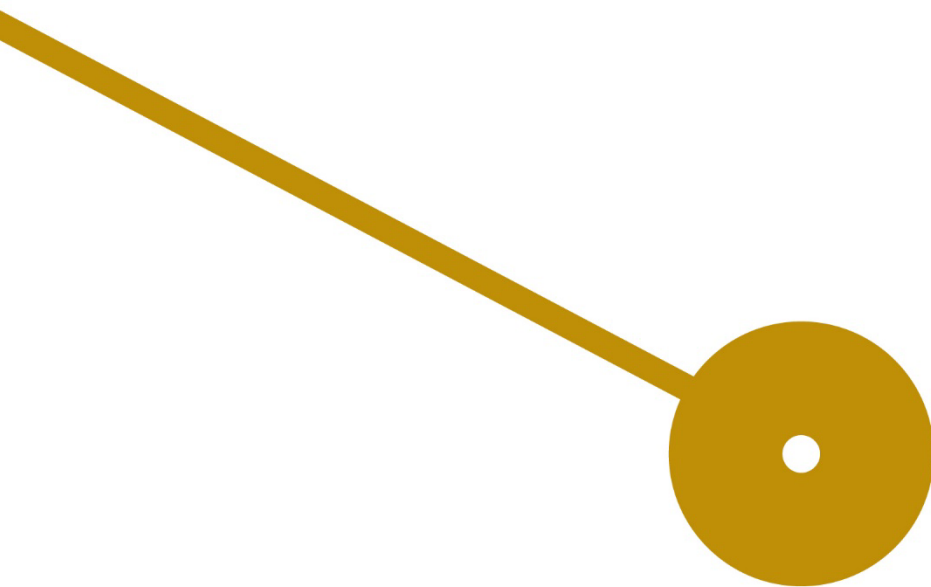


Tecnologias de espacialização sonora aplicadas ao *sound design* de videojogos: estudo comparativo

Guilherme de Bastos Roldão Baptista Bezerra

10/2024





Tecnologias de espacialização sonora aplicadas ao *sound design* de videojogos: estudo comparativo

Guilherme de Bastos Roldão Baptista Bezerra

Projeto apresentado à Escola Superior de Música e Artes do
Espetáculo como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Artes e Tecnologias do Som

Professor Orientador: Pedro Emanuel de Oliveira Santos

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Pedro Santos, pelo apoio e orientações que me permitiram desenvolver e concluir este projeto.

A todos os professores com participação neste mestrado pela partilha dos conhecimentos adquiridos.

A todos os colegas com quem partilhei e desenvolvi matérias que me permitiram consolidar este projeto.

Ao meu amigo Hugo e Rui pelo apoio prestado no desenvolvimento das modelações dos espaços.

À ESMAE pela disponibilização do equipamento de recolha de som.

À Rita pelo carinho, confiança e paciência que tanto contribuíram para a minha decisão.

A todos os meus amigos e família por acreditaram em mim.

E em especial, aos meus pais pela resiliência e credibilidade que permitiram a continuidade e término deste projeto.

Resumo

No âmbito dos videojogos e experiências de realidade virtual, a espacialização sonora considera-se crucial na criação de experiências imersivas e realistas.

Neste sentido, o objetivo principal deste projeto, centrou-se na utilização e exploração das tecnologias disponíveis para o efeito que permitam comparar o som natural dos espaços reais com o mesmo som virtualmente espacializado e cuja análise e desenvolvimento se prendeu com as seguintes fases:

- Seleção, levantamento, medição e modelação 3D com recurso ao programa Blender de três espaços distintos (Régie A e Sala Teresa Macedo, ambas na ESMAE e a Cisterna do Castelo de Marvão).
- Simulação acústica de dois desses espaços recorrendo ao *Unity* como motor de jogo, ao Fmod como ferramenta de *sound design* e ao Steam Audio como *plugin* de espacialização sonora.

Palavras-chave: Videojogos; *Sound design*; Espacialização sonora

Abstract

In the context of video games and virtual reality experiences, sound spatialization is considered to be crucial in creating immersive and realistic experiences.

With this in mind, our main goal in this project was to use and explore available technologies to enable us to compare the natural sound of real spaces with the same virtually rendered sound, whose analysis and development involved the following phases:

- *Selecting, mapping, measuring and 3D modelling three different spaces (ESMAE's Régie A and Sala Teresa Macedo, and Marvão Castle's Cistern).*
- *Acoustic simulation using Unity as a game engine, Fmod as a sound design tool and Steam Audio as a sound spatialization plugin.*

Keywords: *Video games; Sound Design; sound spatialization*

Índice geral

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice geral	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	ix
Índice de Gráficos	ix
Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação inicial e objetivos	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 O Estado da Arte	4
2.1 Evolução e Conceitos	4
2.2 Áudio Dinâmico	7
2.3 A espacialização sonora centrada na percepção do jogador	7
2.3.1 Simulação de reflexões e reverberação.....	9
2.4 Técnicas de espacialização sonora	10
2.4.1 <i>Panning</i> estéreo	10
2.4.2 Áudio Binaural	12
2.4.3 HRTF - Head-related transfer function	13
2.4.4 Ambisonics	15
3 Recursos Tecnológicos	16
3.1 Hardware utilizado	16
3.1.1 Genelec 1031 A.....	16
3.1.2 Marshall Emberton II.....	18
3.1.3 Dummy Head Neumann KU 100.....	19
3.1.4 AKG 391B	20
3.2 Software utilizado	21
3.2.1 Audacity.....	21
3.2.2 Ableton Live 11.....	21
3.2.3 <i>FMOD</i>	23
3.2.4 Unity - Game Engine	24
3.2.5 Steam Audio.....	26
3.2.6 Possibilidades da integração do Steam Audio no Unity.....	27

3.2.7	Blender	30
4	Desenvolvimento	32
4.1	Seleção dos espaços a analisar	32
4.1.1	Régie A.....	32
4.1.2	Cisterna de Marvão	33
4.1.3	Sala Teresa Macedo	34
4.2	Seleção dos sons a implementar	35
4.2.1	Régie A.....	36
4.2.2	Cisterna de Marvão	37
4.2.3	Sala Teresa Macedo	39
4.3	Levantamento dos espaços	40
4.3.1	Régie A.....	40
4.3.2	Cisterna de Marvão	41
4.3.3	Sala Teresa Macedo	42
4.4	Modelação 3D (Blender)	43
4.4.1	Régie A.....	43
4.4.2	Cisterna de Marvão	45
4.4.3	Sala Teresa Macedo	48
4.5	Captações de áudio	49
4.5.1	Régie A.....	50
4.5.2	Cisterna de Marvão	52
4.6	Unity/Steam Audio: definição de materiais acústicos	55
4.6.1	Régie A.....	56
4.6.2	Cisterna de Marvão	60
4.7	Unity/Steam Audio: auralização	61
4.7.1	Régie A.....	73
4.7.2	Cisterna de Marvão	75
5	Auscultação externa - Inquérito	79
5.1	Análise dos resultados.....	81
5.1.1	Cisterna de Marvão	81
5.1.2	Régie A.....	83
6	Conclusão	86
6.1	Resumo do trabalho realizado.....	86
6.2	Limitações encontradas.....	87
6.3	Sugestões de desenvolvimento futuro.....	89
	Bibliografia.....	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Os harmônicos esféricos reais e os seus modos até à terceira ordem.....	15
Figura 2 - Resposta de Frequência da Genelec 1031A	16
Figura 3 - Diretividade na Horizontal da Genelec 1031A	17
Figura 4 - Padrão Polar “Cardióide” da Genelec 1031A.....	17
Figura 5 - Equalização da resposta de Frequência das Genelec1031A	18
Figura 6 - Interface gráfico do Unity.....	25
Figura 7 - Interface do Blender	31
Figura 8- Fotos do espaço da Régie A	33
Figura 9 - Foto do interior da Cisterna de Marvão	34
Figura 10 - Fotografias do interior da Sala Teresa Macedo	35
Figura 11 - Amostra da faixa de DubTechno em Stereo	37
Figura 12 - Amostra da faixa de DubTechno separada em dois canais	37
Figura 13 - Amostra do diálogo Ableton Live.....	38
Figura 14 - Amostra das gotas de água	38
Figura 15 - Amostra das gotas de água a serem processadas no FMOD	39
Figura 16 - Sequência de notas MIDI da peça A Tale Of Distant Lands	39
Figura 17 - Levantamento manual da sala Régie A	40
Figura 18 - Levantamento manual do interior da cisterna do castelo de Marvão	41
Figura 19 - Levantamento manual do interior da Sala Teresa Macedo.....	42
Figura 20 - Modelação 3D da sala Régie A em wireframe	43
Figura 21 - Modelação 3D efetuada da Régie A	44
Figura 22 - Modelação 3D da cisterna de Marvão em wireframe	46
Figura 23 - Modelação 3D efetuada da Cisterna do castelo de Marvão I.....	47
Figura 24 - Modelação 3D efetuada da Cisterna do castelo de Marvão II.....	47
Figura 25 - Modelação 3D da Sala Teresa Macedo em vista de wireframe	48
Figura 26 - Modelação 3D efetuada da Sala Teresa Macedo	49
Figura 27 - Captação de som com a Neumann KU 100.....	50
Figura 28 - Amostras das captações de som a 2,10 m e 2,80 m	52
Figura 29 - Diferença de decibéis entre as distâncias 2,10 m e 3,10 m	52
Figura 30 - Cisterna do castelo de Marvão - Captação de som	53
Figura 31 - Amostra da palma	54
Figura 32 - Espectrograma da amostra "palma"	55
Figura 33 - Configurações no Project Settings	61
Figura 34 - Configurações Audio Listener e Steam Audio Listener.....	62
Figura 35 - Configurações Audio Source do Unity	62
Figura 36 - Configurações Spatial Blend	63
Figura 37 - Configurações Steam Audio Geometry	63
Figura 38 - Configurações Steam Audio Material	64
Figura 39 - Configurações HRTF.....	64

Figura 40 - Configurações Attenuation	65
Figura 41 - Configurações Directivity.....	66
Figura 42 - Configurações Occlusion.....	67
Figura 43 - Configurações Direct Mix	67
Figura 44 - Configurações Reflections.....	68
Figura 45 - Configurações da Pathing	68
Figura 46 - Configurações Real-Time Rays.....	69
Figura 47- Configurações da Real Time Bounces	69
Figura 48 - Configurações da Real Time Duration	70
Figura 49 - Configurações Baked Reflections	70
Figura 50 - Configurações Steam Audio Prob Batch	71
Figura 51- Configurações Steam Audio Baked Source	72
Figura 52 - Dados do processo de baking	72
Figura 53 - Fontes sonoras presentes na Régie A	73
Figura 54 - Fontes sonoras presentes na Cisterna de Marvão	75
Figura 55 - Configuração das audio probes para a Cisterna de Marvão	76
Figura 56 - Inquérito realizado	79
Figura 57 - Posições e orientações dos testes da Régie A (1 a 5, da esquerda para a direita).80	

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Fenómenos simulados na espacialização sonora	8
Tabela 2 - Coeficientes de absorção estimados para os materiais da Régie A	59
Tabela 3 - Coeficientes de absorção estimados para os materiais da Cisterna de Marvão.....	60
Tabela 4 - Resumo das configurações efetuadas na fonte sonora Régie A	74
Tabela 5 - Resumo das configurações efetuadas para a Cisterna de Marvão.....	76
Tabela 6 - Fonte sonora "Voz"	77
Tabela 7 - Fonte sonora "Gotas de água"	78
Tabela 8 - Respostas à pergunta 3 do Inquérito da Régie A (respostas certas a verde).....	84

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Régie A - Posições dos speakers com a Neumann KU 100.....	51
Gráfico 2 - Régie A - Posição do microfone e da coluna	54
Gráfico 3 - Painel acústico 25mm.....	57
Gráfico 4 - Painel acústico 50mm.....	57
Gráfico 5 - Difusor policilíndrico de ripas de madeira	58
Gráfico 6 - Painel acústico de madeira (SlatFusor 25 mm)	58
Gráfico 7 - Painel acústico - Bass Trap (B4).....	58
Gráfico 8 - Resultados da pergunta 2 do inquérito da Cisterna de Marvão.....	81
Gráfico 9 - Resultados da pergunta 2 do inquérito da Régie A	83

Abreviaturas e Siglas

VR: Virtual Reality

AR: Augmented Reality

CPU: Central Processing Unit

CTF: Common Transfer Function

DTF: Directional Transfer Function

DAW: Digital Audio Workstation

HRTF: Head-Related Transfer Function

ILD: Interaural Level Difference

ITD: Interaural Time Difference

GPU: Graphics Processing Unit

MPE: MIDI Polyphonic Expression

1 Introdução

Os videogames são uma área de entretenimento em constante evolução a par com a rápida expansão da tecnologia e cultura popular emergente que os jogos propagam. Este crescimento multifacetado criou bases para que os produtores pudessem fabricar conteúdos mais diversificados e, para que os académicos expandissem e aprofundassem os seus estudos sobre os jogos. Neste sentido, os videogames incluem diversos elementos sensoriais, como o som. Do mesmo modo que a arte visual evoca sentimentos, também o *sound design* tem uma função de imersividade e de induzir os jogadores a tomarem decisões (Murch, 2016).

O *design* de som no contexto dos jogos refere-se ao processo de produção, projeto e implementação do som, música e voz para os jogos e, integra igualmente um conjunto de habilidades artísticas, técnicas e sociais para alcançar os resultados de design propostos (Bridgett, 2016). A crescente indústria de videogames exige mais competências ao designer de som, sendo que este pode ser visto como uma disciplina progressiva que exige um estudo cada vez mais pormenorizado.

Segundo Fernando Pepe¹, o som é um recurso que transmite emoções e ativa sensações sem que para isso seja necessário prestar atenção de forma ativa. Embora muitos *designers* de som considerem essa arte uma intuição, Denis Zlobin (2020) considera que esse julgamento não é suficiente na perspetiva da experiência do jogador de videogames, onde muitas vezes os sons distraem, enganam e irritam o jogador.

Anteriormente, Rumsey (2001) referiu algumas das possibilidades, e desde então temos vindo a assistir a essas e mais aplicações, como a espacialização sonora tridimensional que tem como objetivo conduzir-nos a uma experiência imersiva que vai muito além do som stereo.

Esta tecnologia cria uma sensação de realismo pela simulação acústica dos espaços, localização dos sons, profundidade sonora, e efeitos de oclusão, entre outros, que desempenham um papel fundamental para a experiência geral do jogador, transportando emoções que levam a uma sensação única de imersão e realismo no

¹ Fernando Pepe é sound designer, trabalha como *audio lead* na Wildlife Studios e é professor no curso de Sound Design da EBAC – Escola Britânica de Artes Criativas & Tecnologia.

mundo do videogame e que pode ser produzida com técnicas de reprodução sonora *surround* ou binaural (Cox J. , 2021) (Daniel, 2019).²

Tendo em conta estes pressupostos, o principal desafio deste projeto tem como premissa a espacialização sonora e simulação acústica para som binaural, centrado no grau de realismo da experiência sonora. Esta pode manifestar-se na sensação de proveniência dos sons e distância dos sons, no realismo da reverberação dos espaços de videogame inserido no espaço virtual que o envolve, de forma que este possa responder adequadamente às ações no jogo, combinando as capacidades distintas do som, com as suas capacidades elementares.

1.1 Motivação inicial e objetivos

A área dos videogames sempre exerceu sobre mim um enorme fascínio, sendo que, ao longo do meu percurso académico, desenvolvi um interesse crescente por explorar o impacto do *sound design* neste meio. Com os conhecimentos adquiridos tanto durante a licenciatura como no mestrado, senti que este último me oferecia a oportunidade de aperfeiçoar e aprofundar de forma mais específica o domínio do *sound design* aplicado aos videogames, uma área que considero extremamente interessante e desafiadora. Este interesse foi amplamente reforçado pela constante evolução tecnológica que, dia após dia, impulsiona o desenvolvimento de novas ferramentas e soluções, como as ligadas ao som 3D, o que torna o campo ainda mais apelativo e inovador. Assim, decidi orientar o meu projeto de mestrado para o desenvolvimento de um trabalho relacionado com esta área, com o propósito de adquirir novos conhecimentos, explorar as possibilidades que a tecnologia oferece e contribuir para o avanço da compreensão e aplicação do *sound design* em videogames.

1.1.1 Objetivo geral

Conhecer, documentar e testar a realidade atual na área da espacialização tridimensional aplicada ao *sound design* para videogames e ambientes interativos, refletindo sobre os procedimentos e os desafios enfrentados durante sua implementação, e as várias possibilidades apresentadas pelos desenvolvimentos tecnológicos, com foco no impacto dessas inovações na experiência imersiva.

² Tanto na gravação binaural quanto na medição HRTF, uma configuração típica é registrar as propriedades acústicas da cabeça fictícia ou do simulador de cabeça e tronco (HATS), que são projetados com base na dimensão média de uma cabeça/tronco humano e têm dois microfones de alta fidelidade inseridos em cada ouvido para gravar os sinais de dois ouvidos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Conhecer as tecnologias atuais disponíveis para a construção da espacialização tridimensional do *sound design* e efetuar análises comparativas quanto às respectivas funcionalidades proporcionadas;
- Refletir, idealizar e implementar estratégias diversas que potenciem o realismo da espacialização desenvolvida num contexto de videojogo, como o trabalho em ambientes fechados, a utilização de reverberação para aprimorar a percepção sonora e a imersão;
- Ensaiar possibilidades técnico-artísticas utilizando as tecnologias atrás mencionadas, testá-las e avaliá-las;
- Identificar potenciais áreas sujeitas a melhoria neste âmbito, sugerindo possibilidades futuras.

2 O Estado da Arte

2.1 Evolução e Conceitos

O *design* e o desenvolvimento dos elementos auditivos dos videogames desempenham um papel inclusivo cada vez mais relevante dentro e fora dos jogos. Os sons permitem uma imersão mais profunda e significativa, e igualmente podem facilitar a inclusão e acessibilidade de pessoas com capacidades físicas e psicológicas diferentes. Por exemplo, os elementos sonoros podem ser essenciais para pessoas com deficiência visual, oferecendo informações sobre o ambiente e ações do jogo por meio de áudio espacial e feedback sonoro.

A evolução dos videogames ao longo das últimas décadas não se limita a gráficos mais realistas e mecânicas inovadoras. O campo dentro do *sound design*, em particular, tem desempenhado um papel crucial na criação de experiências envolventes e imersivas. Neste contexto, a espacialização sonora emergiu como um dos aspectos mais relevantes, permitindo que os jogadores percebam com precisão a localização, distância e movimento das fontes sonoras dentro do ambiente dos jogos. Este conceito não só enriquece a experiência sensorial do jogador, como também melhora o seu desempenho e a percepção situacional.

A espacialização sonora refere-se ao posicionamento do som no espaço, utilizando técnicas como panorâmica estéreo, áudio binaural, som *surround* e outras formas de áudio espacial. Vários estudos têm mostrado que a espacialização sonora impacta diretamente a imersão do jogador, sendo um dos fatores mais críticos na construção de uma experiência de jogo convincente. De acordo com Grimshaw (2008), a presença de áudio tridimensional nos videogames pode melhorar significativamente a "sensação de presença", definida como o sentimento de estar fisicamente presente no ambiente virtual. Em jogos de realidade virtual (VR), por exemplo, o som espacializado permite que o jogador "sinta" a direção e a distância das fontes sonoras, o que, por sua vez, aumenta a percepção de realismo e profundidade do espaço virtual.

Por outro lado, Laird (2014) investiga como o som espacializado afeta a jogabilidade, demonstrando que jogadores que têm acesso a sons tridimensionais conseguem tomar decisões mais informadas, como evitar inimigos ou identificar oportunidades no ambiente do jogo. O autor destaca que o áudio espacializado funciona como um guia subconsciente, complementando o *input* visual, ajudando os jogadores a construir um "mapa mental" mais completo do ambiente ao seu redor. Este conceito é especialmente

evidente em gêneros como jogos de ação e terror, onde os jogadores precisam de confiar no som para identificar ameaças que podem não estar visíveis imediatamente.

No entanto, a implementação da espacialização sonora em videogames também apresenta uma série de desafios técnicos e criativos. O desenvolvimento de uma paisagem sonora tridimensional precisa exigir não só uma integração eficaz entre motores de jogo e ferramentas de áudio, como também a capacidade de adaptação em tempo real às ações dos jogadores. Como apontado por Zagala et al. (2016), a criação de um ambiente auditivo tridimensional envolve o processamento contínuo de dados sobre a posição do jogador, os objetos ao seu redor e as fontes sonoras. Esse processamento exige recursos consideráveis, tanto em termos de *hardware* como de *software*, o que pode ser uma limitação em jogos com muitos elementos dinâmicos e de grande escala.

A percepção auditiva dos jogadores também é influenciada pela qualidade do equipamento de áudio utilizado, como auscultadores ou sistemas de som *surround*. Por isso, as experiências variam significativamente dependendo do sistema de reprodução, sugerindo que jogadores com equipamento de áudio de alta qualidade têm uma percepção mais precisa da espacialização sonora (Vickers, 2007). Por outro lado, jogadores com sistemas de som mais básicos podem não experimentar o som espacial da maneira prevista pelos designers de som, comprometendo parte da imersão e da jogabilidade.

De acordo com dados disponibilizados pela plataforma de distribuição digital de jogos *Steam*, num inquérito detalhado sobre hardware e software realizado em setembro de 2024³, revelou um dado interessante no que diz respeito à utilização de dispositivos de áudio entre os seus utilizadores. Especificamente, verificou-se que 1,60% dos jogadores ativos na plataforma utilizam sistemas de realidade virtual VR, o que pressupõe a utilização de auscultadores com áudio binaural.

Diante da crescente importância da espacialização sonora no design de videogames, várias ferramentas e tecnologias têm sido desenvolvidas para auxiliar os criadores na implementação de áudio tridimensional. Além dos populares *middlewares* como FMOD⁴ e *Wwise*, que oferecem uma grande flexibilidade na criação de ambientes sonoros

³ <https://store.steampowered.com/hwsurvey/Steam-Hardware-Software-Survey-Welcome-to-Steam>

⁴ FMOD Studio é uma aplicação que permite criar conteúdo de áudio adaptável para jogos. O conteúdo criado no FMOD Studio pode ser gravado como bancos de sons, e posteriormente carregados no FMOD Engine.

dinâmicos, o uso de plugins específicos como *Steam Audio*, *Google Resonance* e o *Facebook Audio (Oculus)* têm vindo a destacar-se pela sua capacidade de proporcionar uma espacialização sonora mais realista e imersiva. Estes plugins utilizam algoritmos avançados para simular o comportamento do som em ambientes virtuais, considerando fatores como a oclusão, a reverberação e a interação com objetos no espaço. No entanto, apesar das melhorias proporcionadas por estas soluções, ainda existem desafios, especialmente no que diz respeito à otimização do desempenho em plataformas com recursos limitados e à acessibilidade dessas tecnologias para pequenos estúdios e desenvolvedores independentes.

A audição é o segundo sentido mais importante para os humanos, pois o som possui informações que influenciam as nossas emoções e comportamentos em associação com os fatores como a intensidade, o contexto, frequência e alturas (Oskari & Kai, 2018). Ao jogar, o áudio é muitas vezes considerado como a parte integrante da sensação do jogo e, como os jogos atualmente são jogados via dispositivos móveis, aumentou o alcance de novos conceitos e metodologias, bem como de oportunidades de desenvolvimento de funções básicas de áudio como um motor da experiência de reprodução (Natasa Paterson, 2013).

O estudo de Guillen et al. (2021) teve como objetivo identificar e rever tematicamente a literatura académica relevante (47 estudos), resumindo o papel percebido do design de som do jogo, o seu impacto na imersão e a forma como este ajuda ou dificulta a inclusão e a acessibilidade dentro dos jogos.

Alguns estudos anteriores sugeriram duas abordagens paralelas para o design de som de jogos, os vestígios sonoros cinematográficos e como extensão desta abordagem, a criação e a comunicação de informações espaciais para gerar uma sensação mais profunda de imersão sensorial através do áudio de jogo (Fassbender, 2012). Especificamente, os sinais auditivos convertem as informações espaciais em áudio, que poderá conduzir a níveis mais profundos de imersão, um estado de envolvimento mental profundo e a absorção na atividade.

O *Steam Audio* oferece uma solução de áudio para videojogos que integra a simulação de ambientes acústicos. A propagação do som baseada na física permite a imersão auditiva recriando consistentemente como o som interage com o ambiente virtual, e é percecionado pelo ouvinte.

2.2 Áudio Dinâmico

O áudio dinâmico em videogames refere-se à capacidade do som em responder e se adaptar em tempo real às ações e ao ambiente do jogador, como por exemplo, a interatividade, a adaptabilidade e processamento em tempo real.

Ao contrário de um áudio pré-gravado ou linear, o som dinâmico muda conforme o estado do jogo, a localização do jogador, interações com objetos e até o comportamento dos inimigos ou outros elementos. O objetivo é aumentar a imersão e o realismo da experiência, garantindo que o som não possua apenas um papel acessório, mas que seja parte ativa da narrativa e da jogabilidade.

A contribuição sonora da música para o quadro virtual é muito importante durante o jogo, pois adiciona atmosfera, drama, emoção e fantasias. Contudo, os sons interativos e os ambientes, e acústica também são importantes para melhorar a experiência do utilizador. Estes tipos de sons atualmente são utilizados principalmente com efeitos e não como referências autênticas no sistema virtual (Kamp, 2016).

O áudio dinâmico é um dos fatores chave para criar uma experiência de jogo envolvente. Jogadores que são expostos a ambientes sonoros dinâmicos relatam uma sensação muito mais forte de envolvimento emocional e identificação com o personagem do jogo, em comparação com aqueles que jogam com áudio estático, repetitivo e monótono. O som dinâmico tem a capacidade de guiar o jogador sem que esta perceba diretamente, como uma "mão invisível", sugerindo emoções, perigos iminentes ou novas oportunidades (Stevens, 2016).

Grimshaw (2010) reforça essa visão, mostrando que em jogos de terror, por exemplo, o uso de sons dinâmicos pode aumentar a tensão e o suspense de maneira significativa. À medida que o ambiente muda, o som também muda para refletir essa evolução. Assim, sons repentinos ou a falta de sons podem ser usados para manipular a expectativa do jogador, contribuindo para a atmosfera assustadora e mantendo a imersão intacta.

2.3 A espacialização sonora centrada na percepção do jogador

A percepção sonora e as diversas outras modalidades perceptivas são atualmente consideradas relevantes para a experiência do utilizador nos domínios artificiais e simulados. A composição do cenário sonoro, especialmente em jogos de computadores

foi facilitado por avanços em *hardware* de computador e as capacidades de armazenamento (Grimshaw M. , 2011).

A espacialização e os elementos sonoros interativos em tempo real são essenciais para a experiência do utilizador, para que este seja conduzido para o próximo nível em desenvolvimentos futuros. Muitas das ferramentas de áudio desenvolvidas recentemente baseiam-se na teoria bem estabelecida, mas permanecem limitadas na sua implementação de verdadeiros espaços de som com restrições de hardware.

No áudio, a simulação da localização sonora, também conhecida como espacialização sonora, é obtida utilizando uma ampla variedade de tecnologias de áudio que trabalham em conjunto. Essas tecnologias imitam fenómenos sonoros naturais, como orientação, atenuação, reflexão, absorção, reverberação, propagação, obstrução e oclusão. Além disso, utilizam princípios fundamentais como a Diferença Interaural de Tempo (ITD), que se refere à variação no tempo que um som leva para atingir cada ouvido, e a Diferença Interaural de Nível (ILD), que representa a diferença de intensidade sonora percebida por cada ouvido. Esses fatores, combinados com outras técnicas de áudio, criam uma experiência sonora imersiva e precisa, permitindo ao ouvinte identificar com exatidão a posição da fonte sonora no espaço.

Tabela 1 - Fenómenos simulados na espacialização sonora

Fenómeno	Descrição
Orientação	A orientação relativa entre o ouvinte e a fonte sonora.
Atenuação	A distância entre o ouvinte e a fonte sonora.
Absorção	Quando o som é absorvido pelas superfícies
Reflexão	Quando o som é refletido nas superfícies do ambiente até chegar ao ouvido
Reverberação	Fenómeno causado por múltiplas reflexões num espaço
Propagação	Os caminhos que um som percorre desde sua fonte até o ouvinte.
Obstrução e Oclusão	Um som pode colidir com outros objetos enquanto se desloca em direção ao ouvinte. Esses objetos atuam como obstruções ao som.

O *Spatial Audio* é geralmente utilizado em espaços de jogos digitais para auxiliar os jogadores a experimentar o som como na vida real, são sons que estão imersos na experiência. Este fenómeno é igualmente designado por externalização, pois tem como objetivo ajudar os jogadores a diferenciar quais os sons que fazem parte do jogo (Rieger et al., 2023). De acordo com os autores, a chave para tornar o áudio mais eficaz é garantir que o jogador possa diferenciar o contexto dos sons que está a ouvir.

Neste contexto, o conceito de “audição espacial”, introduzido inicialmente por Blauert em 1983, representa a relação entre as localizações dos eventos auditivos e outros parâmetros sonoros, ou seja, a capacidade de localizar os eventos sonoros com base em sinais percebidos pelo cérebro (Broderick, 2018).

2.3.1 Simulação de reflexões e reverberação

A simulação de reflexões e reverberações é um dos fatores cruciais para a criação de ambientes sonoros realistas e imersivos. Estas técnicas replicam como o som se comporta em ambientes físicos reais, refletindo e dissipando a partir de superfícies ao redor de um espaço. Isso permite que o jogador tenha uma percepção precisa e convincente do ambiente tridimensional, desde um quarto fechado ou uma igreja. Estas simulações contribuem não apenas para a imersão do jogador, mas também para a navegação espacial e a comunicação da arquitetura e composição dos espaços no jogo.

A reflexão do som ocorre quando uma onda sonora atinge uma superfície e é redirecionada. A reverberação é o resultado da soma de múltiplas reflexões que continuam a ser percebidas mesmo após a fonte original do som ter parado de emitir. Juntas, reflexões e reverberações criam uma imagem sonora que ajuda o ouvinte a compreender a dimensão, forma, distância e materialidade de um espaço.

Em videogames, essas propriedades são simuladas para criar uma experiência sonora mais imersiva e realista, permitindo ao jogador identificar e sentir a textura acústica do ambiente. A reverberação pode ser manipulada para ajustar a atmosfera emocional, como tornar um ambiente mais opressivo ou relaxante, além de oferecer *feedback* sonoro sobre a geometria e proximidade dos objetos e personagens.

O desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas para a simulação de campos sonoros em acústica de ambiente atraiu um esforço de investigação significativo até à data, com a literatura científica a propor uma série de técnicas específicas. Estes métodos incluem modelos baseados em filtros digitais que simulam a resposta acústica de uma sala, ajustando o sinal sonoro para reproduzir o comportamento do som em diferentes tipos de espaços (Moorer, 1979). Apesar de serem eficientes do ponto de vista computacional, oferecem um nível de realismo mais limitado, pois as características espaciais geradas são genéricas e não refletem com precisão as particularidades acústicas de ambientes específicos.

