. As orbes, que representam um ponto sonoro no espaço virtual, são um *prefab* com um *script* associado que define o seu comportamento, um som que define a sua fonte sonora individual, e um material que define a sua aparência, podendo estes elementos ser facilmente modificados e replicados.

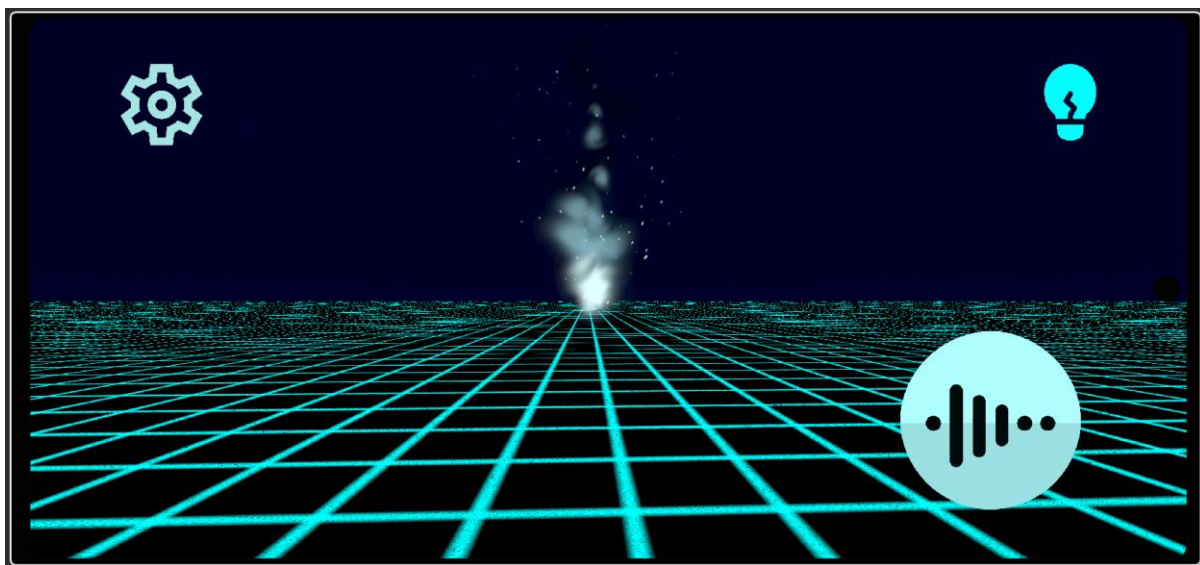


Figura 10: UI da Aplicação Móvel para Exploração de VAS¹⁴

O protótipo, mostrado na Figura 10, utiliza uma esfera de fumo animada como representação visual da fonte sonora. A estética visual adota uma paleta de cores que inclui o Azul Imperial e o Ciano, conferindo à plataforma um ambiente estilizado em néon. A adoção de quadrados na construção do solo virtual deve-se à sua capacidade de conferir uma percepção de profundidade e organização espacial, essenciais para a navegação num ambiente 3D. Esta

¹⁴ Captura obtida através do simulador Unity, exibindo a UI da aplicação VAS, com uma representação visual de áudio figurada por um *orb* de fumo, destacando-se num contexto de fundo cibernético de tonalidade *néon* azulado. A imagem foi registada no dia 13 de dezembro de 2023.

forma, reconhecida por induzir uma sensação de familiaridade e estabilidade, é frequentemente associada a ambientes digitais padrão, o que facilita a orientação do utilizador. A escolha quadrangular permite, ainda, uma tesselação eficaz e uma gestão computacional simplificada, essenciais para a renderização fluida e para o cálculo preciso de interações no espaço virtual, aliando estética reconhecível a funcionalidade prática.

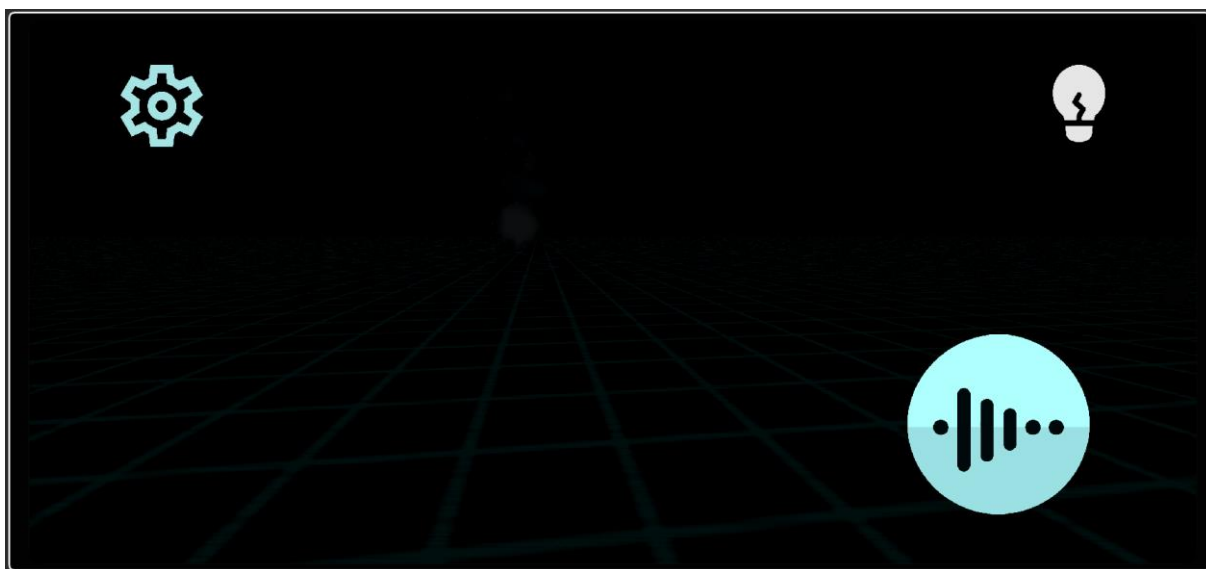


Figura 11: UI Noturna da Aplicação Móvel VAS

A incorporação da funcionalidade de atenuação luminosa na aplicação, ilustrada na Figura 11, foi delineada para realçar a experiência auditiva, facultando um botão que permite aos utilizadores atenuar prontamente a intensidade dos elementos visuais e um controlo deslizante nas definições para ajustes precisos do nível de luminosidade. Esta abordagem assegura uma transição suave para o modo de baixa luminosidade, otimizando a imersão sonora e contribuindo simultaneamente para a eficiência energética do dispositivo, em conformidade com práticas sustentáveis e o bem-estar do utilizador.

