

Mestrado em Multimédia

Implementação de um sistema de simulação do campo sonoro 3D com base em respostas impulsivas obtidas por medição

Rui Pedro Diogo Sampaio

MM10039

Orientador de Tese:

Octávio Inácio (Ph.D)

Laboratório Acústica Musical da Unidade de Investigação da ESMAE-IPP

octavioinacio@esmae-ipp.pt

© Rui Pedro Diogo Sampaio, 2012

Implementação de um sistema de simulação do campo sonoro 3D com base em respostas impulsivas obtidas por medição

Rui Pedro Diogo Sampaio

Mestrado em Multimédia – Perfil de Música Interactiva e Design de Som

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Doutor Carlos Alberto Barbosa da Cunha Mendonça Guedes, Professor Coordenador da Escola Superior de Música, Artes e Espetáculo

Vogal Externo: Mestre Marco Paulo Barbosa Conceição, Assistente Convidado na Escola Superior de Música, Artes e Espetáculo, especialista de reconhecido mérito na área

Orientador: Doutor Octávio José Patrício Fernandes Inácio, Professor Adjunto da Escola Superior de Música, Artes e Espetáculo

_____

30 de Outubro de 2012

Agradecimentos

No desenrolar do presente ano lectivo, foram várias as pessoas e entidades que contribuíram para que fosse possível desenvolver o tema proposto nesta tese.

Assim, fica um agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por desde o início permitir desenvolver o tema proposto em colaboração com o Laboratório Acústica Musical da Unidade de Investigação da ESMAE-IPP, ao qual deixo também a minha gratidão por permitir o acesso a vários equipamentos e aplicações essenciais para a análise acústica.

Um muito obrigado ao orientador Octávio Inácio, por todo o contributo e toda a sua disponibilidade demonstrada na orientação da tese.

Um agradecimento também aos serviços de áudio do IPP, por disponibilizarem por várias vezes equipamento fundamental, entre outros equipamentos o microfone *SoundField*, bem como a utilização dos seus espaços para montagem e testes do sistema proposto.

Deixo também um agradecimento à direcção do Teatro Helena Sá e Costa, Conservatório de Música do Porto e director técnico da Casa da Música, por me terem permitido o acesso e utilização de dados recolhidos nas respectivas salas.

Obrigado também ao colega e amigo Gustavo Almeida, pelo seu contributo, troca de ideias e partilha de documentação.

Índice

Agradecimentos..... 3
Resumo..... 7
1. Introdução..... 8
1.1 Objectivos..... 9
2. Estado da Arte..... 11
2.1 Sistemas de Reprodução..... 11
2.1.1 Stereo (ou estéreo)..... 12
2.1.2 Stereo Dipole..... 14
2.1.3 Binaural..... 15
2.1.4 Quadrifonia..... 16
2.1.5 Surround 5.1..... 17
2.1.6 Ambisonics..... 17
2.1.7 Wave Field Synthesis..... 19
2.2 Sistema de captação SoundField..... 20
2.3 Respostas Impulsivas..... 23
2.4 Sistemas de Convolução..... 27
2.5 Norma ISO 3382..... 29
2.5.1 Parâmetros Físicos e Objectivos..... 29
2.5.2 Métodos e sinais utilizados em medições..... 33
2.6 Software de Análise, Medição Acústica e de Processamento..... 37
2.6.1 Método do Varrimento Frequencial Exponencial..... 40
2.7 Sistema de simulação desenvolvido por Kanaco Ueno, Hideki Tachibana e outros investigadores..... 42
2.8 MS – Middle Side..... 44
3. Ensaios Acústicos..... 48
3.1 Salas analisadas..... 48
3.1.1 Teatro Helena Sá e Costa..... 48
3.1.2 Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto..... 50
3.1.3 Sala Suggia da Casa da Música do Porto..... 51
3.2 Metodologia de ensaio..... 53
3.3 Setup experimental..... 60

4. Sistema de Simulação..... 66
4.1.1 Avaliação subjectiva do sistema de reprodução e simulação.....70
4.2 Câmara utilizada como laboratório.....71
5. Análise de Resultados Obtidos.....74
5.1 Medições no Teatro Helena Sá e Costa.....74
5.2 Medições no Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto.....76
5.3 Medições na Sala Suggia da Casa da Música.....77
5.4 Resposta do microfone SoundField..... 78
5.5 Simulações..... 79
5.5.1 Parâmetros acústico objectivos..... 79
5.5.2 Respostas impulsivas..... 81
5.5.3 Avaliação subjectiva.....83
6. Conclusões..... 84
7. Bibliografia..... 86

Resumo

Com a implementação de um sistema de simulação do campo sonoro 3D com base nas respostas impulsivas obtidas por medição, pretendeu-se com a presente dissertação fazer uma contribuição para pesquisas já realizadas no passado recente neste campo. Nesse sentido, foi tido como ponto de partida o sistema de captação e reprodução proposto por Kanaco Ueno, Hideki Tachibana e restantes investigadores, alterando a forma de captação das respostas impulsivas. Propôs-se fazendo uma única medição 3D utilizando o microfone *SoundField* em vez das seis medições utilizando um microfone cardióide propostos pelos autores, e propondo aplicar a técnica de descodificação MS às respostas impulsivas obtidas pelo microfone *SoundField* a cada um dos eixos ortogonais do sistema de reprodução.

Para verificar, de forma objectiva, a fidelidade do sistema proposto realizou-se a comparação dos valores de parâmetros físicos caracterizadores da acústica de salas de espectáculo, com particular enfoque na zona do palco, medidos com o mesmo microfone numa sala real e num ambiente simulado por este sistema numa sala seca (quasi-anecóica). Foram também realizadas avaliações subjectivas preliminares sobre a qualidade da reprodução pelo sistema proposto, que, apesar de não serem o foco principal desta tese, tiveram como objectivo a despistagem de possíveis defeitos audíveis na reprodução e a óbvia percepção/capacidade de diferenciação entre os diferentes espaços. Para atingir estes objectivos foram realizadas medições acústicas no palco de três salas de espectáculo da cidade do Porto com características diferentes: o Teatro Helena Sá e Costa, o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e a Sala Suggia da Casa da Música. Com estes ensaios obtiveram-se as respostas impulsivas no palco das três salas para utilização e simulação no sistema proposto, fazendo posteriormente a comparação entre as respostas impulsivas e os resultados delas derivados, para a situação real e simulada.

Os resultados obtidos pela análise objectiva demonstram que o sistema proposto permite simular os resultados dos parâmetros acústicos das salas de forma muito equivalente aos obtidos *in situ* na sala real. Os resultados subjectivos avaliaram positivamente o potencial de utilização deste sistema.

1. Introdução

Há várias décadas que se tenta que os sistemas de reprodução sonora possam recriar ambientes acústicos reais, da forma mais fidedigna possível. Desde o sistema estéreo ao *surround* 5.1 para representações bidimensionais até aos sistemas mais complexos como a reprodução binaural e o *Ambisonics*, que permitem uma representação sonora tridimensional, muitos outros surgiram recentemente com esse objectivo.

Muito se tem feito também ao nível do estudo da acústica de salas e no desenvolvimento de técnicas de medição e caracterização de parâmetros acústicos de espaços. O avanço e desenvolvimento destas técnicas, associado ao actual estado tecnológico da informática, permitem que hoje seja possível captar as características acústicas essenciais de um espaço, normalmente descritas pelas denominadas respostas impulsivas, ou seja, a resposta acústica da sala a um impulso sonoro. Com essas respostas impulsivas registadas, é possível calcular-se a resposta da sala a qualquer sinal sonoro através da operação matemática de convolução. Este processo de convolução pode ter várias utilizações possíveis, desde uma perspectiva criativa como por exemplo o processamento em tempo real de um sinal sonoro proveniente de um microfone com um sinal musical previamente registado, até uma utilização onde o objectivo está na procura de um resultado mais realista, realizando a convolução de um sinal sonoro anecóico com uma resposta impulsiva de um determinado espaço.

É neste último aspecto que esta tese se enquadra pretendendo investigar os sistemas de reprodução sonoro existentes, com especial foco na representação tridimensional, bem como as técnicas de medição e obtenção de respostas impulsivas, de forma a propor um sistema de simulação de campo sonoro 3D através de respostas impulsivas obtidas por medição.

Esta dissertação divide-se em quatro partes principais: 1) um resumo do estado da arte em matérias como os sistemas de captação, de convolução e reprodução, necessários à recriação de ambientes sonoros bi e tridimensionais, passando pela análise dos sistemas de processamento actualmente mais aplicados, bem como uma descrição do sistema desenvolvido e proposto por Kanaco Ueno, Hideki Tachibana e restantes

investigadores (Ueno et al 2007), (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003), para processamento em tempo real; 2) uma descrição dos ensaios acústicos efectuados às diferentes salas estudadas; 3) a descrição do sistema de simulação proposto com base na técnica de descodificação MS e finalmente 4) terminando com a análise dos resultados e respectivas conclusões.

1.1 Objectivos

Pretende-se com esta tese de mestrado fazer a implementação de um sistema de simulação do campo sonoro 3D com base nas respostas impulsivas obtidas por medição, utilizando a captação *SoundField* e a descodificação MS (Middle-Side).

Conhecendo a realidade da interacção músico/espaço e as dificuldades daí resultantes, está a ser desenvolvido um projecto de investigação no laboratório de Acústica Musical da Unidade de Investigação da ESMAE que tem por objectivo avaliar a capacidade de adaptação dos músicos a diferentes ambientes acústicos. Para cumprir este objectivo, é necessário implementar em laboratório um sistema de simulação 3D da acústica de um espaço. A presente proposta pretende contribuir para esta investigação através da implementação de um sistema de simulação do campo sonoro 3D com base nas respostas impulsivas obtidas por medição.

Esta é uma matéria que é importante para a comunidade musical, pois este sistema poderá progredir para um outro que permita ao(s) músico(s) aperfeiçoar em tempo real a sua performance num espaço acústico virtual. Simulando um determinado espaço real, o(s) músico(s) pode(m) experimentar uma determinada sala de espectáculos, por exemplo, na qual não têm possibilidade de praticar regularmente. Adicionalmente, os resultados da investigação do projecto a que esta proposta está associada, têm como objectivo encontrar as preferências dos músicos relativamente às características acústicas dos palcos, pelo que o sistema a desenvolver contribuirá assim para esse conhecimento.

Com esta dissertação, pretende-se fazer uma contribuição para os estudos já existentes, tendo como ponto de partida investigações efectuadas por Kanaco Ueno, Hideki Tachibana e outros investigadores do projecto. Colocaram-se portanto as seguintes

questões que motivaram este projecto: Será possível aplicar ao sistema de reprodução proposto por estes autores as respostas impulsivas obtidas através do microfone *SoundField* aplicando a descodificação MS? Será que o microfone *SoundField* e um sistema de reprodução tridimensional baseado em MS permitem simular com rigor as respostas impulsivas que caracterizam a acústica de um espaço?

2. Estado da Arte

Actualmente existem vários sistemas de reprodução sonora que permitem uma audição tendo a sensação de espaço, sobretudo dando a noção de largura e profundidade. Ao longo deste capítulo e respectivos sub-capítulos, será feita uma descrição do estado da arte actual referente a vários temas tais como alguns dos sistemas de reprodução sonora mais conhecidos, sistemas de processamento de sinal por convolução mais comuns, um sistema de captação sonora 3D, os métodos de captação de respostas impulsivas mais actuais e as aplicações informáticas que permitem obter essas mesmas respostas impulsivas, os parâmetros acústicos mais característicos e as respectivas normas para se efectuarem as medições acústicas que permitem obter esses mesmos parâmetros.

2.1 Sistemas de Reprodução

Os actuais sistemas de reprodução sonora que permitem a um auditor escutar um determinado programa musical ter ao mesmo tempo a sensação de localização e espaço vão desde o já muito comum sistema estéreo que envolve a reprodução sonora através de dois altifalantes, que deverão formar em conjunto com o auditor um triângulo equilátero, até sistemas mais complexos que necessitam de muitos altifalantes associados a processadores de sinal. Os sub-capítulos que se seguem, fazem uma descrição dos principais sistemas de reprodução sonora actuais.

2.1.1 *Stereo* (ou estéreo)

A primeira vez que surgiu um sistema bifónico que mais tarde viria a dar origem ao sistema estéreo, remonta ao ano de 1881, quando foi apresentado pela primeira vez em Paris na Exposição de Electricidade por Clement Ader, um sistema utilizando o telefone para transmitir sinais de 10 microfones situados tanto do lado esquerdo como direito do palco da Ópera de Paris, para pares de telefones situados numa sala a 3Km de distância. Os sinais que eram captados do lado esquerdo do palco eram reproduzidos num auscultador esquerdo e os sinais captados do lado direito do palco eram reproduzidos por um segundo auscultador direito. Este sistema, bifónico, deu origem mais tarde, já na década dos anos 30 do século XX, ao sistema convencionalmente designado de estéreo, através dos desenvolvimentos obtidos pelo trabalho de Alan Blumlein (Streicher e Everest 1998).

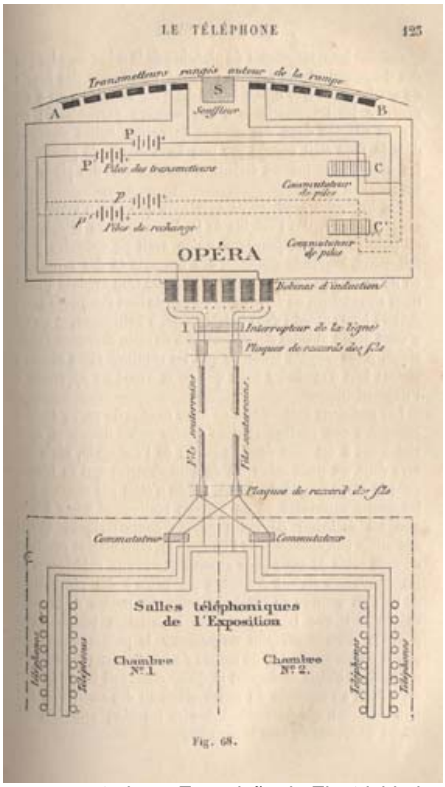


Figura 1: Esquema apresentado na Exposição de Electricidade de 1881 em Paris

A estereofonia funciona como já foi dito, recorrendo a dois altifalantes espaçados, e que em conjunto com o ouvinte, deverão formar um triângulo praticamente equilátero, tal como ilustra a figura 2. Este sistema funciona pelo facto de criar diferenças de fase e de tempos de chegada dos sinais sonoros aos ouvidos do ouvinte, tal como é possível verificar pela figura 3, sendo estas características as mais apropriadas para a percepção de direcionalidade no plano horizontal (Watkinson 1998). Como é visível na figura 3 as ondas sonoras provenientes de cada um dos altifalantes chegam a ambos os ouvidos. Este fenómeno, denominado interfonia cruzada ou mais correntemente "*cross-talk*", impede que a imagem sonora possa transpor o ângulo entre os dois altifalantes, limitando portanto a capacidade de reproduzir ambientes reais 360º em torno do ouvinte.