Para além disso existe o *Ray Tracing* que segundo Savioja e Svensson (2015), o som é modelado como raios que se propagam pelo ambiente e interagem com superfícies,

levando em consideração os materiais, texturas e distâncias para calcular como o som será refletido e absorvido. Esta técnica é particularmente eficaz para gerar reflexões primárias precisas e simular o comportamento acústico de grandes espaços ou áreas com estruturas geométricas complexas.

Estas simulações têm um impacto direto na imersão e percepção espacial dos jogadores pois a reverberação pode ser usada como uma ferramenta de design emocional, modulando o som para criar diferentes atmosferas (Grimshaw M. N., 2007). Por exemplo, um som reverberante num corredor estreito pode induzir sensações de claustrofobia, enquanto num ambiente aberto com pouca reverberação pode ser percebido como arejado. Além disso, a simulação de reflexões sonoras também auxilia o jogador na navegação espacial. Em ambientes tridimensionais complexos, como cavernas ou edifícios grandes, as reflexões sonoras fornecem ao jogador informações importantes sobre a proximidade e direção de paredes ou outros obstáculos. Tsingos et al. (2004) mostra que reflexões sonoras e reverberações adequadamente simuladas ajudam a construir uma noção mais precisa da geometria do ambiente de jogo, o que pode melhorar a performance do jogador em jogos que envolvem navegação ou exploração.

No jogo *Battlefield V* (DICE-EA, 2018) por exemplo, a equipa de design de som usou técnicas avançadas de reverberação e simulação de reflexões para criar ambientes auditivos realistas, como edifícios destruídos, florestas densas e grandes espaços abertos. Essas técnicas ajudam os jogadores a localizar outras personagens com base nos passos e tiros refletidos em diferentes superfícies.

2.4 Técnicas de espacialização sonora

2.4.1 *Panning* estéreo

Panning estéreo é uma técnica fundamental no design de som, utilizada para posicionar diferentes sons no campo estéreo, de maneira a criar uma sensação de espaço horizontal entre os canais esquerdo e direito. Embora possa parecer uma técnica simples, a sua utilização apropriada pode ter um impacto profundo na percepção auditiva, especialmente em ambientes interativos, como videojogos. A pesquisa sobre esta técnica remonta a décadas, e sua eficácia na criação de espacialidade e direcionalidade tem sido amplamente estudada no campo da psicoacústica e da engenharia de áudio.

No *panning* estéreo, o som é distribuído entre os canais esquerdo e direito num sistema estéreo. A principal função desta técnica é criar a ilusão de que a fonte sonora está

posicionada nalgum ponto entre os dois alto-falantes, ou diretamente num dos lados. Isso é feito ajustando o nível relativo do som em cada canal, com por exemplo, ao aumentar o volume no canal esquerdo e diminuir no direito, cria-se a percepção de que o som está a vir do lado esquerdo. Segundo Rumsey (2001), o *panning* estéreo explora a forma como os seres humanos percebem a direcionalidade do som com base na diferença de nível interaural (ILD) – a variação na amplitude sonora entre os ouvidos. Quando um som é mais alto num dos ouvidos do que no outro, o cérebro interpreta-o como proveniente do lado do ouvido onde o som é mais intenso. Esta é a base do *panning* estéreo, sendo eficaz sobretudo em sons reproduzidos em sistemas com dois altifalantes.

Blauert (1997), especialista em psicoacústica, detalha como os seres humanos percebem a localização dos sons, argumentando que o *panning* estéreo pode imitar a percepção lateral, mas é limitado pela sua incapacidade de reproduzir a percepção de profundidade (distância) e altura. Isto significa que o *panning* é eficaz principalmente para criar um campo sonoro horizontal. Já Tarr et al. (2018) investigaram o impacto da localização sonora através do *panning* estéreo em videojogos e concluíram que os jogadores tendem a responder mais rapidamente e com maior precisão a eventos sonoros quando a fonte do som está devidamente localizada no campo estéreo. Este estudo sugere que o *panning* estéreo, quando bem implementado, pode melhorar o desempenho dos jogadores ao fornecer pistas auditivas que aumentam a imersão.

Contudo, esta técnica possui algumas limitações tais como falta de simulação de profundidade ou altura, o que acaba por ser uma desvantagem em sistemas de áudio que exigem uma representação completa do espaço sonoro (Blauert, 1997). Para além disso, a dependência da posição relativa dos ouvintes em relação aos alto-falantes, no caso de o ouvinte estar significadamente deslocado para um lado, este efeito de *panning* pode ficar distorcido ou mesmo perdido.

Por fim com o aparecimento de sistemas multicanais como o som *surround* 5.1 e 7.1, esta técnica tornou-se insuficiente para criar experiências sonoras verdadeiramente imersivas em configurações mais avançadas, sendo frequentemente complementado por outras técnicas de espacialização.

Nos videojogos, o *panning* estéreo é amplamente utilizado para fornecer pistas auditivas sobre a localização de eventos sonoros, como inimigos, objetos interativos ou ambientes dinâmicos, contribuindo para a imersão dos jogadores, melhorando a percepção de movimento e a interação com o ambiente virtual (Tarr, 2018). No entanto, em jogos mais

complexos e com exigências de espacialização sonora em 3D, o *panning* estéreo é frequentemente substituído por técnicas mais sofisticadas, como o áudio binaural e o HRTF, de forma a simular uma experiência auditiva tridimensional mais precisa.

2.4.2 Áudio Binaural

O áudio binaural representa uma das técnicas mais avançadas e imersivas de espacialização sonora, especialmente em ambientes virtuais. O conceito fundamental subjacente a essas tecnologias é replicar a maneira como os humanos percebem o som no mundo real, simulando a localização e a distância das fontes sonoras num ambiente tridimensional. O áudio binaural, em particular, utiliza um conjunto de princípios acústicos e fisiológicos para criar uma sensação realista de posicionamento sonoro ao redor da cabeça do ouvinte, sendo amplamente utilizado em experiências de realidade virtual (VR) e aumentada (AR).

Estas tecnologias replicam a anatomia da cabeça humana, simulando os ouvidos do ser humano e por isso é necessário fazer gravações binaurais, que são feitas com microfones posicionados de maneira semelhante às orelhas humanas, frequentemente em cabeças artificiais (*dummy heads*). Quando essas gravações são ouvidas com fones de ouvido, o ouvinte consegue perceber de maneira muito realista o posicionamento dos sons — seja de cima, de baixo, de frente, de trás ou dos lados. Isso cria uma sensação tridimensional, sem a necessidade de sistemas complexos de áudio multicanal.

A aplicação de áudio binaural é especialmente relevante em jogos que requerem imersão profunda e uma alta sensibilidade à direção do som. Em *Half-Life: Alyx* por exemplo, o som binaural é utilizado extensivamente para criar uma atmosfera imersiva e tensa (Valve Corporation, 2020). O jogador é capaz de ouvir passos, tiros e outros sons de diferentes direções e alturas, criando uma sensação de presença e urgência enquanto explora o ambiente do jogo. Este jogo utiliza o *Steam Audio*, desenvolvido pela própria Valve, para a produção dos seus jogos e integração em jogos e experiências interativas de outros desenvolvedores. Funciona como um *showcase* da tecnologia proporcionada. De forma semelhante, jogos como *Resident Evil 7* (Capcom Cup, 2017), que utilizam som binaural, conseguem amplificar o terror psicológico, uma vez que o jogador pode ouvir sons súbitos ou misteriosos vindo de pontos específicos no espaço, aumentando o suspense e a sensação de vulnerabilidade.

Segundo uma pesquisa feita por Lindau et al. (2012), o áudio binaural tem um impacto significativo na imersão e na percepção espacial do ouvinte. O estudo comparou o áudio estéreo tradicional com o áudio binaural em jogos e ambientes de simulação, concluindo

que os participantes sentiram uma presença muito maior no espaço tridimensional quando expostos a sons binaurais. O estudo também observou que a percepção da direção e da distância dos sons foi mais precisa com o uso de HRTF – *Head-related transfer function* personalizadas, em que as características físicas do ouvinte são incorporadas no cálculo da experiência sonora.

2.4.3 HRTF - Head-related transfer function

As HRTF constituem-se por um conjunto de funções matemáticas que descrevem como os ouvidos humanos percebem o som proveniente de diferentes direções. Essas funções são usadas para calcular como o som é modificado pela interação com a cabeça, orelhas, tronco e até ombros de uma pessoa antes de chegar ao canal auditivo. Basicamente, as HRTF modelam as diferenças de intensidade e tempo (*Interaural Time Difference* - ITD e *Interaural Level Difference* - ILD) entre os ouvidos, essenciais para a percepção da origem do som.

Relacionado mas diferente do áudio binaural, as HRTF não são uma técnica de gravação em si, mas sim uma ferramenta usada em algoritmos de processamento de som. Elas permitem que sistemas de áudio digital, como motores de jogos, simulem como o som deveria ser percebido por um ouvinte num ambiente tridimensional, adaptando o som de acordo com a posição relativa da fonte sonora ao ouvinte. Ao aplicar uma HRTF, um som simples pode ser transformado de forma a parecer que vem de qualquer direção, sem a necessidade de gravações binaurais pré-existentes.

Os HRTF atuais são modelos genéricos que são utilizados em todos os produtos, uma vez que estes são únicos e podem oferecer uma boa experiência. Uma única função de transferência relacionada com o TRF é definida como sendo o ouvido esquerdo ou direito de um indivíduo, e como resposta de frequência do campo distante, medida a partir de um ponto específico no campo livre, para um ponto específico no canal auditivo (Frank & Zooter, 2018).

Uma técnica comum utilizada para medir empiricamente os HRTF das orelhas é inserir microfones de tubo de sonda, parcialmente nos ouvidos de um sujeito, e depois realizar uma forma simples de identificação do sistema, tocando um estímulo de espectro conhecido através de um altifalante colocado a um azimute especificado θ , elevação ϕ e distância da cabeça do sujeito (Zhixin & Wang & Chan, 2015).

As porções das funções de transferência medidas devido ao aparelho de medição, como as funções de transferência de microfone e altifalante, juntamente com partes das

funções de transferência medidas que são as mesmas para todos os locais, são designados por função de transferência comum (CTF) e são removidas das medições brutas (Chen, 2013). O resultado final é a função de transferência direcional (DTF) em azimute θ e elevação φ . O DTF é a quantidade que contém sinais espectrais responsáveis pela audição espacial, e é frequentemente designado por HRTF (Ramos, 2017).

De acordo com Majdak et al. (2010), a personalização das HRTF pode melhorar substancialmente a precisão da percepção espacial, mas a aplicação de HRTF genéricas ainda oferece uma experiência imersiva e precisa em muitos casos. Bronkhorst (2015) também destaca a importância das HRTF para simulações auditivas, mostrando que elas melhoram a percepção da localização dos sons, mesmo em ambientes ruidosos. Várias empresas possibilitam a configuração de HRTF personalizados ao incluir uma etapa de calibração do utilizador, tais como:

- A Dolby que oferece o *Dolby Atmos Personalized HRTF (PHRTF) Creator*, que captura dados anatómicos detalhados de utilizadores (como o formato das orelhas e cabeça) para gerar HRTF específicos. Esta tecnologia é usada tanto por profissionais quanto por consumidores para garantir uma experiência de som tridimensional mais precisa.
- A Apple, que introduziu o áudio espacial personalizado com a utilização de HRTF adaptadas às características anatómicas do utilizador através do uso da câmara TrueDepth do iPhone, que consegue criar um modelo 3D da cabeça e orelhas, o que permite ajustar o som espacial nos AirPods de acordo com o perfil único de cada utilizador. Isto resulta numa experiência auditiva mais precisa, onde a localização dos sons no espaço tridimensional é percebida de forma mais realista.
- A Sony que está a desenvolver soluções de áudio espacial personalizadas com o *360 Reality Audio*, que permite personalizar o som de acordo com as características físicas do utilizador, através de uma aplicação que digitaliza a forma das orelhas e ajusta o áudio para proporcionar uma experiência de som imersiva.

Para além das soluções acima mencionadas, existem ainda normalizações em formatos de ficheiro, como é o caso do *SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics)*, que armazenam dados acústicos orientados espacialmente, como HRTF e respostas ao impulso, permitindo personalizar experiências sonoras em diversos contextos. Por exemplo, o *Steam Audio* oferece a opção de seleccionar um ficheiro *SOFA* específico,

permitindo que os jogadores importem características acústicas personalizadas, como as formas das orelhas ou da cabeça. Isso torna a experiência auditiva mais realista e imersiva, adaptando-se às particularidades de cada ouvinte.

2.4.4 Ambisonics

A teoria da *ambisonics* começa pelo problema de representar um campo sonoro tridimensional matematicamente para que possa ser dividido com os seus componentes espalhados, manipulados e novamente montados com o uso de altifalantes ou auscultadores. *Ambisonics* é um formato de som *surround*, no qual um som registado ou sintetizado no campo é dividido (codificado) nos seus componentes de velocidade de som ortogonal e novamente montado (descodificado) para formar o campo sonoro original através de auscultadores ou altifalantes o mais precisamente possível. O formato de dados da *ambisonics* é designado por formato B. Cada canal no formato B transporta uma componente específica do som capturado, representada por harmónicos esféricos. Os harmónicos esféricos são funções matemáticas que descrevem como o som se propaga em todas as direcções a partir de um ponto. Por exemplo, o canal W contém a pressão sonora global (um sinal mono que representa o som de todas as direcções), enquanto os canais X, Y e Z representam as diferenças de pressão sonora nas direcções do eixo cartesiano (esquerda-direita, frente-trás e cima-baixo). Assim, um campo sonoro completo pode ser construído a partir dos harmónicos esféricos com uma resolução determinada pela ordem do sistema (Zoter, 2019).

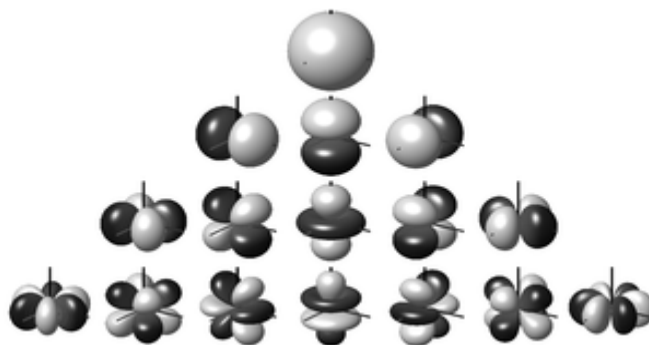


Figura 1 - Os harmónicos esféricos reais e os seus modos até à terceira ordem

Para um sistema *ambisonics* de primeira ordem, são preferíveis dois microfones de *layouts*: triplo-MS e *layouts* tetraédricos. O layout Triplo MS utiliza três microfones perpendiculares para capturar as dimensões esquerda-direita, frente-trás e cima-baixo do som, complementados por um microfone omnidirecional que regista a pressão sonora geral.

3 Recursos Tecnológicos

3.1 Hardware utilizado

3.1.1 Genelec 1031 A

Para a concepção e desenvolvimento da reprodução de som na Régie A, foram utilizados os monitores de estúdio ativos *Genelec 1031A*, produzidos pela empresa finlandesa *Genelec*. Estes monitores, compostos por um sistema ativo de duas vias, são bi-amplificados, o que significa que cada unidade possui amplificadores internos dedicados a diferentes faixas de frequência: altas (*tweeter*) e baixas (*woofer*).

O *tweeter*, de 1 polegada, construído em alumínio (cúpula metálica), garante uma elevada precisão na reprodução das frequências agudas. Já o *woofer*, com 8 polegadas e fabricado em material composto, oferece uma resposta sólida e clara nas frequências graves. Cada monitor está equipado com dois amplificadores internos, ambos com uma potência de 120 watts: um dedicado ao *woofer* e outro ao *tweeter*.

Estes monitores apresentam uma resposta de frequência que varia entre 48 Hz e 20 kHz, proporcionando uma cobertura sonora ampla, particularmente adequada para a mistura de áudio que requer uma reprodução fiel tanto das frequências altas como das baixas. Com dimensões de 39,5 cm de altura e 25 cm de largura, apesar do *woofer* ser relativamente grande, os monitores revelam-se poderosos para o seu tamanho compacto.

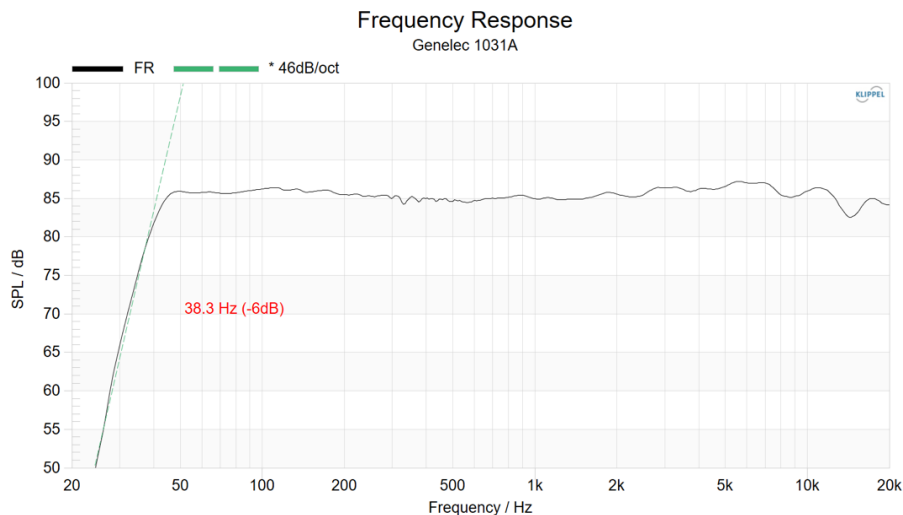


Figura 2 - Resposta de Frequência da Genelec 1031A⁵

⁵ Fonte: audiosciencereview.com

Estes monitores são projetados para oferecer uma resposta de frequência bastante uniforme num ambiente de estúdio, permitindo que o engenheiro de som tenha uma reprodução precisa do áudio. Por isso, a diretividade (refere-se à sua capacidade de direcionar o som em determinadas direções) da 1031A é otimizada para evitar reflexões indesejadas em superfícies próximas, como paredes e mesas, que poderiam afetar a clareza do som.

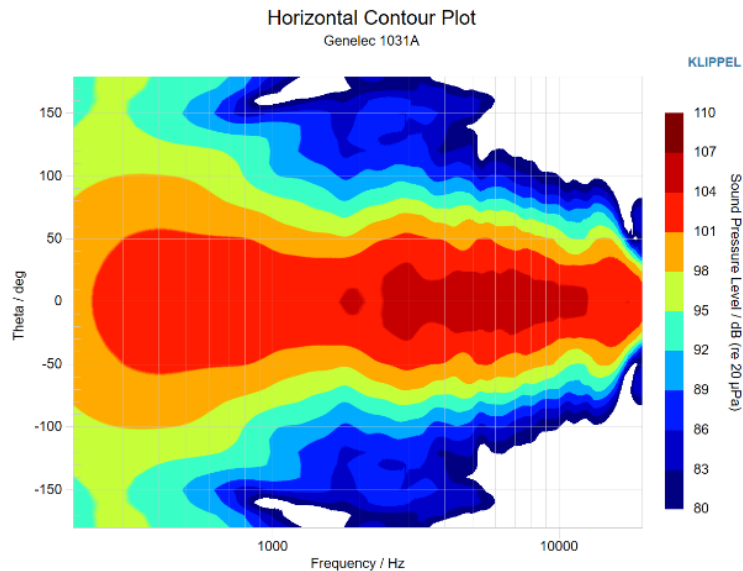


Figura 3 - Diretividade na Horizontal da Genelec 1031A

Quanto ao padrão polar, é do tipo "cardioide", o que significa que irradia o som tendencialmente para a frente. Isso é benéfico em ambientes de estúdio, onde a minimização de ruídos reflexivos e eco é crucial para uma mistura precisa.

Na prática, isso significa que os engenheiros de som podem posicionar os monitores em locais estratégicos preocupando-se com a interação do som com as superfícies ao redor, desde que as direções de audição sejam respeitadas.

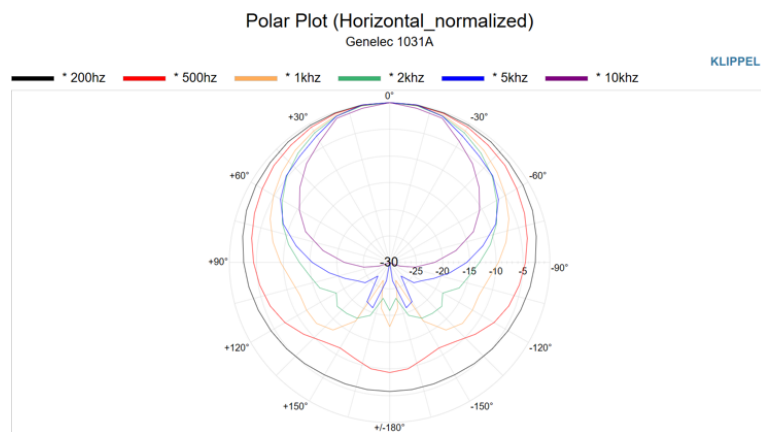


Figura 4 - Padrão Polar "Cardióide" da Genelec 1031A

Face às características da Genelec em relação à resposta de frequência, conforme apresentado na Figura 17, foi fundamental em pós-produção equalizar o som utilizando o *FabFilter Pro-Q2* no *Ableton*, como demonstrado na Figura 20. Este processo teve como objetivo assegurar que o som propagado pelas colunas no cenário virtual da Régie A estivesse alinhado com as especificações da Genelec 1031A, garantindo assim uma reprodução sonora que respeitasse as características acústicas desejadas.



Figura 5 - Equalização da resposta de Frequência das Genelec1031A

3.1.2 Marshall Emberton II

Para a reprodução sonora num dos espaços estudados neste projeto (a Cisterna do Castelo de Marvão), devido à dificuldade de acesso ao seu interior e à ausência de eletricidade no local, foi necessário optar por equipamento portátil e de fácil transporte. Para esse efeito, foi selecionada a coluna portátil *Marshall Emberton II*, pelas suas características que a tornam ideal para situações onde a mobilidade e a autonomia são essenciais.

A *Marshall Emberton II* foi projetada para proporcionar uma experiência sonora imersiva, utilizando uma tecnologia desenvolvida pela marca conhecida como *True Stereophonic*, que permite a propagação de som em 360 graus, o que significa que tem um padrão polar do tipo “omnidirecional”. Segundo a marca, isso é possível graças à sua engenharia com dois amplificadores passivos de 20 watts cada um e dois radiadores passivos, que trabalham em harmonia para garantir um desempenho acústico potente e equilibrado. Em termos de marketing, a coluna é apresentada como capaz de propagar som em 360°. Contudo, com base na experiência obtida, consideramos que o seu padrão de polaridade se manifesta tendencialmente de forma mais bidirecional do que omnidirecional. Para além disso, apresenta uma resposta de frequência que varia de 60

Hz a 20 kHz, o que torna uma excelente adequada para a reprodução e análise do excerto sonoro dentro da cisterna.

3.1.3 Dummy Head Neumann KU 100

Para a captação de som na Régie A, utilizou-se o Neumann KU 100 por ser um sistema de microfones binaurais com um design que imita a anatomia humana, incluindo a forma da cabeça e dos ouvidos. Esta configuração é projetada para captar som da mesma forma que um ser humano o faria, permitindo que os ouvintes experimentem a direccionalidade do som de maneira realista. Para além disso, é frequentemente descrito como uma "cabeça de microfone" devido à sua forma que se assemelha a uma cabeça humana, dotada de microfones embutidos em cada orelha (Neumann., 2019).

Estes microfones estão equipados com uma tecnologia de alta qualidade, com uma ampla resposta de frequência e baixo nível de ruído. As suas características técnicas incluem microfones condensadores de diafragma pequeno, que proporcionam uma captura detalhada e precisa do som, uma resposta de frequência de 20 Hz a 20 kHz, permitindo a reprodução fiel de uma vasta gama de sons, e um *design* binaural que permite captar som de diferentes direções, facilitando a criação de paisagens sonoras imersivas (Neumann., 2019).

O uso do *Neumann KU 100* em videojogos proporciona diversas vantagens no *design* de som. Em primeiro lugar, a captura binaural permite que os jogadores experimentem a profundidade e a espacialidade do áudio, criando uma sensação de presença no ambiente virtual. Isto é particularmente eficaz em jogos de terror e exploração, onde a ambientação sonora desempenha um papel crucial (Meyer, 2017). Em segundo lugar, a capacidade do KU 100 tem de captar som de várias direções, ajuda os designers a criar experiências auditivas que permitem aos jogadores localizar fontes sonoras com precisão, aumentando a interação e a jogabilidade (Heller, 2021). Por último, o uso deste microfone para gravação de sons ambiente resulta numa experiência auditiva que se aproxima da realidade, fazendo com que os jogadores se sintam mais conectados ao mundo do jogo (Steinberg, 2020).

Neste contexto, o *Neumann KU 100* revelou-se fundamental para este projeto, uma vez que reúne todas as condições necessárias para uma análise precisa e realista, em consonância com os objetivos delineados. A sua capacidade de reproduzir som binaural de forma fiel permite capturar as nuances sonoras de ambientes diversos, proporcionando uma experiência auditiva que simula a percepção humana. Esta característica é essencial para garantir que os resultados da análise sonora estejam

alinhados com as expectativas de imersão e interatividade pretendidas, contribuindo assim para a qualidade geral do design de som no contexto do projeto.

3.1.4 AKG 391B

Para a realização da captação na Cisterna de Marvão, foi utilizado o microfone AKG 391B. A escolha deste microfone deveu-se à sua portabilidade e facilidade de transporte, sendo também um equipamento disponível para uso fora das instalações da ESMAE, ao contrário do Neumann KU 100, embora tecnicamente superior para este contexto, não era viável devido à impossibilidade de o retirar das imediações da escola.

O AKG 391B, é um microfone condensador de diafragma pequeno que se destaca pela sua versatilidade e qualidade sonora, tornando-o uma escolha popular entre profissionais de áudio, especialmente no contexto do design de som para videojogos. Este microfone é conhecido pela sua capacidade de captar detalhes subtis e pela sua ampla resposta de frequência, características essenciais para a criação de paisagens sonoras imersivas em ambientes virtuais.

Com um padrão polar cardioide, o AKG 391B é mais sensível a sons provenientes da frente do microfone e menos a sons que vêm dos lados e de trás. Essa característica é particularmente útil em situações de gravação onde se deseja isolar fontes sonoras específicas, minimizando o ruído ambiente. O microfone tem uma resposta de frequência de 20 Hz a 20 kHz, o que permite capturar uma vasta gama de sons, desde os graves mais profundos até os agudos mais nítidos (AKG., 2021).

No contexto do design de som para videojogos, o AKG 391B é frequentemente utilizado para a gravação de efeitos sonoros e diálogos, contribuindo para a criação de uma experiência auditiva envolvente. A sua capacidade de captar sons com clareza e precisão é crucial para a imersão do jogador, especialmente em géneros que dependem fortemente do ambiente sonoro, como jogos de aventura e terror (Heller, 2021).

Por isso, o AKG 391B mostrou ser um microfone fundamental para a captação de som na cisterna, não apenas pela sua facilidade de transporte, que foi crucial dado o difícil acesso ao local, mas também pelas suas características técnicas avançadas, adequadas para a captação de diálogos e do som das gotas de água a caírem dentro da cisterna, o que contribuiu significativamente para a criação de uma experiência sonora imersiva e realista.

3.2 Software utilizado

3.2.1 Audacity

O *Audacity* é um software gratuito amplamente utilizado para captação e edição de som, destacando-se pela sua capacidade de manipulação de áudio em múltiplas faixas e suporte a diversos formatos, como WAV, MP3, FLAC e AIFF. Esta versatilidade torna-o numa ferramenta essencial em projetos de *sound design*, especialmente para videojogos, onde a qualidade e precisão sonora são fundamentais. Além das suas funcionalidades de edição, o *Audacity* oferece poderosas ferramentas de análise de áudio, como a visualização de formas de onda e a análise espectral facilitam a compreensão técnica e criativa de elementos sonoros.

A análise sonora no *Audacity* é crucial para projetos que exigem uma compreensão detalhada de como os sons se comportam em diferentes ambientes, como no *sound design* para videojogos. A visualização de formas de onda permite observar como o som é distribuído ao longo do tempo, o que ajuda a identificar picos de volume, distorções e áreas que requerem ajustes. A análise espectral, por outro lado, permite ver a distribuição de frequências ao longo do tempo, ajudando a isolar sons indesejados, como ruídos de baixa frequência, ou a destacar elementos que precisam de ser enfatizados numa mixagem final.

No âmbito do design sonoro para videojogos, a precisão e a clareza dos efeitos sonoros são essenciais para a qualidade da experiência do jogador. A utilização do *software Audacity* para a análise e o ajuste dos sons gravados, em conformidade com as exigências do projeto, pode ter um impacto significativo nos resultados finais. Dessa forma, a escolha do *Audacity* para a análise das amostras recolhidas revelou-se fundamental, dado que se trata de uma ferramenta robusta e eficaz para essa finalidade (Audacity: Free Audio Editor and Recorder, 2024).

3.2.2 Ableton Live 11

O *Ableton Live 11* é uma das mais reconhecidas ferramentas de produção musical e *performance* ao vivo, amplamente utilizada por produtores, DJs e artistas de música eletrónica. Lançado pela primeira vez em 2001, o *software*, agora na sua décima segunda versão, consolidou-se como uma plataforma completa para criação, gravação, edição e apresentação de composições musicais, destacando-se pela sua interface intuitiva e abordagem inovadora à música electrónica e às *performances* ao vivo (Ableton, 2020).

A principal característica que distingue o *Ableton Live* de outras DAWs - (*Digital Audio Workstations*) é a sua versatilidade e flexibilidade. Oferece dois modos de operação: o *Arrangement View* e o *Session View*. O *Arrangement View* segue uma abordagem linear tradicional de produção, semelhante à maioria das DAWs, onde o artista organiza faixas de áudio e MIDI numa linha temporal. Por outro lado, o *Session View* permite uma forma não linear de criação, ideal para performances ao vivo e experimentação sonora, possibilitando a execução de *clips* independentes de áudio e MIDI em tempo real (Collins, 2010).

Com o lançamento do Live 11, a Ableton expandiu significativamente as funcionalidades do *software*, adicionando novas ferramentas criativas. Entre os destaques, encontra-se a introdução do *Comping*, que permite aos utilizadores gravar múltiplas tomadas de áudio ou MIDI e selecionar as melhores partes para compor uma versão final. Este recurso é particularmente útil para músicos que procuram manter a espontaneidade nas suas *performances* gravadas, mas com a precisão técnica das melhores tomadas (Ableton, 2021). Outro avanço notável é a inclusão do *MPE - MIDI Polyphonic Expression*, que oferece um controlo mais detalhado sobre parâmetros como altura e expressão de cada nota, ampliando as possibilidades criativas em instrumentos MIDI e sintetizadores (Davis A. , 2021).