A utilização dos sensores de giroscópio em *smartphones* abre novos horizontes para a experiência em VAS, permitindo a adoção de HMDs de baixo custo compatíveis com estes dispositivos, enquanto a interação tátil nos dispositivos móveis se revela como um método intuitivo para a navegação espacial sonora, independente de rastreamento tradicional. O projeto visa potenciar estas funcionalidades, desenvolvendo uma interface visual orientada para o áudio, que não só prolonga a duração da bateria, mas também combina rastreamento e interatividade tátil para enriquecer a experiência auditiva e estimular a exploração de *design* sonoro avançado.

A escolha de *smartphones* como plataforma para este projeto é justificada pela sua acessibilidade e capacidade de resposta tátil, apresentando-se como uma alternativa viável aos dispendiosos sistemas de VR tradicionais. Os desafios impostos pelas limitações de processamento de certos dispositivos Android foram ultrapassados através de soluções criativas, realçando a versatilidade do Unity no desenvolvimento, com a execução deste projeto a destacar não só o potencial, mas também os desafios associados ao Unity, nomeadamente em termos de modularidade na criação de elementos e na necessidade imperativa de adaptação contínua face às questões de compatibilidade e atualização de bibliotecas, sublinhando assim a importância crítica de um desenvolvimento que seja ao mesmo tempo dinâmico e adaptável.

No contexto do uso do giroscópio, foram desenvolvidas duas modalidades de interação distintas. A primeira baseia-se exclusivamente na relação espacial entre o telemóvel e o chão, sendo esta dinâmica determinada pela linha base estabelecida pelo próprio dispositivo. A segunda, embora também recorra ao giroscópio, introduz uma componente tátil para definir o ponto inicial da interação, resultando numa fusão entre o tato e a tecnologia giroscópica. Esta abordagem proporciona um tipo de rastreamento personalizado, oferecendo ao utilizador a possibilidade de manter as mãos próximas ao corpo, evitando a necessidade de extensão excessiva dos braços ou o uso de um HMD. Adicionalmente, embora possa parecer pouco convencional, esta interação permite fixar o telemóvel na cabeça, acoplado aos auscultadores ou a uma fita, para um rastreamento da cabeça rudimentar, o que otimiza o realismo e a interação no ambiente virtual, potenciando a imersividade da experiência sonora.

A integração de HRTFs, particularmente através do uso do Google Resonance Audio, constitui um elemento fundamental desta aplicação, impulsionando uma espacialização sonora substancialmente mais realista e envolvente que intensifica a percepção de presença no VAS e é vital para alcançar a imersão sonora desejada, expandindo os limites da experiência auditiva. O Resonance Audio, comparativamente a outras soluções como o Steam Audio, distingue-se pela sua capacidade de controlar com maior precisão efeitos como oclusão, obstrução e direccionalidade do som, elementos cruciais em VAS complexos. Esta ferramenta destaca-se pela sua adaptabilidade e robustez. Gorzel et al. (2019) enfatizam a eficiência computacional do Resonance Audio, sobretudo em dispositivos móveis, graças ao seu enfoque em algoritmos otimizados de espacialização sonora. A eficácia deste sistema é reforçada pela eliminação de componentes intensivos em termos computacionais, como a matriz de decodificação e a filtragem de prateleira, melhorando o desempenho em sistemas com recursos limitados. em testes realizados, o Resonance Audio usou menos de 1% da CPU num Google Pixel de primeira

geração, evidenciando a baixa demanda de recursos e a alta eficiência do sistema em dispositivos móveis. Combinando estas características com a facilidade de uso e a vasta documentação disponível, o Resonance Audio emerge como uma ferramenta altamente adequada e poderosa, promovendo uma experiência de som envolvente e tecnicamente sofisticada no ambiente móvel. O sistema é otimizado primariamente para uso com *headphones*, uma escolha comum em dispositivos móveis, garantindo uma experiência auditiva de alta qualidade sem a necessidade de sistemas de som mais complexos. A compatibilidade do Resonance Audio com diversas plataformas e motores, incluindo a Unity, e o seu caráter de código aberto, permitem uma implementação e otimização simplificadas, tornando-o uma escolha vantajosa para o desenvolvimento do projeto.

5.2. Sugestões para Desenvolvimentos Futuros

O plano inicial, repleto de ideias ambiciosas, enfrentou desafios devido à complexidade inesperada na programação de alguns aspetos, impedindo a implementação de algumas funcionalidades, cuja futura integração na aplicação não só representará um avanço significativo pela inovação intrínseca de cada uma, mas também pela sinergia que surgirá da sua união numa única plataforma.

Em seguimento a esta visão, propõe-se, inicialmente, a diferenciação entre modos de criação e exploração. No modo de criação, os utilizadores teriam a liberdade para criar os seus próprios VAS, enquanto no modo de exploração, estariam limitados a experienciar espaços auditivos concebidos por outros. Esta distinção fomentaria uma dinâmica colaborativa, resguardando a integridade artística dos espaços sonoros. Paralelamente, a implementação de uma lista de salas, gerida através de um servidor, simplificaria a descoberta e a exploração de novos VAS, incentivando a formação de uma comunidade interativa e empenhada.