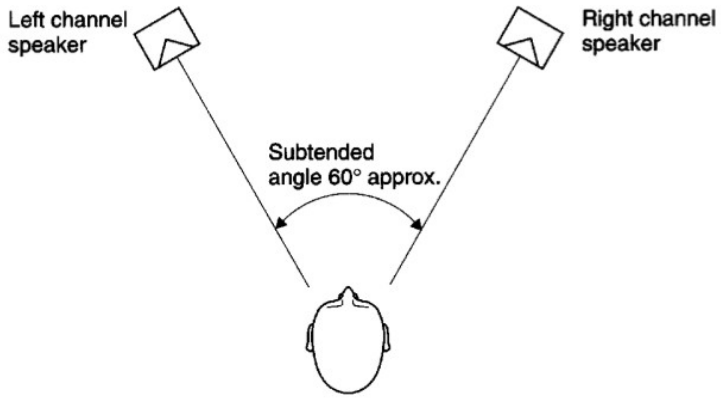


Figura 2: Representação do posicionamento do sistema estéreo e ouvinte (Watkinson 1998)

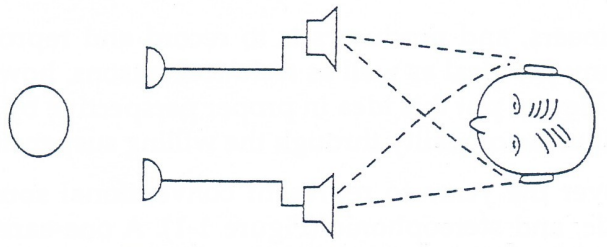


Figura 3: Influência de cada altifalante nos dois ouvidos do ouvinte (Streicher e Everest 1998)

2.1.2 Stereo Dipole

O termo *Stereo Dipole* é utilizado para descrever um sistema que reproduz a fonte virtual de uma imagem sonora, utilizando dois altifalantes espaçados lado a lado com uma distância muito pequena (os seus centros não distam mais do que 15 a 30 cm), de tal forma, que ao ouvinte, as duas colunas deverão formar uma abertura com ângulo de 10º, tal como indica a figura 4, em vez dos convencionais 60º do sistema estéreo. Este sistema, tem a vantagem em relação ao estéreo convencional, de formar um ponto de escuta ideal maior, e também pela maior robustez na qualidade da localização e da imagem da fonte sonora virtual, que permite ao ouvinte maiores movimentos com a cabeça sem que isso afecte significativamente a imagem sonora (ISVR 2011), (Nelson e Hamada 2004). Esta capacidade de localização melhorada, e sobretudo a capacidade de alargar a imagem sonora para além do ângulo abrangido pelos dois altifalantes, permitindo quase 360º em torno do ouvinte, deve-se à aplicação de processamento digital ao sinal emitido pelos altifalantes. Este processamento, denominado *"cross-talk cancellation"*, atenua significativamente a parte da onda sonora emitida pelo altifalante da esquerda que chega ao ouvido direito, e vice-versa. Deste modo, os sinais emitidos por cada altifalante podem ser manipulados para induzir o ouvinte a ouvir uma fonte numa localização bastante para além do ângulo entre os altifalantes. A pequena distância entre os altifalantes resulta essencialmente da capacidade de se efectuar um melhor controlo das interacções (interferências construtivas e destrutivas) entre as ondas sonoras à chegada ao sistema auditivo externo dos ouvintes.

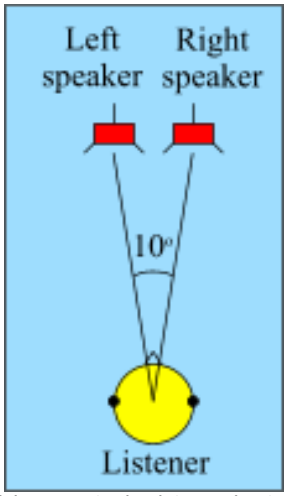


Figura 4: Representação do posicionamento do sistema de stereo dipole e ouvinte (ISVR 2011)

2.1.3 Binaural

É um sistema que para captar o conteúdo sonoro, utiliza a chamada *Dummy Head*, visível na figura 5, que possui a forma da cabeça do ser humano, e coloca 2 microfones com a cápsula na posição dos tímpanos do sistema auditivo humano. A sua reprodução é feita através de auscultadores, estando associado a cada ouvido um único canal da gravação, e não uma soma de vários canais com diferentes tempos de chegada e intensidade a cada ouvido na reprodução, mas sim, no registo sonoro, tal como a figura 6 demonstra. A percepção de realidade é muito clara, mas tem como limitação, a necessidade do uso exclusivo de auscultadores, não funcionando de forma correcta em altifalantes (Streicher e Everest 1998), sem a aplicação de processamento electrónico. Uma limitação adicional é a muito comum dificuldade em distinguir os sons que se tentam reproduzir imediatamente à frente e atrás do ouvinte, bem como o facto de que as fontes sonoras ouvidas através deste sistema se "moverem" com o ouvinte, caso este altere a posição da sua cabeça. Para além destes factos, uma reprodução ainda mais fidedigna implica que as "orelhas" artificiais usadas na *Dummy Head* tenham um formato igual às do ouvinte.



Figura 5: Dummy Head para captação binaural

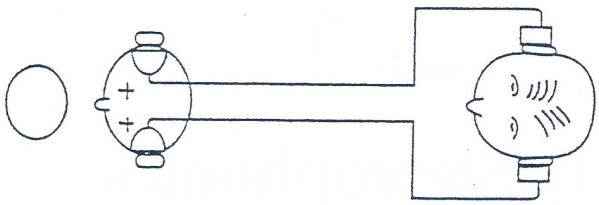


Figura 6: Representação da captação e escuta binaural (Streicher e Everest 1998)



Figura 7: Auscultadores – são a única forma de reprodução correcta de registos efectuados com sistemas binaurais

2.1.4 Quadrifonia

Este sistema, visível na figura 8, desenvolvido na década de 70 do séc. XX, consiste em 4 altifalantes dispostos num quadrado. Esta proposta não teve grande sucesso, em parte devido aos problemas de armazenamento e distribuição de conteúdos em 4 canais discretos, mas também devido aos problemas inerentes a ter 2 sistemas estéreo em quadrado, o que leva a que o ponto de escuta seja ainda pouco alargado (Toole 2008).

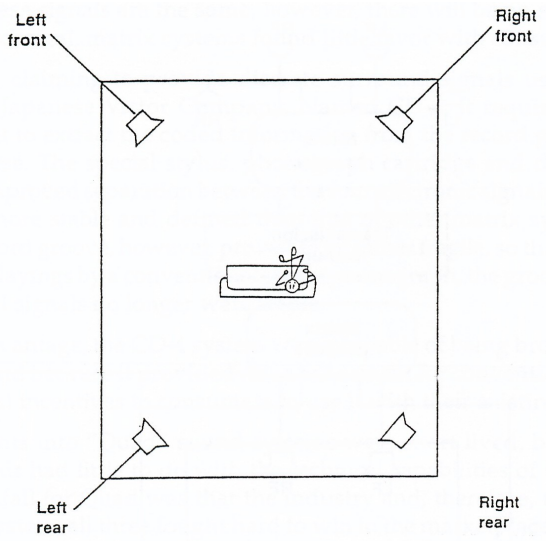


Figura 8: Representação do sistema quadrifónico (Streicher e Everest 1998)

2.1.5 Surround 5.1

O sistema *surround* foi desenvolvido para melhorar a representação espacial do áudio em filme e televisão. Este sistema, tal como é possível verificar pela figura 9, para além dos canais *Left-Right* (LR) convencional do estéreo utiliza um terceiro canal ao centro, que permite definir melhor a imagem sonora em frente ao ouvinte, quando a escuta é feita fora do eixo central, ao passo que no sistema LR, uma representação central ouvida fora desse mesmo eixo, irá parecer que está deslocada para o lado do altifalante mais próximo. Possui ainda mais dois canais traseiros, que permitem uma melhor representação da origem da fonte sonora na imagem criada, e um último canal para um altifalante para reprodução de baixas frequências. (Watkinson 1998).

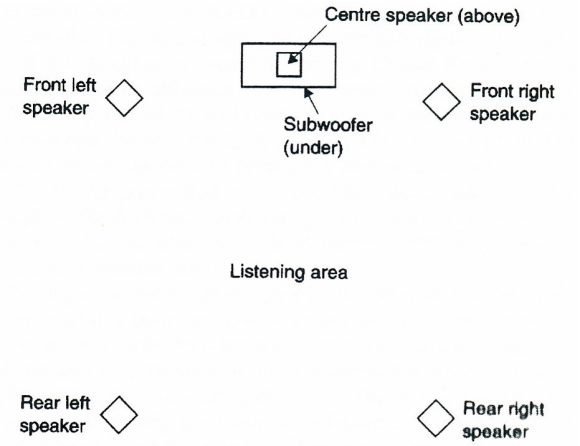


Figura 9: Representação de sistema surround 5.1 (Watkinson 1998)

2.1.6 Ambisonics

O sistema *Ambionics* foi desenvolvido pelo matemático Michael Gerzon *et al*, do Mathematical Institute, Oxford há já cerca de 40 anos.

É um sistema que utiliza informação áudio em *B-Format* (formato com 4 sinais WXYZ) e através de uma unidade de processamento, distribui os sinais resultantes, dependendo da configuração do *array* de altifalantes pretendido. Este pode ir de um sistema mais simples, de 3 altifalantes, que permite a representação sonora num plano horizontal, até a um complexo sistema de 16 altifalantes que permite uma representação

sonora esférica. A figura 10 representa um exemplo de um sistema de reprodução *Ambisonic*.

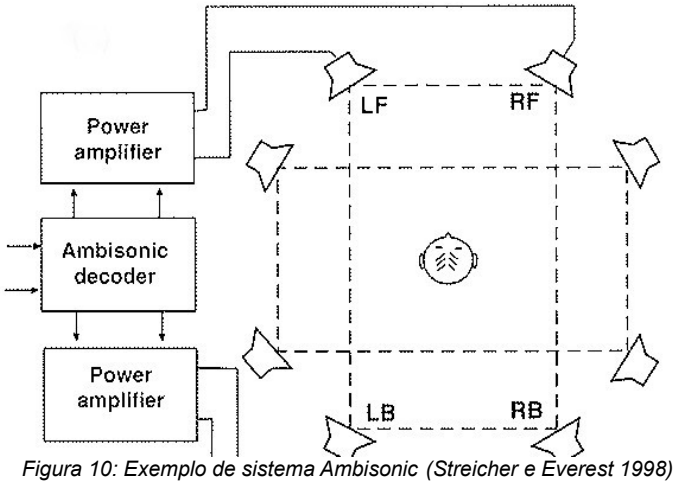


Figura 10: Exemplo de sistema Ambisonic (Streicher e Everest 1998)

No sistema *Ambisonic*, é possível obter uma representação horizontal satisfatoriamente boa com apenas 3 altifalantes, enquanto que para se obter uma representação 3D são necessários no mínimo quatro altifalantes. Contudo, são recomendados pelo menos 4 altifalantes para a representação horizontal e 6 para representação 3D, permitindo assim uma melhor cobertura da área de escuta e diminuindo assim a probabilidade de o ouvinte identificar individualmente cada altifalante (Streicher e Everest 1998).

O sistema *Ambisonic* é discreto (ou muito próximo de discreto), pelo que cada sinal reproduzido de um canal é tão importante como o de qualquer outro. Ao contrário de sistemas surround de menor complexidade que permitem que sejam utilizados altifalantes e respectivos amplificadores de menores potências para os canais traseiros, o *Ambisonic* requer que todos os altifalantes e respectivos amplificadores sejam da mesma qualidade (Streicher e Everest 1998). Este sistema tem usualmente associada a captação por intermédio de um microfone *SoundField* (ver secção 2.2).

2.1.7 Wave Field Synthesis

O *Wave Field Synthesis* é uma técnica de reprodução sonora que usa um conjunto de altifalantes que redefine os limites existentes nos sistemas de reprodução mais convencionais. O *Wave Field Synthesis* pretende obter a reprodução dos verdadeiros atributos físicos de um determinado campo sonoro numa determinada área, e não num ponto. É baseada no princípio de Huyghens (1678) que determina que a propagação de uma onda num determinado meio pode ser formulada pela adição de contribuições de várias fontes secundárias posicionadas ao longo da frente de onda (IRCAM 2010).

As primeiras experiências utilizando esta técnica datam de 1988 pelo professor A. J. Berkhout da Universidade de Delft (IRCAM 2010).

É um sistema complexo com recurso a bastantes altifalantes. Existe inclusivamente uma sala de cinema na Alemanha equipada com um sistema totalmente funcional, recorrendo a um total de 192 altifalantes a toda à volta da sala (Brandenburg 2009).

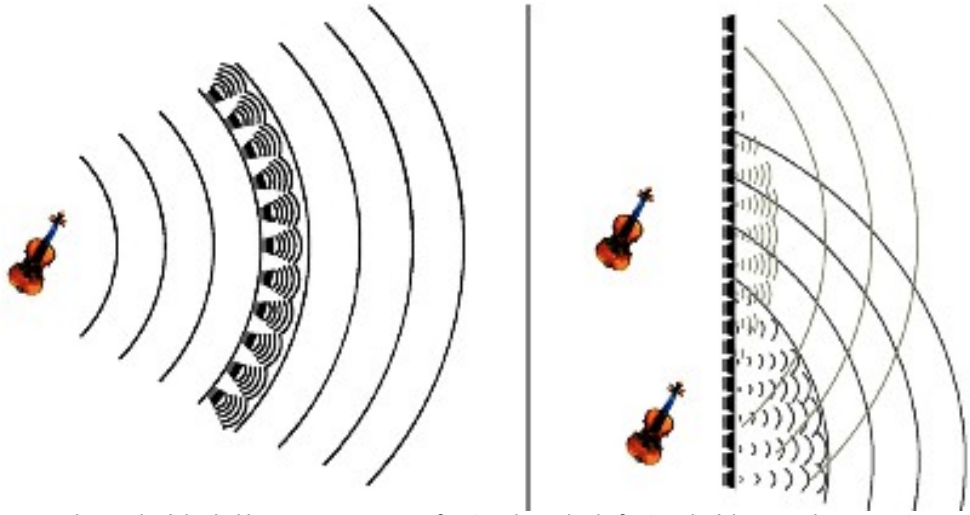


Figura 11: À esquerda, o princípio de Huygens, em que as frentes de onda da fonte primária se pode comportar como um conjunto de várias fontes colocadas ao longo da frente de onda; à direita, um conjunto de altifalantes podem sintetizar um campo sonoro associado a várias fontes virtuais (IRCAM 2010).

Neste sub-capítulo fez-se uma descrição dos vários sistemas de reprodução existentes actualmente. De seguida, será abordado o microfone *SoundField*, que permite uma captura sonora 3D num único ponto de captação.

2.2 Sistema de captação *SoundField*

O sistema *SoundField* consiste num microfone de 4 cápsulas sub-cardióide montadas em forma de um tetraedro e uma unidade de controlo, sendo que as cápsulas que o integram se encontram muito próximas umas das outras, por forma a eliminar o máximo possível os problemas de fase associados à soma de vários pontos de captação. A figura 12 permite visualizar o conjunto das 4 cápsulas que constituem o microfone *SoundField.*



Figura 12: Conjunto das 4 cápsulas que constituem o microfone SoundField

Os 4 sinais de saída do microfone, designado por *A-Format*, são posteriormente processados e descodificados pela unidade de controlo que decompõe e cria um sinal de saída de 4 canais em *B-Format*. Este formato é caracterizado por possuir a informação de todo o campo sonoro e os seus 3 vectores de direcção – frontal/traseiro, esquerda/direita, superior/inferior – e um quarto sinal central omnidirecional de onde se retira a componente de referência. Assim, o microfone é capaz de codificar a informação direccional de todos os planos incluindo as componentes de pressão e velocidade de reflexões indirectas e campo reverberante (Rumsey 2001).

O *B-Format,* tal como as figuras 13 e 14 ilustram, representa portanto a informação acústica tri-dimensional em redor do microfone e consiste no equivalente a uma gravação de 3 microfones com padrões figura-de-oito em ângulos rectos que nos

dão a informação X, Y e Z mais a informação equivalente a um microfone com padrão omnidirecional, denominado de W, que representa a referência para os restantes 3 canais (SoundField 2011).