Para além das suas capacidades em estúdio, o *Ableton Live 11* continua a ser uma ferramenta indispensável para *performances* ao vivo, oferecendo integrações fáceis com controladores de *hardware*, como o *Ableton Push*, que permite um fluxo de trabalho intuitivo e responsivo. A baixa latência do *software* e a capacidade de executar *plugins* em tempo real fazem dele uma escolha favorita para músicos de música electrónica e DJs em apresentações ao vivo (McGlynn, 2020). Outro aspeto relevante do Live 11 é a sua abordagem colaborativa. Num contexto em que o trabalho remoto e a colaboração digital se tornaram mais comuns, a compatibilidade com o *Link*, uma ferramenta que sincroniza diversos dispositivos e *softwares* musicais numa rede, facilitou colaborações musicais à distância e ao vivo (Manning, 2021). Este recurso demonstra como o *Ableton Live* está na vanguarda da adaptação das ferramentas musicais às exigências do mundo moderno.

Em termos de *design* sonoro, o *software* oferece uma vasta biblioteca de instrumentos e efeitos nativos. A nova versão inclui dispositivos como o *Hybrid Reverb*, um efeito de reverberação híbrida que combina convolução e algoritmos para criar ambientes sonoros complexos. Destacam-se também os dispositivos *Spectral Resonator* e

Spectral Time, que utilizam processamento de áudio espectral para transformar sons de forma única (Ableton, 2021).

No contexto acadêmico, o *Ableton Live 11* tem-se destacado não apenas como uma ferramenta prática, mas também como objeto de estudo nas áreas de produção musical e música computacional. Segundo Collins (2010), o *software* desafia as fronteiras entre composição, performance e improvisação, e a sua interface não linear incentiva novas formas de abordar a criação musical. Em suma, o *Ableton Live* exemplifica a convergência entre a tecnologia digital e a criatividade artística, oferecendo um ambiente onde o músico pode manipular o som de forma precisa e, ao mesmo tempo, intuitiva.

O impacto do *Ableton Live 11* na música eletrônica moderna, nas performances ao vivo e nas práticas de estúdio é inegável. As suas inovações tecnológicas, facilidade de utilização e possibilidades criativas tornaram-no numa ferramenta essencial para músicos contemporâneos, transformando tanto o processo criativo como a forma de apresentação ao vivo.

3.2.3 FMOD

FMOD é uma plataforma de áudio usada em diversas aplicações como videojogos que permite que sejam reproduzidos ficheiros de sons em diversos formatos nessas aplicações, entre outras características avançadas de áudio. O *FMOD* é gratuito se usado em produtos não comerciais.

O recurso ao *FMOD* permite a criação de áudio espacial, posicionando sons tridimensionalmente para criar uma experiência auditiva mais realista e imersiva, oferece simulações avançadas de reflexões e reverberações, ajustando o som de acordo com o ambiente e as superfícies e modela como objetos e paredes afetam a propagação do som, proporcionando uma sensação de profundidade e realismo.

É compatível com *Unity*, *Unreal Engine* e outros motores de jogo, facilitando a sua implementação em diversos projetos e permite ajustes e edição de áudio em tempo real, ajudando os desenvolvedores a testar e refinar sons diretamente no contexto do jogo.

É amplamente utilizado em jogos de alto perfil, como "*BioShock*", "*Dark Souls*", "*Celeste*", entre outros, evidenciando a sua capacidade de criar ambientes sonoros

complexos e ricos. A ferramenta também oferece uma API⁶ de baixo nível para programadores que desejam integrar áudio de forma mais personalizada.

O *FMOD* proporciona ainda um alto grau de controle sobre todos os aspetos do design de som. A funcionalidade que pode ser considerada uma das mais interessantes de trabalhar no *FMOD* pode ser a função de parâmetros, onde o *sound designer* pode criar automatizações para o seu projeto que podem ser controladas por variáveis dentro do jogo. Função que cria realmente a sincronia entre o programador e a equipa de áudio.

No presente projeto, foi utilizada a ferramenta *FMOD*, para a implementação e reprodução do som ambiente na Cisterna de Marvão e cuja sonoridade foi o das gotas da chuva a incidirem sobre a água armazenada dentro da cisterna, capturando a atmosfera característica do local naquela hora. Esta escolha sonora contribuiu para a criação de uma experiência imersiva, enriquecendo a perceção espacial e acústica do ambiente. A utilização do *FMOD* permitiu assim, um controlo mais detalhado sobre a dinâmica e a espacialização dos sons (por exemplo, através do *Scatterer Instrument*), integrando-os de forma orgânica no ambiente virtual.

3.2.4 Unity - Game Engine

O *Unity Engine*, desenvolvido pela *Unity Technologies*, é um dos motores de desenvolvimento de jogos mais amplamente utilizados no mercado, sendo uma plataforma poderosa e versátil para criação de conteúdo interativo em tempo-real. Originalmente lançado em 2005, com foco em desenvolvedores independentes, o *Unity* cresceu rapidamente para se tornar uma escolha popular para estúdios de diferentes tamanhos, indo além dos jogos, para áreas como simulação, arquitetura, educação, realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR).

A principal característica do *Unity* é sua arquitetura baseada em componentes, na qual cada objeto no ambiente de desenvolvimento é tratado como um *Game Object*, que pode ser personalizado com diferentes componentes como física, animação ou scripts. O motor utiliza *C#* como sua linguagem principal de *script*, o que proporciona flexibilidade e uma curva de aprendizagem relativamente acessível, especialmente para novos desenvolvedores.

Um dos fatores que tornam o *Unity* tão popular é a sua capacidade multiplataforma, que permite exportar projetos para uma ampla gama de dispositivos e sistemas

⁶ *Application Programming Interfaces* - conjuntos de regras e protocolos que permitem a comunicação entre diferentes softwares

operacionais, incluindo *Windows*, *macOS*, *iOS*, *Android*, consoles como *PlayStation* e *Xbox*, além de suportar *WebGL* para aplicações de navegadores. Essa característica permite que os desenvolvedores criem um único projeto e o publiquem em várias plataformas com o mínimo de ajustes.

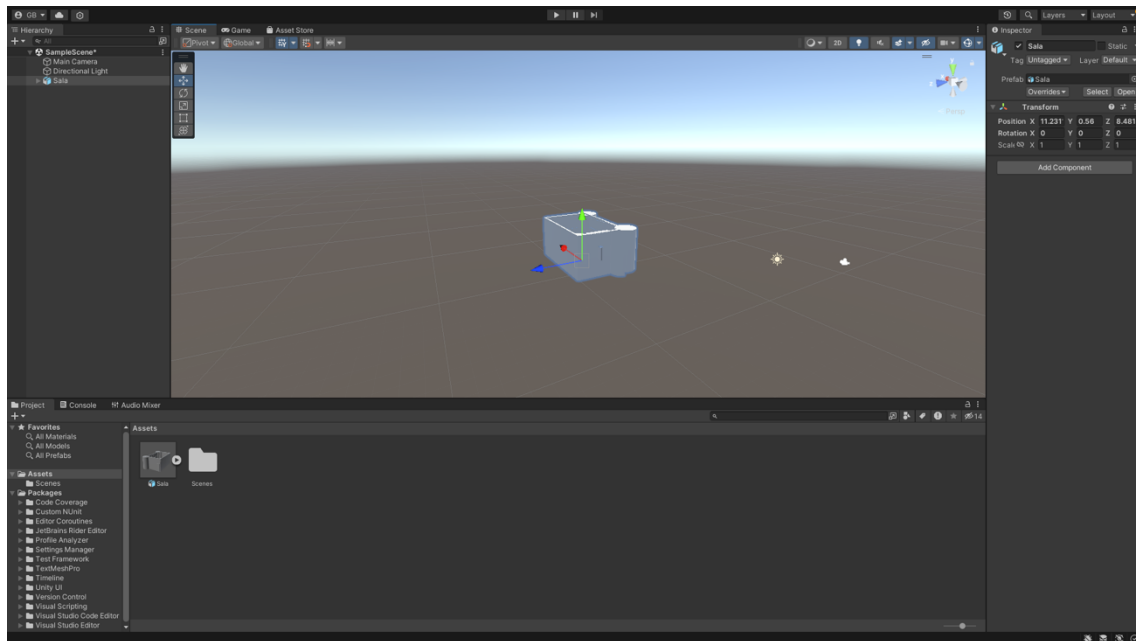


Figura 6 - Interface gráfico do Unity

O *Unity* também é conhecido pela sua vasta *Asset Store*, um *marketplace* de ativos que oferece desde modelos 3D e texturas até *scripts* e pacotes completos de funcionalidades. Isso possibilita que desenvolvedores economizem tempo ao utilizar recursos prontos ou *presets*, aumentando a eficiência no processo de criação.

Embora seja uma ferramenta extremamente poderosa, o *Unity* apresenta alguns desafios, como a necessidade de otimizações para projetos maiores e a busca por maior qualidade gráfica em comparação com outros motores, como o *Unreal Engine*. Entretanto, com melhorias contínuas, como a introdução de *pipelines* de renderização avançada (URP e HDRP), o *Unity* continua a expandir as suas capacidades, permitindo que seja utilizado em projetos cada vez mais complexos e de alta qualidade gráfica.

O impacto do *Unity* na indústria vai além do desenvolvimento de jogos, amplamente utilizados para criar aplicações em áreas como simulação médica, visualização arquitetônica e experiências imersivas de VR/AR, consolidando-se como uma ferramenta indispensável na criação de ambientes interativos em tempo real.

3.2.5 Steam Audio

O *Steam Audio* é um *plug-in* de áudio espacial desenvolvido pela Valve, concebido para aprimorar a simulação sonora em ambientes tridimensionais, tanto em jogos quanto em aplicações de realidade virtual (VR) e aumentada (AR). Ele simula, de forma realista, a forma como o som interage com o ambiente e é percebido pelo ouvinte, proporcionando uma experiência imersiva. Compatível com motores de jogo como *Unity* e *Unreal Engine*, o *Steam Audio* tem sido amplamente utilizado para criar ambientes sonoros envolventes e precisos.

O *Steam Audio* destaca-se pelas suas funcionalidades técnicas, voltadas para a simulação realista da propagação do som. Entre as principais capacidades estão a simulação de reflexão e oclusão, onde o *plug-in* imita como o som reflete em superfícies e como objetos ou paredes bloqueiam ou filtram o som, dependendo das suas características físicas, como material e espessura. Além disso, uma das tecnologias fundamentais do *Steam Audio* é o HRTF (*Head-Related Transfer Function*), que modela como as ondas sonoras são modificadas pela forma da cabeça, orelhas e torso do ouvinte, criando uma experiência sonora tridimensional direcional e envolvente, especialmente eficaz em cenários de realidade virtual.

O *Steam Audio* também simula a propagação do som em ambientes dinâmicos, considerando a forma, material e posicionamento dos objetos no espaço. Esta simulação permite que o som seja refletido de forma diferente, conforme as superfícies, proporcionando um realismo sonoro mais aprofundado. Além disso, a integração com motores de jogo populares, como *Unity* e *Unreal Engine*, facilita a implementação de áudio espacial, oferecendo ferramentas acessíveis para configurar fontes sonoras tridimensionais e simulações acústicas.

A aplicação do *Steam Audio* é vasta, abrangendo desde jogos até simulações VR e AR. Em realidade virtual, o áudio espacial permite que os utilizadores percebam o som de acordo com a sua localização no espaço, o que aumenta significativamente a imersão e a sensação de presença. Em jogos, sobretudo multijogador, o som posicional pode fornecer informações estratégicas cruciais, como a localização de adversários, oferecendo uma vantagem tática importante. Adicionalmente, em simuladores de treino, como os utilizados em operações militares ou médicas, o *Steam Audio* proporciona uma simulação sonora precisa que melhora a percepção do ambiente, aumentando a qualidade e a eficácia dos treinamentos.

No entanto, a implementação do *Steam Audio* apresenta alguns desafios. A simulação avançada de áudio espacial em tempo real exige uma quantidade significativa de recursos computacionais, o que pode impactar o desempenho do sistema, particularmente em plataformas com *hardware* limitado, como dispositivos móveis ou consolas. Além disso, embora o *plug-in* seja compatível com motores de desenvolvimento populares, a sua configuração e implementação eficaz requerem um conhecimento técnico profundo, especialmente para ajustar as fontes sonoras e a simulação acústica de modo que superem os sistemas de áudio padrão.

O impacto do *Steam Audio* no mercado tem sido notável, especialmente em jogos e simulações VR. Um exemplo de aplicação prática pode ser encontrado em jogos multijogador como *Counter-Strike: Global Offensive* (CS), onde o som posicional desempenha um papel fundamental na estratégia dos jogadores. A implementação de áudio espacial preciso oferece uma camada adicional de realismo e imersão, que influencia diretamente a experiência de jogo. Além disso, o *plug-in* tem sido em simuladores de treino militar e médico, com destaque para soluções como as desenvolvidas pela VRAI⁷, onde a precisa percepção auditiva melhora o realismo das simulações e contribui para a formação dos utilizadores.

3.2.6 Possibilidades da integração do Steam Audio no Unity

O *Steam Audio*⁸ pode ser usado para adicionar uma variedade de recursos de áudio espacial a qualquer projeto *Unity* como mecanismo de áudio integrado do *Unity* ou como *middleware* de áudio de terceiros, como o *FMOD Studio*, por exemplo.

Constitui-se de um conjunto de ferramentas de software multiplataforma para áudio espacial que pode ser usado para adicionar efeitos de áudio posicionais e ambientais ricos e envolventes a jogos e aplicativos de realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR) através da oferta de uma ampla variedade de recursos, incluindo:

- Renderização áudio posicional 3D, de forma binaural usando HRTF, para modelar com precisão a direção de uma fonte de som em relação ao ouvinte;
- Renderização áudio 3D para conteúdo *ambisonics*, especializando clips de áudio *ambisonics* com base na orientação do ouvinte no mundo virtual;

⁷ VRAI é uma empresa especializada em realidade virtual (VR), com foco em criar experiências imersivas para treinamento e simulação.

⁸ [Steam Audio Unity Integration — Steam Audio Unity Integration documentation \(valvesoftware.github.io\)](https://valvesoftware.github.io/Steam-Audio-Unity-Integration/)

- Usar HRTF personalizados com recurso a arquivos SOFA, para espacializar fontes pontuais e *ambisonics* usando qualquer HRTF especificado pelo utilizador e cujos arquivos devem estar no formato padrão da AES, o SOFA⁹.
- Modelo de oclusão de fontes sonoras para modelar rapidamente a oclusão através do *raycast* do som direto por objetos sólidos assim como a oclusão parcial para fontes não pontuais e a transmissão de som ocluído através de geometria oclusiva;
- Reflexões do modelo e efeitos de áudio ambientais relacionados para modelar a forma como o som é refletido por objetos sólidos como efeitos de áudio ambientais, incluindo ecos de tapa, ecos de vibração, oclusão de som por edifícios e muito mais;
- Modelar a propagação do som ao longo de vários caminhos para modelar a forma como o som se propaga da fonte até ao ouvinte, ao longo de vários caminhos;
- Criar efeitos de áudio ambientais adaptados à cena de jogo para analisar o tamanho, a forma, o layout e as propriedades dos materiais das salas e objetos que integram a cena de jogo;
- Automatizar o processo de criação de reverberações e outros efeitos de áudio ambientais, sem necessitar de colocar manualmente filtros de efeitos na cena toda assim como não necessitar de os ajustar manualmente em todos os lugares uma vez que o *Steam Audio* usa um processo automatizado em tempo real ou baseado em pré-computação, onde as propriedades do áudio ambiental são calculadas (usando princípios da física) em toda a cena;
- Alterar a acústica em tempo real em resposta à geometria em movimento modelando a forma como a geometria em movimento afeta a oclusão, os reflexos e outros efeitos ambientais;
- Renderizar *reverbs* de convolução de alta qualidade calculando a reverberação de convolução em ambientes atraentes que soam mais realistas do que a reverberação paramétrica;
- Usar CPU *multi-core* e GPU para acelerar a simulação e renderização de efeitos ambientais, garantindo ao mesmo tempo que suas cargas de trabalho de áudio

⁹ SOFA é um formato de arquivo para armazenar dados acústicos orientados espacialmente como funções de transferência relacionados à cabeça (HRTF) e respostas de impulso binaural ou espacial (BRRs, SRIRs). SOFA foi padronizado pela Audio Engineering Society (AES) como AES69-2015 e AES69-2022 (sofaconventions.org)

não impactem negativamente outras cargas de trabalho de GPU ou a estabilidade da geração de imagens;

- Equilibrar o realismo físico e a intensão artística ao modificar os resultados da simulação baseada na física antes de serem usados para renderizar efeitos de áudio.

3.2.7 Blender

O Blender é um software poderoso e gratuito de modelação e animação, possui um mecanismo de jogo avançado e eficiente e integra ainda uma biblioteca de física. Através do interpretador *Python*¹⁰ incorporado, o motor de jogo fica totalmente aberto para implementar a interação em tempo real do software de controlo externo com o motor de jogo interno. Assim a física do jogo pode ser utilizada sempre que alguma parte mecânica estiver sob movimento descontrolado, como deslizar ou cair.

O aplicativo Blender 3D compreende o modelador, mecanismo de animação e mecanismo de jogo. No modelador, os objetos geométricos 3D são desenhados e anotados com informações, configuração, e configuração para animação, execução de jogos e física. A física do jogo é um recurso que é utilizado na animação ou modo de jogo (Lind & Roulet-Dubonnet, 2010).

De salientar que os utilizadores avançados utilizam a API do Blender para *scripts Python* para personalizar o aplicativo e escrever ferramentas especializadas; muitas vezes estes são incluídos em versões futuras do Blender. O Blender é adequado para indivíduos e pequenos estúdios que se beneficiam de seu pipeline unificado e desenvolvimento o processo responsivo.

O Blender é multiplataforma e funciona igualmente bem em computadores Linux, Windows e Macintosh.

Não obstante o Blender é um conjunto de ferramentas de software de computação gráfica 3D profissional, gratuito e de código aberto, utilizado para criar imagens animadas, filmes, efeitos visuais, arte, modelos impressos em 3D, aplicativos 3D interativos e videojogos com som. Os recursos do Blender incluem o modelo 3D, texturização, edição de gráficos *raster*, *rigging* e *skinning*, simulação de fluidos e fumos, simulação de partículas, simulação de corpo mole, escultura, animação, com movimento, renderização, movimento gráfico, edição, composição de vídeo (Diefenbach, 2011). Exemplos de muitos projetos baseados no Blender estão disponíveis no *showcase*.

¹⁰ *Python* é uma plataforma de programação voltada para a agilidade de produção de aplicações, contando com uma sintaxe simplificada e orientada a objetos (*Python Software Foundation*). Muitas vezes é classificada como uma linguagem de script¹ por ser ágil, entretanto possui todos os recursos para a construção de grandes aplicações (Reis, 2004). A utilização de uma linguagem como *Python* para a construção de jogos e de pequenas aplicações é interessante tanto para contextos educacionais como profissionais, e durante esse capítulo será possível observar a facilidade e agilidade para certas rotinas. Ainda, a plataforma bem como a maior parte das bibliotecas é Software Livre, o que garante a economia e a qualidade do código.

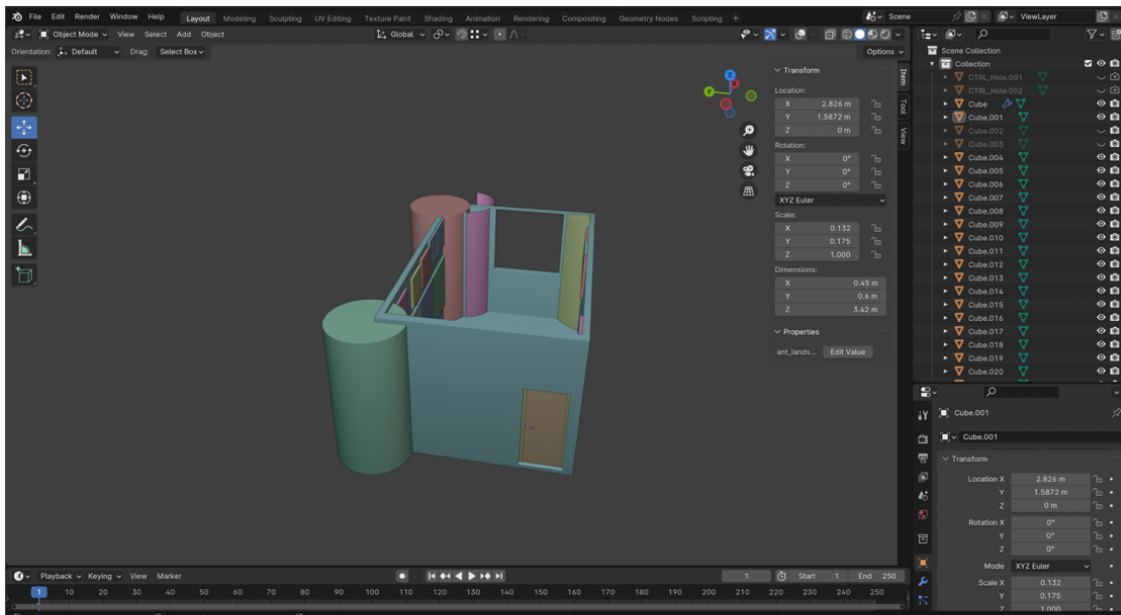


Figura 7 - Interface do Blender

O Blender tem sido utilizado em vários projetos industriais e comerciais, inclusive pelo Jet Laboratório de Propulsão (NASA) (Nutting, 2016), The History Channel (Veldhuizen, 2006), em outros programas de televisão como Red Dwarf (Veldhuizen 2006 B).

A cada nova versão do Blender, a importação/exportação e a lista de opções de formatos de ficheiros aumentam. Isso torna o Blender muito mais compatível com uma variedade de outros modelos 3D, programas de software de animação e motores de jogo como o Unity. Ao importar arquivos do Blender para outros arquivos do Blender, deve-se utilizar o comando *Append*. Para além da utilização como aplicativo de padrão 3D, as funcionalidades do Blender podem ser facilmente ampliadas e tendem a utilizar os *scripts Python*. O Blender inclui duas APIs Python principais: o mod (bpy) regras para o editor principal e visualização de informações de superfície do utilizador e os módulos *GameLogic* para o *Game Engine* que permite a interação do utilizador e as simulações de física utilizando os blocos lógicos simples do projeto (Amatriain, 2007).

No *Game Engine*, os eventos são gerados por sensores e enviados aos controladores, que decidem qual a ação deve ser executada com e a interagir com o ambiente de jogo. Os sensores não estão apenas conectados ao teclado ou rato, mas para conceitos de nível superior como a proximidade ou colisão com outros objetos (Ballamudi, 2019). Na maior parte das vezes, é no Blender que se efetua os modelos de ambientes, exceto itens menores, ou sejam o design de níveis é criado inteiramente dentro do programa Blender (Turner, 2016). De igual modo, o layout inicial e a construção foram criados no Blender.

4 Desenvolvimento

4.1 Seleção dos espaços a analisar

O desenvolvimento deste projeto partiu na escolha e identificação dos espaços a replicar considerando essencialmente as suas características acústicas tais como, materiais, dimensão do espaço, reverberações, difusão, entre outros fenómenos acústicos importantes para a simulação e criação de uma experiência sonora realista e imersiva.

Por isso, no que respeita à conceção deste projeto, foi escolhida a sala Régie A e Teresa Macedo, integradas na ESMAE - Escola Superior de Artes e Espetáculo do Porto e a cisterna do castelo da Vila de Marvão, sita no distrito de Portalegre. Espaços com diferentes características acústicas permitindo testar por exemplo, reverberações curtas e longas, posicionamento dos sons, distanciamento e detalhes de sons naturais como as gotas de água no caso da cisterna.

4.1.1 Régie A

A Régie A é uma sala direcionada para atividades audiovisuais, considerado um recurso essencial para estudantes dos cursos de som e imagem. A opção desta escolha recaiu no facto de se tratar de um estúdio com isolamento e tratamento acústico adequado ao impedimento de interferências sonoras de modo a garantir uma acústica ideal para produção de som.

Diz-se que é uma sala acusticamente "seca" e tratada, pois possui painéis acústicos absorvedores posicionados em diferentes regiões, uma janela com uma caixa de ar e um vidro duplo com acesso ao estúdio de ensaio. Todos esses materiais servem para eliminar fenómenos acústicos indesejados, tais como reverberações indesejadas, ondas estacionárias, sombras de graves e oclusão. É uma sala executada em tijolo numa das paredes e cimento nas restantes.

A intenção dos testes nesta sala recai sobre a pretensão de simular fontes sonoras que não sejam multidirecionais o que é possível na Régie A, uma vez que existem dois altifalantes *Genelec* 1031A, que são unidirecionais e que se encontram fixos numa só posição, facilitando o objetivo de simular as fontes sonoras dos altifalantes, onde o jogador pode estar em diferentes posições na sala (mais atrás ou mais à frente), observando sempre a direccionalidade do som, a distância e algumas reverberações que a sala proporciona.



Figura 8- Fotos do espaço da Régie A

4.1.2 Cisterna de Marvão

A cisterna do Castelo de Marvão é uma das maiores cisternas dos castelos portugueses, com cerca de 10 metros de altura e 46 de comprimento. Esta estrutura acumulava água para cerca de 6 meses, o que era essencial para que a fortificação pudesse resistir a um cerco prolongado, pois no cume do monte a quase 900 metros de altitude, não existia outra forma de água disponível.

Trata-se de uma construção subterrânea feita com pedra natural e uma abóbada, que hoje é amplamente conhecida não apenas pela sua história e arquitetura, mas também pelas suas características acústicas únicas e notáveis. A estrutura de pedra e a forma abobadada da cisterna resultam em absorções mínimas, o que contribui para um tempo de reverberação muito longo, no qual os sons são refletidos múltiplas vezes pelas

superfícies duras, criando um ambiente sonoro rico e envolvente. Essas reflexões interferem umas com as outras, gerando padrões de interferência que podem ser explorados e simulados no *sound design*. As características estruturais da cisterna também permitem a difração do som, onde as ondas sonoras contornam obstáculos e se espalham por todo o espaço.

O objetivo neste espaço prende-se em captar e simular um diálogo de uma pessoa enquanto as gotas da chuva caem na água armazenada, criando uma experiência imersiva de um diálogo com um som de fundo natural. Esta combinação de diálogo e sons de chuva que se espalham no ambiente, cria uma paisagem sonora única e envolvente proporcionando uma experiência auditiva rica em detalhes e profundidade.



Figura 9 - Foto do interior da Cisterna de Marvão

4.1.3 Sala Teresa Macedo

Uma das salas que foi alvo de desenvolvimento foi a Sala Teresa Macedo, localizada na Escola Superior de Música e Artes do Espetáculo, por ser uma sala cuja estrutura é composta por tijolos, com um piso de madeira e com características arquitetônicas que incluem três janelas duplas com uma caixa de ar entre elas, e um teto com uma geometria mais inclinada no centro. Essa configuração poderia resultar em reflexões sonoras distintas, destacando-se também a possibilidade de ocorrência de ondas estacionárias no centro da sala.

Destaca-se também a presença de uma cortina que circunda a parede do fundo da sala, envolvendo os dois pianos. Esta cortina proporciona uma absorção adicional nessa área, direcionando o som dos pianos de forma mais concentrada para o restante espaço. Essa característica contribui para a projeção adequada do som e para a criação de uma atmosfera sonora equilibrada durante os ensaios ou as atividades realizadas na sala.

Portanto, o objetivo nesta sala era simular uma composição de piano como se alguém estivesse a tocar, de forma a combinar posições estratégicas por parte do jogador a fim de testar a sensação de direccionalidade e distância da fonte, e a reverberação da sala.



Figura 10 - Fotografias do interior da Sala Teresa Macedo

4.2 Seleção dos sons a implementar

Em estudos de implementação e análise de som tridimensional, a seleção de sons para testes de captação binaural é uma etapa essencial para garantir que o sistema possa simular com precisão diferentes ambientes e condições acústicas. Por isso, a escolha de sons para testes de som binaural é fundamental, uma vez que existem sons que possuem características que afetam diretamente a percepção espacial. A seleção de sons para testes de áudio binaural deve cobrir uma ampla gama de frequências e cenários acústicos, como vozes humanas, instrumentos musicais, sons ambientes (naturais e urbanos), e efeitos sonoros que simulam objetos em movimento (Lokki, 2009) (Savioja, 2015). Sendo assim, ajuda a avaliar a capacidade de o sistema de capturar pontos importantes, como a percepção precisa da direção, distância e alteração do som conforme a interação com superfícies e obstáculos.

Num contexto mais controlado como por exemplo em estúdios de gravação ou ambientes acústicos específicos, os testes de som binaural podem fornecer informações valiosas sobre o comportamento do som em relação ao espaço e à localização.

Por isso, a seleção incluirá fontes sonoras que permitam avaliar o comportamento de reflexão, difração, reverberação e propagação em ambientes fechados, conforme sugerido por estudos de acústica e áudio espacializado (Savioja, 2015). Com base nessas referências, a escolha dos sons será crucial para garantir que as capacidades do *Steam Audio* sejam plenamente exploradas, contribuindo para uma experiência auditiva imersiva e realista em futuros desenvolvimentos de aplicações de realidade virtual e jogos.

Posto isto, existem diversas categorias de sons usados em testes de captação sonora binaural tais como, sons de vozes humanas (conversas, discursos, sussurros, entre outros), sons de ambientes naturais (chuva, sons de animais, vento, entre outros), sons de ambientes urbanos (transito, sirenes, aviões), efeitos sonoros dinâmicos e impactantes (tiros, explosões, entre outros), sons de instrumentos musicais (guitarras, baterias, pianos, entre outros), sons de ambientes fechados (sons de passos em diferentes superfícies, portas ou janelas a abrir, entre outros), movimento e transição sonora (veículos a aproximarem se ou a afastarem se, um objeto a girar a nossa volta, entre outros).

4.2.1 Régie A

A intenção da escolha sonora na Régie A, recaiu sobre a análise da propagação sonora através dos monitores instalados nesse ambiente, permitindo chegar a conclusões relevantes sobre a acústica do espaço, que é fechado e acusticamente controlado. Nesse contexto, as reflexões sonoras são minimizadas, resultando numa experiência auditiva mais direta e clara. Para o efeito, foi selecionada uma música da minha autoria, pertencente ao subgênero *Dub Techno*, devido à sua estrutura composta por batidas rápidas e sintetizadores, características que se revelam ser excelentes para testar reflexões curtas e reverberações suaves. Por isso, elementos que compõe a faixa tais como o *kick* e o *bass*, podem servir para avaliar a localização dos graves. Por sua vez, os *hi-hats* e a percussão, distribuídos entre os canais esquerdo e direito, criam uma sensação de largura do campo sonoro ao ouvinte. Além disso, os sintetizadores, incluindo *leads* e *pads*, com frequências mais agudas, são espalhados pelo campo estéreo. Desta forma, todos esses elementos possibilitam a extração de conclusões que poderão auxiliar decisões da implementação virtual.