A possibilidade de partilha de experiências em tempo real, viabilizada por microfones em funcionamento contínuo, facultaria aos utilizadores a oportunidade de navegar em conjunto no espaço 3D. Esta funcionalidade enriqueceria significativamente a experiência através de interações sociais e espontâneas. Tal característica intensificaria a imersão nos VAS, conferindo à experiência uma dinâmica mais envolvente. Paralelamente, a implementação de comandos de voz para a gestão de determinadas funcionalidades da aplicação não só simplificaria a interação com a interface, mas também elevaria a acessibilidade, possibilitando que os utilizadores se concentrassem mais nos aspetos auditivos da experiência.

De particular relevância na proposta de desenvolvimento é a implementação de gatilhos de início/paragem. Esta funcionalidade permitiria aos utilizadores estabelecer gatilhos temporais e geográficos para os sons. O mecanismo subjacente a esta inovação reside na capacidade de definir temporizadores ou indicadores que desencadeiam eventos sonoros, proporcionando a criação de narrativas interativas e adaptáveis. A interatividade advém da dependência destes eventos sonoros relativamente à localização e movimentação do jogador no espaço virtual. Tal abordagem abre um leque de possibilidades para o desenvolvimento de histórias imersivas e personalizadas. Por exemplo, poder-se-ia conceber uma narrativa interativa na qual sons concorrentes são ativados e, dependendo da trajetória escolhida pelo utilizador face a esses sons, diferentes sequências sonoras, e consequentemente narrativas, seriam acionadas. Esta estrutura narrativa dinâmica não só aumentaria a imersão do utilizador nos VAS, como também proporcionaria uma experiência auditiva única e profundamente personalizada.

A opção de alternância entre vistas em primeira pessoa e visão aérea proporcionaria aos utilizadores uma perspetiva adicional na exploração dos VAS. Esta mudança de perspetiva revelar-se-ia uma ferramenta útil tanto para a criação como para a edição de espaços. Paralelamente, a capacidade de determinar a posição dos sons em relação a um ponto específico no espaço, ajustando a distância e o ângulo a partir de um círculo central, permitiria uma configuração mais precisa e intencional dos elementos sonoros. Esta funcionalidade é essencial para a conceção de experiências auditivas detalhadas e cativantes. Tal poderia ser conjugado com zonas circulares definíveis para os sons, onde seria possível ajustar a distância até à qual o som permanece audível.

Uma das funcionalidades inicialmente contempladas e alvo de tentativas de implementação, mas que acabaram por revelar-se infrutíferas devido à limitação temporal e à complexidade inerente, foi a capacidade de integrar uma interface de síntese sonora dentro da própria aplicação de criação de VAS. A solução Audio Helm, compreendendo um sintetizador ao vivo, sequenciador e sampler no Unity, constituiria uma opção adequada para tal, facilitando a criação de efeitos sonoros dinâmicos e música generativa em jogos. Esta integração ofereceria aos utilizadores a possibilidade de parametrização da síntese sonora, proporcionando uma plataforma avançada e intuitiva para a modelação de ambientes sonoros. Contudo, a descontinuação do Helm e a subsequente falta de suporte levaram à decisão de não prosseguir com a sua integração no protótipo. Como alternativa, é sugerido o CsoundUnity, um *wrapper*

do Csound para o Unity, apresentando-se como uma opção robusta e com suporte mais consistente, disponível no GitHub, para a implementação de síntese sonora no Unity Engine.

Faust – Functional Audio Stream –, uma linguagem de programação funcional para síntese sonora e processamento de áudio, destaca-se pela sua simplicidade e facilidade de compreensão em relação ao C++, permitindo que o seu compilador traduza especificações de DSP em Faust para diversas linguagens. Na aplicação móvel desenvolvida, considerou-se a integração de código Faust, através da biblioteca ConvertFaust2Unity, para o desenvolvimento de efeitos sonoros personalizados ou síntese sonora, mas tal integração exigiria programação adicional e a utilização de arquivos específicos para operacionalização no ambiente Unity. A complexidade desta implementação levou à sua não execução imediata, mas permanece como uma opção viável e atrativa para futuros aprimoramentos da aplicação.

Outras ideias que poderiam ser implementadas incluem a adição de orbes móveis, complementando as estacionárias já existentes, para permitir aos utilizadores mapear sons em representações visuais dinâmicas, como círculos no chão e bolas de fogo simbolizando a fonte do som. Esta inovação aumentaria a flexibilidade e criatividade na disposição dos elementos sonoros no espaço virtual. Adicionalmente, a funcionalidade de cortar a duração do áudio carregado, editando os pontos de início e fim, ofereceria um controlo mais apurado sobre o conteúdo sonoro, facilitando a adaptação dos sons às especificidades de cada VAS. A implementação de funcionalidades reativas ao movimento, como passos em água, e a possibilidade de adicionar um som de fundo constante e contextual, conforme enfatizado por Begault (2000), intensificariam a sensação de presença e enriqueceriam a imersão e interatividade nos VAS, reforçando a autenticidade do ambiente virtual.

A implementação de VAS na educação e terapia sonora tem o potencial de revolucionar a interação com o ambiente de aprendizagem e o bem-estar mental. A imersividade proporcionada por estas tecnologias permite a criação de cenários educativos e terapêuticos altamente envolventes, onde os utilizadores podem sentir-se mais presentes e ligados ao conteúdo e à experiência. Por exemplo, em contextos educativos, os VAS podem criar simulações realistas que facilitam a aprendizagem experiencial, permitindo aos alunos explorar conceitos abstratos de uma forma mais palpável e interativa.