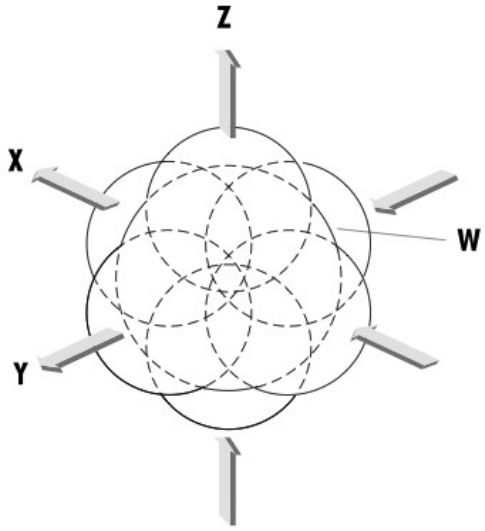


Figura 13: Componentes do B-Format (SoundField 2011)

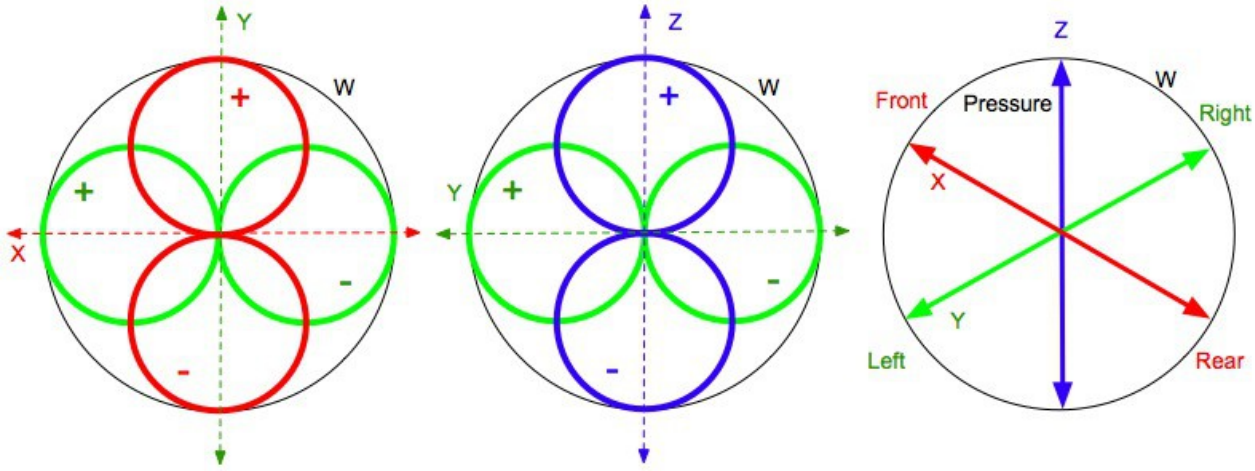


Figura 14: Polaridades das componentes do microfone SoundField (SoundField 2011)

Este sistema representa por isso uma solução em teoria ideal para a caracterização do campo sonoro de um determinado espaço acústico e num determinado ponto de medição, dado o seu sistema de alinhamento temporal e coerência de fase dos seus sinais, que permite a captação dos vários sinais no mesmo ponto físico. Isto é

possível dado que o espaçamento físico das cápsulas ao centro do *array* tetraédrico é constante e conhecido sendo por isso possível calcular electronicamente a correcção a aplicar a cada sinal, criando assim um centro do *array*. Esta coincidência por via electrónica, é possível até cerca de 10kHz (Rumsey 2001).

Assim que o sinal dos vários canais do *array* são registados, estes podem posteriormente ser descodificados nos vários formatos áudio utilizados, tais como *MS,* mono, estéreo e os vários formatos *surround* existentes no mercado 5.1, 6.1 e 7.1 (SoundField 2011).

Com este sistema e respectivo processador, é possível alterar a direcção do resultado sonoro alterando as relações de nível dos vários sinais e sem alterar a direcção do microfone. É possível também extrair os vários sinais como se tivessem sido utilizados microfones de vários padrões de polaridade, cardióide, hiper-cardióide, figura-de-oito ou omnidirecional (SoundField 2011).

Este sistema é já utilizado em varias situações, desde gravações de concertos de orquestras sinfónicas a captação de ambiente sonoro de grandes estádios de desportos para fins de *broadcast*.

Conhecido o microfone *SoundField* e as suas principais características abordadas no sub-capítulo que agora termina, será de seguida abordada a temática relativa a respostas impulsivas e sistemas de convolução, que nesta tese se pretende serem adquiridas de forma 3D com recurso a este mesmo microfone.

2.3 Respostas Impulsivas

As respostas impulsivas são utilizadas para se obter as características acústicas de salas desde já há cerca de 50 anos (Farina 2007).

É um modelo físico-matemático que permite avaliar o comportamento linear de sistemas lineares, causais e invariáveis no tempo, através da reprodução de um sinal conhecido e comparação da captação das modificações acústicas sofridas por esse mesmo sinal no campo sonoro em avaliação. Na acústica de salas, as respostas impulsivas têm um papel bastante importante, à semelhança dos parâmetros acústicos que podem ser extraídos através da sua medição (Barron 2005).



Figura 15: Esquema básico da cadeia de obtenção de respostas impulsivas - baseado em (Ballou 2005)

É portanto, um método aplicado na Acústica de Salas que permite estudar as características da propagação sonora de um ponto emissor para um ponto receptor. Através da sua convolução com sinais acústicos registados em ambientes anecóicos é possível realizar o processo de auralização (Farina e Tronchin 2005) ou até mesmo a simulação em tempo real com sinais a serem captados em tempo real em ambiente anecóico.

A técnica normalmente utilizada faz uso de uma fonte de emissão sonora omnidirecional, 12 altifalantes dispostos num dodecaedro, e de um receptor, também ele omnidirecional. O facto de serem ambos omnidirecionais, permite que naquele ponto de captação, o sinal registado contemple todas as reflexões provenientes de todas as direcções possíveis. No entanto, apenas com um ponto de captação com um microfone omnidirecional não é possível diferenciar e decompor as componentes da direcção de cada reflexão.

Várias foram já as tentativas de obter essa informação, fazendo a captação do

sinal com vários microfones direccionais. Nesta matéria, é conhecido o método utilizado pela investigadora japonesa Kanako Ueno, que regista no mesmo ponto 6 respostas impulsivas com um microfone direccional, rodando o microfone entre cada registo um passo de 90º, obtendo assim a informação nos 3 eixos ortogonais.

Actualmente, novos métodos para caracterização 3D de uma sala são já utilizados ou investigados, tais como o recurso ao sistema *SoundField*, utilização de microfones figura de oito, captação ORTF ou até mesmo a um sistema desenvolvido por Angelo Farina que consiste numa esfera com 32 cápsulas de captação (Farina 2007).

Para o registo das respostas impulsivas, era comum há cerca de 2 décadas, a utilização de um varrimento sinusoidal linear ou de sequências de máximo comprimento (*maximum length sequence* - MLS), devido aos recursos computacionais da época serem mais limitados. Com o desenvolvimento tecnológico informático, com a capacidade actual dos computadores e a fiabilidade dos interfaces áudio foi possível dar um passo em frente, sendo comum nos dias de hoje a utilização de um varrimento sinusoidal exponencial. A utilização deste varrimento, tem como principais benefícios obter uma melhor relação sinal-ruído permitindo também, um melhor tratamento das não - linearidades dos sistemas. Através da obtenção da resposta inversa do sinal de teste, é possível uma separação e limpeza das distorções harmónicas existentes na cadeia de equipamentos utilizados (Farina 2007).

Até há algumas décadas atrás, os registos das respostas impulsivas de uma sala eram obtidos de forma mais imediata, mas menos rigorosa, através da utilização de uma fonte sonora com carácter impulsivo, como por exemplo, o rebentamento de um balão, o disparo de um tiro ou até mesmo uma palma. Estes sons eram registados num gravador, e como a visualização é no domínio temporal, a resposta impulsiva era imediatamente obtida. No entanto, estes eram métodos suficientes para obter características acústicas como o Tempo de Reverberação, mas manifestamente insuficientes para se obter com rigor informação no domínio frequencial, podendo inclusivamente serem obtidos resultados e/ou análises erradas. Esta falta de rigor no domínio frequencial, deve-se ao facto de estes elementos sonoros não possuírem informação espectral constante (Farina 2007).

Tal como Angelo Farina e Lamberto Tronchin referem no seu artigo (Farina e

Tronchin 2011) geralmente só são utilizados métodos monoaurais e binaurais para se efectuarem medições acústicas, em grande medida devido ao estabelecido pela norma ISO 3382. No entanto, estes métodos não permitem extrair muita informação relativamente às características direccionais nos pontos de medição, pelo que vários autores começaram a desenvolver novos métodos e técnicas para obtenção dessas mesmas características (Farina e Tronchin 2011).

Uma tentativa de recolher essa informação espacial num teatro foi obtida utilizando todas as técnicas conhecidas até esse momento, que consistiam em 3 sistemas numa única estrutura, uma *dummy head,* ORTF e um microfone *SoundField*, captando um conjunto de respostas impulsivas a cada posição angular (Farina e Tronchin 2011).

O grande inconveniente deste método, está no facto de este ser bastante lento e de ser bastante difícil de combinar toda a informação recolhida pelos 3 sistemas (Farina e Tronchin 2011).

Ainda neste artigo, os autores defendem que apesar de a norma ISO 3382 indicar que se deve fazer uso de uma fonte omnidirecional, embora esta não corresponda à efectiva directividade das fontes reais (por exemplo, instrumentos musicais ou voz humana) que é preferível quando as medições pretendem determinar com precisão a distribuição sonora no espaço acústico. Contudo, salientam que quando o propósito das medições é determinar a resposta da sala a um determinado tipo de fonte, uma fonte mais directiva possa ser utilizada, como por exemplo, uma boca artificial (Farina e Tronchin 2011).

É também referido neste artigo que o microfone *SoundField* pode ser um “óptimo” transdutor para as medições de respostas impulsivas 3D, isto porque o sinal W, permite obter os parâmetros monoaurais das medições, ao passo que este mesmo sinal em conjunto com o sinal Y, que é uma representação de um microfone figura-de-oito, permitem obter o parâmetro LF – *Lateral Fraction*. Juntando os sinais X e Z, estes podem ser utilizados para recriar todo o espaço sonoro 3D num sistema de reprodução com uso de tecnologia *Ambisonic* de 1ª ordem. Actualmente, um sistema de 1ª ordem é considerado incapaz de providenciar informação apurada ao ouvinte, visto ser incapaz de sintetizar campos sonoros que exibam polarização significativa, pois nestes casos, o som parece surgir de todo o lado. A solução apresentada pelos autores, consiste na utilização

de um sistema *Ambisonic* de ordem mais elevada (Farina e Tronchin 2011).

No processo de auralização, é comum registar as respostas impulsivas de um espaço acústico através da técnica de captação estéreo ORTF, ou com uma *Dummy Head,* dependendo do objectivo final da auralização, se uma representação para ser reproduzida num sistema estéreo ou se uma representação para ser reproduzida em escuta por auscultadores. O processo consiste na gravação mono de um sinal em ambiente anecóico, sendo este depois convoluído por cada uma das respostas impulsivas registadas por cada um dos sistemas (Farina e Tronchin 2005).

2.4 Sistemas de Convolução

Uma das características dos sistemas lineares, causais e invariantes no tempo, como os descritos anteriormente, é o de ser possível calcular a sua resposta a uma qualquer excitação, desde que se conheça a sua resposta a um impulso ideal (Dirac). Esta resposta é obtida por intermédio de uma operação matemática denominada convolução. Esta propriedade destes sistemas é aplicada nas mais diversas áreas da Engenharia, Física e Informática envolvendo aplicações numerosas para os mais diversos fins. No entanto, é na Acústica de Salas que tem um particular interesse quando se pretende conhecer como soaria uma determinada peça musical em espaços com diferentes características acústicas. Considerando a descrição de um sistema linear através da figura 16, em que *x*(t) é o sinal de excitação, *y*(t) a resposta e *h*(t) a resposta impulsiva do sistema, é possível descrever a operação de convolução pela seguinte equação 1, no domínio do tempo:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} h(t-\tau)\,x(\tau)\,d\tau \qquad (1)$$

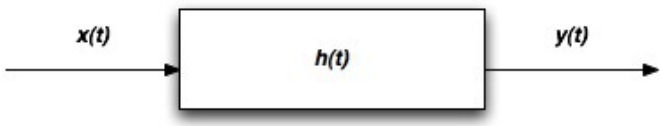


Figura 16: Descrição de um sistema linear, identificando x(t) como sinal de excitação, h(t) como resposta impulsiva do sistema e y(t) como resposta da convolução.

A reverberação por convolução é portanto uma operação matemática que requer a utilização de uma resposta impulsiva como filtro *h*(t), ao qual será multiplicado um sinal de entrada preferencialmente anecóico *x*(t), obtendo assim esse mesmo sinal reverberado digitalmente *y*(t) (LAE 2011).

Existem também actualmente vários sistemas que permitem aos utilizadores o processamento de reverberação por convolução, podendo assim recrear o ambiente acústico de uma determinada sala de espectáculos, bastando para isso que o utilizador carregue o ficheiro da resposta impulsiva da livraria de respostas existentes em cada uma das aplicações. São exemplos o *plug-in Altiverb* da *Audio Ease*, *Sound Designer* presente

na aplicação *Logic* da *Apple* e o *ProVerb*, da *Motu* presente na aplicação *Digital Performer*. No caso das duas primeiras aplicações citadas, elas possibilitam ainda registar respostas impulsivas de espaços que não estejam disponíveis nas suas livrarias de respostas, possuindo mesmo módulos que disponibilizam os sinais necessários para o utilizador reproduzir no local e registar o resultado, bastando para isso o utilizador se fazer deslocar ao local com um altifalante e microfones, sem haver propriamente uma norma para selecção deste equipamento, enquanto que a última aplicação mencionada, permite apenas carregar respostas impulsivas (em ficheiros áudio) que já tenham sido registadas previamente (Apple 2009), (Audio Ease 2011), (Motu 2011).

A característica comum a estas aplicações, é o facto de o processamento ser nos formatos mono, estéreo ou *surround*, nunca contemplando o eixo vertical. Aliás, no caso da aplicação *Impulse Response Utility* (módulo de aquisição de respostas impulsivas do *Sound Designer*), esta permite a captação e registo através do microfone *SoundField* (apresentado de seguida) com a particularidade de nem sequer registar a componente vertical do microfone, isto é, regista todas as componentes, menos a vertical. (Apple 2009).



Figura 17: Exemplo de 3 aplicações de convolução existentes no mercado, Impulse Response Utility/Sound Designer (Apple), Altiverb (Ease) e ProVerb (Motu)

Para se efectuar as medições acústicas e obter-se as respostas impulsivas de salas, que se abordam neste sub-capítulo, é necessário ter em consideração vários factores que estão descritos numa norma internacional (actualmente também na sua versão portuguesa) que deve ser seguida. Essa norma é identificada como ISO 3382, que será abordada no sub-capítulo que se segue.

2.5 Norma ISO 3382

A norma pretende apresentar/definir o método para se obter o tempo de reverberação e outros parâmetros acústicos através de respostas impulsivas como também pelo método de ruído interrompido.

A norma ISO 3382 está actualmente dividida em duas partes:

ISO3382-1:2009 "Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces" e

ISO3382-2:2008 "Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms"

Apesar de esta norma já ter sido transportada para a normalização portuguesa, detalha-se aqui a versão internacional editada pelo *Internacional Standards Organization*.

2.5.1 Parâmetros Físicos e Objectivos

O tempo de reverberação é utilizado como sendo o principal indicador das propriedades acústicas de uma sala/espaço acústico.

Mesmo continuando a ser visto como um dos parâmetros acústicos mais significativos a ter em conta, existem outros parâmetros de grande importância e que deverão também ser tidos em conta, como por exemplo, os níveis de pressão sonora relativa, relações de energia inicial/tardia, fracção de energia lateral, IACC e ruído de fundo. Todos estes parâmetros são bastante importantes para uma completa definição e avaliação de um espaço acústico.

Tempo de reverberação (T_{60}) – segundo a norma ISO 3382 é o tempo expresso em segundos, que é necessário para que o nível de pressão sonora decresça em 60 dB no espaço acústico (BSI 2002). O tempo de reverberação desejável para uma sala de espectáculo depende muito do tipo de interpretação, música ou palavra, mas também do volume da sala em si. Na figura 18 pode-se ver os valores desejáveis para o valor médio do tempo de reverberação de uma sala entre os 500Hz e os 1000Hz, com uma ocupação

de sala entre os 80 e os 100% (Ballou 2005).