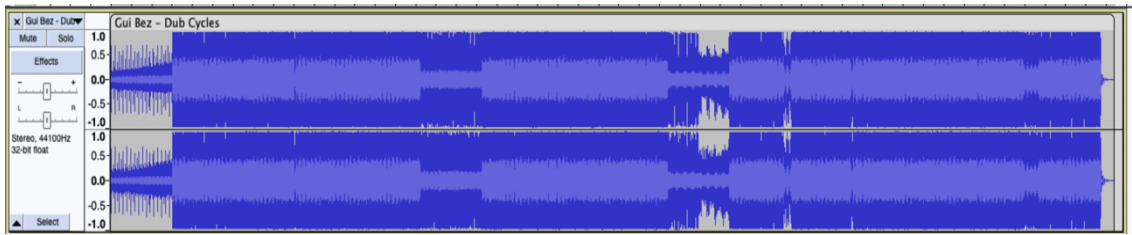


Figura 11 - Amostra da faixa de DubTechno em Stereo

Embora a Régie A seja um espaço tratado acusticamente de modo a impedir reverberações excessivas, algum nível de reverberação está seguramente presente, especialmente nas frequências mais baixas, o que pode ajudar a criar uma sensação de envolvimento.

Dada a natureza estéreo da música e considerando que existem dois altifalantes na sala, foi essencial realizar a separação dos dois canais — o canal esquerdo e o canal direito. Essa separação é fundamental para a implementação adequada no *Steam Audio*, assegurando que cada canal seja direcionado corretamente para o respetivo altifalante, tanto para o esquerdo quanto para o direito

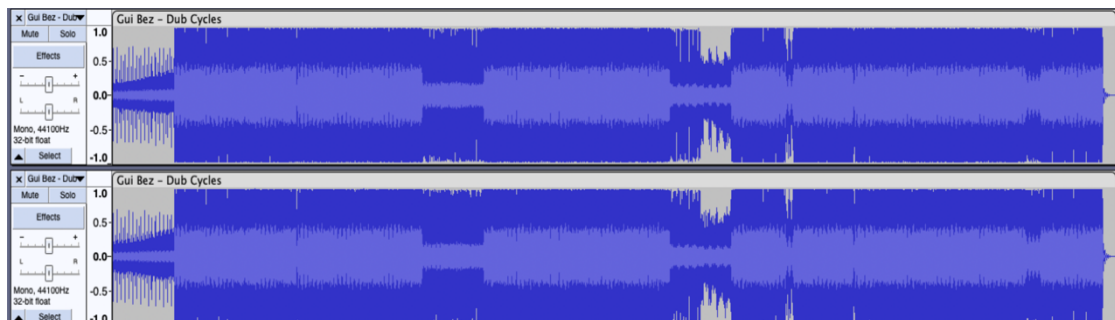


Figura 12 - Amostra da faixa de DubTechno separada em dois canais

4.2.2 Cisterna de Marvão

A Cisterna de Marvão, um espaço caracterizado pelas suas paredes de pedra, é possível observar uma reverberação natural que cria um ambiente sonoro complexo e rico em reflexões. Este fenómeno torna a cisterna um local ideal para a exploração dos efeitos de reverberação prolongada. A reverberação, que se refere ao prolongamento do som num espaço após a sua emissão, pode influenciar significativamente a perceção auditiva e a experiência imersiva dos ouvintes.

Para o efeito, foi selecionado um excerto de um texto que discute a história e características da cisterna, e que servirá como base para a análise dos efeitos sonoros.

O objetivo principal é testar o nível e a duração da reverberação presente neste espaço, utilizando técnicas de captação sonora que permitam uma boa avaliação.



Figura 13 - Amostra do diálogo Ableton Live

Contudo, devido ao facto de estar a chover dentro da cisterna durante o processo de captação, o desafio foi significativamente aumentado. Esta condição obrigou-me a produzir sons de gotas de água a caírem gradualmente, recriando assim a sonoridade real que estava presente no espaço. Para este fim, utilizei o software FMOD, que me permitiu simular e manipular os sons de forma a capturar a essência do ambiente sonoro da cisterna. Este processo de produção sonora não só enriqueceu a experiência auditiva, como também proporcionou uma oportunidade única para estudar a interação entre os sons naturais e a reverberação característica do espaço.

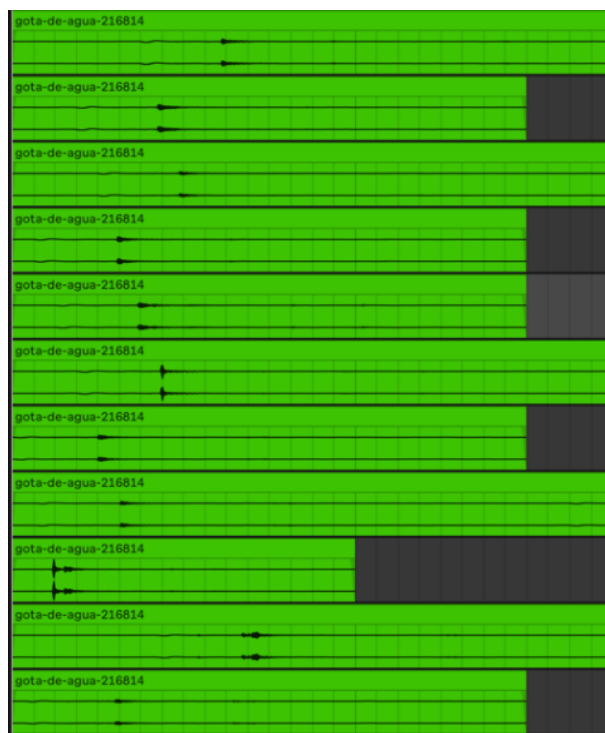


Figura 14 - Amostra das gotas de água

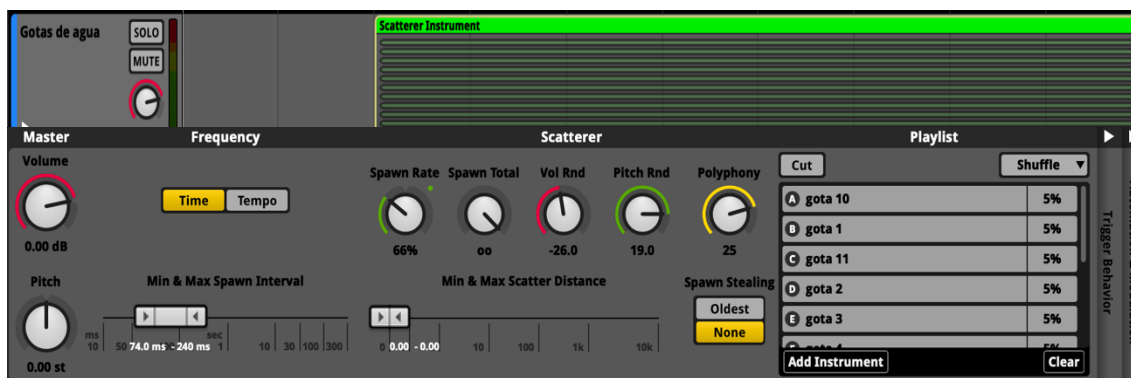


Figura 15 - Amostra das gotas de água a serem processadas no FMOD

4.2.3 Sala Teresa Macedo

A escolha da peça musical a ser implementada na Sala Teresa Macedo recaiu sobre uma composição de Schumann, intitulada "A Tale Of Distant Lands". Esta decisão foi fundamentada no facto de se tratar de uma obra escrita para piano, instrumento que está presente na sala, o que reforça a coerência entre o ambiente físico e a trilha sonora selecionada. Para obter as notas MIDI necessárias, recorri ao site <http://www.piano-midi.de/>, o qual disponibiliza transcrições em formato MIDI de composições para piano. Estas notas foram posteriormente, reproduzidas no software Ableton Live, utilizando um *plugin* de piano. A intenção foi reproduzir o som de maneira totalmente "seca", ou seja, sem a adição de reverberação, efeitos ou outros tratamentos sonoros, garantindo uma reprodução fiel e pura do timbre do piano, em consonância com a atmosfera acústica da sala.

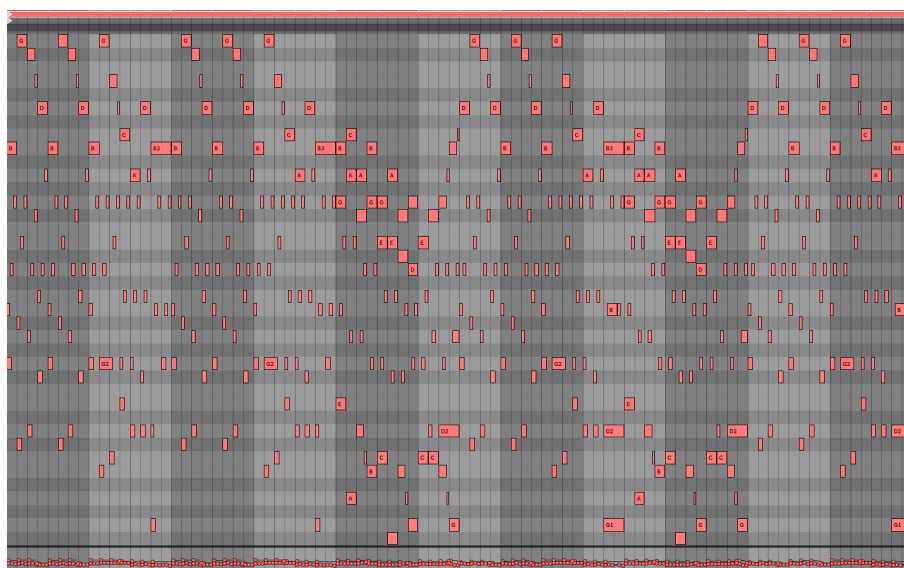


Figura 16 - Sequência de notas MIDI da peça A Tale Of Distant Lands

4.3 Levantamento dos espaços

A realização do projeto partiu do pressuposto conhecimento dos locais de intervenção, sendo importante a replicação dos espaços físicos o mais possível da realidade, com recurso ao programa Blender.

A implementação no Blender requer o levantamento dos espaços reais que envolvem um processo técnico de captura e transferência de dados do físico para o digital, processo esse que envolve a recolha de medidas e a captura de imagens do ambiente real a usar posteriormente para construir uma réplica virtual no Blender. Para o efeito existem variadas técnicas dependendo da escala do projeto, do nível de precisão exigido e dos recursos disponíveis sendo que, no presente caso os levantamentos envolveram as seguintes etapas e ferramentas - Levantamento manual, considerado um método mais tradicional que envolveu a medição manual dos espaços com recurso a fitas métricas e a criação de croquis que mais tarde foram convertidas num modelo 3D no Blender a partir das medidas exatas.

4.3.1 Régie A

Neste caso, o processo escolhido (levantamento manual), embora menos preciso quando comparado com outras técnicas mais sofisticadas, considera-se mais adequado para espaços pequenos e simples como é o caso, mais acessível e simples e dispensa a necessidade de recorrer a equipamento especializado.

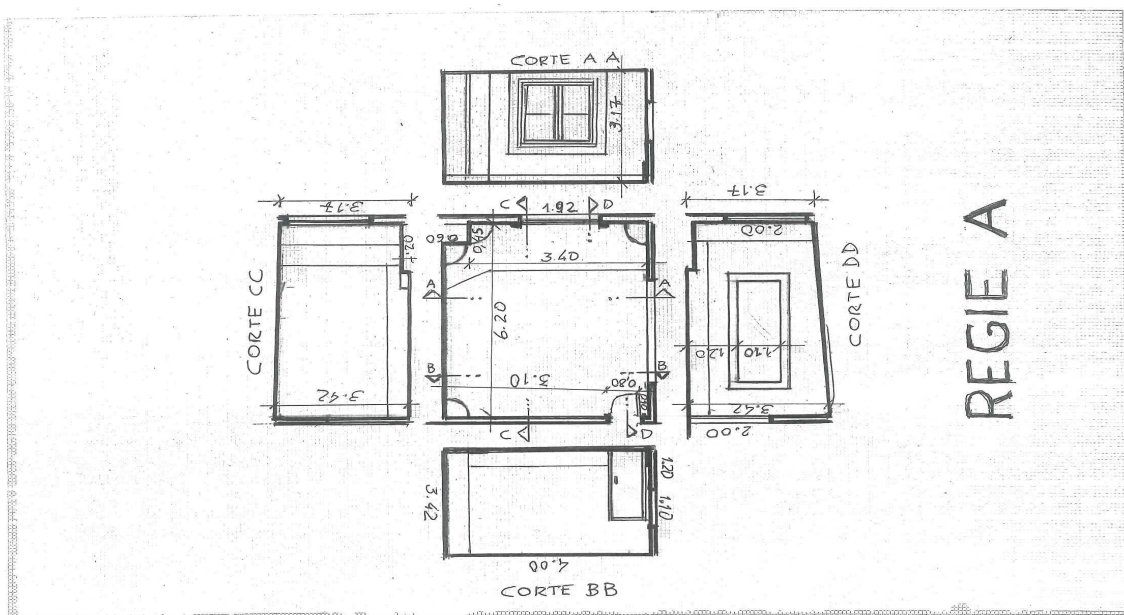


Figura 17 - Levantamento manual da sala Régie A

4.3.2 Cisterna de Marvão

Para a realização das medições da cisterna, recorreu-se a dados previamente disponibilizados pela Câmara Municipal de Marvão, entidade responsável pela gestão e preservação do património local.

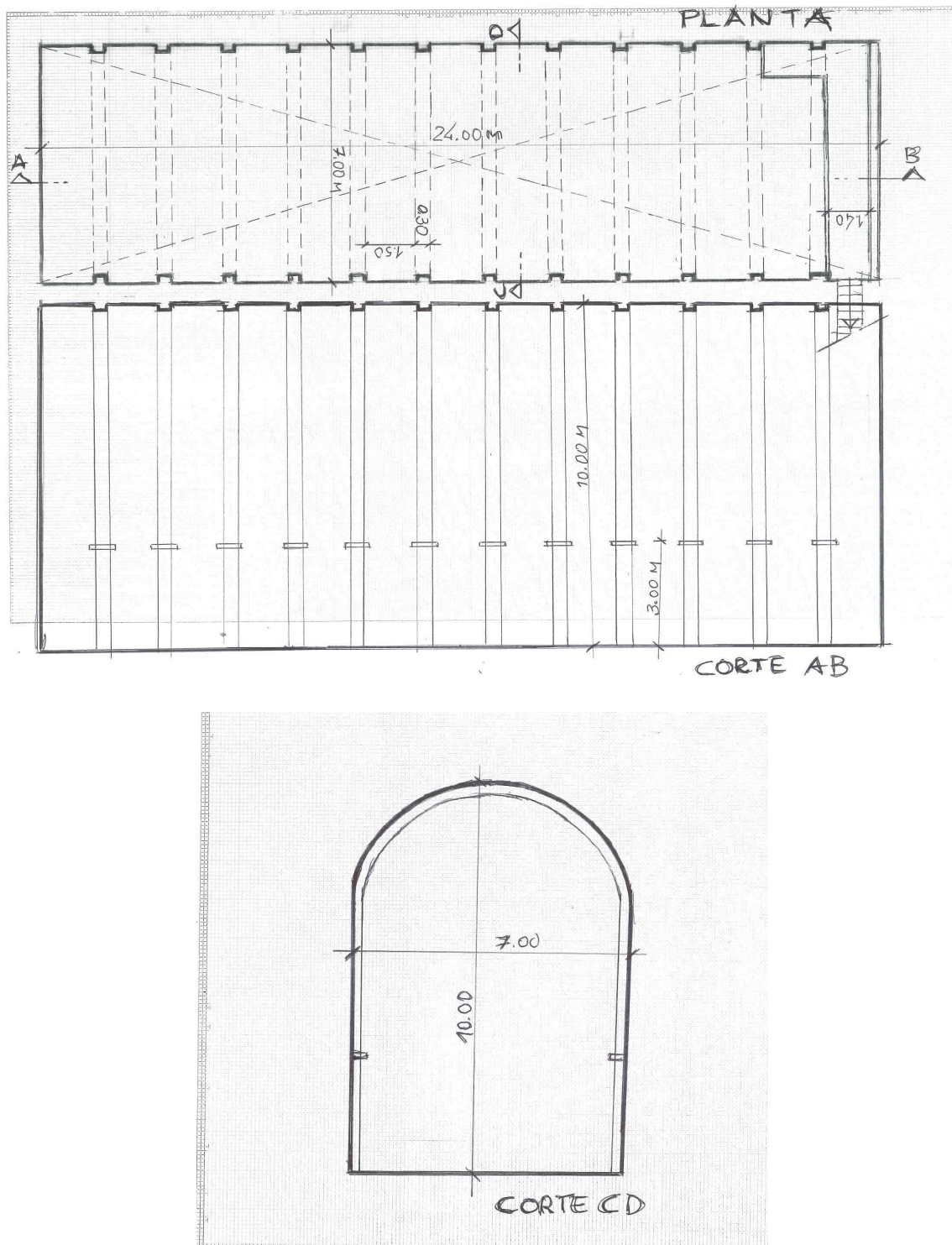


Figura 18 - Levantamento manual do interior da cisterna do castelo de Marvão

4.3.3 Sala Teresa Macedo

Neste contexto, o processo adotado para a execução do levantamento da Sala Teresa Macedo, foi o mesmo utilizado para a Regie A, sendo caracterizado também por um levantamento manual.

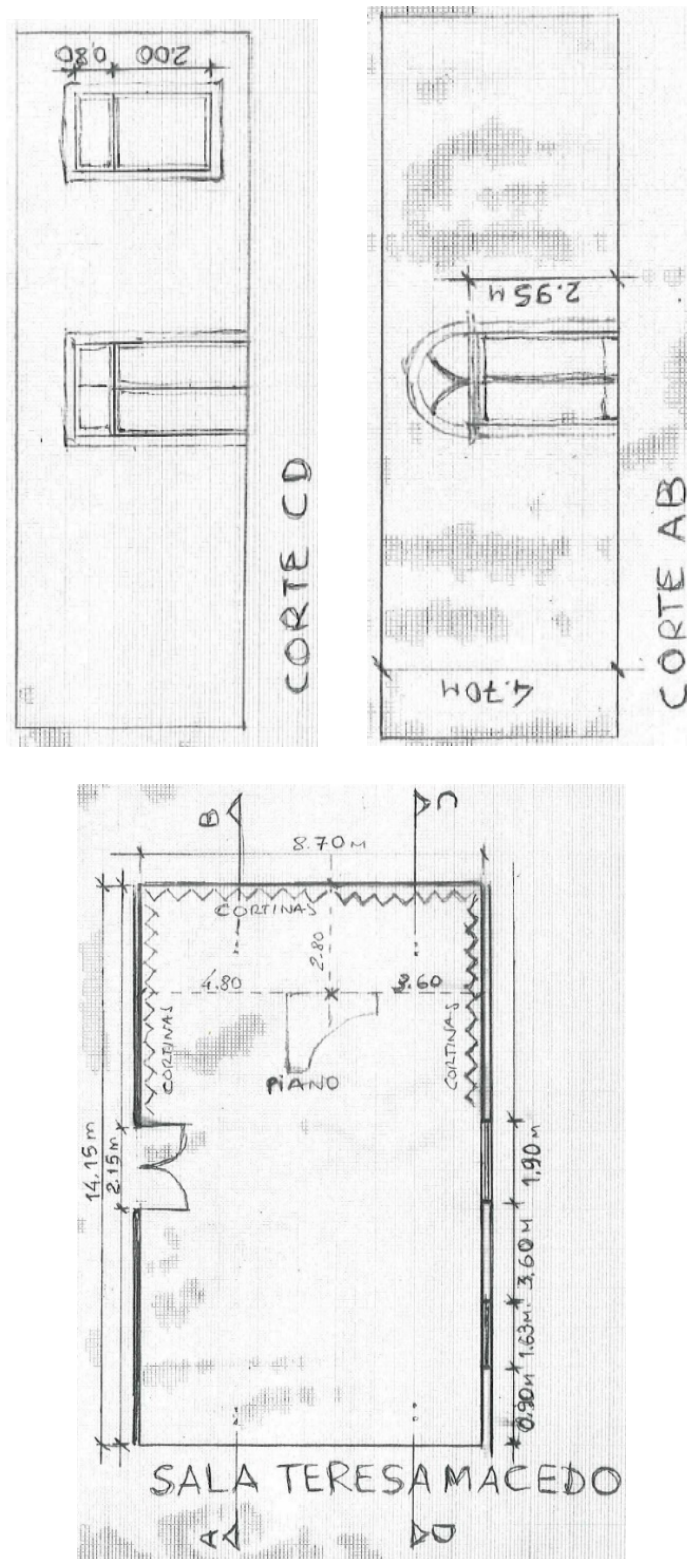


Figura 19 - Levantamento manual do interior da Sala Teresa Macedo

4.4 Modelação 3D (Blender)

4.4.1 Régie A

A modelação da Régie A no *Blender* foi realizada com o objetivo de criar uma réplica detalhada e fiel do espaço arquitetónico, com ênfase nas suas características físicas que influenciam a experiência visual e auditiva dentro de um ambiente de videojogo. O processo começou com a análise das plantas arquitetónicas e medições detalhadas do espaço real, de forma a garantir a precisão nas proporções.

Durante o processo de modelação, várias ferramentas e técnicas específicas do *Blender* foram manipuladas para otimizar o fluxo de trabalho e garantir a precisão tais como modelação Poligonal, com base em modelação já feita utilizando primitivas geométricas, como cubos e cilindros, para construir as paredes, portas e janelas. Para além disso, utilizou-se modificadores *Mirror* para replicar automaticamente partes simétricas do edifício, como os painéis absorvedores por exemplo, acelerando a criação de estruturas repetitivas e o modificador *Bevel* aplicado em cantos e arestas para suavizar transições entre superfícies e melhorar o realismo do modelo ao evitar ângulos extremamente rígidos.

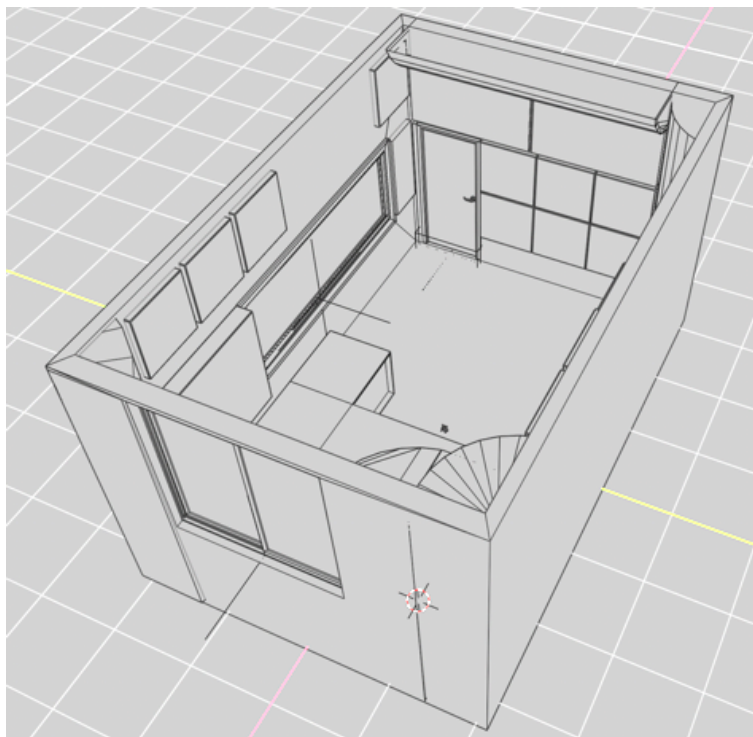


Figura 20 - Modelação 3D da sala Régie A em wireframe

A Régie A é um espaço arquitetonicamente complexo, composto por vários elementos que afetam diretamente a experiência visual e sonora do ambiente. Durante a modelação, foram abordados os seguintes componentes principais:

- **Painéis Acústicos:** Os painéis acústicos foram modelados com precisão, replicando as suas formas geométricas e a disposição nas paredes, cantos e teto. Para isso, foi utilizada a técnica de *array modifier*, que permitiu a repetição uniforme desses elementos em todo o espaço;
- **Speakers ou Equipamentos de Som:** Esses objetos foram modelados com detalhe, considerando as suas dimensões e posição no espaço, garantindo que fossem representados com precisão no ambiente 3D;
- **Janelas de Vidro:** A modelação das superfícies de vidro envolveu a criação de objetos transparentes, utilizando *material shaders* no Blender para simular a reflexão e refração da luz através dessas superfícies, o que contribuiu para a estética realista do ambiente.

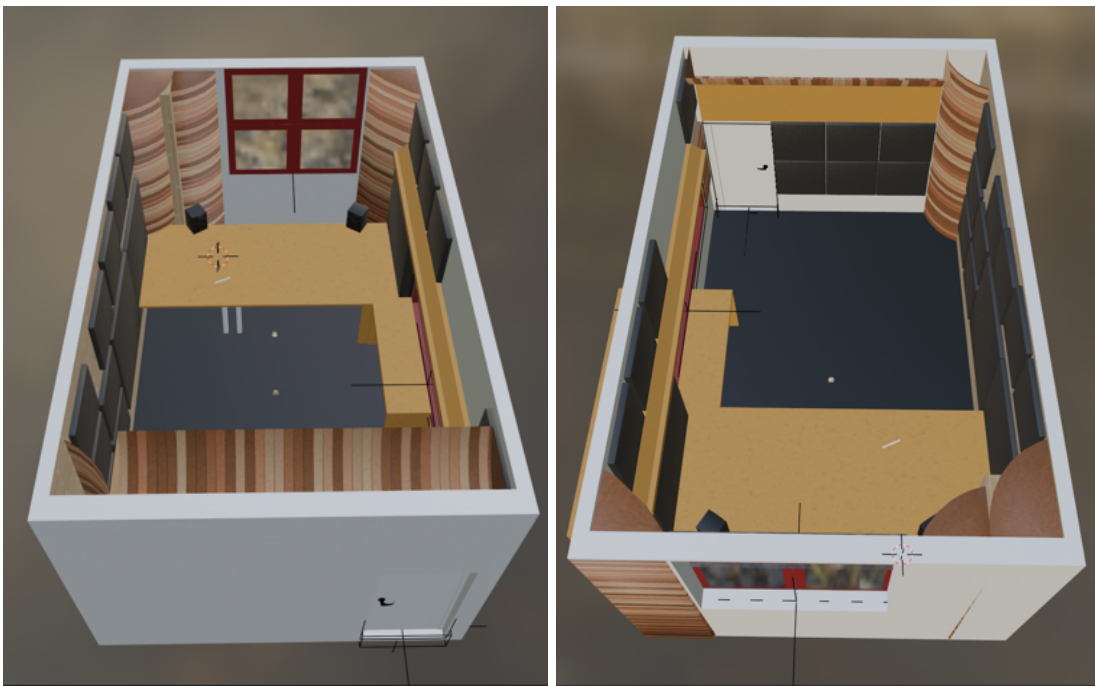


Figura 21 - Modelação 3D efetuada da Régie A

O uso da ferramenta de medição de distância no *Blender* permitiu manter as proporções exatas, crucial para assegurar a integração posterior com motores de jogo, onde a correspondência de escala afeta diretamente a experiência do jogador.

Um dos aspetos mais importantes do processo de modelação foi a aplicação de texturas e materiais realistas aos componentes arquitetónicos da Régie A. A texturização foi feita

utilizando o processo de *UV Unwrapping*, permitindo que texturas fotográficas fossem aplicadas às superfícies com precisão. Foram usadas várias bibliotecas de materiais, algumas criadas especificamente para este projeto, com o objetivo de simular materiais como:

- **Madeira** para a mesa, os aros das janelas, o rodapé e alguns painéis acústicos.
- **Vidro** para janelas.
- **Superfícies de tijolo e cimento** para as paredes.
- **Alcatifa** para alguns painéis acústicos e o chão.

Após a conclusão da modelação e texturização, o próximo passo foi a renderização preliminar para testar a iluminação e a aparência geral do ambiente.

O processo de modelação da *Régie A* no *Blender* resultou em um modelo tridimensional detalhado e otimizado, pronto para ser integrado a um ambiente de videojogo. O modelo final representa com precisão as características arquitetónicas do espaço, incluindo os painéis acústicos, speakers, e outros elementos essenciais para o seu funcionamento como um espaço de estúdio. Além disso, a atenção aos detalhes durante o processo de texturização e iluminação garantiu uma representação visualmente rica e esteticamente agradável.

4.4.2 Cisterna de Marvão

Nos últimos anos, a recriação de patrimônios históricos em videojogos tem ganhado relevância, com desenvolvedores procurando capturar fielmente monumentos e locais de importância cultural. A modelação 3D aplicada ao património arquitetónico exige um equilíbrio entre fidelidade visual e otimização de recursos para que a performance do jogo não seja comprometida (Bailey, 2019). A preservação digital de monumentos, como a Cisterna de Marvão, não só contribui para a educação histórica em ambientes interativos, mas também oferece uma plataforma para novas formas de interação com a arquitetura e o design de som (Lavoie, 2017). A modelação de estruturas históricas é particularmente desafiadora devido à necessidade de capturar tanto os aspetos visuais quanto o contexto arquitetónico de cada local. Por isso, a modelação 3D da Cisterna de Marvão foi feita com o objetivo de recriar com precisão este espaço arquitetónico notável no contexto histórico e cultural de Portugal, tanto ao nível da construção, como da geometria e sonoridade.

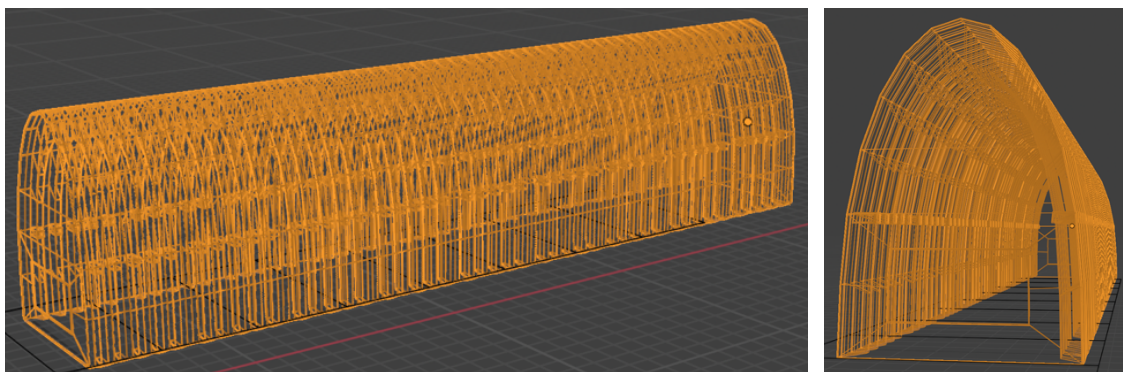


Figura 22 - Modelação 3D da cisterna de Marvão em wireframe

A modelação da Cisterna de Marvão no *Blender* começou com uma fase de levantamento e análise arquitetónica, utilizando dados disponíveis de medições e estudos históricos. A fidelidade ao espaço original foi uma prioridade, já que a cisterna é um dos elementos mais icônicos da fortaleza de Marvão, tanto pela sua forma simples e robusta, quanto pela sua importância funcional como reservatório de água.