No campo da terapia sonora, a aplicação de VAS oferece um meio inovador para sessões de meditação e *mindfulness*. Estas sessões, enriquecidas com ambientes sonoros interativos, proporcionam uma maior sensação de presença, crucial para a prática eficaz da *mindfulness*. A interatividade dos VAS permite a inclusão de estímulos sonoros adicionais,

adaptáveis às necessidades e preferências individuais, intensificando assim a experiência meditativa. Além disso, a utilização de VAS em terapias de exposição, onde os utilizadores são gradualmente expostos aos seus medos pessoais através do som, abre novas possibilidades tanto para a prática psicológica quanto para explorações artísticas, oferecendo uma abordagem segura e controlada para o enfrentamento de fobias e ansiedades. É importante salientar que já existem várias aplicações no mercado que incorporam som espacializado com o objetivo de facilitar a meditação. De facto, este parece ser um dos aspetos mais explorados comercialmente nas aplicações móveis de áudio espacial, ao lado dos videojogos. Estas aplicações demonstram o potencial e o interesse crescente na utilização de VAS para promover o bem-estar mental, sublinhando a sua relevância e aplicabilidade prática em contextos além do entretenimento.

A escolha do Android como plataforma inicial para o desenvolvimento de aplicações na área de VAS foi uma decisão estratégica, considerando a sua ampla adoção e acessibilidade no mercado global. Esta escolha facilita o acesso a uma vasta gama de utilizadores, proporcionando uma base sólida para a introdução e adoção destas tecnologias. Contudo, a expansão para outras plataformas, como iOS e Windows, representa um passo significativo no desenvolvimento de aplicações de VAS. Através desta otimização multiplataforma, é possível alcançar uma audiência ainda mais ampla, permitindo que diferentes grupos de utilizadores, com preferências variadas de sistemas operativos, possam explorar e beneficiar das potencialidades imersivas que os VAS oferecem. Este enfoque em várias plataformas é fundamental para o avanço e a disseminação mais abrangente destas tecnologias, aumentando seu impacto e relevância em diversos contextos.

O desenvolvimento de algoritmos avançados para áudio espacial, como HRTFs personalizados e IA para criar ambientes sonoros dinâmicos, é crucial para proporcionar uma experiência auditiva mais rica e adaptada às necessidades individuais nos VAS. A otimização e integração destas técnicas com aprendizagem automática e IA é de suma importância no contexto tecnológico atual. Prevê-se que HRTFs personalizadas, ajustadas às características anatómicas de cada utilizador, tragam uma evolução significativa na experiência sonora em VAS, aproximando-a da realidade e proporcionando um nível de imersão e realismo sonoro sem precedentes. As colaborações académicas são essenciais para impulsionar este desenvolvimento.

É pertinente destacar o papel preponderante da emergência da IA na geração processual de áudio representa um marco significativo. Esta inovação permite a criação de paisagens sonoras dinâmicas e adaptativas, que respondem em tempo real a diferentes estímulos

e contextos. A abordagem processual potenciada pela IA inaugura um panorama de possibilidades inéditas para a arte sonora, propiciando experiências auditivas enriquecidas e profundamente imersivas. Além disso, a aplicação da IA em sistemas de som 5.1, por exemplo, pode revolucionar a experiência da espacialização sonora em ambientes virtuais. A capacidade de IA para analisar, adaptar e otimizar o som em função das características específicas de cada ambiente e utilizador promete uma personalização e uma precisão acústicas sem precedentes. Além disso, a IA pode contribuir para o desenvolvimento de algoritmos avançados de HRTF, proporcionando uma experiência ainda mais realista e imersiva nos VAS. Estes avanços têm o potencial de não só melhorar a qualidade da experiência auditiva, mas também de abrir novas avenidas para a investigação e a criação artística no domínio da espacialização sonora, sugerindo um futuro onde a interação entre som e tecnologia alcança patamares de sofisticação e eficiência sem paralelo.

Na exploração de alternativas para o desenvolvimento de plataformas de áudio virtual, considera-se o UE como uma opção promissora. A sua interface intuitiva e conjunto abrangente de funcionalidades integradas podem facilitar o processo de desenvolvimento, especialmente para aqueles com menor experiência em programação. A capacidade gráfica avançada do UE, juntamente com as ferramentas de *scripting* visual Blueprints, apresentam oportunidades para criar ambientes auditivos imersivos com maior eficiência. Enquanto a Unity oferece uma abordagem modular que permite personalização extensa, o UE, com a sua abordagem mais integrada e de fácil utilização para o utilizador, emerge como uma alternativa viável e potencialmente mais eficaz para iniciativas que procurem realismo sonoro.

Especificamente no que diz respeito à espacialização sonora, o UE demonstra um potencial notável. Com a introdução de funcionalidades como a reverberação baseada em volumes e suporte para renderização de áudio 3D, este motor de jogo possibilita a criação de espaços sonoros altamente realistas e envolventes. Estas funcionalidades permitem aos desenvolvedores simular com precisão a acústica de ambientes reais, gerando uma experiência auditiva mais rica e imersiva. Além disso, a integração de áudio 3D abrangente no UE facilita a implementação de sons que emanam de todas as direções, crucial para a criação de ambientes virtuais verosímeis. Esta capacidade de produzir áudio espacializado detalhado e de alta qualidade estabelece o UE como uma ferramenta poderosa para projetos que visam aprofundar a imersão auditiva em espaços virtuais.

É importante salientar que a aplicação se encontra ainda numa fase prototípica. Com o desenvolvimento futuro, será crucial recolher *feedback* dos utilizadores sobre a imersividade

da experiência, utilizando métricas como a SAQAM - Spatial Audio Quality Assessment Metric. Este processo de avaliação e aperfeiçoamento é essencial, não apenas para a evolução da aplicação em si, mas também como um valioso contributo para o campo académico, especialmente nos estudos de som, engenharia de áudio, e tecnologias de áudio 3D.

No âmbito académico, os VAS, enquanto forma de VR que se foca exclusivamente no som, abrem um vasto campo de investigação e desenvolvimento. A sua utilização vai além do entretenimento em videojogos, estendendo-se à experiência e prática artística, oferecendo novas formas de expressão e interação sonora. É fundamental incentivar a pesquisa contínua nesta área, explorando as suas aplicações em diferentes contextos e investigando como futuras funcionalidades podem ser implementadas. Através desta abordagem, pode-se não só aprimorar a tecnologia existente, mas também descobrir novos caminhos para a experiência sonora imersiva e a sua aplicação em diversas áreas, desde a arte até à terapia sonora e educação.