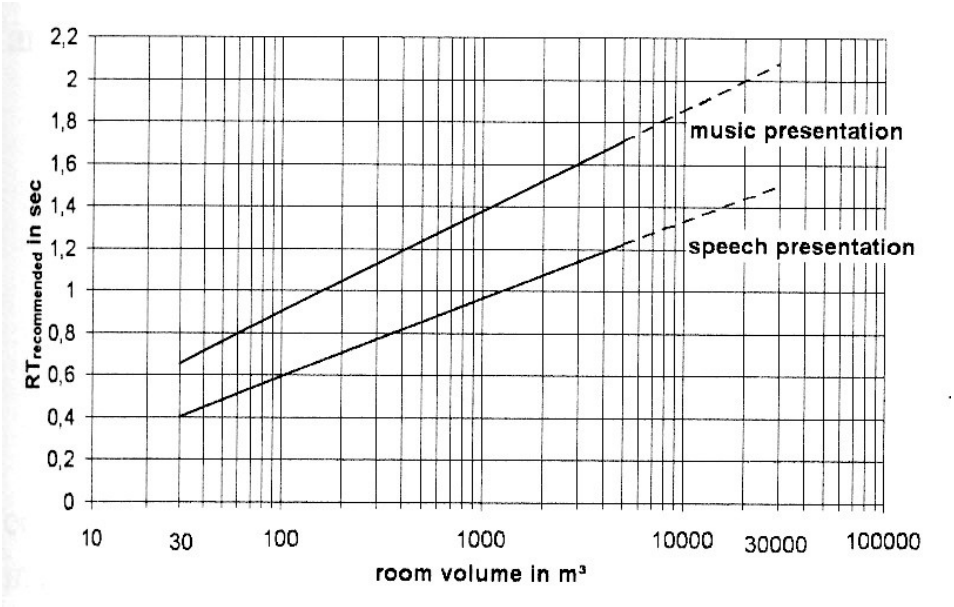


Figura 18: Valores médios do tempo de reverberação desejáveis para uma sala entre os 500Hz e os 1000Hz, com uma ocupação de sala entre 80 e 100%, para palavra e para música (Ballou 2005)

Intensidade (G) - é a razão logarítmica da pressão sonora medida no espaço acústico com a pressão sonora produzida pela mesma fonte sonora num campo livre à distância de 10m da fonte sonora, e a sua representação matemática é dada por:

$$G = 10\log\left(\frac{E_{\infty}}{E_{\infty,10\mathrm{m}}}\right) \quad dB \tag{2}$$

onde E_{∞} representa a componente de energia sonora medida no local e $E_{\infty,\ 10m}$ representa a referência da componente de energia sonora existente a 10m de distância num campo livre, da fonte sonora (Ballou 2005).

Clareza - é um parâmetro que no caso de se tratar de uma sala para palavra, consideram-se o som directo e as primeiras reflexões nos primeiros 50 ms com a energia do que chega depois dos primeiros 50 ms num determinado ponto de medição. No caso de a sala ser para música, então em vez de 50ms consideram-se 80ms (Henrique 2002).

Este parâmetro pode ser calculado através da expressão:

$$C_{80} = \frac{energia\,recebida\,nos\,primeiros\,80\text{ms}}{energia\,recebida\,após\,os\,80\text{ms}} = 10\log\frac{\int_{0}^{80} p^2(t)dt}{\int_{80}^{\infty} p_A^2(t)dt} \quad dB \tag{3}$$

No caso da palavra, considera-se que existe uma boa inteligibilidade quando C50 ≥ 0 dB, enquanto que para a música, existem autores que consideram que C80 deverá estar compreendido entre -2 ≤ C80 ≤ +2dB (Barron 2005) e outros que defendem que este parâmetro depende muito do reportório a ser executado, sendo que para um reportório de período romântico -3 ≤ C80 ≤ +4dB é considerado um bom intervalo, ao passo que num reportório clássico e mais moderno, se podem chegar a +6dB ou até mesmo +8dB (Ballou 2005).

Definição - é muito semelhante à clareza, apenas difere no aspecto de que se compara a energia chegada nos primeiros 50 ou 80 ms com a energia total recebida. Os dois parâmetros relacionam-se por:

$$C_{50} = 10\log\frac{D_{50}}{(1-D_{50})} \quad dB \tag{4}$$

e onde:

$$D_{50} = \frac{energia\,recebida\,nos\,primeiros\;\;50\,ms}{energia\,total} = 10\log\frac{\int_{0}^{50} p^2(t)dt}{\int_{0}^{\infty} p_A^2(t)dt} \tag{5}$$

(Ballou 2005)

IACC - É um critério binaural relacionado com a forma da cabeça humana, e que serve para descrever e para equiparar/comparar o sinal acústico chegado aos dois ouvidos.Por definição, o IACF – Função do coeficiente de intercorrelação binaural é dada por:

$$IACF_{t1t2}(\tau)=\frac{\int_{f1}^{f2} p_L(t).p_R(t)dt}{\left[\int_{f1}^{f2} p_L^2(t)dt\cdot\int_{f1}^{f2} p_R^2(t)dt\right]^{1/2}} \quad (6)$$

onde $p_L(t)$ é a resposta impulsiva de entrada no canal esquerdo e $p_R(t)$ é a resposta impulsiva de entrada no canal direito. O *IACC* é dado por:

$$IACC_{t1t2}=max|IACF_{t1t2}(\tau)| \quad (7)$$

para $-1\,ms<\tau<+1\,ms$ (Ballou 2005).

Fracção Lateral – Este parâmetro avalia o efeito das reflexões laterais chegadas ao ouvinte, entre os 5 ms e os 80 ms. A razão entre estas componentes de energia sonora dão-nos a medida de LF através de:

$$LF=\frac{E_{80Bi}-E_{5Bi}}{E_{80}} \quad (8)$$

onde E_{Bi} é a componente de energia sonora medida através do microfone figura-de-oito com o eixo de rejeição na direcção da fonte sonora (Ballou 2005) (Barron 2010).

EDT (Early Decay Time - Tempo de Decaimento Inicial) - mede a taxa de decaimento da mesma forma que o tempo de reverberação TR60, mas relativo ao decaimento dos primeiros 10 dB, ou seja, de 0 a – 10dB (Ballou 2005).

2.5.2 Métodos e sinais utilizados em medições

O método de ruído interrompido, tal como definido na norma ISO 3382, é o método de obter curvas de decaimento pelo registo do decaimento do nível de pressão sonora depois de o espaço acústico ser excitado com um ruído de banda limitada ou alargada (BSI 2002).

A resposta impulsiva é portanto a representação em função do tempo da pressão sonora recebida numa sala/espaço acústico em resultado da excitação da sala com um impulso de Dirac. Na realidade, é impossível produzir e radiar um impulso de Dirac perfeito, no entanto, é possível criar sons impulsivos com um transiente bastante rápido que permitem uma boa aproximação para a prática de medições. Em alternativa, pode ser utilizado uma sequência MLS ou o varrimento em frequência, transformando a resposta medida em resposta impulsiva, com recurso à transformada inversa de Fourier utilizando, por exemplo, *software* preparado para este efeito como o Aurora.

Para se efectuar medições de tempo de reverberação, estas deverão ser efectuadas com a sala em causa nos vários tipos de ocupação de lotação, uma vez que os resultados poderão ser bastante diferentes tendo uma sala e/ou palco vazios ou ocupadas com público/músicos. Algumas salas possuem cadeiras que são construídas com materiais que, não tendo ninguém sentado nelas, estas simulam o efeito absorsor como se uma pessoa estivesse sentada nessas mesmas cadeiras, com resultados muito semelhantes aos reais, mas noutros casos, não havendo esse recurso, é sugerido que se utilizem nos lugares dispositivos para simularem a mesma absorção (Barron 2005). Em casos de salas em que existam elementos de variação acústica, as várias opções deverão ser também elas registadas.

A fonte sonora, deverá ser tão omnidirecional quanto possível, produzindo um nível de pressão sonora suficiente para provocar curvas de decaimento com dinâmica suficiente de forma a não serem contaminadas pelo ruído de fundo. No caso de serem utilizadas sequências pseudo-aleatórias ou o varrimento em frequência para o registo de respostas impulsivas, o nível de pressão sonora poderá ser mais baixo visto ser possível uma grande melhoria em termos de relação sinal-ruído (BSI 2002).

Para as medições, deverão ser utilizados microfones omnidirecionais, com um

diafragma tão pequeno quanto possível para se obter os níveis de pressão sonora e registar assim as curvas de decaimento (BSI 2002).

Uma vez que as medições poderão ser utilizadas para vários propósitos, o número de posicionamentos de medições deverá ser escolhido de forma a se poder ter uma recolha de dados de toda a sala em questão. O posicionamento dos microfones deverá ter um distanciamento de pelo menos de 2 m entre microfones e de 1m para superfícies reflectoras, como chão, paredes laterais ou tectos. O posicionamento dos microfones também não deverá ser muito próximo de fontes sonoras, para evitar uma grande influência do som directo. A distância mínima deverá respeitar a equação:

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \tag{9}$$

onde V é o volume do espaço em m^3, c é a velocidade do som (m/s) e T é o tempo de reverberação estimado em segundos.

No caso de espaços muito pequenos com tempo de reverberação muito pequeno, poderá ser impossível respeitar esta distância mínima, pelo que nestes casos, e apenas para a medição de tempo de reverberação, deverá ser utilizada uma barreira entre a fonte sonora e o receptor (BSI 2002).

A fonte sonora deverá ser colocada em pelo menos dois locais do palco, no entanto deverão ser utilizados vários locais que possam cobrir toda a área que possa ser ocupada no palco pelos intérpretes. O posicionamento dos microfones deverá ser pensado de forma a antecipar os principais pontos que possam introduzir maior influência e diferenças no tempo de reverberação na sala, como por exemplo locais debaixo de balcões, locais mais perto de superfícies com características diferentes (BSI 2002).

Segundo a norma, o tempo de reverberação pode ser apresentado para cada posicionamento de medição, ou poderá ser apresentado um valor para todo o espaço acústico, calculando a média aritmética do tempo de reverberação obtido em cada posicionamento (BSI 2002).

Para além das medições dos tempos de reverberação dos espaços acústicos, outros parâmetros podem ser medidos, tais como intensidade (G), tempo de decaimento

inicial (EDT), fracções laterais (LF), a clareza (C_{80}), definição (D_{50}), coeficiente de intercorrelação binaural (IACC). (BSI 2002)

Para se obter o parâmetro da intensidade, é necessário um microfone omnidirecional e é a razão logarítmica da pressão sonora medida com a pressão sonora num campo livre à distância de 10m da fonte sonora (BSI 2002).

Para a obtenção da fracção de energia lateral LF chegada nos primeiros 80 ms que chega das direcções laterais, pode ser medida através da resposta impulsiva obtida através de um microfone omnidirecional e de um microfone figura-de-oito. É implícito que o eixo de rejeição do microfone figura-de-oito seja direccionado para uma fonte colocada no centro do palco, ou para posições de fontes sonoras individuais no palco (BSI 2002).

Segundo a norma ISO 3382 (BSI 2002), a distância mínima entre fonte sonora e microfones deverá ser no mínimo de 1,5m, sendo que os microfones deverão estar a 1,2 m de distância em relação ao chão, por forma a representar a altura dos ouvidos de uma pessoa sentada numa cadeira. Deverão ser utilizadas no mínimos 6 posições de microfones na sala.

Para a medição do parâmetro IACC, deverá ser utilizada uma Dummy Head a uma distância do chão de 1,2 m. Segundo a norma ISO 3382 (BSI 2002), o uso e a relevância subjectiva deste parâmetro é ainda objecto de discussão e investigação (BSI 2002).

Um aspecto fundamental nas medições de parâmetros acústicos reside na calibração dos sistemas a utilizar, sobretudo quando se está a falar de medições de LF e G, de modo a obterem-se resultados com elevado grau de precisão. O máximo da sensibilidade do microfone figura-de-oito nas bandas de frequência a serem estudadas/medidas deverá ser semelhante ao do microfone omnidirecional, devendo para essa calibração ser utilizada uma câmara anecóica (Barron 2005).

Uma vez que as fontes sonoras omnidirecionais costumam perder a característica omnidirecional acima dos 4000Hz, tornando-se assim fontes direccionais, as medições devem ser compreendidas entre os 125Hz e os 4000Hz, em 6 bandas de oitava. Também não se costumam realizar medições abaixo dos 125Hz, devido à incapacidade de as fontes omnidirecionais produzirem com fidedignidade estas frequências (Barron 2005), (BSI 2002). A tabela 1 representa os valores de referência para vários parâmetros.

Measure	Acceptable range
Reverberation time (RT)	1:8 ≤ RT ≤ 2:2 s
Early decay time (EDT)	8 ≤ EDT ≤ 2:2 s
Early-to-late sound index (C_{80})	-2 ≤ C_{80} ≤ +2dB
Early lateral energy fraction (LF)	0:1 ≤ LF ≤ 0:35
Total relative sound level (G)	G > 0 dB

Tabela 1: Valores de referência dos vários parâmetros (Barron 2005)

2.6 *Software* de Análise, Medição Acústica e de Processamento

Dos vários sistemas de medição das características acústicas de salas, optou-se por descrever o *software Aurora.* Este *plug-in* criado por Angelo Farina para o *software Adobe Audition* possibilita de uma forma facilitada a medição de vários parâmetros acústicos. É uma alternativa a outros programas idênticos, como por exemplo o *DIRAC,* o *WinMLS* ou *o MLSSA*, sendo que os dois primeiros utilizam os métodos de geração de sinais tanto de varrimento frequencial exponencial como *MLS (Maximum Length Sequence),* ao passo o último apenas permite o método *MLS* (LAE 2011) (DRA Laboratories 2009) (AE 2011) (Morset Sound Development 2004). É recomendado pelo autor que o registo de sinais seja efectuado com uma frequência de amostragem de no mínimo de 48KHz e uma resolução de pelo menos 24 bit, sendo ideal a utilização de 32 bit. (LAE 2011).

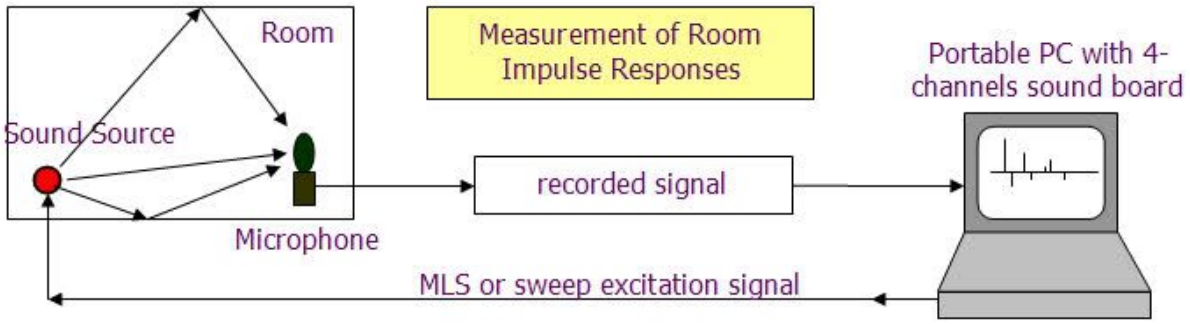


Figura 19: Esquema de sistema de medição de respostas impulsivas (LAE 2011)

O *Aurora* é composto por vários módulos, entre eles, módulos de criação de sinais de excitação, módulos de convolução, módulos de deconvolução e de cálculo de parâmetros acústicos. (LAE 2011).