A modelação foi conduzida utilizando várias ferramentas do *Blender* que facilitaram a recriação precisa das proporções e detalhes da cisterna como, modelação Poligonal, baseada em formas primitivas, como cubos e cilindros, que foram modificados através de operações como *extrude* e *loop cut*, permitindo a construção das paredes e do teto abobadado da estrutura. Para além disso, o modificador *boolean* utilizado para criar aberturas precisas, como as entradas da cisterna e as abóbadas internas, facilitando a criação de formas geométricas complexas, e o modificador *displacement*, que foi aplicado para criar a irregularidade das superfícies internas, especialmente no teto e paredes, replicando as imperfeições da pedra esculpida.

A cisterna, embora uma estrutura relativamente simples, possui características arquitetónicas que precisam ser modeladas com precisão para manter sua integridade histórica:

- **Paredes em Pedra:** A estrutura da cisterna é composta principalmente de paredes de pedra maciça, que foram modeladas com base em texturas fotográficas aplicadas através do processo de *UV unwrapping*. O uso do modificador de *displacement* também ajudou a criar o relevo natural das pedras.
- **Teto Abobadado:** O teto da cisterna, uma das suas partes mais distintivas, foi modelado utilizando primitivas esféricas que foram ajustadas com o uso de operações booleanas e de subdivisão para garantir a curvatura correta.
- **Portas e Entradas:** Foram criadas com um cuidado especial, utilizando medições precisas para garantir que as proporções fossem fiéis ao espaço real.

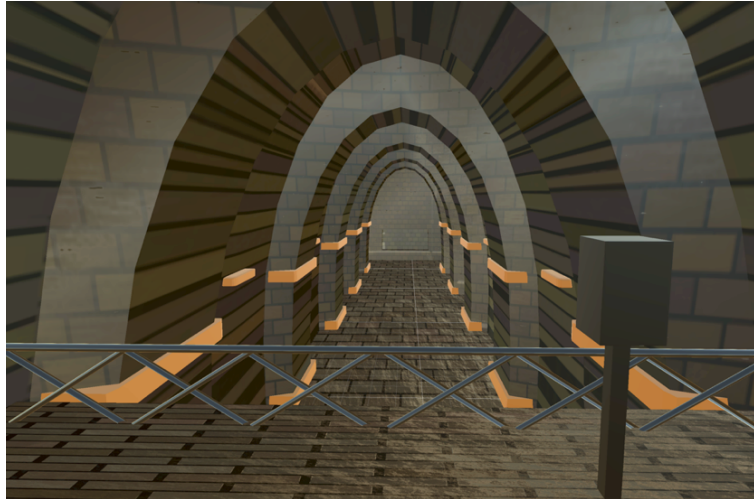


Figura 23 - Modelação 3D efetuada da Cisterna do castelo de Marvão I

A texturização foi um dos elementos cruciais para garantir que a Cisterna de Marvão fosse representada de forma realista no ambiente virtual. Para simular a aparência das pedras e das superfícies desgastadas, foram utilizadas técnicas avançadas de *UV mapping* e *procedural texturing* no Blender:

- **Pedra e Alvenaria:** As paredes e o teto foram texturizados com materiais que simulam pedras envelhecidas e desgastadas pelo tempo. Foram aplicadas texturas fotográficas de alta resolução para obter um realismo maior, combinadas com mapas de *bump* e Normal para dar a sensação de relevo nas superfícies.
- **Água:** Como a cisterna foi projetada para armazenar água, foi necessário modelar e texturizar o piso de maneira a refletir a presença de água, criando um material semitransparente que simulasse a reflexão e refração da luz.



Figura 24 - Modelação 3D efetuada da Cisterna do castelo de Marvão II

Após a modelação e texturização, foi realizada uma renderização preliminar no Blender, utilizando o motor *Cycles* para testar a iluminação e o aspeto visual da cisterna. O objetivo principal desta etapa foi avaliar como a luz interage com as superfícies de pedra e água, criando uma ambientação que pode ser integrada em videojogos.

4.4.3 Sala Teresa Macedo

A aplicação de técnicas de modelação 3D na sala Teresa Macedo no Blender envolveram diversas etapas e metodologias que cobrem diferentes aspetos gráficos e computacionais, desde a geometria simples até à texturização e iluminação avançadas. Estas técnicas são fundamentais para criar ambientes virtuais que sejam ao mesmo tempo realistas e envolventes, quer para fins de visualização arquitetónica, desenvolvimento de videojogos ou para experiências de realidade virtual.

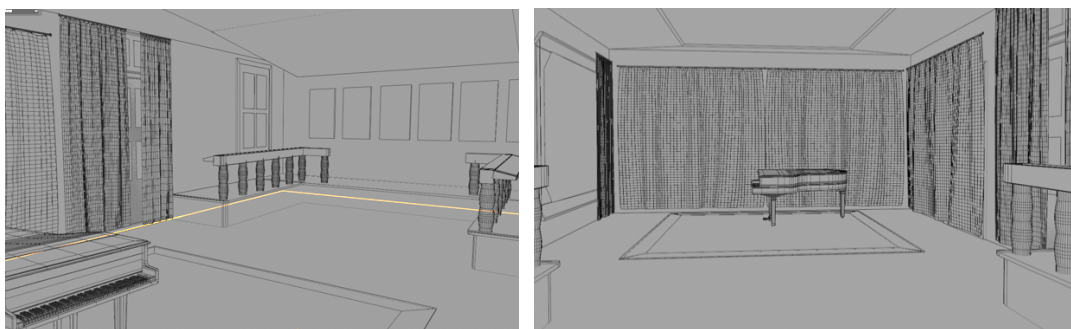


Figura 25 - Modelação 3D da Sala Teresa Macedo em vista de wireframe

O processo de modelação começou com a criação da estrutura básica da sala, a partir da definição das suas formas e dimensões, incluindo elementos como as janelas, a porta, o tapete e o piano. Este desenvolvimento seguiu as seguintes etapas:

- **Estrutura da Sala:** O ponto de partida foi a forma básica da sala, que geralmente se inicia com um cubo ou prisma retangular. As dimensões da sala foram cuidadosamente definidas para assegurar uma escala adequada aos restantes objetos.
- **Janelas e Porta:** Para criar as aberturas das janelas e da porta, utilizaram-se operações booleanas, que permitiram modelar as superfícies com precisão. Para dar maior realismo às janelas, foi aplicada espessura aos vidros através da ferramenta *extrude* nas suas arestas.
- **Piano:** A modelação do piano envolveu a combinação de formas primitivas, como cubos e cilindros, juntamente com a aplicação de modificadores como *boolean*, *array* e *bevel* para adicionar detalhes estruturais e acabamento.

Este processo exemplifica a importância de uma abordagem sistemática e modular na construção de modelos 3D complexos no Blender, em que cada etapa de modelação contribui para um ambiente final coeso e visualmente apelativo



Figura 26 - Modelação 3D efetuada da Sala Teresa Macedo

A aplicação de técnicas de modelação 3D na criação da sala Teresa Macedo requereu uma atenção rigorosa aos detalhes, tanto na fase de modelação como na texturização. Cada etapa desempenhou um papel fundamental na construção de um ambiente virtual realista e envolvente. Desde a definição da geometria básica até à inserção de pormenores complexos e à aplicação cuidadosa de texturas precisas, estas técnicas combinam-se para transformar modelos tridimensionais simples em representações vívidas e detalhadas. Seja no contexto da visualização arquitetónica, do desenvolvimento de videojogos ou de experiências de realidade virtual, o domínio destas técnicas 3D é crucial para criar cenários apelativos e visualmente impressionantes.

4.5 Captações de áudio

A captação de áudio para *sound design* em videojogos 3D é uma área complexa e multidisciplinar que combina aspetos técnicos e criativos, sendo as escolhas dos microfones e das técnicas de gravação fundamentais para garantir uma experiência sonora imersiva e realista. Os microfones de condensador, devido à sua alta sensibilidade e ampla resposta de frequência, são frequentemente utilizados para captar detalhes sonoros precisos, enquanto os microfones dinâmicos, pela sua resistência e capacidade de lidar com sons de elevada pressão sonora, são mais adequados para situações como explosões ou ruídos intensos (Cohen, 2015). Para além disso, técnicas de gravação *stereo* e a aplicação de *ambisonics*, são bastante importantes para a criação de um campo sonoro tridimensional, permitindo uma experiência auditiva mais envolvente (Furukawa, 2017).

A gravação em ambientes acústicos controlados é essencial para garantir clareza e precisão para trabalhar a espacialização sonora, e desenvolve-se com base em técnicas como por exemplo a gravação binaural que oferece uma percepção espacial e realista (Binaural Audio: The Basics, 2020). Estudos provam que a gravação binaural é eficaz na criação de experiências auditivas imersivas em jogos 3D (Kunz, 2019).

Uma das técnicas importantes nas captações de áudio, é a gravação de sons em diversas distâncias pois contribuem para uma experiência auditiva interativa (Brucks, 2016). A implementação de sistemas de áudio adaptativos, que ajustam os sons com base na posição e movimento do jogador, é amplamente estudada e aplicada para aumentar a imersão (Kang, 2018). Por isso, para referenciar a sonorização e acústica de cada sala, tornou-se necessário realizar diversas captações de áudio. Para esse efeito, foi essencial compreender quais as técnicas essenciais e os equipamentos a utilizar, de acordo com as características acústicas de cada espaço. Para além disso, foi importante perceber qual o som a ser implementado que garantisse uma propagação sonora desejada de acordo com o espaço envolvente.

4.5.1 Régie A

Para a captação desta sala, foi utilizada a cabeça artificial Neumann KU 100, um dispositivo que simula a anatomia do ouvido humano através de dois microfones omnidirecionais integrados nos seus canais auditivos. A Neumann KU 100 destaca-se pela sua capacidade de registar com precisão detalhes espaciais e a direccionalidade sonora, tornando-se uma ferramenta essencial para a análise acústica detalhada, superando outras técnicas e equipamentos convencionais (Brungart DS, 2012).



Figura 27 - Captação de som com a Neumann KU 100

A sua utilização foi fundamental para os objetivos deste estudo, que pretendiam avaliar a acústica da sala de forma realista e cujo objetivo esteve na simulação de fontes sonoras que não emitem som de maneira multidirecional, mas sim de forma unidirecional, como é o caso dos monitores de estúdio *Genelec* 1031A disponíveis na Régie A.

Para a realização dos testes acústicos, posicionou-se a cabeça artificial a uma altura de 1,80 metros uma vez que reflete a posição típica de escuta de um ouvinte humano, permitindo que os dados obtidos sejam mais representativos da experiência auditiva real. Durante os testes, a cabeça artificial foi deslocada em várias posições distintas em relação aos altifalantes, com medições realizadas a distâncias de 2,10 m, 2,80 m, 3,40 m e 3,70 m.

Essas diferentes distâncias foram escolhidas para avaliar como a propagação do som e a percepção acústica variam em função da distância às fontes sonoras. A análise detalhada dessas variáveis é fundamental para compreender o comportamento acústico da sala, permitindo identificar possíveis reflexões, difrações e interferências que possam ocorrer ao longo do caminho sonoro entre os altifalantes e o ponto de escuta.

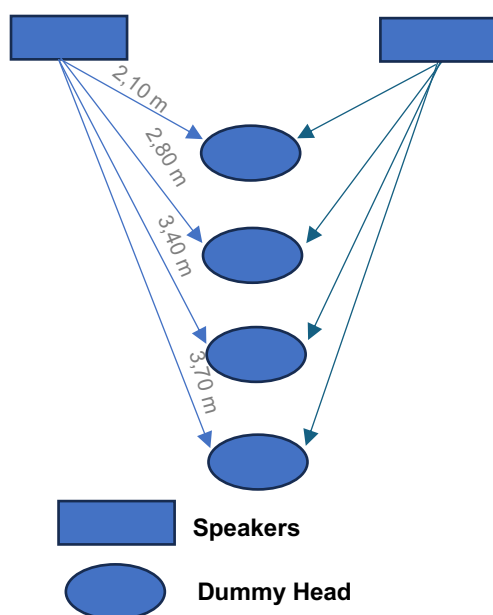


Gráfico 1 - Régie A - Posições dos speakers com a Neumann KU 100

Após a captura do som, foi realizada uma avaliação auditiva utilizando auscultadores, seguida de uma análise espectral das diferentes posições. Conforme evidenciado no gráfico da Figura 28, concluiu-se que há uma disparidade significativa na distribuição da energia sonora ao longo do espectro, o que indica uma propagação desigual do som na

sala. Esta variação pode estar relacionada com a geometria do espaço, absorção acústica e possíveis reflexões, tendo em conta que do lado direito temos um vidro duplo com e do lado esquerdo uma parede tratada com painéis acústicos.

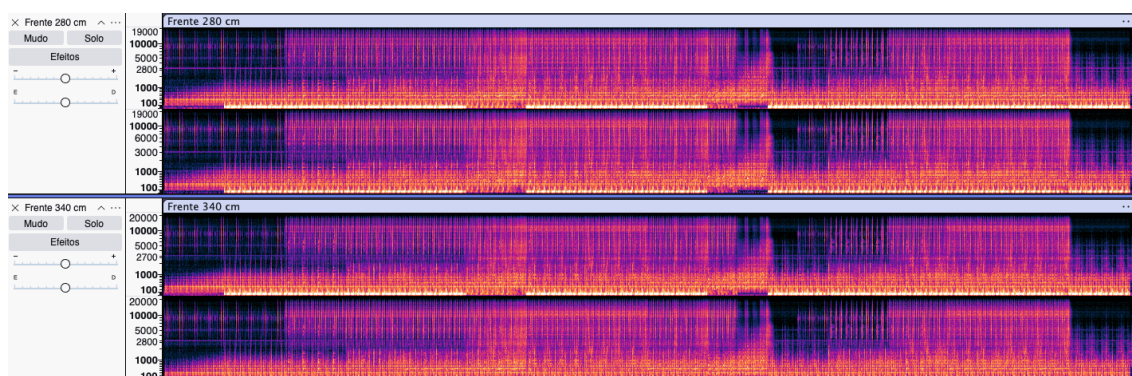


Figura 28 - Amostras das captações de som a 2,10 m e 2,80 m

Para além disso, segundo o gráfico da figura 13, há uma diferença de aproximadamente -6 decibéis entre as posições 2,10 m e 3,10 m, o que indica uma variação significativa na intensidade sonora captada entre os dois pontos de medição mais distantes. Esta discrepância pode ser atribuída a fatores como a distância em relação à fonte sonora, mas também a dispersão do som no espaço e as características acústicas do ambiente, que influenciam diretamente a forma como o som se propaga e é percebido em diferentes áreas.

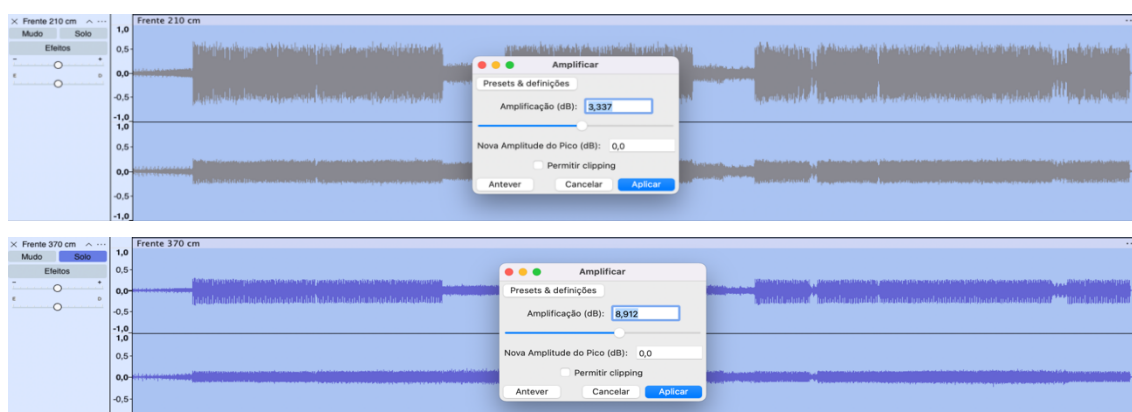


Figura 29 - Diferença de decibéis entre as distâncias 2,10 m e 3,10 m

4.5.2 Cisterna de Marvão

A cisterna de Marvão, situada no Castelo de Marvão, em Portugal, é um espaço caracterizado por suas paredes de pedra e pela presença constante de água nas alturas de aguaceiros. O ambiente reverberante e a acústica peculiar desta estrutura histórica favorecem a captação de som de forma única. A reverberação natural, resultante da

forma e dos materiais da cisterna, proporciona um fundo sonoro rico, que pode ser explorado para adicionar profundidade e textura às gravações. Além disso, as gotas de água que caem sobre a superfície da água na cisterna criam um som suave e rítmico, contribuindo para a atmosfera envolvente (Schroeder, 1965).

A captação de som em ambientes únicos como na cisterna de Marvão, oferece oportunidades distintas para a gravação de áudio, especialmente quando se procura captar diálogos e sons naturais. Neste contexto, foi utilizado o microfone de condensador AKG 391B, que é conhecido pela sua precisão e capacidade de captar detalhes sonoros com clareza. Este microfone, com um padrão polar cardioide, é ideal para isolar a voz do interlocutor enquanto minimiza o ruído ambiente indesejado (Huber, 2010).

Contudo, o espaço disponível na cisterna é limitado, o que impossibilita a movimentação à volta da área. Devido a essas restrições, apenas um local viável foi identificado para a captação do som, situado na estrutura metálica destinada a visitas na cisterna. O material utilizado foi escolhido por ser de fácil transporte e por permitir um acesso adequado através do túnel que leva à estrutura metálica, considerando ainda a ausência de eletricidade no local. Assim, optei por utilizar o microfone AKG391B, juntamente com uma coluna portátil da *Marshall*, modelo *Emberton II*. Desta forma, posicionei a coluna de modo que a fonte sonora estivesse orientada para o fundo da cisterna, enquanto o microfone foi colocado no centro do espaço, também direcionado para o fundo.



Figura 30 - Cisterna do castelo de Marvão - Captação de som

Neste cenário, o AKG 391B foi fundamental, uma vez que o espaço disponível na cisterna é limitado, impossibilitando a movimentação em redor do espaço. Devido a essas limitações, havia apenas um local possível para captar o som. Assim, posicionou-se a coluna com a voz apontada para o fundo da cisterna de um lado e colocou-se o microfone no centro, também apontado para o fundo, a fim de captar todas as reverberações e difrações criadas pelo espaço ao mesmo tempo que iam caindo gotas de água pela água armazenada. Para além disso, foram também realizados testes com palmas para medir o tempo de reverberação que a cisterna apresenta. O resultado não ficou aquém daquilo que já se esperava, revelando reverberações bastante longas que criaram um ambiente rico e envolvente.

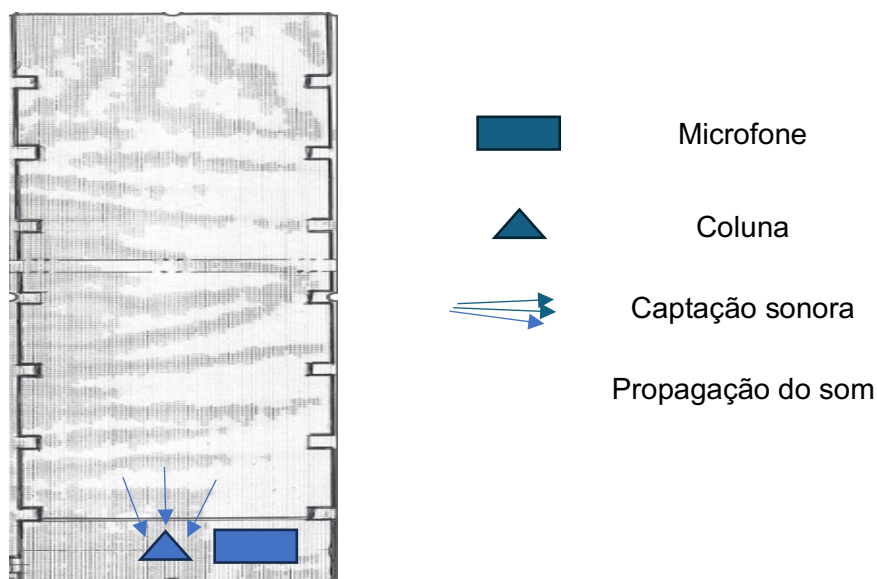


Gráfico 2 - Régie A - Posição do microfone e da coluna

Para além disso, foi testado um som impactante, especificamente o som de uma palma, para obter dados mais precisos sobre a durabilidade da reverberação na cisterna. O impacto sonoro da palma cria uma onda sonora que se propaga pelo ambiente, permitindo observar como o som interage com as superfícies da cisterna. Além de ser um som claramente audível, a palma gera um evento sonoro que provoca uma resposta auditiva interessante, facilitando a análise das características reverberantes do espaço tal como a duração.

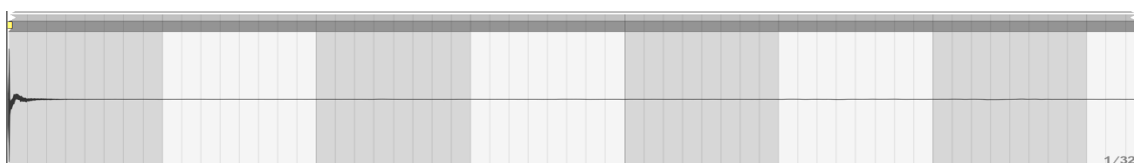


Figura 31 - Amostra da palma

Concluídas as captações, procedeu-se à avaliação e análise detalhada das amostras sonoras recolhidas na cisterna. Como esperado, observou-se um prolongado tempo de reverberação, aproximadamente 9 segundos. Este valor está de acordo com as características acústicas típicas de espaços confinados com superfícies altamente refletoras, como é o caso da cisterna. No entanto, não foi possível determinar com total precisão este valor devido à interferência causada pelo som constante das gotas de água a caírem na cisterna, que geraram um ruído de fundo contínuo, dificultando a medição exata do tempo de reverberação. Ainda assim, foi possível chegar a esta conclusão a partir do gráfico apresentado na Figura 32, onde, na zona das frequências graves, se observa um decaimento que se prolonga por cerca de 9 segundos. Este resultado é particularmente relevante, pois o ruído de fundo não afeta significativamente esta gama de frequências, permitindo assim uma avaliação mais confiável do tempo de reverberação nessa faixa específica.

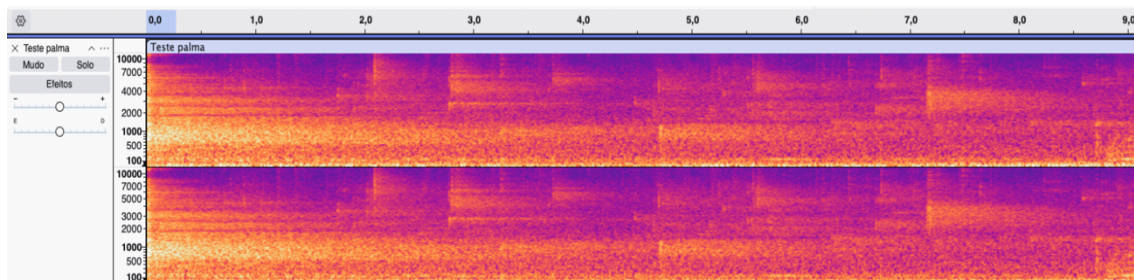


Figura 32 - Espectrograma da amostra "palma"

4.6 Unity/Steam Audio: definição de materiais acústicos

Uma das características que o *Steam Audio* oferece, é a capacidade de simular o comportamento sonoro no espaço, permitindo a modelação da interação entre o som e os materiais presentes no espaço. Isso resulta numa experiência auditiva mais imersiva, onde o som reflete e se espalha de maneira convincente, dependendo das superfícies e da geometria do espaço. Um aspeto crucial dessa simulação envolve a divisão do espectro de som que é dividido em três faixas de frequência que representam diferentes características acústicas (Valve Corporation, 2017).

- *Frequências Baixas*: 0 Hz a 400 Hz.
- *Frequências Médias*: 400 Hz a 2.5 kHz;
- *Frequências Altas*: 2.5 kHz a 20 kHz.

Por isso, uma das variáveis importantes no *Steam Audio* são os coeficientes de absorção e que variam entre 0 (nenhuma absorção) e 1 (absorção total), dependendo dos materiais de cada espaço. Estas variáveis são fundamentais para criar a sensação

de que o som se comporta de maneira mais realista no ambiente virtual, como por exemplo uma parede de cimento que pode ter uma absorção baixa para frequências baixas (cerca de 0.05), mas pode absorver mais em frequências médias e altas (em torno de 0.2 a 0.3, respectivamente). Contudo, uma superfície de espuma acústica apresenta um comportamento oposto, uma vez que absorve significativamente mais nas frequências médias e altas (coeficientes entre 0.7 e 0.9), enquanto mantém menor absorção em frequências graves (por exemplo, 0.3 em frequências baixas) (Valve Corporation, 2017) (Grimshaw M. , 2008). Por isso, essa variação nos coeficientes de absorção para diferentes gamas de frequência, reflete a necessidade de ajustes específicos para criar uma paisagem sonora realista.

Os coeficientes de absorção acústica variam consoante o material utilizado no espaço e indicam a eficácia com que um determinado material absorve ondas sonoras em várias frequências. Estes coeficientes são normalmente fornecidos para frequências padrão, como 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz e variam de 0 (nenhuma absorção) a 1 (absorção total), sendo essenciais para controlar a reverberação e as reflexões no ambiente, impactando diretamente a percepção sonora, sendo essenciais para avaliar o comportamento acústico de um espaço. Assim, foi necessário identificar os materiais presentes em cada espaço antes de realizar o mapeamento acústico no *Steam Audio*. Este mapeamento garante uma simulação precisa do comportamento sonoro, refletindo a capacidade de absorção de cada material em diferentes frequências sonoras, resultando assim numa modelação acústica mais fiel à realidade.

4.6.1 Régie A

Em ambientes de estúdios de gravação, como no caso da Régie A, a correta configuração dos coeficientes de absorção acústica em superfícies específicas, como paredes tratadas acusticamente, é de extrema importância para garantir que os sons reproduzidos tenham um comportamento tendencialmente neutro. Estes coeficientes são fundamentais para controlar o tempo de reverberação e as características de reflexão, absorção e difusão do som no espaço, o que impacta diretamente na qualidade final da gravação e na precisão da monitorização do áudio. Segundo Berakek (2017), o uso de painéis acústicos corretamente posicionados reduz significativamente o tempo de reverberação, o que é fundamental para a clareza do som nas gravações. Por outro lado, Cox e D'Antonio (2009) indicam que a absorção de baixas frequências requer soluções mais especializadas, como as armadilhas de graves, para evitar o efeito de "*boominess*", comum em salas não tratadas.

Por isso, com o objetivo de garantir uma calibração acústica precisa, o processo baseou-se na consulta de produtos e soluções fornecidos pela empresa *GIK Acoustics*, que oferece uma vasta gama de materiais acústicos especializados e disponibiliza informações detalhadas sobre o desempenho de cada material em diferentes frequências, expressas nos gráficos seguintes.

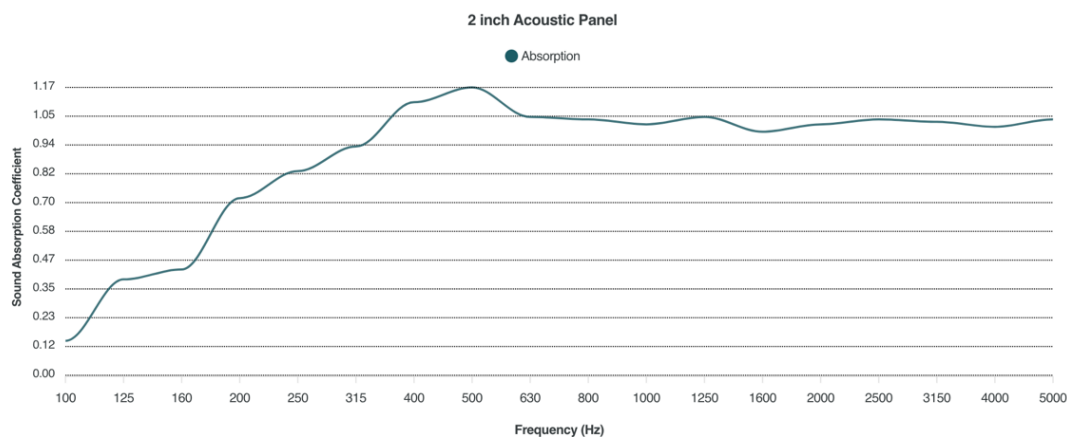


Gráfico 3 - Painel acústico 25mm

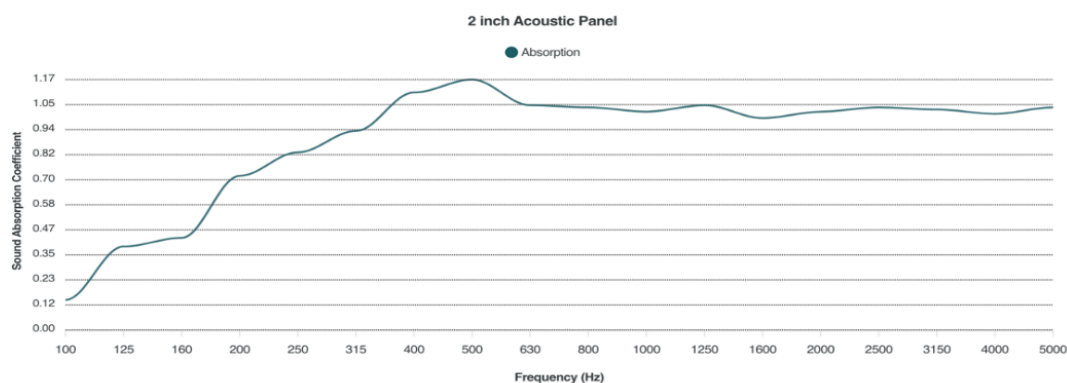


Gráfico 4 - Painel acústico 50mm

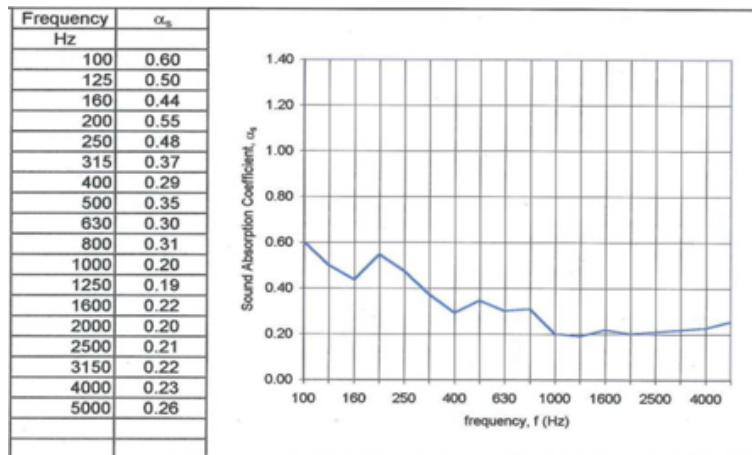


Gráfico 5 - Difusor policilíndrico de ripas de madeira

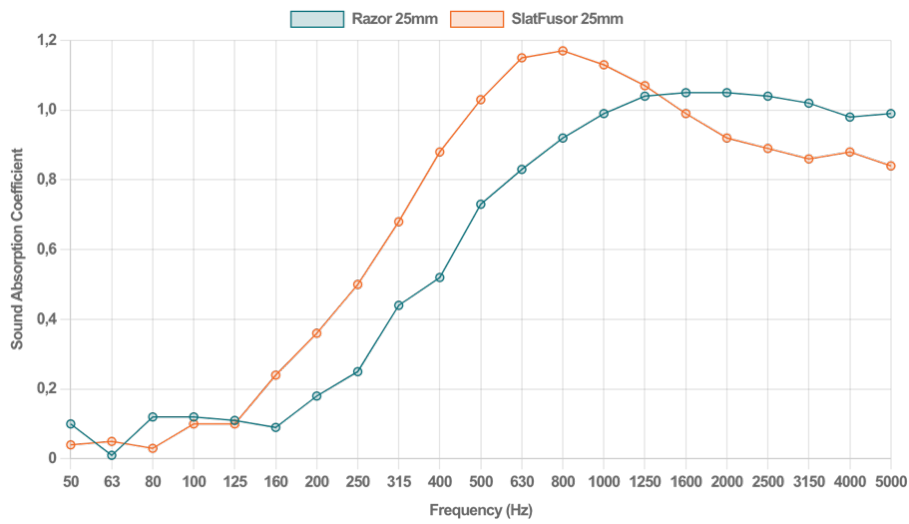


Gráfico 6 - Painel acústico de madeira (SlatFusor 25 mm)

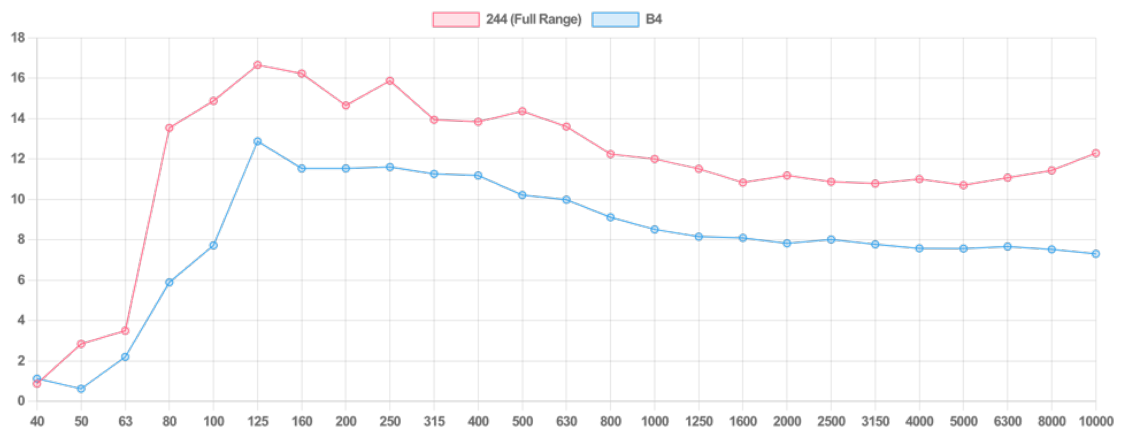


Gráfico 7 - Painel acústico - Bass Trap (B4)

Além dos materiais de tratamento acústico disponibilizados na Régie A, é importante considerar outros elementos, como paredes de tijolo e vidros duplos, que são fundamentais para o mapeamento dos coeficientes de absorção no *Steam Audio*. Para essa finalidade, baseei minha pesquisa nas soluções oferecidas pela empresa *Akustik*, que apresenta uma ampla gama de materiais acústicos especializados. Os materiais selecionados foram escolhidos em função das opções disponíveis na Régie A.