As recomendações delineadas visam enriquecer a aplicação móvel de VAS em desenvolvimento, mas também servem como inspiração e orientação para projetos semelhantes no domínio da tecnologia sonora. Apesar de estas propostas poderem impulsionar a interatividade nas experiências auditivas virtuais, reconhece-se a importância dos desafios e da necessidade de investigação contínua para a sua efetiva implementação. Estes avanços, embora promissores, representam etapas num percurso de descoberta e aprendizagem contínua na área da produção e tecnologia sonora.

Em suma, este projeto apresenta-se como um contributo significativo para o avanço do conhecimento académico e técnico no domínio dos VAS. Visando aprofundar as experiências auditivas de forma mais rica e imersiva e estabelecer bases para investigações e avanços futuros em espacialização sonora. A eficácia dos *smartphones* como plataforma para a exploração de VAS demonstra o potencial da integração de tecnologias móveis na arte sonora. Além disso, a sinergia entre arte sonora e tecnologia, aliada à integração de conceitos teóricos avançados, abre novas vias para a expressão artística e a inovação tecnológica, contribuindo para uma redefinição profunda dos estudos de som. Esta abordagem estabelece novas direções para a exploração e compreensão do som em ambientes virtuais, desempenhando um papel crucial no enriquecimento da experiência auditiva e na expansão dos horizontes dos estudos de som.

6. Conclusão

Esta dissertação focou-se na criação de uma aplicação móvel para a conceção e exploração de VAS, destacando-se pela integração do som espacializado em ambientes virtuais, desenvolvida na plataforma Unity e otimizada para Android, representando um marco importante na convergência entre a tecnologia de som, arte sonora e realidade virtual, e introduzindo uma nova dimensão na experiência auditiva digital.

A investigação desenvolvida abrangeu tanto a análise teórica como a prática, permitindo demonstrar como os VAS podem gerar experiências auditivas imersivas, superando as limitações inerentes aos sistemas de som tradicionais. Através da implementação de funcionalidades como a espacialização sonora otimizada e a navegação intuitiva, revelou-se o vasto potencial dos VAS, que se estende desde a criação artística sonora até ao uso em terapias baseadas em som, evidenciando a sua aplicabilidade em diversos contextos.

A decisão estratégica de utilizar a plataforma Unity e o Android visou maximizar a acessibilidade e a usabilidade da aplicação, assegurando que esta pudesse ser facilmente adotada por um público alargado e contribuir para uma maior apreciação e compreensão das tecnologias de som avançadas. Este aspeto foi fundamental para democratizar o acesso a experiências sonoras sofisticadas, anteriormente restritas a contextos especializados. Os desafios enfrentados, particularmente na otimização de desempenho para dispositivos móveis, foram aparentemente superados, demonstrando a capacidade do projeto de operar eficientemente mesmo com recursos de *hardware* limitados. Esta eficácia na gestão de recursos contribui significativamente para a viabilidade da aplicação, assegurando uma experiência de som rica e envolvente em dispositivos móveis.

Além de avanços técnicos, o trabalho contribuiu significativamente para o campo académico, fornecendo novos desenvolvimentos sobre a aplicação prática de teorias sonoras em contextos digitais. A fusão entre arte sonora e tecnologia móvel abre caminho para novas formas de expressão artística e inovação tecnológica, redefinindo a relação entre o som e a tecnologia num mundo cada vez mais digitalizado. Este projeto, ao estabelecer uma base sólida para futuras investigações e desenvolvimentos no campo dos VAS, não só propõe uma expansão contínua das suas funcionalidades e do seu escopo, mas também incentiva a experimentação e desenvolvimentos na intersecção da produção de som com a tecnologia e a arte, o que é fundamental para a evolução dos VAS.

Concluindo, a presente dissertação, através de um estudo aprofundado, sugere a viabilidade técnica e artística dos VAS em dispositivos móveis. Este trabalho, inserido no vasto e dinâmico campo da espacialização sonora e ainda que representando apenas um pequeno contributo, aspira a avançar na evolução deste domínio, focando-se particularmente nas suas aplicações práticas em dispositivos móveis e propondo-se modestamente a influenciar a interação com o som no ambiente digital. A investigação realizada abre caminhos para futuras explorações e inovações, destacando-se como um ponto inicial para aprofundamento e desenvolvimento contínuo na área da espacialização sonora e da sua integração com a VR. É importante destacar que a aplicação desenvolvida possui um potencial que ultrapassa o escopo desta investigação, e será objeto de contínuo desenvolvimento. As limitações temporais inerentes a um projeto de mestrado impediram a sua completa exploração, todavia, está prevista a sua evolução e aprimoramento futuros, ampliando assim as possibilidades e o alcance desta abordagem à espacialização sonora em dispositivos móveis.