A grande vantagem deste *software*, está no facto de Angelo Farina, com a evolução do processamento dos computadores actuais, ter re-introduzido como método de captação de respostas impulsivas o uso de varrimento frequencial exponencial, que permite obter melhores resultados em relação ao método que até então, que era o considerado mais adequado, o *MLS*, dada a menor capacidade de processamento dos

computadores dessa época. A grande vantagem da utilização do varrimento exponencial, está no facto de esta ser praticamente imune às distorções harmónicas dos equipamentos utilizados nas medições, e também ser possível obter uma melhor relação sinal-ruído na captação, ao passo que o *MLS*, embora menos exigente a nível de processamento computacional, é mais susceptível a erros nos resultados por ser menos imune ao ruído de fundo (menor relação sinal-ruído) e poder introduzir erros devidos às distorções harmónicas dos equipamentos utilizados (Farina 2007).

É disponibilizado um módulo que permite a criação de sinais MLS (acrónimo para *Maximum Lenght Sequence*) e de sinais IRS (*Inverse Repeated Sequence*). Ambos são formados por sequências pseudo-aleatórias de números binários. As características mais importantes são o facto de serem sinais periódicos, uma vez que basta a utilização das funções de *loop* dos editores ou sequenciadores de áudio ao elemento gerado. Ao fazerem-se várias sequências seguidas, é possível obter uma resposta "média" do sistema, o que permite que a relação sinal-ruído seja superior, do que no caso de se efectuar apenas uma sequência. Dada a utilização de números binários, este facto permite que o *crest factor* seja igual a 0 dB e oferecer assim potência máxima numa determinada amplitude, isto porque os valores do sinal oscilam sempre entre 0 ou 1. Ainda segundo o autor do programa, o conteúdo frequencial contido no sinal, é praticamente linear, sendo por isso muito próximo do sinal de ruído branco ideal. A autocorrelação é uma função matemática que associada à função Delta de Dirac permite a deconvolução da resposta impulsiva do sistema correlacionando a resposta medida com a sequência original (LAE 2011).

Ainda nos módulos de criação de sinais, o Aurora disponibiliza um terceiro módulo que gera sinais de varrimento sinusoidal. É na prática um sinal sinusoidal em que a frequência é continuamente variada, desde uma frequência inicial até uma frequência final. Nestes sinais é necessário a criação de um *fade-in* inicial e de um *fade-out* final, que o próprio programa executa automaticamente (LAE 2011). A utilização deste *fade-in* e *fade-out* permite minimizar o efeito de *pre-riging* que ocorre mesmo antes do impulso em si se formar, que este método de geração de sinal MLS cria, fazendo com que o impulso não seja perfeito (Farina 2007).

O módulo *Convolve*, permite a convolução linear de uma forma de onda/sinal seleccionado com uma outra previamente registada e carregada no *clipboard* do sistema

operativo. Assim, carregando o *clipboard* do sistema operativo com a resposta impulsiva que se pretende utilizar como filtro (após a conversão da frequência de amostragem da resposta impulsiva de 48KHz para 22KHz requerida pelo programa), basta seleccionar o sinal registado em ambiente anecóico e executar a operação de convolução para se obter o resultado da convolução dos dois sinais (LAE 2011).

Depois de medidas as respostas impulsivas no espaço acústico em estudo, este programa permite ainda obter os parâmetros acústicos segundo as normas estabelecidas no ISO 3382, tais como o tempo de reverberação T_{20}, T_{30} e o tempo de reverberação com intervalo dinâmico definido pelo utilizador, o tempo de decaimento inicial EDT (*early decay time*), a clareza C_{50} e C_{80} bem como a definição. Permite também de forma simples, obter os parâmetros acústicos que necessitam de respostas impulsivas binaurais, como o IACC bem como dos parâmetros que necessitam de respostas impulsivas medidas com recurso a um microfone omnidirecional e um outro figura-de-oito, como é o caso da fracção lateral (LF). Neste caso, o programa especifica que a medição da resposta impulsiva deverá ser registada num ficheiro estéreo, com a medição registada pelo microfone omnidirecional no canal esquerdo e a medição registada pelo microfone figura-de-oito no canal direito (LAE 2011).

Ainda no campo das respostas impulsivas, o Aurora possui o módulo *Flatten Spectrum*, que permite obter a resposta inversa e, em teoria, corrigir as não-linearidades de um determinado sistema electroacústico. No fundo, este módulo funcionará como que um filtro igualizador, corrigindo a resposta de um sistema, tornando a sua resposta final praticamente linear (LAE 2011).

2.6.1 Método do Varrimento Frequencial Exponencial

O sinal de teste de varrimento frequencial exponencial com uma deconvolução não periódica, providencia uma melhor rejeição ao ruído que o método *MLS* com a mesma duração e pelo facto de os efeitos não-lineares serem completamente separados da resposta linear. Uma utilização de um único varrimento longo evita problemas no caso de um sistema possuir variações temporais (Farina 2007).

A expressão matemática que define este sinal de teste é dada por:

$$s(t) = \sin\left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \left(e^{\left(\frac{1}{T}\right)\cdot\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1\right)\right] \tag{10}$$

onde ω_1 representa a frequência angular inicial e ω_2 a frequência angular final do varrimento, com uma duração de T segundos (Farina 2007).

Quando o sinal, que possui uma amplitude constante, seguido de alguns segundos de silêncio, é reproduzido num altifalante e a resposta do espaço acústico é registada por um microfone, o sinal registado exibe a reverberação, o ruído e as distorções não-lineares presentes (Farina 2007).

Aquando da geração do sinal de varrimento frequencial exponencial, o próprio programa guarda no *clipboard* do sistema operativo o filtro inverso, para após a reprodução do sinal de varrimento frequencial exponencial no espaço acústico e do registo da respectiva resposta, seja possível executar a convolução, obtendo assim a medição da resposta impulsiva do espaço acústico (Farina 2007).

Este sinal, ao contrário do sinal de varrimento frequencial linear que possui um espectro linear e semelhante a um ruído branco, possui um espectro semelhante a um ruído rosa devido ao facto de começar de forma mais lenta nas baixas frequências e passando de forma mais rápida nas frequências mais elevadas, com um decaimento de 3dB/oitava numa representação espectral de Fourier. No caso do varrimento frequencial

linear, dada a sua constante amplitude, este possui uma menor relação sinal-ruído a frequências baixas. Por este motivo, era frequente as medições serem efectuadas em duas fases, uma primeira com um varrimento mais lento para as baixas frequências, e uma segunda fase com um varrimento mais rápido para a medição nas frequências médias e mais elevadas (Farina 2007). A figura 18 permite visualizar uma comparação efectuada por Angelo Farina, aos dois sinais abordados.

A expressão matemática que define o varrimento frequencial linear é dada por:

$$s(t) = \sin(k \,.\, t^2) \tag{11}$$

onde *k* é a velocidade do varrimento (Farina 2007).

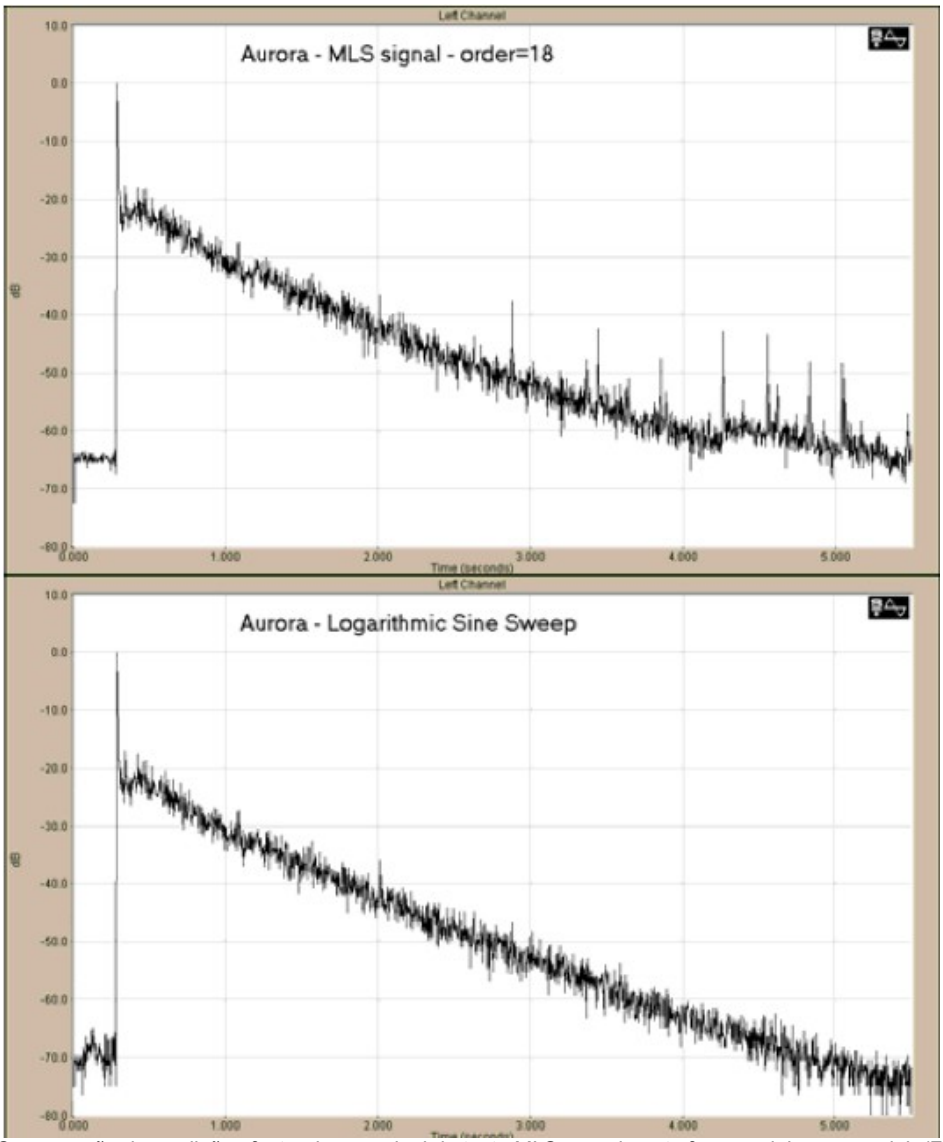


Figura 20: Comparação de medição efectuada com sinal de teste MLS e varrimento frequencial exponencial (Farina 2007)

2.7 Sistema de simulação desenvolvido por Kanaco Ueno, Hideki Tachibana e outros investigadores

No domínio da simulação de campos sonoros, a investigadora Kanaco Ueno (*Institute of Industrial Studies, University of Tokyo*) em conjunto com outros investigadores tem vindo a desenvolver desde cerca do ano 2000 um sistema que permita a um músico estar num espaço anecóico a interpretar uma peça musical como se estivesse acusticamente inserido numa determinada sala de espectáculo, e assim ouvir o resultado da sua interpretação nessa mesma sala (Ueno et al 2007), (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

O sistema que a autora propõe, consiste numa câmara anecóica, num conjunto de 6 altifalantes dispostos a uma distância de 2 m do centro do sistema, e um conjunto de 6 respostas impulsivas registadas previamente no palco de uma sala de espectáculos e respectivos processadores de convolução em tempo real (Ueno et al 2007), (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

O registo das respostas impulsivas do palco das várias salas de espectáculo é feito utilizando um microfone direccional, registando a resposta impulsiva no mesmo ponto 6 vezes, em que tal como se pode verificar pela figura 21, entre cada registo, o microfone é rodado em 90º, captando assim a resposta da sala nos seus 3 eixos ortogonais naquele ponto (cima, baixo, frente, trás, lado esquerdo e lado direito), e não um microfone omnidirecional, tal como é usual fazer-se nas medições acústicas. Cada uma das 6 respostas obtidas estará depois associada a um determinado altifalante e processador de convolução do sistema de simulação (Ueno et al 2007), (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

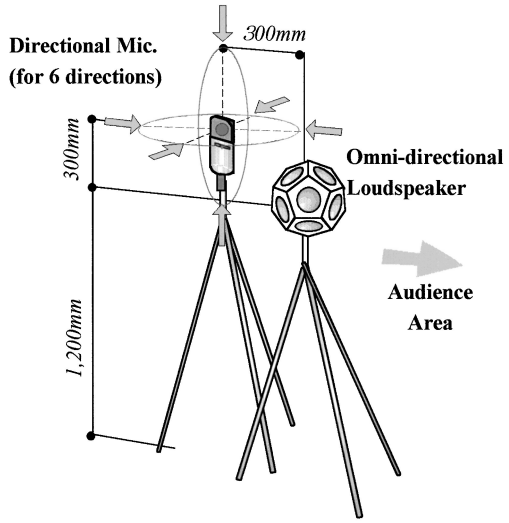


Figura 21: Sistema de medição e captação de respostas impulsivas propostas pelos autores (Ueno et al 2007) (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

O sistema de simulação de campo acústico é constituído, tal como a figura 22 demonstra, por um total de seis altifalantes voltados para o centro do sistema (a uma distância de 2 m), distribuídos dois a dois pelos 3 eixos ortogonais, à semelhança do sistema de captação de respostas impulsivas (cima, baixo, frente, trás, lado esquerdo e lado direito). A cada altifalante está associado um canal de um processador de convolução com a respectiva resposta impulsiva registada, e reproduzirá o resultado da convolução em tempo real dessa mesma respectiva resposta impulsiva com o sinal registado da interpretação musical do músico na câmara anecóica (que se encontra a tocar no centro do sistema). A captação da interpretação real do músico, é feita utilizando um microfone omnidirecional, colocado à frente do músico (Ueno et al 2007), (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

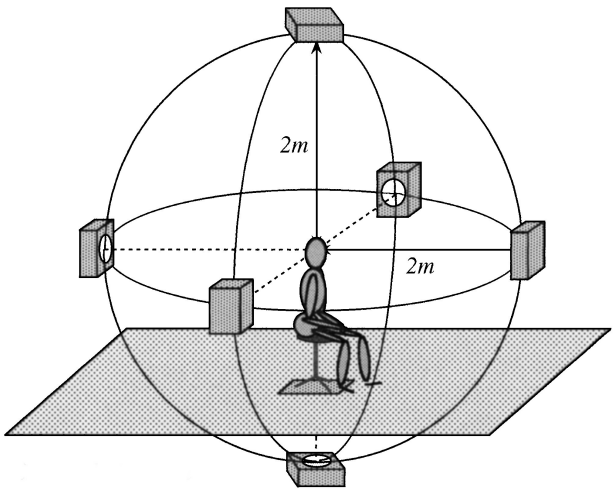


Figura 22: Esquema de disposição de altifalantes e músico no espaço anecóico (Ueno et al 2007) (Ueno et al 2001), (Ueno et al 2002), (Ueno e Tachibana 2003).

2.8 MS – *Middle Side*

O MS, acrónimo de *middle/side,* é uma técnica de processamento de sinais que é bastante utilizada por profissionais de áudio e também por músicos, sobretudo em captações estéreo, mas também em ambiente de mistura e processamento de áudio para criação do chamado pseudo-estéreo.

Esta técnica surgiu na década de 50 do século passado, quando a rádio estatal Dinamarquesa começou a fazer as suas primeiras experiências de transmissão de programas radiofónicos em estéreo, e assim desejava ter um sistema que providenciasse tanto um bom sinal monofónico como estéreo em simultâneo. (Streicher e Everest 1998).

O conceito da técnica *middle/side* é simples. O sinal M é a captação monofónica providenciada por um único microfone, com o seu eixo de captação alinhado com o centro da fonte sonora. Embora as primeiras experiências fizessem uso de um microfone cardióide, na prática, qualquer padrão pode ser utilizado como M. (Streicher e Everest 1998).

A informação direccional é providenciada por um microfone bidireccional, alinhado lateralmente de tal forma que o seu eixo de rejeição esteja alinhado com o eixo de captação do microfone utilizado para M. O microfone S deverá estar o mais coincidente possível com o microfone M, minimizando assim as diferenças temporais de sinais entre os dois microfones, logo, minimizando ao máximo as diferenças de fase. Pelo facto de os dois lóbulos do microfone bidireccional estarem apontados respectivamente para o lado esquerdo e direito, e o seu nulo directamente para a fonte sonora, este sinal contém essencialmente informação direccional e de ambiente (reverberação), apresentando pouca componente directa. Na figura 23 é possível ver a configuração dos dois microfones. (Streicher e Everest 1998).