Tabela 2 - Coeficientes de absorção estimados para os materiais da Régie A

Material	Referências utilizadas (tabela da Akustik ¹¹)	Coeficientes de absorção					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vidros duplos	Double glazing, 2-3mm glass, 10mm air gap	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Carpete do chão	Medium pile carpet on sponge rubber underlay	0,15	0,10	0,30	0,50	0,65	0,70
Madeiras das janelas e mesa	Hardwood, mahogany	0,19	0,23	0,25	0,30	0,37	0,42
Porta de entrada	Wood hollowcore door	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
Parede de tijolo	Brickwork, 10mm flush pointing	0,08	0,09	0,12	0,16	0,22	0,24
Parede de cimento	Smooth concrete, painted or glazed	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

Ao utilizar os gráficos de coeficientes fornecidos pela *GIK Acoustics* e pela *Akustik*, foi possível realizar um ajuste detalhado na modelação acústica, garantindo que os materiais escolhidos corressem em conformidade com as características desejadas da Régie A. Segundo (Davis R. E., 2018), a escolha correta de materiais acústicos é essencial para otimizar o desempenho sonoro em ambientes virtuais. A correta implementação desses materiais no *Steam Audio* aprimora a experiência imersiva e realista do utilizador.

Ao manipular os parâmetros acústicos, é possível criar um ambiente que simula interações sonoras de um espaço físico real, promovendo uma experiência que transcende a mera audição e que envolve o utilizador de maneira mais completa. Além disso, a utilização de tecnologias avançadas como o *Steam Audio* permite uma integração mais eficaz entre elementos visuais e sonoros, contribuindo para uma experiência coesa e impactante.

¹¹ https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf

4.6.2 Cisterna de Marvão

A cisterna de Marvão é uma estrutura histórica composta principalmente por materiais como pedra e argamassa, que conferem características acústicas singulares. Essas características influenciam diretamente a propagação do som e a qualidade sonora do espaço, o que é de grande relevância quando se considera a criação de ambientes sonoros imersivos em *sound design* para videogames.

Os coeficientes de absorção da cisterna são significativamente impactados pela sua geometria e pelos materiais utilizados na sua construção. A pedra, que predomina na cisterna, possui coeficientes de absorção relativamente baixos, resultando na reflexão da maior parte das ondas sonoras. Essa propriedade leva a uma reverberação prolongada, o que pode tornar a percepção do som mais complexa, mas também rica e envolvente. Num contexto de videogames, onde a imersão é fundamental, compreender e simular essas características acústicas pode aprimorar significativamente a experiência do jogador.

Tabela 3 - Coeficientes de absorção estimados para os materiais da Cisterna de Marvão

Material	Referências utilizadas (tabela da Akustik ¹²)	Coeficientes de absorção					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Parede de Granito	<i>Stone floor, plain or tooled or granolithic finish</i>	0,02	0,00	0,02	0,00	0,05	0,05
Água	<i>Water surface, ie swimming pool</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Por isso, a empresa *Akustik* oferece uma ampla variedade de materiais projetados especificamente para salas de valor histórico, acompanhados de informações detalhadas sobre seus coeficientes de absorção acústica. Esses coeficientes são fundamentais para a criação de ambientes sonoros otimizados, especialmente quando integrados em tecnologias de manipulação sonora como o *Steam Audio*. O objetivo é utilizar esses materiais para desenvolver uma experiência auditiva que mantenha uma reverberação longa e envolvente, criando um ambiente sonoro imersivo que respeite a arquitetura histórica e ao mesmo tempo satisfaça as necessidades contemporâneas de design de som.

¹² https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf

4.7 Unity/Steam Audio: auralização

O crescente desenvolvimento de aplicações de realidade virtual e vídeo jogos, tem cada vez mais exigido abordagens sofisticadas para a espacialização sonora tridimensional, de maneira a melhorar as experiências imersivas. Por isso, uma das técnicas que se tem destacado como solução eficaz para criar experiências auditivas realistas é o som binaural, quando combinada com aplicações avançadas de simulação acústica como o *Steam Audio*, que pretende simular a propagação do som em ambientes tridimensionais, incluindo reverberação, difração, direccionalidade e profundidade do som, sendo foco deste estudo uma vez que me concentrei mais em desenvolver o som em espaços fechados sem que tenham, objetos entre a fonte sonora e o ouvinte. Tudo isto, com suporte nativo a áudio binaural dentro do motor de jogos *Unity*. O *Steam Audio* é uma ferramenta amplamente utilizada para este fim, sendo capaz de calcular reflexões, oclusões e a propagação do som de acordo com a geometria do ambiente. Este aplicativo utiliza o método de *Head-Related Transfer Function* (HRTF) para simular como os ouvidos humanos percebem as diferenças de tempo e intensidade do som, dependendo da posição da fonte sonora em relação ao ouvinte.

Para a configuração e implementação do som binaural tanto no motor de jogo *Unity* como no *Steam Audio*, foram necessárias realizar várias etapas consideradas fundamentais para o resultado final.

O primeiro passo foi instalar o *Steam Audio* no *Unity* através do site oficial da Valve, seguido da configuração para utilizar o *Steam Audio Spatializer* como motor de processamento de som especializado. Isso é feito nas configurações de áudio do *Unity*, selecionando o *Steam Audio* como o *plugin* de *spatializer* no menu de *Project Settings* conforme a Figura 33.

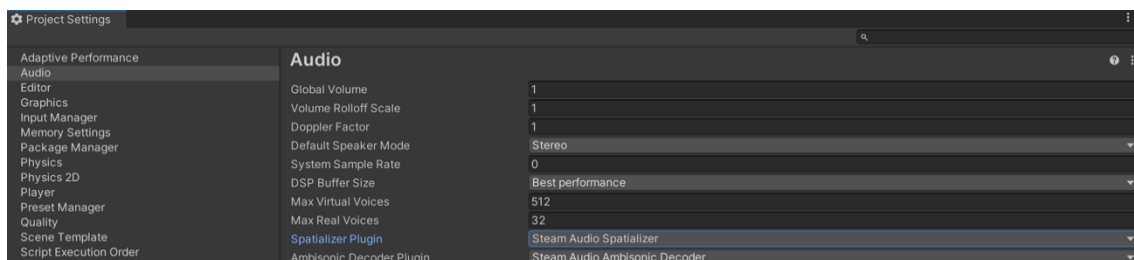


Figura 33 - Configurações no Project Settings

De seguida, foi acionado na *Main Camera*, que está a ser usada em primeiro plano, o *Audio listener* e o *Steam Audio Listener* que é responsável por representar o ouvinte no espaço virtual. O objetivo deste componente é captar os sons em torno do ouvinte e

processar conforme a configuração aplicada na cena. Foi necessário também configurar o *Reverb Settings* que permite que os desenvolvedores ajustem como o som se comporta em diferentes posições e cujos componentes são o *Apply Reverb* que permite escolher se o efeito de *reverb* deve ser aplicado ao som que é emitido pelo *Steam Audio Source*, e o *Reverb Type* em que escolhemos o tipo de *reverb*, desde o *Realtime* se queremos processamento dinâmico em tempo real durante a execução do jogo ou *baked* se queremos que o *reverb* seja pré-calculado e armazenado em dados, sendo depois aplicado como uma textura ao som.

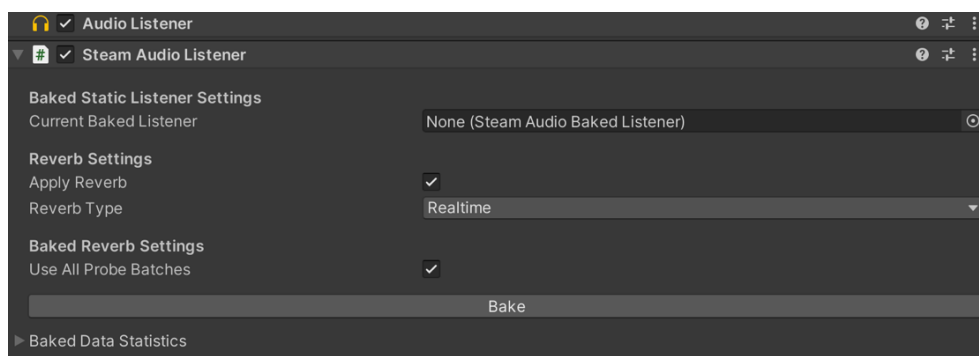


Figura 34 - Configurações Audio Listener e Steam Audio Listener

Após a instalação e configuração adequadas, no componente *Audio Source* do Unity selecionou-se a opção *Spatialize*, que permite que o som emitido pela fonte de áudio seja processado num contexto espacial, simulando a forma como é ouvido em ambientes tridimensionais. Esta simulação é essencial para aumentar a imersão do utilizador ao reproduzir sons de forma realista em cenários 3D. Adicionalmente, liguei a configuração *Play On Awake*, que assegura a reprodução automática do áudio assim que a cena é carregada, sem a necessidade de intervenção do utilizador ou de *triggers* adicionais e o *loop* para que o som não pare quando este termina.

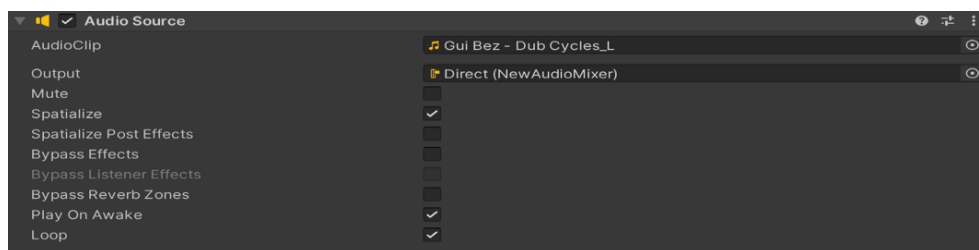


Figura 35 - Configurações Audio Source do Unity

Outro parâmetro relevante configurado no *Audio Source* é o *Spatial Blend*, que controla como o áudio é percebido em termos de espacialidade, determinando se o som se comporta de forma mais fixa em termos de localização (2D) ou ajustada espacialmente

(3D). Esta configuração foi ajustada conforme o contexto sonoro desejado, que neste caso foi o espacial (3D), garantindo a correta percepção da direção e distância das fontes sonoras, criando uma experiência auditiva imersiva e alinhada com os elementos visuais tridimensionais da cena.



Figura 36 - Configurações Spatial Blend

Tendo em conta todas estas configurações importantes para a manipulação do som tridimensional, é necessário perceber quais os materiais que cada cenário tem para a simulação da interação do som com os objetos e superfícies do ambiente, como paredes, chão, madeiras, vidro, painéis acústicos, entre outros obstáculos. Para que o áudio responda adequadamente aos cenários, é necessário adicionar o *Steam Audio Geometric* a cada objeto selecionado. Esse componente processa a geometria do ambiente, permitindo que o *Steam Audio* calcule fenômenos acústicos como reflexão e difração sonora.



Figura 37 - Configurações Steam Audio Geometry

Cada superfície pode ser configurada com um *Steam Audio Material*, que define as propriedades acústicas da superfície, como absorção e transmissão sonora, simulando diferentes materiais como concreto, madeira ou vidro (Corporation, Misleading and Deceptive Conduct in Online Purchases of Games, 2017). Esse processo de configuração da geometria acústica é fundamental para garantir que a simulação binaural no *Steam Audio* funcione de forma realista, replicando como o som vai interagir com o espaço em que está inserido.

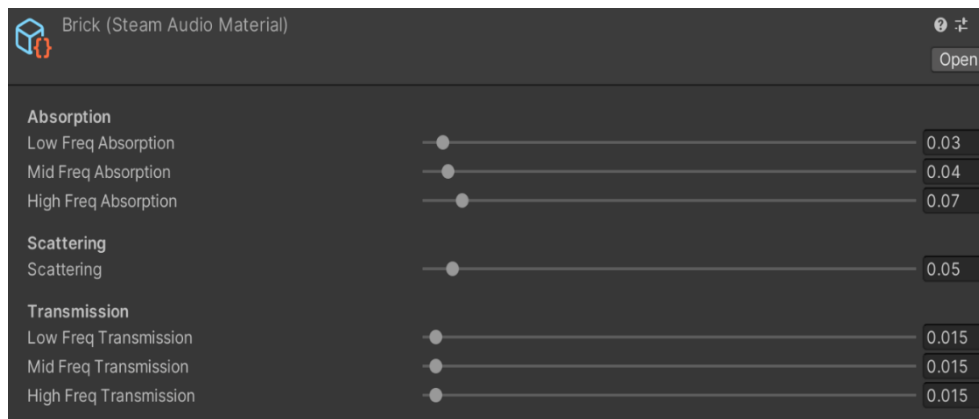


Figura 38 - Configurações Steam Audio Material

Posto isto, seguiu-se para as configurações do *Steam Audio*, a partir do componente *Steam Audio Source*, que oferece várias componentes essenciais para a espacialização sonora num ambiente 3D com o objetivo de criar uma enorme flexibilidade e controle do som para experiências sonoras realistas e envolventes no *Unity*. Por isso existem várias ferramentas ou parâmetros que são adicionados e ajustados conforme os testes que vamos analisando até chegar ao resultado pretendido e que são:

- **Configuração HRTF (HRTF Settings)** – usada para modelar como o som é modificado pela forma da cabeça, ouvidos e ombros, permitindo que os ouvintes percebam a direção da fonte sonora de maneira realista, como se estivesse num ambiente real. Esta configuração tem componentes em tais como o *Direct Binaural*, que permite que tanto os sons diretos quanto os sons refletidos sejam processados de maneira binaural e o *HRTF Interpolation*, que permite controlar o modo de interpolação entre HRTF's de diferentes direções e que pode ser interpolação bilinear ou *nearest*. O método HRTF linear usa interpolação linear entre várias direções HRTF, ao invés de usar apenas o ponto mais próximo, ele mistura suavemente os filtros HRTF de várias direções para criar uma transição mais fluida. O método HRTF *Nearest* usa o mapeamento direto sem interpolação, ou seja, a direção de chegada do som é aproximada para a posição mais próxima na base de dados de HRTF. Por isso, a diferença está na forma como os dados de HRTF são interpolados ou aplicados durante a espacialização do som, afetando a precisão e a qualidade da renderização 3D de áudio.

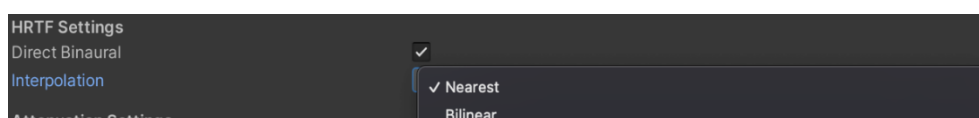


Figura 39 - Configurações HRTF

- Configuração de Atenuação (*Attenuation Settings*)** – usada para controlar como o volume do som diminui à medida que a distância entre a fonte e o ouvinte aumenta e que pode ser definida com *Curve Driven* ou *Physics Based*. O método *Curve Driven* permite aos designers controlarem diretamente a diminuição do som através de curvas pré-definidas no *3D Sound Settings* do *Unity*, o que pode ser menos realista, mas altamente personalizável. O método *Physics Based* utiliza simulações físicas reais para calcular como o som se propaga, resultando numa experiência mais imersiva e natural, principalmente em cenários onde a precisão acústica é importante, como na realidade virtual ou nas simulações reais. Esta abordagem é mais do que simplesmente reduzir o volume com a distância, pois leva em consideração como o som interage com o ambiente, refletindo em superfícies, parcialmente absorvido por materiais e difratado em torno de obstáculos. Para além disso, existe um parâmetro dentro destas configurações que se chama absorção pelo ar (*Air Absorption*) e que é utilizado para simular como as altas frequências do som são atenuadas ao se propagar através do ar em diferentes distâncias. O ar, por suas propriedades físicas, naturalmente absorve mais energia das frequências mais altas, causando uma redução no volume desses componentes conforme o som se propaga.

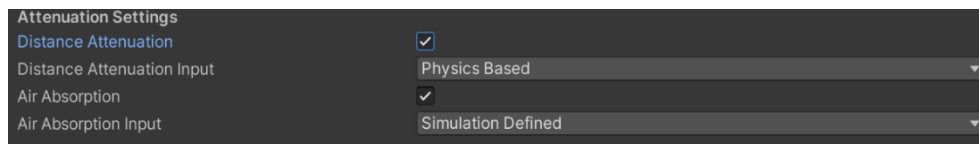


Figura 40 - Configurações Attenuation

- Configuração de Direccionalidade (*Directivity Settings*)** – define como a fonte de som se comporta em termos de emissão em diferentes direções. Por exemplo, podemos simular como uma coluna de som ou a voz humana se propaga em padrões específicos. O *Steam Audio* permite ajustar o padrão de direccionalidade, o que altera a forma como o som é emitido dependendo da orientação da fonte em relação ao ouvinte. Esta configuração usa dois métodos principais, *Simulation Defined* e *User Defined*. A *Simulation Defined* ajusta a direccionalidade com base nos cálculos feitos pelo sistema de simulação física. O padrão de emissão de som é definido automaticamente pela física da cena, tendo em conta fatores como a geometria do ambiente e os materiais que afetam a propagação do som. Neste modo, existem dois parâmetros usadas para configurar a direccionalidade da fonte sonora, o *Dipole Weight* que controla se o som é omnidireccional ou mais direccional, ajustando a intensidade de emissão em várias direções e o *Dipole Power* que afeta

o quão concentrada é essa direccionalidade, definindo o foco da emissão de som numa direção específica.

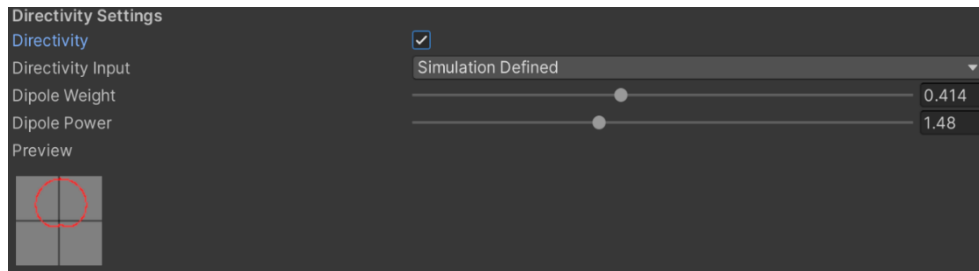


Figura 41 - Configurações Directivity

O *Used Defined* utiliza o total controlo feito pelo utilizador sobre o padrão de direccionalidade do som através de parâmetros ajustáveis, e que pode ser definido exatamente como o som será emitido em várias direções, independentemente das características do ambiente. Pode-se também configurar ganhos em diferentes direções, modelando a direccionalidade de forma precisa conforme as necessidades do projeto.

- **Configurações de Oclusão (*Occlusion Settings*)** – usada para simular a forma como o som é bloqueado ou parcialmente atenuado por objetos ou superfícies que estão no caminho entre a fonte sonora e o ouvinte. Dentro destas configurações, existe o parâmetro *Occlusion Input* que determina como o motor de áudio deve tratar a oclusão de uma fonte sonora específica, ou seja, como ele deve considerar os obstáculos entre a fonte de som e o ouvinte, e que pode ser configurada para seguir uma simulação automática selecionando o *Simulation Defined*, um método com base na simulação física e geométrica do ambiente, proporcionando um comportamento realista e dinâmico. Neste parâmetro podemos optar por escolher o tipo de oclusão (*Occlusion Type*) que queremos, e que vai desde o *Raycast*, um método de traçado de raios (*raycasting*) para calcular se há um objeto sólido entre a fonte sonora e o ouvinte ou o *Volumetric* que simula a oclusão de forma tridimensional, não se limitando a traçar um único raio entre a fonte e o ouvinte, levando em consideração a área total ocupada pela fonte sonora. Contudo, podemos fazer o ajustado manualmente selecionando o *User Defined*, ajustando parâmetros como o nível de atenuação e filtragem, o que oferece mais controle criativo e personalização sem depender da simulação automática. Para além disso, existe um parâmetro que se chama *Transmission* que controla como o som passa através de obstáculos no ambiente 3D simulando a atenuação de frequências, permitindo que sons graves

passem mais facilmente enquanto frequências agudas são mais atenuadas, resultando num som abafado quando atravessa objetos.



Figura 42 - Configurações Occlusion

- **Configurações de Mistura Direta (*Direct Mix*)** – usado para controlar a mistura entre o som direto e os sons refletidos (ou indiretos). O som direto refere-se à porção de áudio que vai da fonte ao ouvinte sem interações com o ambiente. No *Steam Audio*, podemos ajustar o nível da mistura direta para equilibrar o som direto e os efeitos de reflexão e reverberação.



Figura 43 - Configurações Direct Mix

- **Configuração de Reflexão (*Reflections Settings*)** – usadas para ajudar a simular como o som se comporta em ambientes tridimensionais, tendo em conta a reflexão e a interação do som com superfícies e objetos presentes na cena. Dentro destas configurações, temos os tipos de reflexões (*Reflection Types*) e que referem se de como o som se comporta em ambientes tridimensionais, tendo em consideração a reflexão e a interação do som com superfícies e objetos ao redor. Assim sendo, existem as Reflexões em Tempo-Real (*Real-time Reflections*) que são calculadas dinamicamente durante a execução do jogo, o que significa que as reflexões são atualizadas em resposta das mudanças no ambiente e na posição da fonte de som ou do ouvinte. Para além disso, podemos existir o *Baked Static Source* que é usado quando se tem uma fonte de som estática num ambiente fixo e cujas reflexões são pré-calculadas e armazenadas para uso posterior. Contudo, existe o *Baked Static Listener* que é semelhante ao *Baked Static Source*, mas neste caso, a simulação é centrada no ouvinte calculando as reflexões com base na posição fixa do ouvinte em relação a fontes de som. Por último, existem mais dois parâmetros que são o *Apply HRTF to Reflections*, que usa a técnica HRTF e que o *Steam Audio* utiliza para determinar como as reflexões do som chegam ao ouvinte, criando uma percepção mais precisa da localização e da profundidade do som, seguindo da *Reflections Mix Level* que controla o volume das reflexões em relação ao som direto da fonte. Este parâmetro permite equilibrar a presença do som refletido e do som que vem diretamente da fonte.

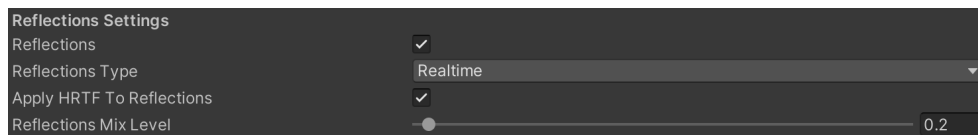


Figura 44 - Configurações Reflections

- **Configurações de caminho (*Pathing Settings*)** – usada para controlar como os caminhos acústicos entre uma fonte sonora e o ouvinte são simulados, ou seja, refere-se à maneira como o som viaja através do ambiente, tendo em consideração não apenas a linha direta entre a fonte e o ouvinte, mas também os desvios e interações que o som pode ter com a geometria do ambiente. Isso envolve a simulação de efeitos sonoros complexos, como reflexões, reverberação e difração, que ajudam a criar uma experiência auditiva mais realista e imersiva.

Dentro desta configuração encontramos vários parâmetros tais como *Pathing Probe Batch*, que se refere ao processamento em lotes de "probes"¹³ (sondas) usados na simulação de propagação de som no *Steam Audio*, *Path Validation* que se refere à verificação da validade dos caminhos sonoros pré-calculados durante a simulação acústica, onde várias rotas possíveis para o som (chamadas de "patches" ou "caminhos") são geradas, tendo em conta obstáculos e reflexões no ambiente. Existe também a *Find Alternate Patch* que permite que o *Steam Audio* encontre caminhos secundários para o som quando o mesmo está bloqueado ou ocorrem alterações no ambiente até chegar ao ouvinte, a *Apply HRTF to Pathing* que se aplica à técnica de HRTF, no qual os caminhos de som indiretos (reflexões, difrações, etc.) serão processados com essa técnica, e por ultimo o *Pathing Mix Level* que controla o nível de mistura entre o som direto e os sons refletidos ou difratados e que são simulados pelos caminhos de som.

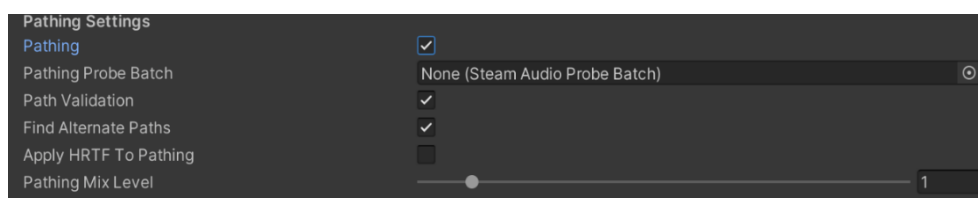


Figura 45 - Configurações da Pathing

Posto isto, existem outras configurações específicas no *Steam Audio Settings* que permitem ajustar como o áudio é processado e simulado num ambiente 3D dentro do

¹³ As probes são pontos no espaço 3D onde informações acústicas, como reflexões, difração e reverberação, são pré-calculadas e armazenadas para posterior uso na simulação.

Unity. Estas configurações fazem parte da integração do *Steam Audio*, que oferece uma série de ferramentas para melhorar a espacialização e a imersão do som em jogos e aplicações. Dentro destas configurações existem as configurações de reflexões em tempo real (*Real-Time Reflection Settings*) e dentro delas temos vários parâmetros tais como:

- **Real-Time Rays** – usado para controlar o número de raios de som que são lançados para calcular as reflexões em tempo real, onde cada raio simula a trajetória do som em direção às superfícies e retorna ao ouvinte. Por exemplo, um número maior de raios pode resultar em reflexões mais precisas e detalhadas, proporcionando uma representação mais realista do ambiente sonoro. Contudo, aumentar o número de raios ocupa mais processamento, o que pode impactar o desempenho em dispositivos com recursos limitados.



Figura 46 - Configurações Real-Time Rays

- **Real-Time Bounces** – refere-se ao número máximo de vezes que um raio pode refletir em superfícies antes de ser considerado "desperdiçado". Aumentar os bounces, pode melhorar a complexidade do som refletido, contribuindo para uma simulação mais rica, especialmente em ambientes com muitas superfícies reflexivas, contudo, definir um número muito alto pode ser desnecessário em ambientes simples e pode afetar o desempenho.



Figura 47- Configurações da Real Time Bounces

- **Real-Time Duration** – refere se á duração, em milissegundos, para a qual as reflexões em tempo real são calculadas. Isso determina o tempo que o sistema considera as reflexões após o som original ser emitido. Quanto maior a duração, maior são as reflexões e reverberações ao longo do tempo, o que pode ser benéfico em ambientes complexos. Por outro lado, quanto menor a duração menor são as reflexões e reverberação ao longo do tempo e pode reduzir a carga de processamento e ainda fornecer uma experiência auditiva aceitável, especialmente em ambientes mais simples.



Figura 48 - Configurações da Real Time Duration

Contudo, quando surgem dificuldades ou limitações com as Reflexões em Tempo Real (*Real-Time Reflections*), o *Steam Audio* oferece uma configuração alternativa que envolve o uso das Reflexões Pré-Calculadas (*Baked Reflection Settings*). Este método permite otimizar o desempenho, especialmente em cenas complexas com várias fontes de som ou geometrias detalhadas, ao pré-calcular as reflexões sonoras com base nas superfícies e materiais da cena.