Referências Bibliográficas

- Algazi, V. R., Duda, R. O., Thompson, D. M., & Avendano, C. (2001). *The CIPIC HRTF database*. Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (Cat. No.01TH8575), 99-102.
- Algazi, V. R., & Duda, R. O. (2011). *Exploiting head motion for immersive communication*. IEEE Signal Processing Magazine, 33, 33-42.
- Amadeo, R. (2021). *Google's VR dreams are dead: Google Cardboard is no longer for sale*. Ars Technica. Retrieved from <https://arstechnica.com/gadgets/2021/03/googles-vr-dreams-are-dead-google-cardboard-is-no-longer-for-sale/>
- Arámbula-Cosío, F., Orduña-Bustamante, F., & Torres-Gallegos, E. A. (2015). *Personalization of head-related transfer functions (HRTF) based on automatic photo-anthropometry and inference from a database*. Applied Acoustics, 97, 84-95.
- Baudrillard, J. (1991). *Simulacros e Simulação*. Relógio D'Água.
- Begault, D. R. (2000). *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Ames Research Center, Moffett Field, California: National Aeronautics and Space Administration.
- Belloch, J. A., Ramos, G., Badia, J. M., & Cobos, M. (2020). *An Efficient Implementation of Parallel Parametric HRTF Models for Binaural Sound Synthesis in Mobile Multimedia*. ACCESS, 1-2.
- Berardi, F. (2011). *After the Future*. AK Press.
- Berger, C. C., Gonzalez-Franco, M., Tajadura-Jiménez, A., Florencio, D., & Zhang, Z. (2018). *Generic HRTFs May be Good Enough in Virtual Reality. Improving Source Localization through Cross-Modal Plasticity*. Frontiers in Neuroscience, 12, 21.
- Binelli, A., Demenescu, A., & Avanzini, F. (2018). *Individualized HRTF for playing VR videos with Ambisonics spatial audio on HMDs*. Journal of Audio Engineering Society, 1-12.
- Blauert, J., & Braasch, J. (2011). Binaural signal processing. In *17th DSP 2011 International Conference on Digital Signal Processing*, Proceedings (pp. 1-11).
- Bogue, D. J. (1969). *Principles of demography*. John Wiley & Sons.
- Boren, B. (2017). History of 3D Sound. In A. Roginska & P. Geluso (Eds.), *Immersive Sound* (p. 23). Focal Press.
- Bostrom, N. (2003). *Are you living in a computer simulation?* Philosophical Quarterly, 53, 243-55.

Brant, H. (1978). Space as an essential aspect of musical composition. In E. Schwartz & B. Childs (Eds.), *Contemporary Composers on Contemporary Music* (pp. 223-242). New York: Da Capo Press.

Bresler, Z. (2021). *Immersed in Pop: 3D Music, Subject Positioning, and Compositional Design in The Weeknd's Blinding Lights in Dolby Atmos*. *Journal of Popular Music Studies*, 33(3), 84-87.

Brooks, F. P. (1999). *What's real about virtual reality?* *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6), 16–27.

Bull, M. (2007). *Sound Moves: iPod Culture and Urban Experience*. Routledge.

Burns, R. (1999). *Blumlein and the birth of stereo*. *IEE Review*, 45(6), 269-273.

Campbell, I. (2017). *John Cage, Gilles Deleuze, and the Idea of Sound*. *Parallax*, 23(3), 361-378.

Campbell, I. (2020). *Sound's matter: 'Deleuzian sound studies' and the problems of sonic materialism*. *Contemporary Music Review*, 39(5), 618-637.

Carlile, S. (1996). *Virtual Auditory Space: Generation and Applications*. Landes Bioscience.

Carrilho, J. M. (2023). *Imersão, transparência e desaparecimento: Uma estética paradoxal*. In *A experiência sonora: Da linearidade à circularidade*. Documenta/Sistema Solar.

Carroll, S. M. (2019). *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime*. Dutton.

Chalmers, D. J. (2023). *Reality+ Virtual Worlds and the Problems of Philosophy*. *Soc*, 60, 249–254.

Cherry, E. C. (1953). *Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(5), 975-979.

Chion, M. (1994). *The three listening modes* (pp. 48–53). *The Sound Studies Reader: Sterne*.

Cirone, J. (2017). *Head Related Transfer Functions (HRTFs)*. ECE Senior Capstone Project 2017 Tech Notes, 0-3.

Cliffe, L. (2021). *SoundScaper*. GitHub. Retrieved from <https://github.com/laurencecliffe/SoundScaper/>

Cobussen, M. (2021). Introduction to Part II: Art – Research – Method. In M. Bull & M. Cobussen (Eds.), *The Bloomsbury Handbook of Sonic Methodologies* (pp. 283-296). Bloomsbury, NY.

- Collins, K. (2008). *Game sound: An introduction to the history, theory, and practice of video game music and sound design*. MIT Press.
- Comunità, M., Gerino, A., & Picinali, L. (2022). *PlugSonic: a web- and mobile-based platform for dynamic and navigable binaural audio*. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, (2022:18).
- Cox, C. (2011). *Beyond Representation and Signification: Toward a Sonic Materialism*. Journal of Visual Culture, 10(2), 145-161.
- Deleuze, G. (2021). *A Filosofia Crítica de Kant* (G. Franco, Trad.). Edições 70, Lisboa. (Original work published 1963).
- Deleuze, G. (2008). *Diferença e repetição* (L. Orlandi & R. Machado, Trad.). Relógio d'Água, Lisboa. (Original work published 1968).
- Deleuze, G. (1996). O atual e o virtual. In *Dialogues*, de Gilles Deleuze e Claire Parnet. Retrieved from https://antropologiassociativa.files.wordpress.com/2010/06/deleuze_1996_o-atual-e-o-virtual_bookchapt.pdf
- Dyson, F. (2009). *Sounding New Media: Immersion and Embodiment in the Arts and Culture*. University of California Press.
- Edison, T. A. (1888). *The perfected phonograph*. The North American Review, 146(379), 641-650.
- Eisenberg, A. J. (2015). Space. In D. Novak & M. Sakakeeni (Eds.), *Keywords in Sound* (pp. 193-207). Duke University Press.
- Eng, M. (2017). *The Sonic Turn and Theory's Affective Call*. Parallax, 32(3), 316-329.
- Etgar, D., Syafei, W. A., Zijlmans, J., & Yuan, Z. (2013). *3D Room Visualization on Android Based Mobile Device (with Philips™ Surround Sound Music Player)*. International Journal of Science and Engineering, 4(1), 24-29.
- Ferrand, S., Alouges, F., & Aussal, M. (2019). *HRTF and panning evaluations for binaural audio guidance*. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germany.
- Ferrara, L. (1991). *Philosophy and the Analysis of Music: Bridges to Musical Sound, Form, and Reference*. Bryn Mawr, PA: Excelsior Music Publishing.
- Fialho, L., Oliveira, J., Filipe, A., & Luz, F. (2021). *Soundspace VR: spatial navigation using sound in virtual reality*. Virtual Reality.
- Finney, N., & Janer, J. (2010). *Soundscape Generation for Virtual Environments using Community-Provided Audio Databases*.