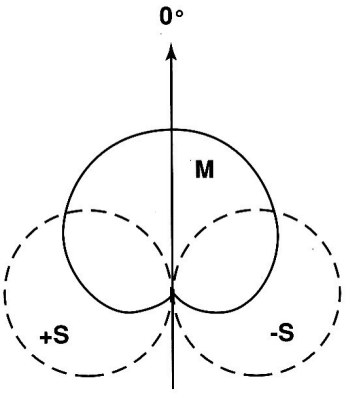


Figura 23: Configuração básica do MS. O microfone M é apontado no eixo a 0º, enquanto que o microfone S, bidireccional, tem o seu eixo nulo alinhado com o eixo principal do microfone M. Por convenção, o lóbulo positivo fica orientado para a esquerda da imagem estéreo (Streicher e Everest, 1998).

Os dois sinais M e S não devem ser escutados directamente, uma vez que são componentes de soma e diferença que necessitam de ser convertidos num formato estéreo (Talbot-Smith 1999). Assim, combinando os sinais de M e S, dois sinais podem ser criados: M+S e M-S, criando assim um novo sinal para cada um dos canais estéreo, tal como o esquema da figura 24 demonstra. (Streicher e Everest 1998).

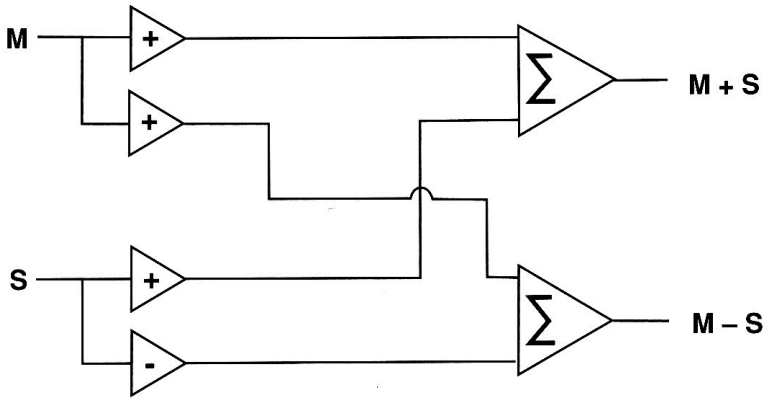


Figura 24: Esquema do circuito da matriz necessária para descodificar os sinais M e S em canais de saída esquerdo e direito. (Streicher e Everest 1998).

A figura 25 permite ver que somando os sinais de M e S (M+S), e utilizando um microfone omnidirecional como M, um sinal cardióide é formado no canal esquerdo. Pelo contrário, subtraindo M-S, podemos obter um sinal cardióide no canal direito. (Streicher e

Everest 1998). Isto pode facilmente ser obtido, através da obtenção do sinal M, S e invertendo a fase do sinal S. Estes dois sinais podem facilmente ser obtidos através de uma superfície de controlo de áudio, encaminhando o sinal M para ambos os canais, esquerdo e direito, encaminhando o sinal S para o canal esquerdo (fazendo assim a soma M+S nesse mesmo canal de saída) e encaminhando para o canal direito a duplicação do sinal S, com a mesma amplitude mas de fase invertida (fazendo assim M-S).

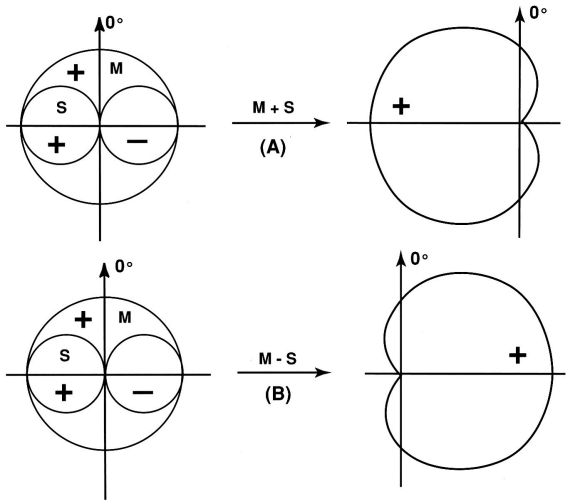


Figura 25: Resultado da soma e subtracção de M e S, quando é utilizado um microfone omnidirecional no lugar de M. (Streicher e Everest 1998).

Variando a quantidade das componentes M e S na matriz de descodificação, a largura da imagem estéreo resultante pode assim ser facilmente alterada. Se a componente S for reduzida a 0, então a saída do canal esquerdo e direito serão idênticas e estarão em fase (resulta apenas no sinal de M), enquanto que se for a componente M a ser reduzida a 0, os sinais de saída dos canais esquerdo e direito serão também idênticos, mas fora-de-fase (resulta apenas no sinal de S) (Streicher e Everest 1998).

Este processo de soma e subtracção das componentes M e S, podem resultar em vários padrões semelhantes para os canais de saída, dependendo do padrão de polaridade do microfone utilizado para M, bem como da razão de amplitude entre M e S. Pela figura 26, podem-se ver os vários padrões que se podem obter com esta técnica.

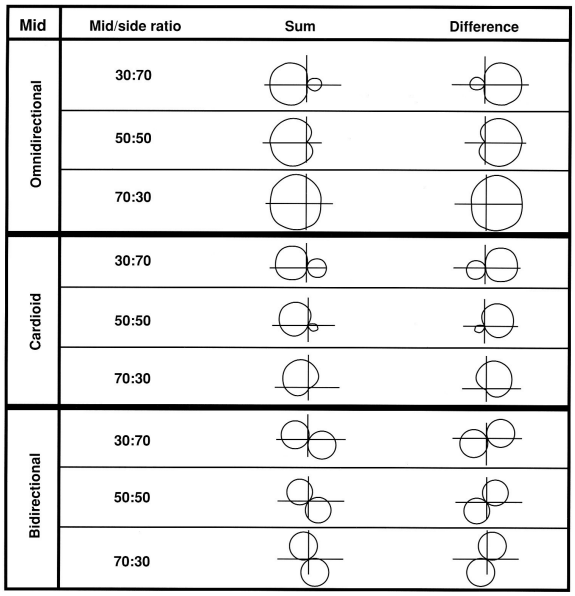


Figura 26: 9 de várias transformações possíveis utilizando a técnica MS. São mostrados 3 tipos de relação de sinal entre M e S, bem como 3 padrões de polaridade diferentes para o microfone M (Streicher e Everest 1998).

3. Ensaios Acústicos

Para efeitos de trabalho de campo da presente tese, houve a necessidade de procurar salas de espectáculo para se efectuar e registar medições acústicas para servirem de “matéria prima” para as comparações que seriam necessárias fazer na avaliação e análise do sistema de simulação proposto.

Para tal foi necessário averiguar quais as salas onde seria possível obter acesso e fazer deslocar todo o equipamento necessário, bem como as respectivas características acústicas e de envolvente mais interessantes para o desenvolvimento do trabalho em causa. Foi igualmente necessário elaborar uma metodologia para os ensaios e estudar qual o melhor *setup* experimental a utilizar nas medições acústicas.

3.1 Salas analisadas

Tal como acabado de referir, houve uma pesquisa de várias salas onde pudessem ser efectuadas e registadas medições acústicas. Após avaliação de várias possibilidades, tendo em conta as características das salas e também a possibilidade de acesso às respectivas salas, foram efectuadas e registadas medições acústicas no palco de três salas de espectáculo diferentes da cidade do Porto.

Na selecção das salas e respectivos palcos, tal como já foi referido, houve a intenção de procurar características acústicas diferentes, sendo portanto salas propícias a diferentes tipos de repertório/espectáculos. Assim, as medições acústicas foram efectuadas nos palcos do Teatro Helena Sá e Costa, do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e da Sala Suggia da Casa da Música do Porto.

3.1.1 Teatro Helena Sá e Costa

O Teatro Helena Sá e Costa, pertencente à Escola Superior de Música, Artes e Espectáculo do Instituto Politécnico do Porto, localiza-se no antigo pátio do edifício daquela que foi a Escola Normal do Porto. Nesse local, foi então projectado e construído

este teatro com 686 m^3 de volume, constituído por duas plateias e um balcão, sendo a sua capacidade distribuída por 180 lugares sentados nas primeira e segunda plateias e 50 lugares no seu balcão, situado por cima da segunda plateia. As figuras 27 e 28 permitem observar as características desta sala.



Figura 27: Fotografia da sala do Teatro Helena Sá e Costa

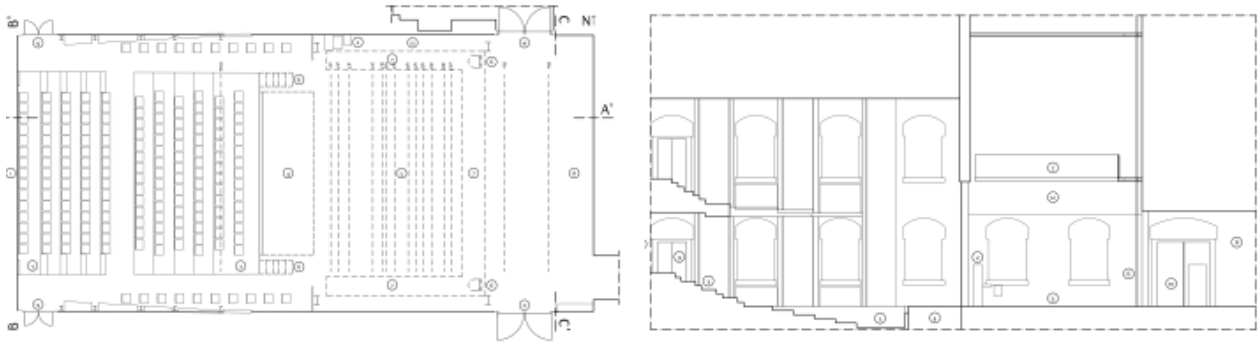


Figura 28: Planta e corte do Teatro Helena Sá e Costa

Este teatro possui um palco com torre de cena de 13 metros de altura e 16 metros de profundidade.

O Teatro Helena Sá e Costa, é uma sala que foi projectada para ter acústica variável, havendo alguns painéis de madeira no tecto e uma canópia na boca de cena, cujos ângulos podem ser modificados. Neste caso, o aspecto variável acabou por não ser utilizado recorrentemente, e por esta razão, é uma sala que é mais propícia a representações teatrais, onde a palavra é um elemento fundamental, com um tempo de reverberação médio de 1,14 s (Santiago e Inácio 2007).

Por estar situada no centro da Escola Superior de Música, Artes e Espectáculo do Porto, é uma sala em que o seu isolamento acústico não é o melhor, havendo mesmo a necessidade de fechar o acesso às salas de estudo da escola quando há espectáculos no teatro, para que não haja na sala ruído externo durante os espectáculos.

3.1.2 Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

Situado na Praça de Pedro Nunes, junto ao liceu Rodrigues de Freitas, o auditório do Conservatório de Música do Porto, é um edifício isolado do resto da escola, onde existe o grande auditório, uma pequena sala de recitais, e salas para ensaios de orquestra. Esta sala foi projecta a pensar na apresentação de concertos e recitais de música câmara, embora seja utilizada também para recitais a solo e para concertos de orquestra sinfónica, devido às dimensões do seu palco que permitem acolher uma orquestra desta dimensão.

As paredes laterais da sala de concerto, são todas revestidas a madeira, sendo que na zona do palco, têm uma característica difusora ao passo que na zona da plateia, possuem características reflectoras. A sala está equipada com uma concha acústica que foi projectada para permitir a configuração e adaptação da profundidade do palco a diferentes tipos de formações orquestrais. Esta adaptabilidade traduz-se, para além de uma adaptação do volume do espaço, em diferentes tempos de reverberação, que poderão variar entre 1,3 e 1,4 s (Inácio 2011).

Através das figuras 29 e 30 é possível visualizar as características deste auditório.



Figura 29: Fotografia do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [Fonte: www.inacoustics.com]

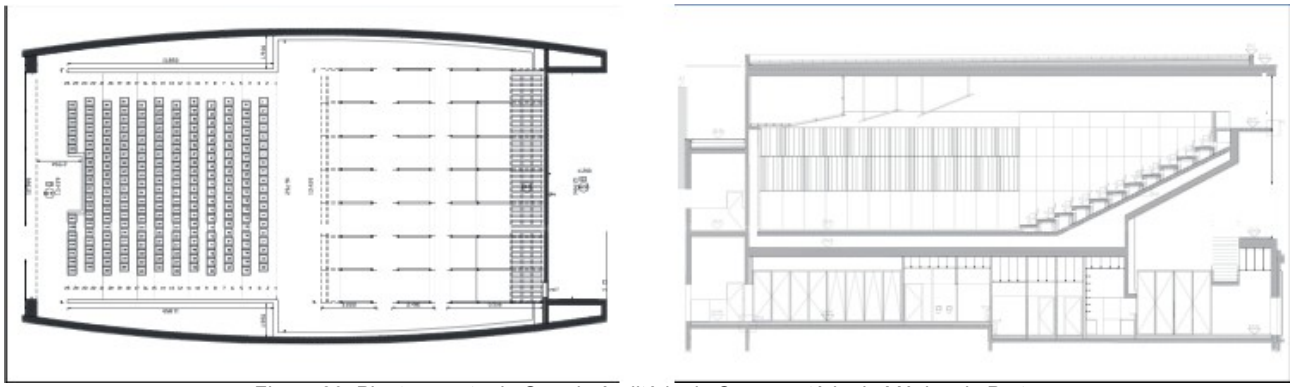


Figura 30: Planta e corte do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

3.1.3 Sala Suggia da Casa da Música do Porto

A Sala Suggia, é a principal sala de concertos da cidade do Porto e localiza-se no interior do edifício da Casa da Música do Porto. É uma sala de grandes dimensões, com uma área de 1100m^2, volume de 18225m^3 e lotação para cerca de 1200 lugares, distribuídos por uma plateia, camarotes e lugares de coro, situados por trás do palco.

É por isso uma sala que possuiu características apropriadas para espectáculo/concertos de música orquestral/sinfónica, podendo na mesma acolher concertos de outros géneros musicais como grupos de música de pequena dimensão, espectáculos corais bem como espectáculos recorrendo a equipamento electroacústico,

como por exemplo, jazz ou rock.

Tal como é possível visualizar nas figuras 31 e 32, as paredes laterais da sala Suggia, são feitas de madeira, tendo a forma de difusores acústicos com cerca de 2,5 m de altura desde a zona traseira do palco até ao final da primeira plateia. Existe também uma réplica de orgão de tubos em ambos os lados da sala na zona do palco que permitem também difusão acústica. O resto da parede lateral da plateia e palco é caracterizada por superfícies planas, ou seja, com características reflectoras e por ter alguns vidros ondulados nas paredes laterais. A sala caracteriza-se também pela existência de dois vidros ondulados de grandes dimensões, tanto por trás da plateia, como por trás do coro.