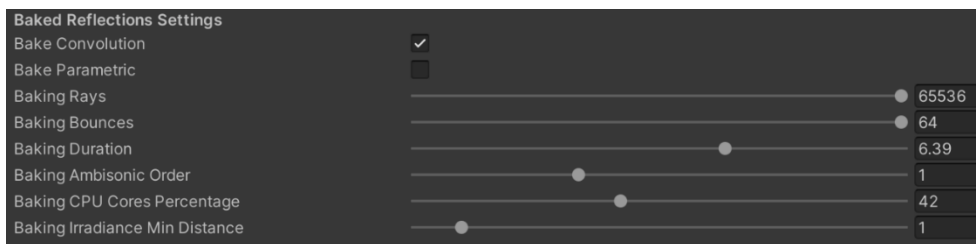


Figura 49 - Configurações Baked Reflections

Por isso, as reflexões pré-calculadas oferecem várias opções para ajustar a qualidade e o comportamento da acústica estática. Por exemplo, ao ativar as reflexões pré-calculadas, o *Steam Audio* permite armazenar informações sobre a maneira como o som reflete em superfícies estáticas, como paredes ou objetos fixos, economizando assim o processamento necessário para calcular estas reflexões em tempo real. A opção de realizar o "*baking*" (pré-calculado) das reflexões sonoras pode ser utilizada para otimizar o desempenho em cenas complexas, mantendo a qualidade da simulação (Aguiar, 2021).

Para a implementação do *Baked Audio* no *Steam Audio*, é necessário passar por algumas etapas tais como:

- **Criação de *Audio Probes*:** Para utilizar o *Baked Audio*, primeiro é necessário configurar um *Steam Audio Probe Batch* à parte na hierarquia do *Unity*. Os probes são pontos onde o *Steam Audio* simula a reflexão e a reverberação durante o processo de *baking*. Esses probes são gerados em volumes definidos, e a distribuição deles pode ser ajustada através de diferentes estratégias, como *uniform floor*, do qual permite distribuir probes de forma uniforme acima do chão num volume específico. Essa estratégia é útil para garantir que o som seja capturado de maneira consistente ao longo de uma superfície, permitindo um desempenho acústico mais

equilibrado e realista. Para além disso, dentro do *uniform floor*, existem dois parâmetros de controlo importantes, o *Horizontal Spacing* que refere se á distancia horizontal (em metros) entre probes adjacentes ao longo da superfície do chão permitindo ao programador definir quanto espaço deve haver entre cada probe, garantindo que a cobertura acústica seja adequada para o ambiente em questão, e o *Height Above Floor*, que especifica a altura (em metros) acima do chão onde os probes devem ser colocados. Essa altura deve ser escolhida com base na geometria do ambiente e nas características do som que se deseja capturar, como por exemplo, se o ambiente tiver objetos altos ou superfícies irregulares, ajustar essa altura pode ajudar a garantir que os *probes* captem as interações acústicas de maneira mais eficaz.

Para além do *uniform floor*, existe o *Centroid* que posiciona automaticamente uma probe no ponto central do volume da *probe batch*. Essa abordagem é simples e eficiente, especialmente em ambientes onde a geometria é uniforme ou em áreas menores onde uma única amostra pode representar adequadamente o espaço.

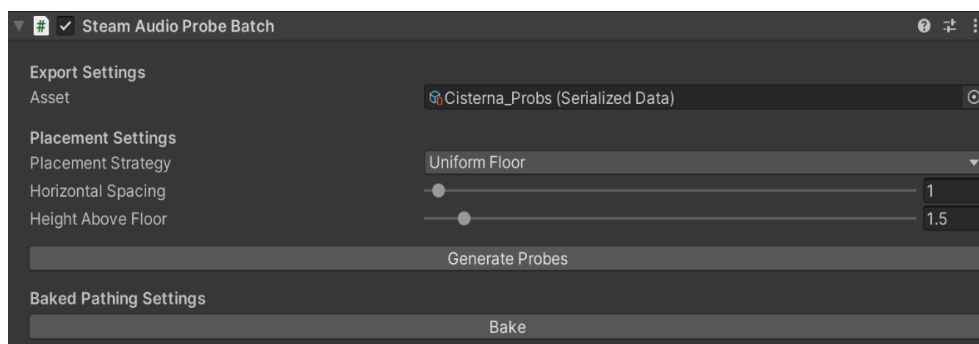


Figura 50 - Configurações Steam Audio Prob Batch

- **Uso de Baked Sources:** Após configurar os probes, adiciona se o componente *Steam Audio Baked Source* nas fontes sonoras da cena. Este componente é responsável por armazenar a posição e a orientação de um objeto estático, permitindo que as reflexões de áudio sejam "assadas" (*baked*) em relação a esses probes. Neste componente podemos controlar o parâmetro *Influence Radius* que determina a área ao redor da fonte de áudio onde os efeitos acústicos serão aplicados. Para além disto, temos a opção *Use All Probe Batches*, que pode ser ativa garantindo que as informações de reflexão sejam incorporadas em todos os probes disponíveis na cena, dentro de um raio de influência definido.

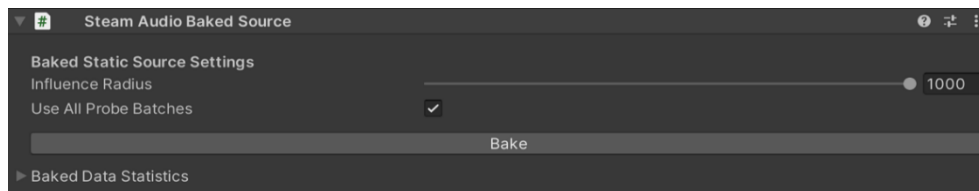


Figura 51- Configurações Steam Audio Baked Source

- **Processo de Baking:** Para iniciar o processo de baking, deve se acionar a função de baking no componente de Baked Source. O Steam Audio então calcula e armazena as informações de reflexão e reverberação com base na geometria do ambiente e nas propriedades acústicas definidas. Após o baking, os dados resultantes são utilizados em tempo real durante a execução do jogo.

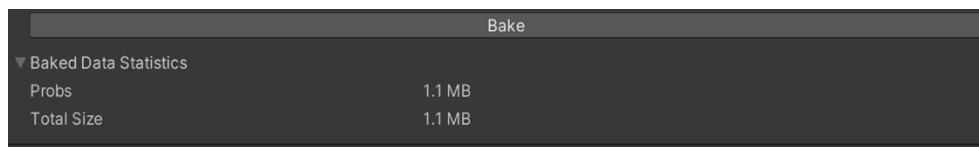


Figura 52 - Dados do processo de baking

- **Oclusão e Transmissão:** O *Steam Audio* também permite a configuração de oclusão e transmissão de som através de geometria. Ao ativar estas opções, o desenvolvedor pode modelar como o som é bloqueado ou atenuado por objetos no ambiente, aumentando ainda mais a realismo do áudio.

Além das configurações já mencionadas, existem outros parâmetros importantes para o pré-cálculo nas definições do Steam Audio, como as Reflection Effect Settings, que definem como o som se reflete nas superfícies de um ambiente virtual. Dentro destas configurações, podemos encontrar:

- **Convolution:** Utiliza amostras reais de ambientes para criar reflexões acústicas precisas, oferecendo uma simulação altamente realista.
- **Parametric:** Permite ajustar os parâmetros de reflexão de forma mais flexível, utilizando filtros para personalizar o comportamento do som nas superfícies.
- **Hybrid:** Combina elementos de convolução e processamento paramétrico, oferecendo uma abordagem versátil para criar efeitos de reflexão complexos.
- **True Audio Next:** Focado em tecnologia avançada de áudio 3D, proporcionando uma experiência imersiva e otimizada para diversas aplicações.


4.7.1 Régie A



Figura 53 - Fontes sonoras presentes na Régie A

Para o desenvolvimento da espacialização sonora na Régie A, utilizou-se o método de simulação em tempo real baseada na física do espaço, ou seja, nas reflexões em tempo real. Essa abordagem permite capturar as interações sonoras de maneira dinâmica, assegurando que o som reaja às mudanças no ambiente em tempo real. A capacidade de simular reflexões acústicas em tempo real é importante para criar uma experiência auditiva imersiva, onde as fontes sonoras se comportam de forma realista, respondendo às posições do ouvinte e à geometria do espaço. O objetivo neste espaço é configurar o som de maneira que o sistema consiga reproduzir as características acústicas com o maior realismo possível, em comparação com a captação sonora real. Para isso, é fundamental considerar várias etapas de configuração no *Steam Audio*, para depois, em função dos resultados, identificar e analisar possíveis limitações da aplicação.

Tabela 4 - Resumo das configurações efetuadas na fonte sonora Régie A

Steam Audio Source		
HRTF Settings	Direct Binaural	Foi acionado para usar a técnica de espacialização sonora, que permite que o som direto seja ouvido de forma tridimensional, usando binaural rendering.
	Interpolation	Selecionou-se em Nearest pois se o ouvinte ou a fonte sonora se mover ligeiramente, o áudio pode pular diretamente para o próximo valor disponível, em vez de fazer uma transição gradual entre as posições.
Attenuation Settings	Distance Attenuation	Ativei para ser criada a distância entre o ouvinte e a fonte sonora.
	Distance Attenuation Input	Selecionou-se em Physics Based para a intensidade sonora diminuir naturalmente com base na física do espaço à medida que o som se propaga.
	Air Absorption	Foi definida como <i>simulation-defined</i> , simulando a atenuação do som pelo ar considerando frequência e distância
Directivity Settings	Directivity	Foi acionado para dizer a cada monitor que tipo de angulo vai propagar o som (cardioide, omnidirecional, etc.)
	Directivity Input	Está definida como Simulation Defined pois o som vai ser calculado com base nos dados acústicos do ambiente e da fonte, ou seja, a geometria do espaço, superfícies de reflexão e os materiais presentes.
	Dipole Weight	Tendo em conta a Figura 4 (subcapítulo 3.1.1), foi configurado a 0.414 uma vez que se trata de monitores do tipo cardioide.
	Dipole Power	Tendo em conta a Figura 4 (subcapítulo 3.1.1), foi configurado a 1.48 pois fica de acordo com o grau de direcionalidade dos altifalantes.
	Preview	
Occlusion Settings	Occlusion	Não é relevante acionar este parâmetro uma vez que não estou a manipular a oclusão no espaço.
Direct Mix Settings	Direct Mix Level	Configurou-se a 1 para depois ser controlado no fader correspondente, de modo que haja um mix entre o som direto e o som refletido. Até chegar a um resultado fiel.
Reflections Settings	Reflection	Foi ativado para o sistema calcular e simular as reflexões sonoras no ambiente.
	Reflections Type	Foi selecionado em realtime para permitir que as reflexões mudem dinamicamente em tempo real.
	Apply HRTF to Reflection	Foi ativada para simular como os ouvidos humanos percebem o som no espaço virtual.
	Reflections Mix Level	Está em 0.2 para não se notar uma excessiva reverberação no espaço. Este valor vai ser controlado no fader do reverb no mesmo grupo em que se insere o som direto.
Pathing Settings	Pathing	Não é relevante estar acionado uma vez que o som não tem diferentes trajetórias no espaço.

4.7.2 Cisterna de Marvão

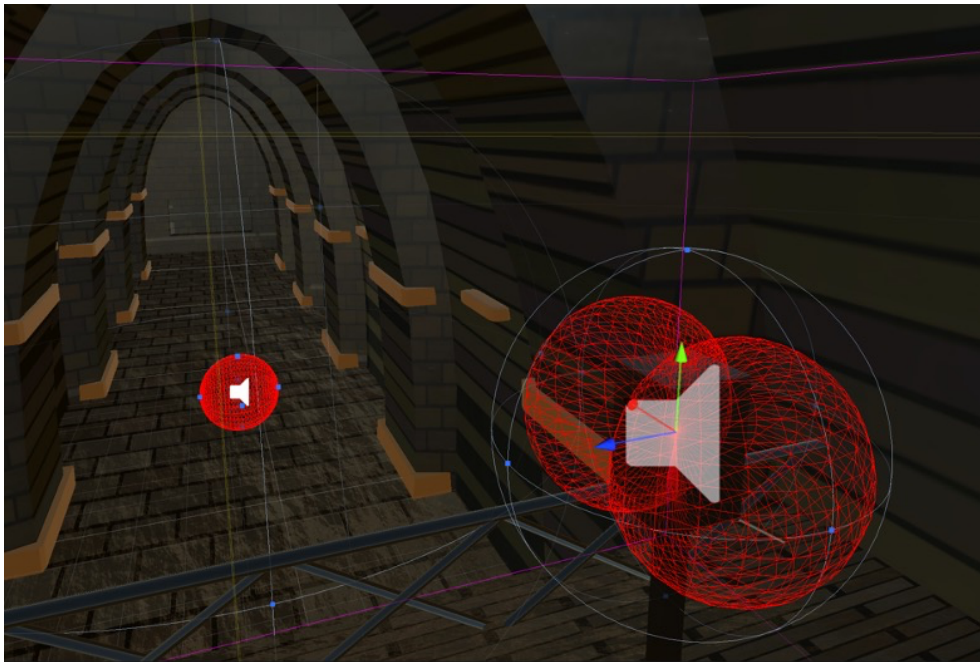


Figura 54 - Fontes sonoras presentes na Cisterna de Marvão

Considerando que a cisterna apresenta um nível de reverberação consideravelmente prolongado, iniciou-se a realização de testes de reflexões em tempo real. No entanto, devido à complexidade da propagação do som neste espaço, os resultados obtidos não corresponderam às expectativas. Assim, decidiu-se optar pela técnica de *Baked Reflections*, com o objetivo de otimizar o processamento computacional e alcançar o resultado desejado: replicar o nível de reverberação característico do ambiente, que, conforme descrito no subcapítulo 4.5.2, é de aproximadamente 9 segundos. Além disso, na cisterna, existem duas fontes sonoras: uma localizada no lado direito da estrutura onde nos deslocamos, associada ao diálogo, e outra com o som das gotas de água a cair no fundo do espaço.

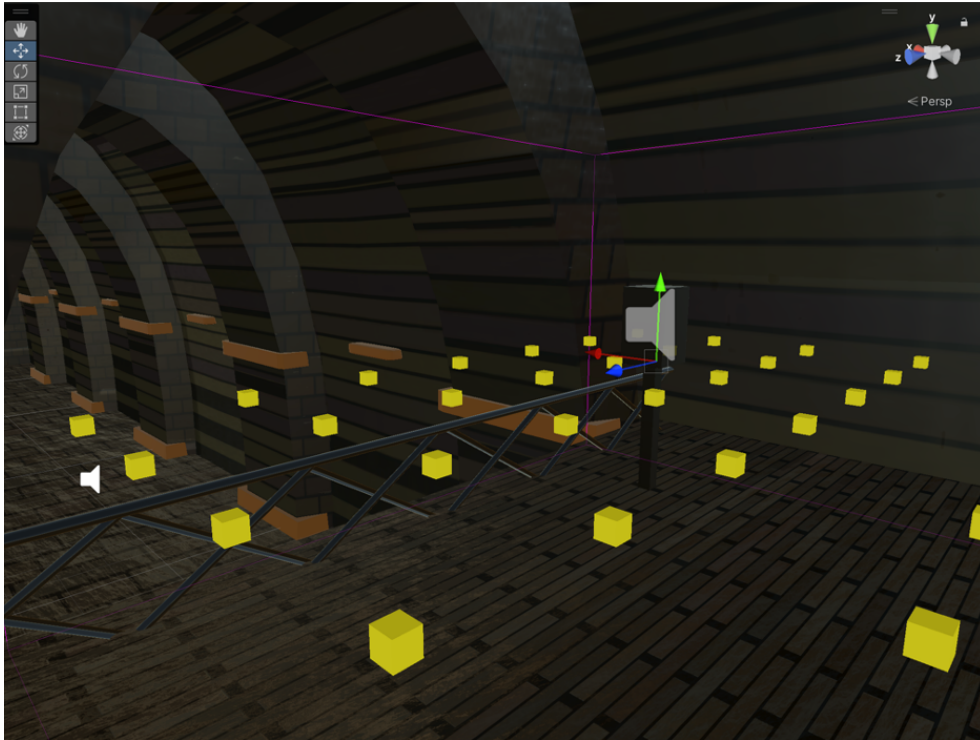


Figura 55 - Configuração das audio probes para a Cisterna de Marvão

Tabela 5 - Resumo das configurações efetuadas para a Cisterna de Marvão

Steam Audio Probe Batch		
Placement Settings	Placement Strategy	Selecionou-se em Uniform Floor pois queremos que as probes sejam distribuídas de forma regular, com intervalos fixos, cobrindo o espaço do ambiente de maneira equidistante, garantindo que o som seja calculado de forma consistente em toda a área selecionada que neste caso foi a estrutura por onde andamos.
	Horizontal Spacing	Definiu-se a 1 metro de distância entre cada prob para criar uma maior densidade de probes, e cobrir toda a estrutura, o que melhora a captura de informações acústica.
	Height Above Floor	Definiu-se a 1,50 metros pois é o cálculo aproximado do chão até aos ouvidos.
Steam Audio Baked Source		
Baked Static Source Settings	Influence Radius	Definiu-se o valor máximo. Afeta a simulação acústica num raio muito grande (até 1000 metros)
	Use All Probe Batches	Foi acionado para calcular a simulação acústica de acordo com as configurações anteriores.
Steam Audio Settings		
Reflection Effect Settings	Reflection Effect Type	Selecionou-se em Convolution para simular de forma precisa como o som interage com diferentes superfícies

Tabela 6 - Fonte sonora "Voz"


Steam Audio Source		
HRTF Settings	Direct Binaural	Foi acionado para usar a técnica de espacialização sonora, que permite que o som direto seja ouvido de forma tridimensional, usando binaural rendering
	Interpolation	Selecionei em Nearest pois se o ouvinte ou a fonte sonora se mover ligeiramente, o áudio pode pular diretamente para o próximo valor disponível, em vez de fazer uma transição gradual entre as posições
Attenuation Settings	Distance Attenuation	Ativei para ser criada a distância entre o ouvinte e a fonte sonora
	Distance Attenuation Input	Selecionei em Physics Based para a intensidade sonora diminuir naturalmente com base na física do espaço à medida que o som se propaga.
	Air Absorption	Ao contrário da Régie A, a cisterna trata se dum espaço com grandes dimensões, no entanto o local por onde andas é curto que acaba também por não ser relevante acionar o air absorption.
Directivity Settings	Directivity	Foi acionado para dizer a cada monitor que tipo de angulo vai propagar o som (cardioide, omnidirecional, etc.)
	Directivity Input	Está definida como Simulation Defined pois o som vai ser calculado com base nos dados acústicos do ambiente e da fonte, ou seja, a geometria do espaço, superfícies de reflexão e os materiais presentes
	Dipole Weight	De acordo com o subcapítulo 3.1.2, foi configurado a 1 uma vez que se trata de uma coluna do tipo bidirecional.
	Dipole Power	De acordo com o subcapítulo 3.1.2, foi configurado a 0.44 pois fica de acordo com o grau de direccionalidade da coluna.
	Preview	
Occlusion Settings	Occlusion	Não é relevante acionar este parâmetro uma vez que não estou a manipular a oclusão no espaço
Direct Mix Settings	Direct Mix Level	Configurou-se para o valor unitário (1.0).
Reflections Settings	Reflection	Foi ativado para o sistema calcular e simular as reflexões sonoras no ambiente
	Reflections Type	Foi selecionado em Baked Static Source para permitir que as reflexões mudem dinamicamente consoantes as probs fornecidas pelo Baked Data Statistics no Steam Audio Baked Source
	Apply HRTF to Reflection	Foi ativada para simular a perceção dos ouvidos humanos no espaço virtual
	Reflections Mix Level	Está em 0.87 para se notar uma excessiva reverberação no espaço.
Pathing Settings	Pathing	Não é relevante estar acionado uma vez que o som não tem diferentes trajetórias no espaço

Tabela 7 - Fonte sonora "Gotas de água"

Steam Audio Source		
HRTF Settings	Direct Binaural	Foi acionado para usar a técnica de espacialização sonora, que permite que o som direto seja ouvido de forma tridimensional, usando binaural rendering
	Interpolation	Selecionei em Nearest pois se o ouvinte ou a fonte sonora se mover ligeiramente, o áudio pode pular diretamente para o próximo valor disponível, em vez de fazer uma transição gradual entre as posições
Attenuation Settings	Distance Attenuation	Ativei para ser criada a distância entre o ouvinte e a fonte sonora
	Distance Attenuation Input	Selecionei em Physics Based para a intensidade sonora diminuir naturalmente com base na física do espaço à medida que o som se propaga.
	Air Absorption	Ao contrário da Régie A, a cisterna trata se dum espaço com grandes dimensões, no entanto o local por onde andas é curto que acaba também por não ser relevante acionar o air absorption.
Directivity Settings	Directivity	Foi acionado para dizer que tipo de angulo vai propagar o som (cardioide, omnidirecional, etc.)
	Directivity Input	Está definida como Simulation Defined pois o som vai ser calculado com base nos dados acústicos do ambiente e da fonte, ou seja, a geometria do espaço, superfícies de reflexão e os materiais presentes
	Dipole Weight	Foi configurado a 0.018 para o som ser propagado em 360°
	Dipole Power	Foi configurado a 0 para o grau de direccionalidade dos das gotas serem multidirecionais
	Preview	
Occlusion Settings	Occlusion	Não é relevante acionar este parâmetro uma vez que não estou a manipular a oclusão no espaço
Direct Mix Settings	Direct Mix Level	Configurou-se para o valor unitário (1.0).
Reflections Settings	Reflection	Foi ativado para o sistema calcular e simular as reflexões sonoras no ambiente
	Reflections Type	Foi selecionado em Baked Static Source para permitir que as reflexões mudem dinamicamente consoantes as probs fornecidas pelo Baked Data Statistics no Steam Audio Baked Source
	Apply HRTF to Reflection	Foi ativada para simular a perceção dos ouvidos humanos no espaço virtual
	Reflections Mix Level	Está em 0.4 para equilibrar o som refletido com o som direto no espaço.
Pathing Settings	Pathing	Não é relevante estar acionado uma vez que o som não tem diferentes trajetórias no espaço

5 Auscultação externa - Inquérito

Por forma a incluir a opinião de terceiros, foi realizado um estudo que envolveu a aplicação de um questionário a 13 estudantes da ESMAE da Licenciatura em Música, variante em Produção e Tecnologias da Música (PTM) e do Mestrado em Artes e Tecnologias do Som (MATS). O objetivo principal deste estudo foi avaliar de forma imparcial o grau de realismo atribuído a diferentes amostras sonoras associadas e a perceção do posicionamento das fontes sonoras no espaço, recorrendo a uma metodologia que evitasse enviesamentos por parte dos participantes.

Cisterna de Marvão	
1	Notas diferença entre as amostras apresentadas? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
2	Relativamente à imagem apresentada, de 1 a 5 quão realista lhe parece cada uma das amostras (1- muito pouco realista / 5- muito realista)? Amostra A: _____ Amostra B: _____
3	Quais foram os maiores desafios para distinguir as amostras (opcional)? _____ _____ _____
Régie A	
1	Notas diferença entre as amostras apresentadas? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
2	Relativamente à imagem apresentada, de 1 a 5 quão realista lhe parece cada uma das amostras (1- muito pouco realista / 5- muito realista)? Amostra A: _____ Amostra B: _____
3	Relaciona cada uma das amostras apresentadas com as figuras. Fig.1: _____ Fig.2: _____ Fig.3: _____ Fig.4: _____ Fig.5: _____
4	Quais foram os maiores desafios para distinguir as amostras (opcional)? _____ _____ _____

Figura 56 - Inquérito realizado

Para o efeito, foram preparadas duas amostras distintas: uma captada diretamente nos espaços e outra gerada virtualmente através de técnicas de simulação acústica. Os participantes não foram informados acerca da natureza de cada uma das amostras, não sabendo, assim, qual delas correspondia à gravação real ou à simulação virtual. Esta abordagem foi adotada com o intuito de garantir uma avaliação genuína e centrada apenas na perceção auditiva.

Para além disso, durante o processo, foi apresentada aos participantes uma única imagem da cisterna e da Régie A, com o objetivo de criar um enquadramento visual comum para a experiência. Em seguida, no caso da Régie A e da Cisterna, foi-lhes solicitado que ouvissem ambas as amostras e pontuassem o grau de realismo. Adicionalmente, no caso da Régie A, foi-lhes pedido que associassem cada amostra que ouviam às figuras apresentadas, com o intuito de identificar o grau de realismo da experiência virtual no que respeita ao posicionamento e orientação das fontes sonoras relativamente ao ouvinte.

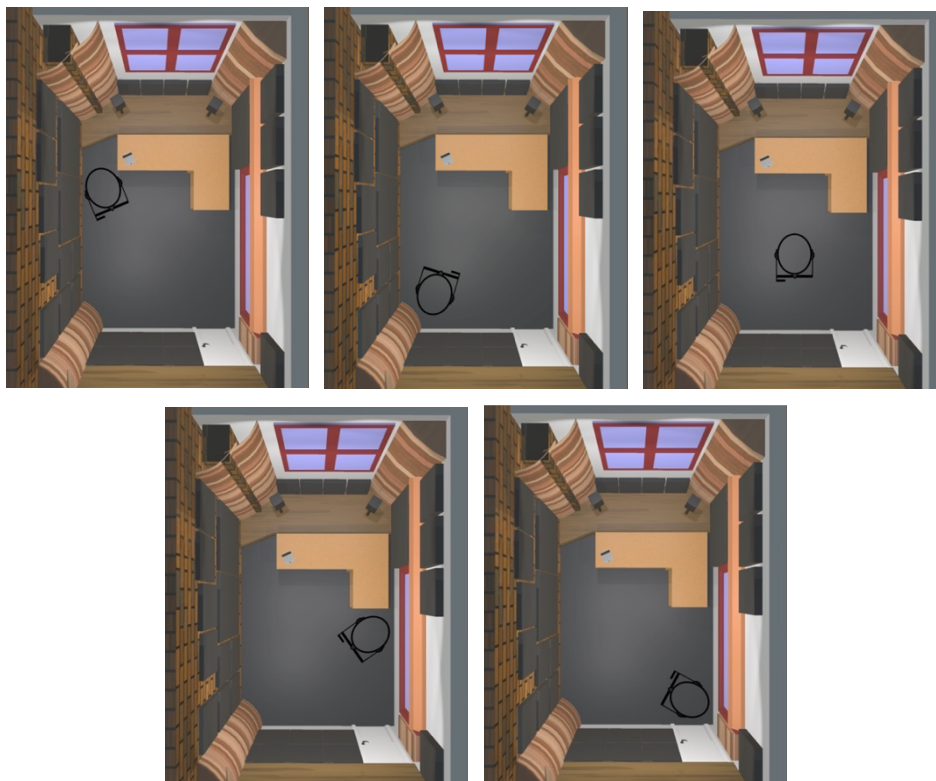


Figura 57 - Posições e orientações dos testes da Régie A (1 a 5, da esquerda para a direita)

5.1 Análise dos resultados

5.1.1 Cisterna de Marvão

"1. Notas diferença entre as amostras apresentadas?"

Todos os inquiridos detetaram diferenças entre as amostras apresentadas.

"2. Relativamente à imagem apresentada, de 1 a 5 quão realista lhe parece cada uma das amostras (1- muito pouco realista / 5- muito realista)?"

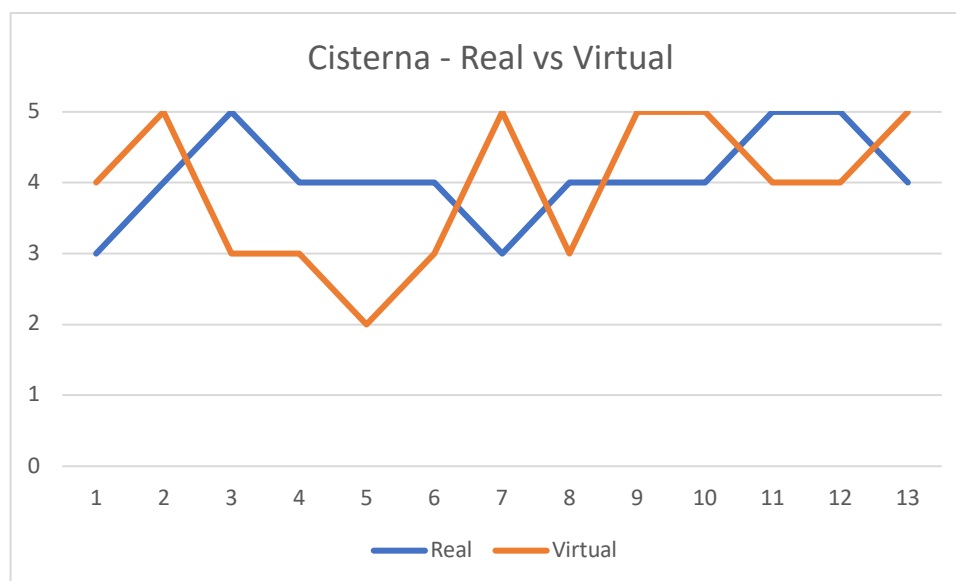


Gráfico 8 - Resultados da pergunta 2 do inquérito da Cisterna de Marvão

Os resultados do estudo revelaram que a pontuação média atribuída à amostra real foi de 4,08, enquanto a pontuação média da amostra virtual foi ligeiramente inferior, situando-se em 3,92. Esta diferença, ainda que presente, é relativamente pequena, indicando que, no geral, ambas as amostras foram percebidas como bastante realistas pelos participantes.

Contudo, ao analisar as respostas individuais, observou-se uma variação interessante: alguns participantes identificaram a amostra virtual como sendo mais realista do que a amostra real, enquanto outros fizeram a interpretação inversa, considerando a amostra real como menos convincente. Este padrão de respostas demonstra uma oscilação na interpretação das amostras sonoras, sugerindo que a percepção de realismo não é uniforme e pode ser influenciada por fatores subjetivos, como a experiência prévia dos participantes, a sua sensibilidade auditiva ou mesmo expectativas inconscientes geradas pelo contexto experimental.

Esta oscilação também reforça a hipótese de que as técnicas de simulação acústica virtual têm alcançado um nível de sofisticação suficientemente elevado para se aproximarem, em muitos casos, da qualidade e autenticidade de gravações reais. No entanto, o facto de haver uma margem de erro na identificação das amostras indica que, para alguns participantes, o realismo subjetivo ainda depende de nuances que as simulações podem não replicar na totalidade.

Estes resultados sublinham a importância de estudos adicionais para compreender os fatores que mais influenciam a percepção de realismo, tanto no caso de amostras reais como virtuais. Além disso, apontam para o potencial de evolução das tecnologias de simulação acústica, que podem, no futuro, minimizar ainda mais as diferenças entre as duas categorias.

"3. Quais foram os maiores desafios para distinguir as amostras (opcional)?"