Firat, H. B., Maffei, L., & Masullo, M. (2022). *3D sound spatialization with game engines: The virtual acoustics performance of a game engine and a middleware for interactive audio design*. *Virtual Reality*, 26, 539-558.

Fonseca, N. (2023). *All You Need to Know About 3D Audio*. Sound Particles.

Fukuyama, F. (1992). *The End Of History and the Last Man*. Macmillan.

Garner, T. A. (2017). *Echoes of other worlds: Sound in virtual reality*. Palgrave Macmillan.

Garcia, J., Favory, X., & Bresson, J. (2016). Trajectoires: A Mobile Application for Controlling Sound Spatialization. In *CHI'16 Extended Abstracts* (pp. 3671-3674). San Jose, CA, USA: ACM.

Geronazzo, M., Sikstrom, E., Kleimola, J., de Gotzen, A., Serafin, S., & Avanzini, F. (2018). The impact of an accurate vertical localization with HRTFs on short explorations of immersive virtual reality scenarios. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 110-111). IEEE.

Gorzel, M., Allen, A., Kelly, I., Kammerl, J., Gungormusler, A., Yeh, H., & Boland, F. (2019). *Efficient Encoding and Decoding of Binaural Sound with Resonance Audio*. Audio Engineering Society Conference Paper, 68.

Graham, S., & Aurigi, A. (1997). *Virtual cities, social polarization, and the crisis in urban public space*. *Journal of Urban Technology*, 4(1), 19–52.

Grantham, D. W. (1995). Spatial hearing and related phenomena. In B. C. J. Moore (Ed.), *Hearing* (pp. 297-345). Academic Press.

Grimshaw, M., & Garner, T. (2015). *Sonic Virtuality: Sound as Emergent Perception*. Oxford University Press.

Hackaday. (2019). *Ask Hackaday: Is Anyone Sad Phone VR Is Dead?* Retrieved from <https://hackaday.com/2019/11/13/ask-hackaday-is-anyone-sad-phone-vr-is-dead/>

Hassan, R. (1999). *Globalization: Information Technology and Culture within the Space Economy of Late Capitalism*. *Information, Communication & Society*, 2(3), 300-317.

Hasty, C. (2010). The Image of Thought and Ideas of Music. In B. Hulse & N. Nesbitt (Eds.), *Sounding the Virtual: Gilles Deleuze and the Theory and Philosophy of Music* (1^a ed., pp. 1-22). Routledge.

Hillis, K. (1999). *Digital Sensations: Space, Identity, and Embodiment in Virtual Reality*. University of Minnesota Press.

- Holman, T. (2014). *Surround sound: Up and running (second edition)*. Burlington, USA: Focal Press.
- Holtum, C. (2020). *Simulacra: Using game development software to create audio-visual performance tools*.
- Hope, A., Court, J., Smith, O., et al. (2014). *Alien Isolation*. Horsham, UK: Creative Assembly. (Garner, 2017, p. 232)
- Hong, J. Y., He, J., Lam, B., Gupta, R., & Gan, W.-S. (2017). *Spatial Audio for Soundscape Design: Recording and Reproduction*. *Applied Sciences*, 7(6), 627.
- Kamps, H. J. (2023). *VR is dead*. TechCrunch. Retrieved from <https://techcrunch.com/2023/07/20/vr-is-dead/>
- Kim, G. J. (2005). A SWOT analysis of the field of virtual reality rehabilitation and therapy. *Presence*, 14(2), 119–146.
- Latour, B. (1999). *Pandora's hope: Essays on the reality of science studies*. Harvard University Press.
- Linstead, S., & Thanem, T. (2007). *Multiplicity, Virtuality and Organization: The Contribution of Gilles Deleuze*. *Journal of Organizational Change Management*, 20(3), 365-378.
- Lévy, P. (1996). *O que é o virtual?* (P. Neves, Trad.). Belo Horizonte: OCRBR.
- Long, C. P. (1998). Toward a Dynamic Conception of ousia: Rethinking an Aristotelian Legacy. In *The Paideia Archive: Twentieth World Congress of Philosophy* (Vol. 3, pp. 177-185).
- Lopes, P., Liapis, A., & Yannakakis, G. N. (2015). Sonancia: Sonification of Procedural Content. In *Proceedings of the 10th Audio Mostly: A Conference on Interaction With Sound (AM '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 4, 1-8.
- LoPiccolo, T., et al. (1998). *Thief: The Dark Project*. USA: Looking Glass Studios.
- MacDonald, C. (2009). *Scoring the work: Documenting practice and performance in variable media art*. *Leonardo*, 42(1), 59-63.
- Medley, S. (2021). *Embody Immerse Gaming HIVE spatial audio software hands-on*. Notebookcheck. Retrieved December 8, 2021, from <https://www.notebookcheck.net/Embody-Immerse-Gaming-HIVE-spatial-audio-software-hands-on.552294.0.html>
- Memoli, G. (2020). *Spatial Soundscapes and Virtual Worlds: Challenges and Opportunities* (pp. 7-9).