Figura 31: Fotografia da Sala Suggia da Casa da Música [Fonte: www.casadamusica.com]

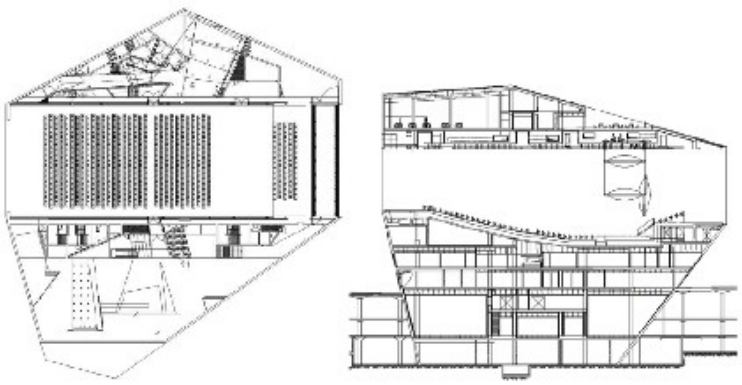


Figura 32: Planta e corte da Sala Suggia da Casa da Música

3.2 Metodologia de ensaio

Foi preparado um sinal com 1 ciclo de varrimento frequencial exponencial com uma duração de 20s seguidos de 10s de silêncio, com frequência inicial de 80 Hz e final de 20000Hz e amplitude máxima de 16384 bits recorrendo ao módulo de geração de sinais de varrimento sinusoidal do *software* Aurora, tal como é possível verificar na figura 33. A este sinal, foram automaticamente aplicados pelo mesmo módulo de geração de sinais os *fade-in* e *fade*-out de 0,1s necessários tal como descrito no capítulo "*Software* de Análise, Medição e Processamento Acústica". Este sinal foi depois reproduzido numa fonte dodecaédrica *DO 12 – AWS* colocada no palco sendo simultaneamente captado por 6 microfones omnidirecionais *BSWA Tech MP 201* e pelo microfone *SoundField,* colocados igualmente no palco.

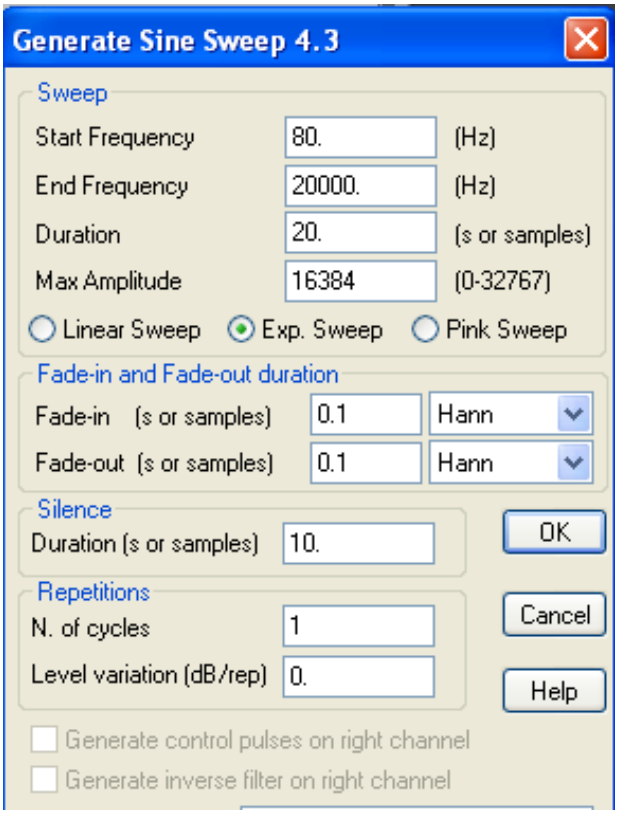


Figura 33: Características do sinal de varrimento frequencial exponencial gerado com módulo Generate Sine Sweep 4.3

Uma vez que se pretendia que a representação fosse na perspectiva de um músico situado no palco, foram efectuadas 5 recolhas de informação de vários

posicionamentos/distanciamentos da fonte dodecaédrica em relação ao ponto de medição no centro do palco de cada uma das salas. Os microfones omnidirecionais foram todos colocados nos palcos, formando um hexágono, com um dos vértices colocado na frente do palco, e o microfone *SoundField* no centro do hexágono, estando a fonte na primeira recolha, do lado direito do microfone *SoundField* a 1,20 m de distância. Tendo em conta esta distância, para que os microfones omnidirecionais não se situassem muito próximos da fonte dodecaédrica, e por uma questão de espaço disponível nos palcos, estes foram colocados a uma distância de 1,70 m do centro do hexágono, isto é, do microfone *SoundField*. Esta disposição, teve como objectivo recolher informação à volta do microfone *SoundField* para posteriormente se poder fazer uma avaliação, caso fosse necessário, de reflexões que pudessem ser evidenciadas nas respostas dos sinais X, Y, Z com os microfones omnidirecionais de referência. Todos os microfones (omnidirecionais e *SoundField)* bem como a fonte dodecaédrica foram colocados a uma distância de 1,20m do chão, respeitando assim a informação presente na norma ISO 3382. As figura 34 a 38 permitem visualizar a disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica nos palcos, para as recolha 1 a 5. Esta disposição dos microfones omnidirecionais, foi também pensada com a finalidade de validar a direcionalidade das componentes recolhidas pelo microfone *SoundField.*

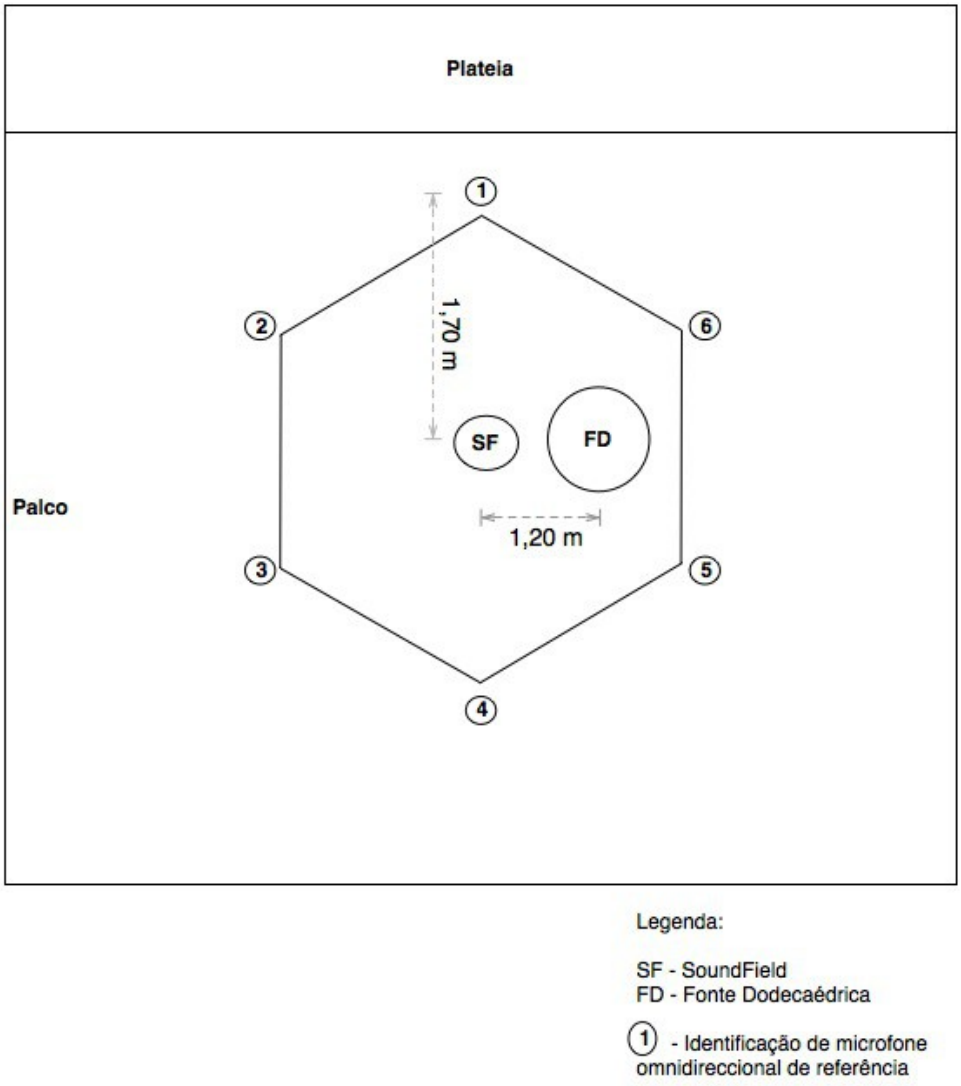


Figura 34: Disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica no palco para recolha 1

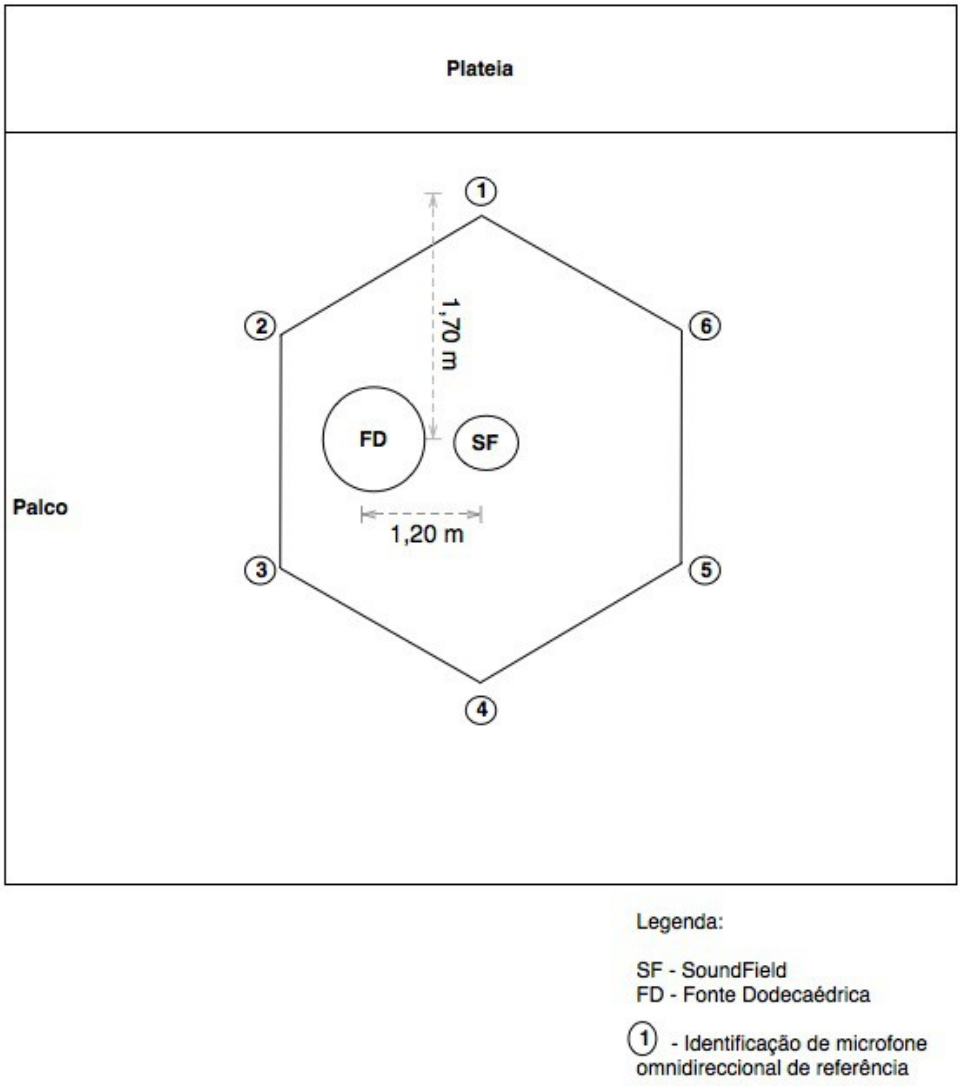


Figura 35: Disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica no palco para recolha 2

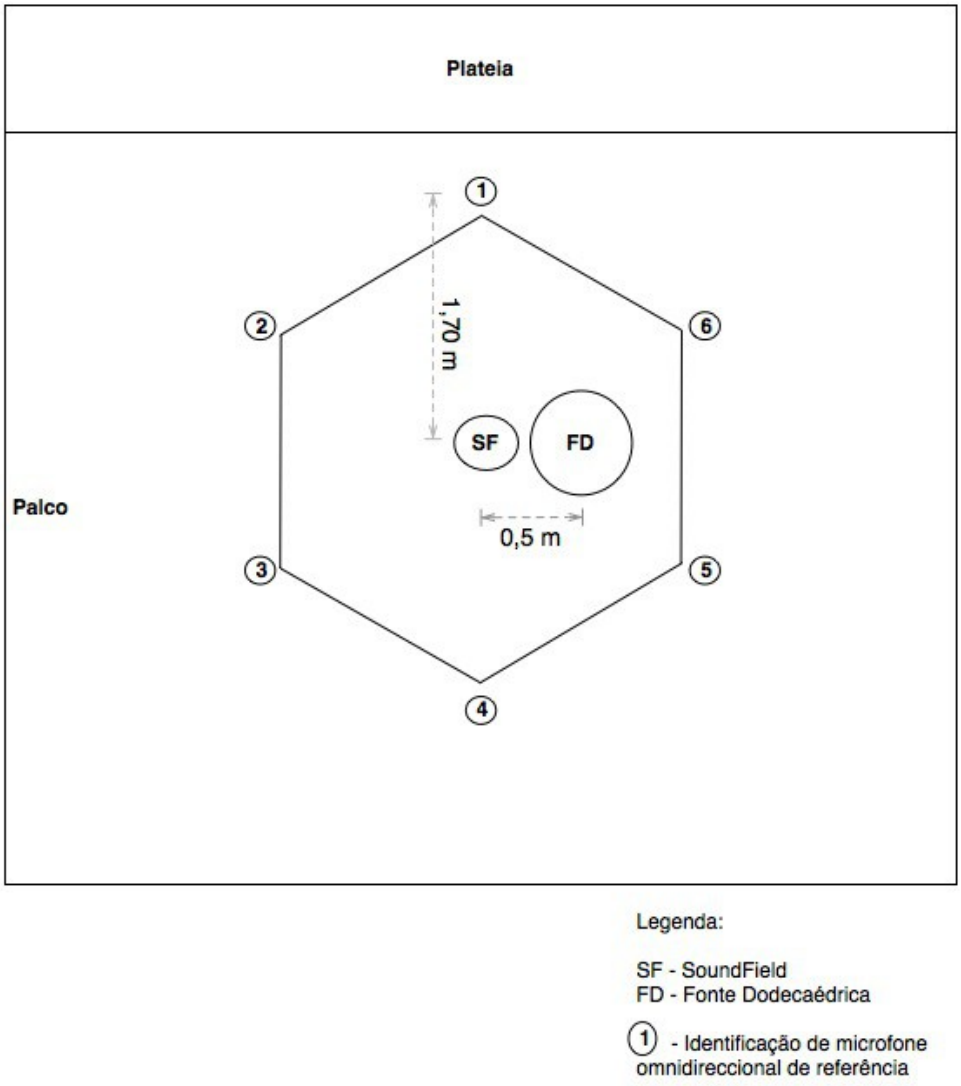


Figura 36: Disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica no palco para recolha 3