Inquirido	Observações
1	"Influência da reverberação"
2	"Na segunda amostra a falta de frequências graves"
3	"Na primeira amostra sinto que as gotas de água são artificiais e o reverb podia aumentar um pouco mais as frequências graves"
4	"O maior desafio foi decidir qual das amostras era a mais realista tendo em conta o espaço acústico apresentado na imagem"
5	"As diferenças entre as amostras são bastante claras. A amostra A apresenta mais médio-grave enquanto a B apresenta mais clareza nos médios e médio-agudos"
6	"Não considerei muito desafiante a diferença das amostras. A amostra A apresenta mais graves do que a B. Contudo considerei a amostra B mais realista do que a A"
7	"Ambas timbricamente contêm grandes diferenças tímbricas. Na amostra B, apesar de nunca ter estado num espaço parecido, parece-me que a resposta aos médios-graves está um pouco exagerada"
8	"Não houve desafios porque as amostras são bastante distintas"
11	"Observando a imagem, foi a reverberação e a equalização do espaço. Principalmente a reverberação, foi o elemento que me fez distinguir melhor as 2 amostras"
12	"O tamanho do espaço acústico, apesar de similar, achei a amostra A mais "mecanizada""

5.1.2 Régie A

"1. Notas diferença entre as amostras apresentadas?"

Dos 13 inquiridos, 12 responderam afirmativamente, sendo que apenas 1 afirmou não notar diferenças entre as amostras apresentadas.

"2. Relativamente à imagem apresentada, de 1 a 5 quão realista lhe parece cada uma das amostras (1- muito pouco realista / 5- muito realista)?"

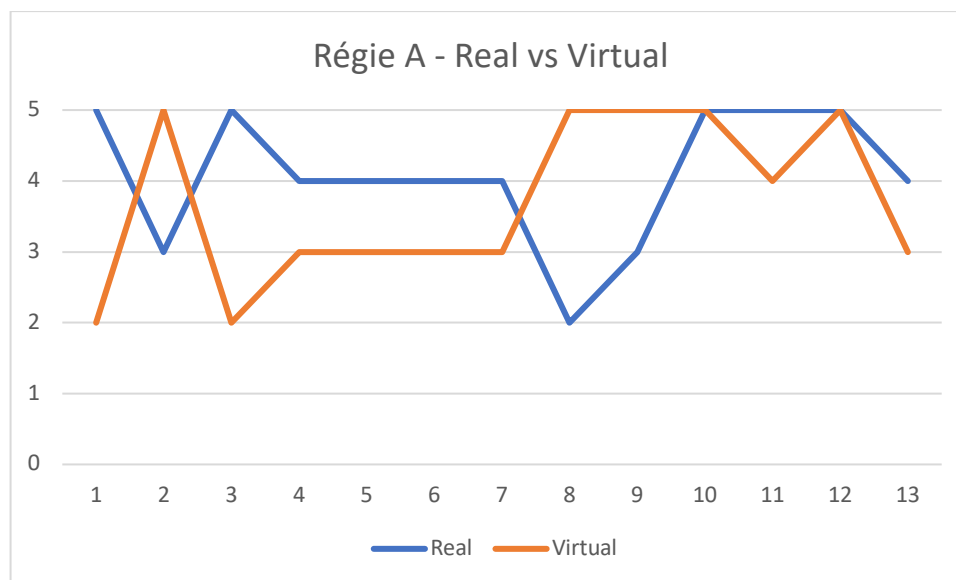


Gráfico 9 - Resultados da pergunta 2 do inquérito da Régie A

De acordo com os dados apresentados no Gráfico 9, os alunos demonstraram uma maior capacidade para discernir entre o que é real e o que é virtual (média de 4,09 contra 3,69). Este facto pode ser atribuído, em parte, à sua familiaridade com o espaço real da Régie A. Estando habituados a trabalhar nessa sala, os alunos possuem uma referência concreta, não apenas das características sonoras captadas numa gravação, mas também da experiência sensorial completa de estar fisicamente presentes no local. Este contacto direto com o espaço permite-lhes criar uma imagem mental mais detalhada e precisa das suas propriedades acústicas, facilitando a distinção entre a amostra real e a virtual.

Por outro lado, quando consideramos a experiência sonora em ambientes virtuais, como num videojogo, a perceção de realismo não depende tanto da fidelidade ao som exato de um espaço específico, mas sim da capacidade de simular uma experiência crível para o utilizador. Neste contexto, os jogadores não têm, geralmente, uma referência física ou auditiva direta dos espaços representados no jogo, pois estes são frequentemente fictícios ou estilizados. Assim, o que se torna mais relevante não é a

reprodução fiel das propriedades acústicas de uma sala real, mas sim a criação de um ambiente sonoro que proporcione uma sensação de autenticidade e imersão.

Estes resultados destacam a importância do contexto no qual o som é experienciado: enquanto em situações reais a familiaridade com o espaço pode ser determinante para avaliar o realismo, nos cenários virtuais o foco recai na consistência e na integração do som com os elementos visuais e narrativos. Essa distinção sublinha os diferentes critérios que devem ser considerados na produção de áudio para espaços reais versus ambientes digitais.

"3. Relaciona cada uma das amostras apresentadas com as figuras."

Tabela 8 - Respostas à pergunta 3 do Inquérito da Régie A (respostas certas a verde)

31	32	33	34	35	3T
A	E	B	C	D	3
A	B	E	D	C	3
C	A	B	E	D	1
A	E	B	C	D	3
A	B	E	C	D	1
A	E	B	D	C	5
A	B	E	C	D	1
A	B	E	D	C	3
A	B	E	C	D	1
A	E	B	C	D	3
A	B	E	D	C	3
E	A	B	C	D	1
A	E	B	D	C	5
					2,5385
11	5	7	5	5	

Nesta pergunta, os dados da Tabela 8 evidenciam algumas tendências relacionadas com a percepção espacial e o posicionamento das fontes sonoras. A Figura 1 destacou-se como a mais corretamente associada, com 11 respostas certas por parte dos participantes, seguida da Figura 3, com 7 respostas corretas. Estes resultados sugerem que, em algumas configurações espaciais, os participantes foram capazes de identificar com maior precisão a posição da fonte sonora no espaço.

Esta maior taxa de acerto na Figura 1 pode estar relacionada com características acústicas específicas que facilitam a identificação da posição da fonte, como maior clareza ou proximidade sonora, que conferem uma percepção espacial mais intuitiva. Por outro lado, a menor taxa de acerto em algumas figuras, sobretudo naquelas associadas a fontes sonoras localizadas no fundo da sala, aponta para dificuldades na percepção

espacial em ambientes onde os efeitos acústicos, como a reverberação, a atenuação ou a dispersão sonora, são mais acentuados. Estas características podem criar uma sensação de ambiguidade na localização precisa da fonte.

Este padrão de respostas revela não apenas o impacto da acústica do espaço na percepção dos participantes, mas também a forma como o posicionamento da fonte sonora influencia a interpretação das amostras. Quando as fontes estão mais distantes ou em posições menos evidentes (como o fundo da sala), é provável que a percepção espacial seja menos clara, levando a uma maior dificuldade em associar as amostras às figuras corretas.

Podemos, assim, concluir que a percepção de realismo e a capacidade de identificação da posição da fonte sonora dependem fortemente do equilíbrio entre as características do espaço (tais como reflexões e reverberações) e as propriedades da própria amostra sonora. Estes resultados sublinham a importância de um design sonoro cuidadoso em situações em que a precisão espacial é crucial, especialmente em ambientes simulados ou recriados virtualmente.

"4. Quais foram os maiores desafios para distinguir as amostras (opcional)?"

Inquirido	Observações
1	"A distinção é clara"
2	"Não senti muito a sensação de distância na fig.5 o que pode ser devido ao facto de a sala ser pequena também"
3	"Acho que a interferência na sala devia ter mais impacto frequencial. Por exemplo, não senti grande diferença nos graves da fig. 3 para a 2, sendo que na segunda devia ter mais graves e difusão sonora"
4	"Foi tentado simular as amostras no espaço apresentado sem a audição de uma amostra sem espacialização"
5	"O maior desafio foi distinguir a presença dos graves em cada amostra relacionando com o posicionamento na sala"
7	"O maior desafio é não saber ao certo se houve processamento na reprodução para a gravação, e a própria Régie A não tem um som característico"
8	"Não houve desafios porque as amostras são bastante distintas"
11	"As panorâmicas e o volume. Mas mesmo sendo 5 amostras, achei mais intuitivo o exercício da Régie A do que o exercício da Cisterna, muito por causa da reverberação das salas"
12	"A reverberação dos graves confunde um pouco quanto a imagem acústica que crio"

6 Conclusão

Este projeto teve como principal objetivo a exploração aprofundada da aplicação *Steam Audio*, utilizada para espacializar o som, com o propósito de criar experiências imersivas e realistas em ambientes virtuais. A recriação desses cenários virtuais foi baseada em espaços reais, permitindo um alto grau de fidelidade e envolvimento sensorial, seguido de captações sonoras reais para depois serem comparadas com o som gerado virtualmente. Para a realização deste trabalho, foi necessário identificar e desenvolver várias etapas, todas elas essenciais ao desenvolvimento do projeto.

6.1 Resumo do trabalho realizado

Na introdução apresento uma breve descrição e análise cronológica do desenvolvimento da indústria da espacialização sonora em 3D para videogames, bem como a motivação e os principais objetivos do projeto. Esta seção serviu de base para orientar a investigação e definir a estrutura do projeto, permitindo uma abordagem mais direcionada e organizada ao longo de todo o processo de pesquisa e execução.

De seguida, abordei o estado da arte, onde me dediquei não só às evoluções e conceitos do tema, assim como à análise aprofundada dos principais fatores relacionados à espacialização sonora no *sound design* para videogames, incluindo as diferentes técnicas aplicadas na construção e desenvolvimento do som espacializado. Esta análise permitiu-me compreender de forma clara os processos necessários para uma implementação eficaz no projeto prático, explorando desde as bases teóricas até às metodologias avançadas utilizadas na criação de ambientes sonoros imersivos. Para além disso aprofundei detalhadamente cada *hardware* utilizado, bem como os diversos softwares envolvidos no projeto. Esta exploração detalhada revelou-se fundamental para compreender o funcionamento de cada componente e a sua integração no processo de espacialização sonora.

No desenvolvimento, foquei-me na escolha criteriosa dos espaços, aprofundando as características acústicas relevantes de cada um, incluindo a consideração detalhada dos fatores que afetam a acústica, como a reverberação, a absorção e a propagação do som, todos eles importantes para uma avaliação precisa. Também foi fundamental a seleção dos sons que melhor se enquadravam às condições acústicas de cada ambiente, garantindo uma captura de áudio adequada para gerar dados relevantes que, por sua vez, fundamentaram a implementação e otimização do projeto com o uso da tecnologia *Steam Audio*. Para além disso, dediquei-me à modelação 3D no Blender para a qual foi realizado um levantamento prévio de cada espaço e uma análise minuciosa

dos coeficientes de absorção dos diferentes espaços envolvidos, que posteriormente foram implementados na aplicação para obter resultados acústicos virtuais, alinhados com as expectativas. No entanto, o objetivo central deste capítulo foi a implementação, teste e análise do som no *Steam Audio*, com o intuito de alcançar o resultado pretendido: a criação de uma experiência imersiva e realista num ambiente virtual.

A tecnologia atual *Steam Audio* é perfeitamente capaz de criar experiências realistas para som tridimensional tendo em vista as aplicações tradicionais de videogames. O grau de “realismo”, é apropriado para entretenimento, contando com uma série de funcionalidades desde a renderização binaural, ao uso de HRTF para áudio 3D e a simulação de reverberação, reflexão, difração e oclusão do som, com base na geometria do espaço virtual e nas características acústicas dos materiais utilizados. Estas funcionalidades são particularmente adequadas para aplicações artísticas e interativas, onde a imersão do utilizador é fundamental. O *Steam Audio* permite implementar ambientes virtuais que refletem com precisão o comportamento sonoro de espaços físicos reais, criando uma experiência auditiva que alia realismo e imersão. No contexto de videogames e experiências interativas, esta combinação de espacialização e simulação acústica resulta numa maior profundidade e envolvimento por parte do utilizador.

6.2 Limitações encontradas

Com base nos testes realizados, o software demonstrou ser capaz de gerar uma experiência acústica que, apesar de algumas limitações, oferece uma reprodução tridimensional do som bastante satisfatória e eficiente. A qualidade sonora foi maximizada, proporcionando uma percepção espacial clara e imersiva. No entanto, é importante destacar que, embora a simulação tenha apresentado um nível de verosimilhança e realismo consideráveis, alguns aspetos técnicos revelaram-se insuficientes para garantir uma total fidelidade acústica, particularmente em condições mais complexas, como na cisterna. As principais limitações observadas foram:

- **Padrão de radiação não é frequencio-dependente:** Uma das limitações mais significativas refere-se à incapacidade do software de simular a variação do padrão de radiação da fonte sonora em função da frequência. Na prática, isto significa que a distribuição da energia sonora é a mesma para todas as frequências (graves, médios e agudos), independentemente da direção. Esse comportamento limita a precisão da simulação, uma vez que na realidade a forma como o som se propaga varia com a frequência, afetando a experiência

auditiva espacial. Isto pode resultar numa sensação de uniformidade sonora que não reflete a riqueza espacial do mundo físico, onde a percepção auditiva depende fortemente de como cada frequência interage com o espaço ao seu redor. Para a imersão nos videogames, uma modelação mais precisa deste fenómeno poderia melhorar significativamente a sensação de realismo.

- **Caracterização simplificada dos materiais acústicos:** A forma simplificada com que o software caracteriza as propriedades dos materiais acústicos, uma vez que foi realizada com base em apenas três bandas de frequência (graves, médios e agudos), pode não ser suficientemente detalhado para ambientes mais complexos. Esta simplificação impede que sejam capturados detalhes importantes, que poderiam ter impacto significativo na precisão da simulação do comportamento acústico nos diferentes cenários. No mundo real, materiais como madeira, vidro ou tecido têm respostas acústicas muito mais complexas, variando de acordo com uma vasta gama de frequências. Se se pretender uma resposta acústica mais detalhada e realista, o software poderia expandir o número de bandas de frequência utilizadas, em vez das 3 existentes.
- **Limitações na simulação de reverberação:** A complexidade associada ao processamento da reverberação foi outro desafio encontrado. Em ambientes com reverberações muito longas, como a Cisterna de Marvão, o software apresentou dificuldades em reproduzir o tempo de reverberação real, resultando num decaimento curto e repentino. Nos videogames, a reverberação é um elemento fundamental na percepção espacial do som, e a sua correta reprodução é essencial para uma simulação imersiva, particularmente em cenas como cavernas ou grandes catedrais, onde o comportamento da reverberação é essencial para a sensação de profundidade e distância.
- **Presença excessiva de ressonância na Régie A:** a presença excessiva de ressonância, que não foi possível eliminar na Régie A, não representa propriamente uma limitação, mas sim uma dificuldade encontrada que não consegui ultrapassar completamente. Por esse motivo, não fiquei totalmente satisfeito com o resultado final, uma vez que tal situação torna o som nos auscultadores excessivamente predominante, criando uma sensação de compressão no espaço sonoro.

A um nível mais geral, um dos problemas identificados no *workflow* experimentado é a necessária dependência em plugins como o *Steam Audio* em vez de soluções nativas oferecidas por motores de jogo como *Unity* ou o *Unreal Engine*, apresentando uma série de desafios e considerações importantes no design de som para videogames. A utilização

de plugins externos pode aumentar a complexidade dos procedimentos de integração, uma vez que cada motor tem as suas próprias API e estruturas, pelo que acabei por dedicar tempo adicional para entender como as interações funcionam. Para além disso, ao depender de soluções de terceiros, podemos ficar sujeito a problemas de atualizações, o que no caso de não ser mantido, pode comprometer a qualidade do áudio no jogo, levando a potenciais problemas de desempenho e limitação tecnológica.

Por isso, para o futuro seria importante que tecnologias de espacialização sonora, como o *Steam Audio*, continuassem a evoluir e a ser integradas diretamente, abordando limitações, tais como:

- Expandir a gama de bandas de frequência utilizadas na modelação acústica, de modo a capturar com mais precisão o comportamento sonoro em diferentes superfícies. Isto permitiria que o som refletido ou absorvido por uma parede de tijolo, por exemplo, fosse significativamente diferente do som refletido por uma superfície de madeira ou de vidro. Uma modelação mais pormenorizada permitiria uma recriação mais autêntica das interações sonoras, o que melhoraria a perceção de profundidade e realismo no ambiente virtual.
- Melhorar a simulação de reverberação, para a qual seria necessário investir em algoritmos que possam gerar reverberações mais longas e detalhadas, simulando não apenas o tempo de reverberação, mas também o caminho complexo que as ondas sonoras percorrem ao interagir com superfícies no ambiente, para permitir uma simulação mais precisa da reverberação, incorporando fatores como a difração e a absorção do som ao longo do tempo. Nos videojogos, poderia significar uma mudança drástica na qualidade do som em espaços como igrejas, túneis ou catedrais, onde os jogadores sentiriam uma reverberação mais natural e autêntica, aprofundando a sensação de imersão.

6.3 Sugestões de desenvolvimento futuro

Para o desenvolvimento futuro desta pesquisa, a oclusão surge como uma área prioritária para testes adicionais, uma vez que desempenha um papel importante na precisão da simulação acústica. Para aprofundar esta análise, propõe-se testar diferentes ambientes, tanto interiores como exteriores, como por exemplo, ouvir música propagada de um espaço fechado enquanto estamos no exterior. Este tipo de testes pode incluir ainda cenários mais variados, que permitam verificar o desempenho do software em condições mais realistas e dinâmicas, onde a oclusão assume

características distintas consoante o ambiente e a distância entre o ouvinte e a fonte sonora.

Para além disso, é recomendável realizar procedimentos de medição acústica mais precisos e a comparação objetiva dos resultados obtidos com os dados simulados. Este processo pode incluir o uso de outros softwares e equipamentos específicos, como microfones omnidirecionais e fontes de som calibradas, tipicamente utilizados em contextos de medição acústica. Comparar os dados capturados em ambientes reais com os produzidos pelo software permitirá identificar com maior rigor as áreas de melhoria, garantindo uma avaliação quantitativa e qualitativa da eficácia da simulação acústica, especialmente no que diz respeito à oclusão e outras propriedades sonoras.

Por último, testar plataformas emergentes e alternativas à tecnologia *Steam Audio* será uma boa abordagem para avaliar e comparar a eficácia e a versatilidade de diferentes soluções de áudio espacial. Plataformas como o *Wwise* ou o *Fmod* oferecem um conjunto abrangente de ferramentas para áudio interativo, enquanto o *Google Resonance Audio* e o *Oculus Audio SDK*, destacam-se na criação de experiências sonoras imersivas em ambientes de realidade virtual e aumentada. Essas alternativas podem proporcionar reflexões valiosas sobre como diferentes abordagens influenciam a qualidade e a imersão do som em videojogos e aplicações interativas.

Bibliografia

- Murch, W. (2016, Fevereiro). Stretching Sound to Help the Mind See. *FilmSound.org*. N.p.
- Bridgett, R. (2016). From the Shadows of Film Sound: Cinematic Production & Creative Process in Video Game Audio: Collected Publications 2000-2010. *Designing Sound*.
- Rumsey, F. (2001). Spatial Audio. . *Focal Press*.
- Cox, J. (2021). . DTS:X: what is it? How can you get it?
- Daniel, H. (2019). Bringing Sound to Interaction Design. *Foundations in Sound Design for Embedded Media (1 ed.)*, Michael Filimowicz (Ed.). *Routledge*,, Series: Sound design ; volume 3, 102-130.
- Zotkin, D. N. (2004). "Rendering localized spatial audio in a virtual auditory space". *IEEE Transactions on Multimedia*, 6(4), 553-564.
- Grimshaw, M. (2008). Sound and immersion in the first-person shooter: Mixed methodologies for analysing game audio. *Games Studies*, 8(2).
- Laird, S. (2014). "Auditory Perception in Video Games: A Study of Sound and Gameplay". *Journal of Game Studies*, 9(2), pp. 42-56.
- Zagala, P. D. (2016). "Real-Time Sound Spatialization Techniques in Interactive 3D Environments". *Journal of Multimedia Tools and Applications*, , 75(3), pp. 1425-1437.
- Vickers, P. (2007). Sonification and the Aestheticization of Data Across Disciplines. *Open Sound New Directions in Sonic Arts*.
- Stevens, R. &. (2016). Game Audio Implementation: A Practical Guide Using the Unreal Engine. *Focal Press*.
- Grimshaw, M. (2010). "The Acoustic Ecology of the First-Person Shooter". *Journal of Virtual Worlds Research*, , 3(3), 3-12.
- Natasa Paterson, G. K. (2013). Viking ghost hunt: Creating engaging sound design for location-aware applications. *Int. J. Arts Technol.*, , 61-82.
- Guillen, G., Jylha, H., & Hassan, L. (2021). "The Role Sound in Games: A Thematic Literature Study on Immersion, Inclusivity and Accessibility in Game Sound Research", .
- Fassbender, E. R. (2012). VirSchool: The effect of background music and immersive display systems on memory for facts learned in an educational virtual environment. . *Computers & Education*,, 58(1), 490-500. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.09.002>.
- Stevens, R. &. (2016). *Focal Press*.
- Nacke, L. E. (2014). Brainhex: A neurobiological gamer typology survey. *Entertainment computing*, 5(1), 55-62.

- Gerling, M. J. (2011). Exergaming for Elderly: Analyzing Player Experience and Performance. *Entertainment Computing Group*, 401-411.
- Grimshaw, M. (2011). Game Sound Technology and Player Interaction: Concepts and Developments. . Herre, J. Et al. 2015. *MPEG-H 3D Audio—The New Standard for Coding of Immersive Spatial Audio*.
- Kamp, M. S. (2016). Ludomusicology: Approaches to Video Game Music. *Equinox*.
- Broderick, J. E. (2018). The Importance of Spatial Audio in Modern Games and Virtual Environments.
- Corporation., V. (2023). Steam Audio Documentation. <https://valvesoftware.github.io/steam-audio>.
- Lindau, A. K. (2012). "Perceptual Evaluation of Binaural Playback of Architectural Acoustics Measurements". *Journal of the Acoustical Society of America*,, 131(3), 2831-2842.
- Zhixin, & Wang & Chan, C. F. (2015). Quaternion common factor decomposition of head-related impulse response. *European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 544-548.
- Majdak, P. G. (2010). "3-D Localization of Virtual Sound Sources: Effects of Visual Environment, Pointing Method, and Training". *Journal of the Acoustical Society of America*,, 127(6), 3418-3429.
- Bronkhorst, A. W. (2015). "The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Research on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Conditions". *Acta Acustica united with Acustica*,, 137, 14-33.
- Hershey, S. e. (2016). CNN Architectures for Large-Scale Audio Classification. *CASSP 2017 Changes: Added definitions of mAP, AUC, and d-prime*.
- Moorer, J. (1979). "About this reverberation business,". *Computer Music J.*,, vol. 3, no. 2, pp. 13-28.
- Savioja, L. &. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*,, 138(2), 708-730.
- Grimshaw, M. N. (2007). A conceptual framework for the design and analysis of first-person shooter audio and its potential use for game engines. *International Journal of Computer Games Technology*,, 1-7.
- Tsingos, N. ., (2004). Perceptual audio rendering of complex virtual environments,". *ACM Trans. Graphic.* , 23, 249–258.
- Rumsey, F. (2001). Spatial Audio. *Focal Press*.
- Blauert, J. (1997). Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization. *MIT Press*.

- Tarr, M. J. (2018). "Auditory and visual integration during emotional scene perception: Effects of spatial audio on gaming performance". *Journal of Sound Studies*.
- Lokki, T. &. (2009). "Creating interactive virtual acoustic environments." *J. Audio Eng. Soc.*, , 675–705.
- Cohen, S. (2015). *Microphone Techniques for Audio Recording*. Audio Engineering . *Society*.
- Furukawa, K. e. (2017). Ambisonics for 3D Audio Rendering. . . *Journal of the Audio Engineering Society*,, 65(4), 243-256.
- Kunz, F. e. (2019). Binaural Recording and Reproduction for Immersive Audio. *Proceedings of the Audio Engineering Society Conference*.
- Brucks, M. (2016). Adaptive Audio Systems for Video Games. *Journal of Game Design*, 8(2), 45-56.
- Kang, J. e. (2018). Dynamic Audio Systems in Video Games. *International Journal Of Interactive Design and Manufacturing*,, 12(3), 150-162.
- Brungart DS, I. N. (2012). Better-ear glimpsing efficiency with symmetrically-placed interfering talkers. *J Acoust Soc Am.* , 132(4):2545-56. doi: 10.1121/1.4747005. PMID: 23039448.
- Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3), 409-412.
- Huber, D. M. (2010). *Modern Recording Techniques* (7th ed.). *Focal press*.
- Neumann. (2019). KU 100 Binaural Microphone. *Neumann*.
- Meyer, M. B. (2017). "Creating Immersive Audio Experiences in Video Games." . *Journal of Game Design and Development Education*,, 3(1), 15-27.
- Heller, S. K. (2021). *Sound Design for Interactive Media: A Practical Guide*. *CRC Press*.
- Steinberg, H. (2020). "The Role of Sound in Enhancing the Gaming Experience.",. *International Journal of Game Audio*, 5(2), 45-59.
- AKG. (2021). AKG 391B Data Sheet. *AKG*.
- Collins, N. (2010). *Introduction to Computer Music*. *Wiley*.
- Zhu, X. B. (2015). Real-time signal estimation from modified short-time Fourier transform magnitude spectra. *IEEE . Trans. Audio Speech Lang. Process.* , 5(5), 1645–1653 .
- Diefenbach, p. j. (2011). Practical game design and development pedagogy. *EEE Comput Graph Appl.*, 31(3):84-8.
- Nutting, A. (2016). "The Determinants of Electronic Textbook Use among College Students". *The American Economist*, 41-50.
- Veldhuizen, E. (2006). Modeling market information processing in new product development: An empirical analysis. *Journal of Engineering and Technology Management*.

- Bailey, R. (. (2019). 3D Environment Design for Video Games: From Concept to.
- Beranek, L. (2017). Acoustics: Sound Fields and Transducers. . *Springer*.
- Cox, T. &. (2009). Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. *CRC Press*,
https://gikacoustics.net/product-category/acoustic-panels-6/?_gl=1*1noz01g*_up*MQ..&gclid=EAlalQobChMlo-DxucG9iAMVwFNBAh3EUSGMEAAAYASAAEgLRFvD_BwE.
- Davis, R. E. (2018). The impact of acoustic treatment on sound quality in virtual environments. *Journal of Acoustical Society of America*, , 143(3), 1123-1130.
- Zlobin, D. (2020). "Rendering localized spatial audio in a virtual auditory space". *IEEE Transactions on Multimedia*, 6(4), 553-564.
- Capcom Cup . (2017). Retrieved from https://liquipedia.net/fighters/Capcom_Cup/2017.
- Zoter, M. &. (2019). A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality. *Springer Topics in Signal Processing*,.
- Davis, A. (2021). Exploring MIDI Polyphonic Expression in Live 11". . *Sound on*.
- McGlynn, K. (2020). Ableton Live 11 and the Future of Music Production.
- Manning, P. (2021). Collaborative Music Making with Ableton Link: A Study of Remote performances.
- Amatriain, J. M. (2007). *r Modeling, Adaptation, and*, pages 247–256.
- Ballamudi, V. (2019). Artificial Intelligence: Implication on Management. *Solution Architect, Software Engineering Architecture Department, Cyber Global*,.
- Turner, L. F. (2016). Towards a Competency-Based, Ethical, and Socially Valid Approach to the Supervision of Applied Behavior Analytic Trainees. *Behavior Analysis in Practice*, 9,. 287 - 298.
- Lavoie, M. (2017). Blender in Game Development: Open Source Innovation for Creative Projects. *Game studies*.
- Corporation, V. (2017). Retrieved from Misleading and Deceptive Conduct in Online Purchases of Games.
- Chen, Y. &. (2013). Ye, Mao and Yao, Chen and Gai, Jiading, . *he Externalities of High Frequency Trading*, *BS Finance Group Research Paper No. 180*.
- Ramos, E. A.-M.-T. (2017). The Antillean manatee produces broadband vocalizations with ultrasonic frequencies. *Citation: The Journal of the Acoustical Society of America* .
- DICE-EA. (2018). Retrieved from <https://www.ea.com/pt-br>.
- Ableton. (2020). *Ableton Live 11 – Features Overview*. Retrieved from <https://www.ableton.com>.

Ableton. (2021). *Live 11 Release Notes*. Retrieved from <https://www.ableton.com/en/release-notes/live-11/>

Lind, M., & Roulet-Dubonnet, O. (2010). Holonic shop-floor application for handling, feeding and transportation of workpieces. *International Journal of Production Research*, 49(5), 1441–1454.

Valve Corporation. (2020). *Steam Audio: Technical Documentation*.

Audacity: Free Audio Editor and Recorder. (2024).

Binaural Audio: The Basics. (2020). Retrieved from <https://www.binauralaudio.com/basics>.

Valve Corporation. (2017). *Steam Audio: Technical Documentation*.

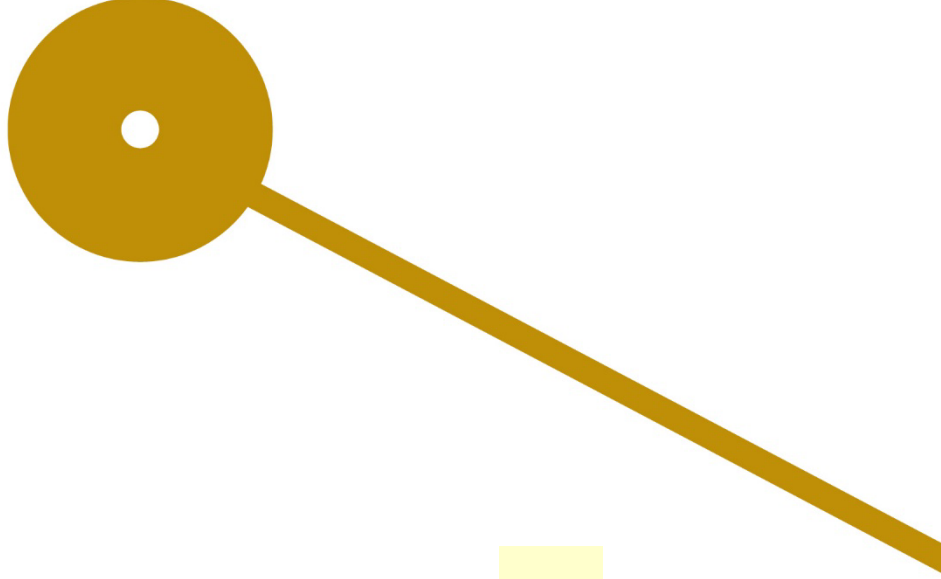
ESCOLA
SUPERIOR
DE MÚSICA
E ARTES
DO ESPETÁCULO
POLITÉCNICO
DO PORTO

P.PORTO

M

MESTRADO

ARTES E TECNOLOGIAS DO SOM



Tecnologias de espacialização sonora aplicadas ao
sound design de videojogos: estudo comparativo
Guilherme de Bastos Roldão Baptista Bezerra