- Mendonça, C., Santos, J. A., Freitas, D., Ferreira, A., & Dias, M. S. (2012). *On the improvement of localization accuracy with non-individualized HRTF-based sounds*. Journal of the Audio Engineering Society, 6.
- Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. (1991). *Sound localization by human listeners*. Annual Review of Psychology, 42(1), 135-159.
- Modena, E., Pinotti, A., & Pirandello, S. (2021). *Virtual Reality and Augmented Reality: New Tools for Art and Politics*. Paradigmi, 39(1), 87-106.
- Nancy, Jean-Luc (2007). *Listening*. New York: Fordham University Press.
- Nurym, N., Sambetova, R., Azybaev, M., & Kerimbayev, N. (2020). *Virtual Reality and Using the Unity 3D Platform for Android Games*. Proceedings of 2020 IEEE 10th International Conference, 539-541.
- O'Keeffe, L., & Kerr, A. (2015). *Reclaiming Public Space: Sound and Mobile Media Use by Teenagers*. International Journal of Communication, 9, 3562-3582.
- Ott, M. (2019). The Virtual as Precondition for Artistic Creation. In J. Braga (Ed.), *Conceiving Virtuality: From Art to Technology* (pp. 95-109). Springer.
- Papacharissi, Z. (2002). *The virtual sphere: The internet as a public sphere*. New Media & Society, 4(1), 9-27.
- Pariser, E. (2011). *The Filter Bubble: What the Internet is Hiding from You*. Penguin Press.
- Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford New York: Oxford University Press.
- Pimentel, K., & Teixeira, K. (1993). *Virtual reality through the new looking glass*. Windcrest: Intel.
- Pinchbeck, D. (2013). *Doom: Scarydarkfast*. University of Michigan Press.
- Poirier-Quinot, D., & Katz, B. (2018). *Impact of HRTF individualization on player performance in a VR shooter game*. AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality, Redmond, United States.
- Pulkki, V., & Karjalainen, M. (2015). *Communication Acoustics: An Introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics*. John Wiley & Sons.
- Rajguru, C., Obrist, M., & Memoli, G. (2020). *Spatial soundscapes and virtual worlds: challenges and opportunities*. Frontiers of Environmental Psychology, 11, 1-9.raj
- Ribeiro, L. C. (2021). Para uma arqueologia dos meios sonoros. In *Crítica das mediações totais*. Lisboa: Documenta.

- Rummukainen, O. S., Robotham, T., & Habets, E. A. P. (2021). *Head-Related Transfer Functions for Dynamic Listeners in Virtual Reality*. Applied Sciences, 11, 6646.
- Rothbucher, M., Kronmüller, D., Durkovic, M., Habigt, T., & Diepold, K. (2011). HRTF Sound Localization. In P. Strumillo (Ed.), *Advances in Sound Localization*. InTech. Available from <http://www.intechopen.com/books/advances-in-sound-localization/hrtf-sound-localization>
- Rumsey, F. (2001). *Spatial Audio*. Focal Press.
- Ryskeldiev, B., Villegas, J., & Cohen, M. (2013). *Exploring virtual sound environments with mobile devices*.
- Salazar-Palma, M., Sarkar, T. K., & Sengupta, D. L. (2009). *Elisha Gray and Alexander Bell telephone controversy*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 51(2), 130-145.
- Sales, M. (2019). *Art and its Relationship with Technology: Virtual Reality*. Journal of Modern Education, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.
- Sánchez, J., Lumbreras, M., & Others. (2002). *VirtualAurea: Perception through spatialized sound*. Proceedings of the 4th International Conference on Disability, Virtual Reality & Associated Technologies.
- Santala, O., & Pulkki, V. (2011). *Directional perception of distributed sound sources*. Journal of the Acoustical Society of America, 129(3), 1522-1530.
- Schafer, R. M. (1993). *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*. Destiny Books.
- Sefercioğlu, E.N., Köse, H. (2021). Audio Centered Game Development in Mobile VR. In: Cordan, Ö., Dinçay, D.A., Yurdakul Toker, Ç., Öksüz, E.B., Semizoğlu, S. (eds) *Game + Design Education*. Springer Series in Design and Innovation, vol 13. Springer, Cham.
- Stiegler, B. (2014), *Symbolic Misery, Volume 1: The Hyperindustrial Epoch*. Polity Press.
- Steuer, J. (1992). *Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence*. Journal of Communication, 42(4), 73–93.
- Sun, X. (2021). *Immersive audio, capture, transport, and rendering: a review*. SIP, 10(e13), 1-24.
- Tanaka, A. (2006). Interaction, experience, and the future of music. In B. Brown & K. O'Hara (Eds.), *Consuming Music Together: Social and Collaborative Aspects of Music Consumption Technologies* (pp. 2, 7, 9). Springer.

Takahashi, K., & Yamamoto, T. (2010). *3D Audio-Visual Display Using Mobile Devices*. SIGGRAPH 2010, Los Angeles, California.

Théberge, P., Devine, K., & Everett, T. (2015). *Living Stereo: Histories and Cultures of Multichannel Sound*. Bloomsbury Publishing USA.

The Verge. (2019). *Phone-based VR is officially over*. Retrieved from <https://www.theverge.com/2019/10/16/20915791/google-daydream-samsung-oculus-gear-vr-mobile-vr-platforms-dead>

Tierney, T. (2013). *The Public Space of Social Media: Connected Cultures of the Network Society*. Routledge. New York.

Trope, Y., & Liberman, N. (2010). *Construal-level theory of psychological distance*. *Psychological Review*, 117(2), 440.

Voegelin, S. (2021). *Sonic Methodologies of Sound*. In M. Bull & M. Cobussen (Eds.). (2021). *The Bloomsbury Handbook of Sonic Methodologies* (pp. 269-283). Bloomsbury, NY.

What Hi-Fi? (2023). *What is Apple Spatial Audio?* Retrieved from <https://www.whathifi.com/advice/what-is-apple-spatial-audio>

Wilson, M. (2002). *Six views of embodied cognition*. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636.

WingyiC. (2021). *3D Sound Virtual Environment*. GitHub. Retrieved from <https://github.com/WingyiC/3D-Sound-Virtual-Environment/>

Xie, B. (2013). *HRTF Individualization: A Survey*. *Journal of Audio Engineering*, 61(7/8), 1-16.

Xie, B. (2020). *Spatial Sound—History, Principle, Progress and Challenge*. *Chinese Journal of Electronics*, 29(3), 397-416.

Zahorik, P., Brungart, D. S., & Bronkhorst, A. W. (2005). *Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research*. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(3), 409-420.

Zuccarelli, M. (2021). *aframe-soundscape*. GitHub. Retrieved from <https://github.com/milenzuccarelli/aframe-soundscape/>