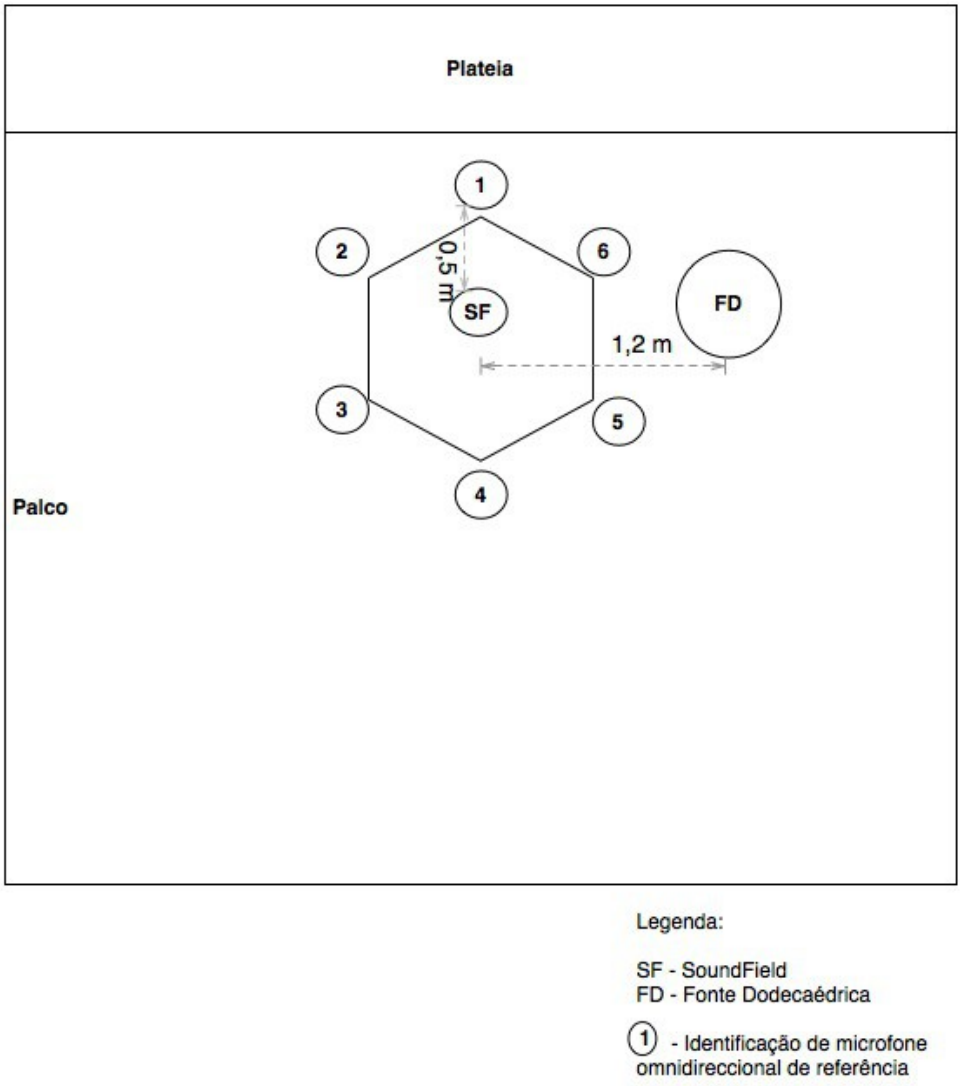


Figura 37: Disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica no palco para recolha 4

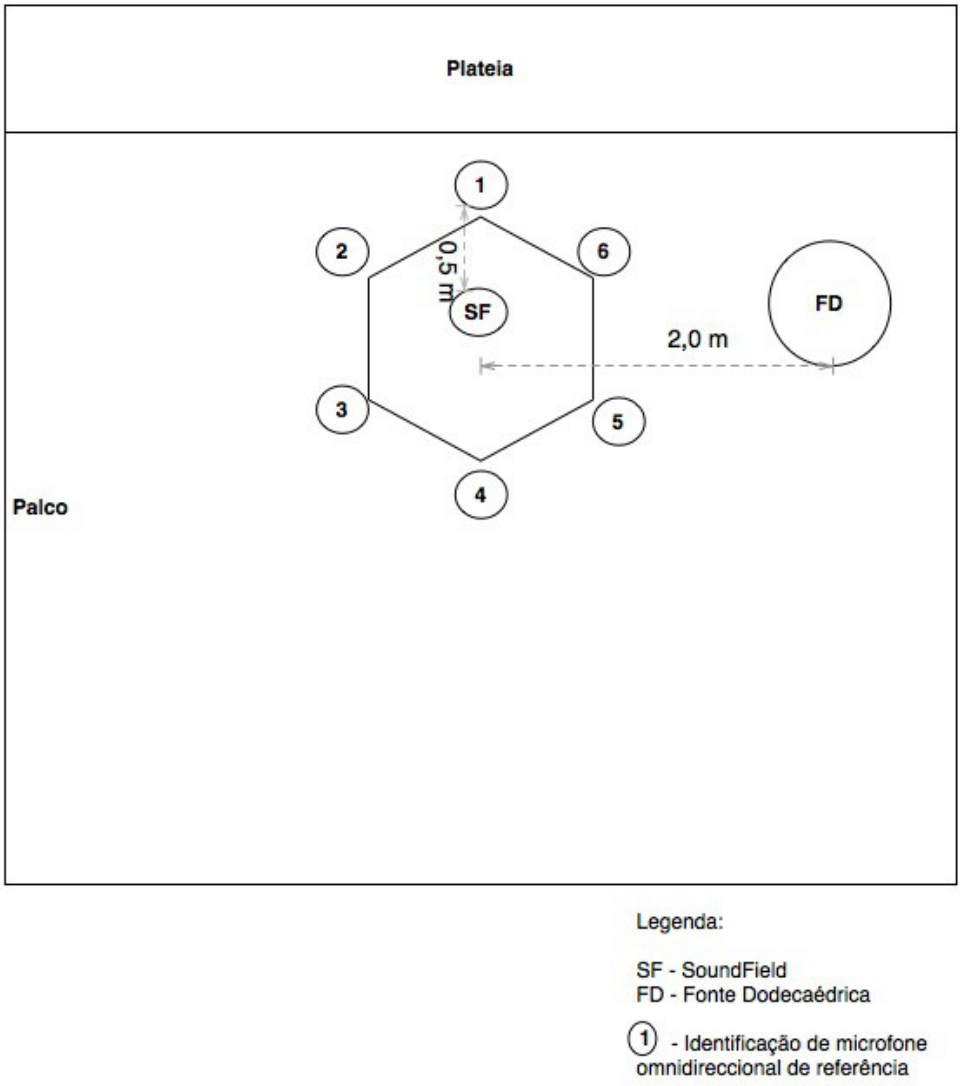


Figura 38: Disposição dos vários microfones e fonte dodecaédrica no palco para recolha 5

Houve a intenção de verificar a resposta impulsiva registada pelos microfones omnidirecionais e pela componente W do *SoundField*, apenas para conferir a compatibilidade do sinal obtido por este microfone, com os microfones omnidirecionais de referência geralmente utilizados para a obtenção de respostas impulsivas em espaços acústicos. Esse procedimento foi efectuado na recolha 4, onde os microfones omnidirecionais foram todos colocados o mais próximo possível do *SoundField* e com a fonte dodecaédrica a distanciar 1,20m do *SoundField*.

Por forma a se poder fazer uma melhor avaliação do sistema, houve também a intenção de observar as respostas impulsivas quando a fonte se encontra mais afastada e mais próxima do *SoundField* tendo sido efectuadas medições com um distanciamento

entre fonte e *SoundField* de 0,50 m (recolha 3) e 2,0 m (recolha 5).

As respostas foram todas registadas e processadas posteriormente com o *software* Aurora para se obter as respectivas respostas impulsivas de cada microfone e de cada uma das quatro componentes do *SoundField*, obtendo assim as respostas impulsivas que foram posteriormente utilizadas no sistema de simulação, e com as quais foram comparados os resultados obtidos por esse mesmo sistema de simulação.

3.3 *Setup* experimental

O *setup* utilizado para efectuar as medições nos palcos, consistiu num computador portátil com o *software* Aurora instalado e o sequenciador áudio *Digital Performer 6* para registo dos sinais, uma interface de áudio *RME Fireface 800*, uma interface *Motu 8 PRE*, um microfone *SoundField* com a respectiva unidade de alimentação/processamento *MKV,* seis microfones omnidirecionais *BSWA Tech MP 201* e uma fonte dodecaédrica *DO 12 – AWS* e respectivo amplificador *RAD Inter MD 700* para reprodução de sinal de varrimento sinusoidal exponencial.

Para receber no computador todos os sinais captados pelos microfones e enviar do computador o sinal de teste para a fonte omnidirecional, foi utilizada a interface *RME Fireface 800*, visto que esta possui 4 pré-amplificadores de microfone utilizados para receber as quatro componentes do *SoundField* e possui ainda entradas ADAT, que foram utilizadas para receber da interface *MOTU 8 PRE* os sinais captados pelos 6 microfones omnidirecionais que formavam o hexágono. Esta segunda interface, serviu assim como complemento à primeira, de modo a poder fazer a pré-amplificação e alimentação dos sinais dos 6 microfones omnidirecionais.

Foi ainda utilizado o processador *MKV* da *SoundField* para alimentar, pré-amplificar e extrair as quatro componentes, W, X, Y e Z, do microfone *SoundField.* A figura 39 representa o esquema de ligação de todo o equipamento utilizado nas medições efectuadas nos palcos.

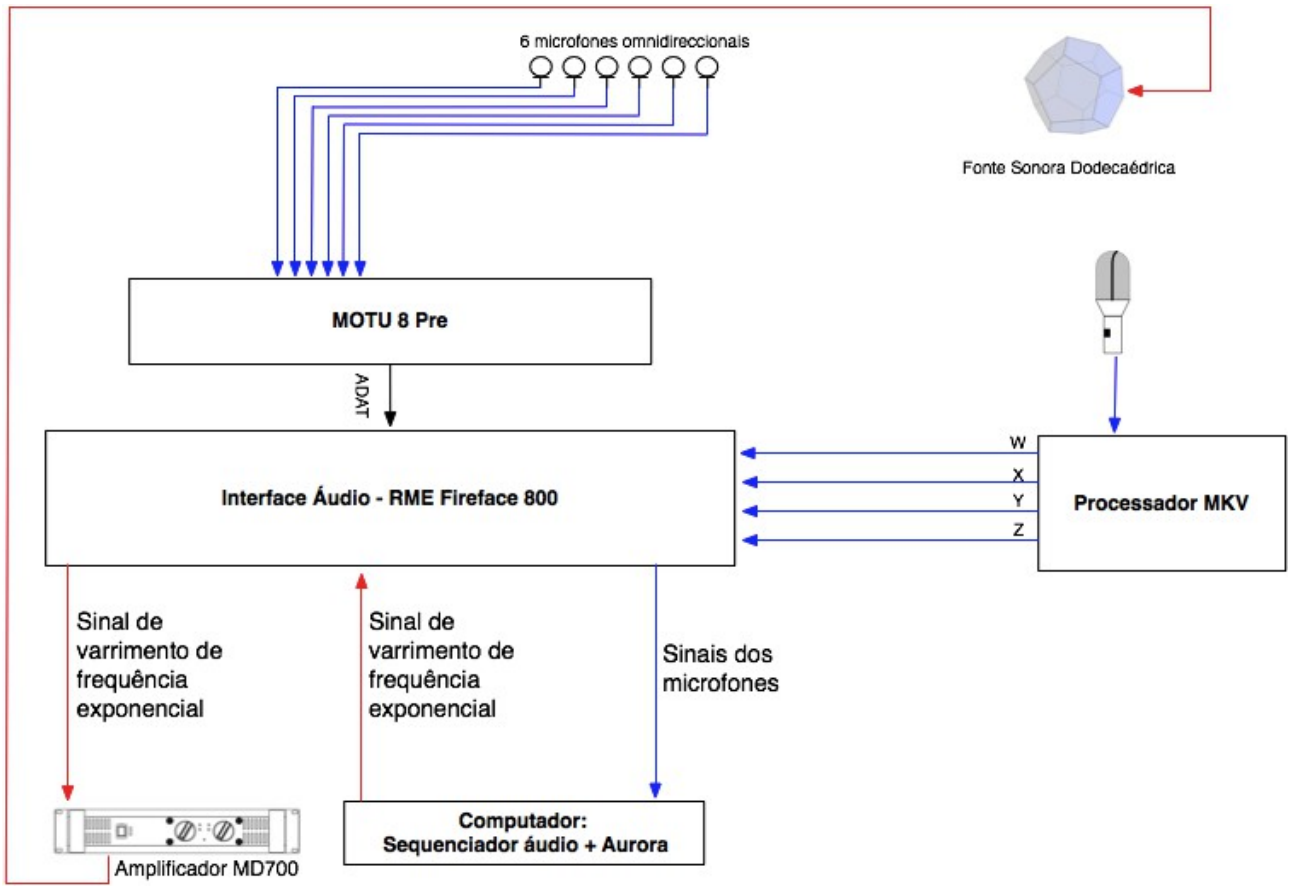


Figura 39: Esquema de ligações do equipamento para registo e medições das respostas impulsivas



Figura 40: Equipamento utilizado para registo e medições das respostas impulsivas



Figura 41: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco do Teatro Helena Sá e Costa



Figura 42: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco do Teatro Helena Sá e Costa



Figura 43: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto



Figura 44: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto



Figura 45: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco da Sala Suggia da Casa da Música

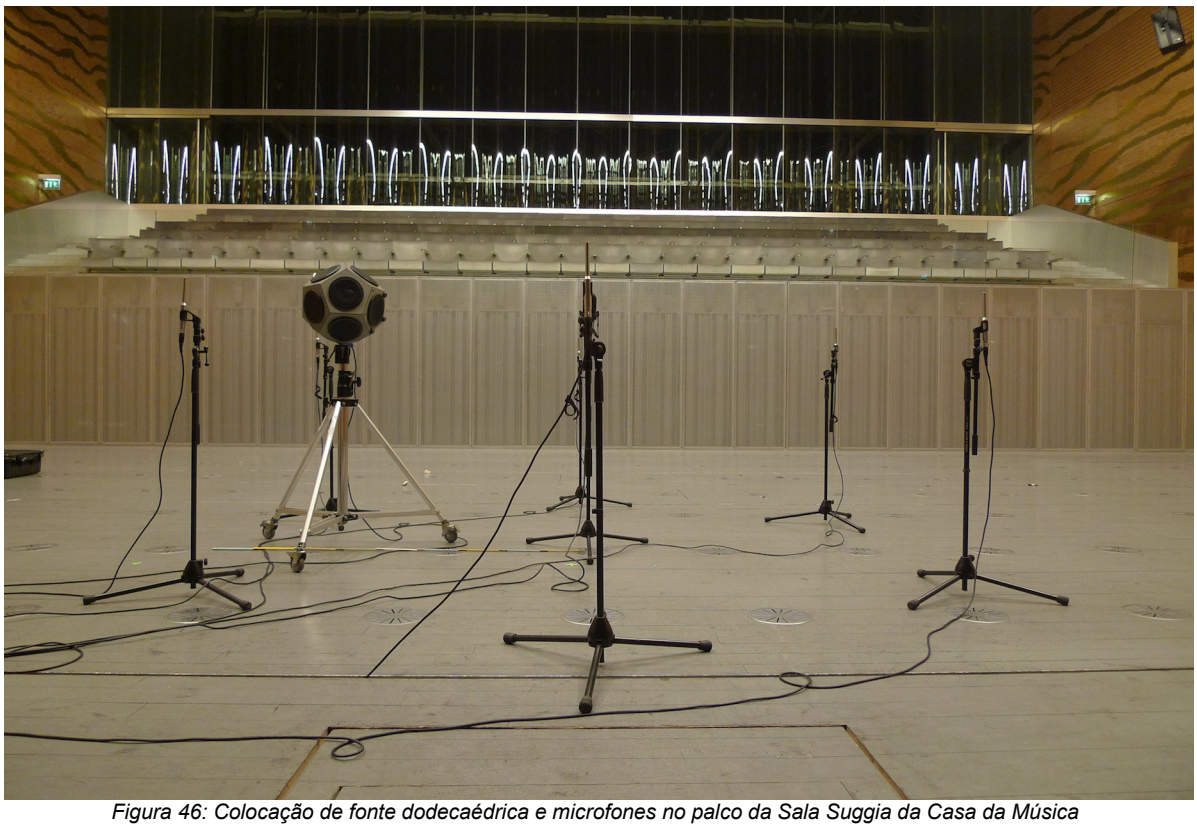


Figura 46: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco da Sala Suggia da Casa da Música



Figura 47: Colocação de fonte dodecaédrica e microfones no palco da Sala Suggia da Casa da Música

4. Sistema de Simulação

Para a simulação da acústica dos espaços, foi utilizado um sistema baseado no estudo que Kanaco Ueno e os seus colegas investigadores têm vindo a desenvolver. Tal como descrito no capítulo 2.7, a autora utiliza um sistema com 6 altifalantes dispostos em três eixos ortogonais (X, Y e Z), sendo que cada eixo possui 2 dos 6 altifalantes voltados para o centro do sistema. Cada um dos 6 altifalantes reproduz a convolução de uma resposta impulsiva obtida individualmente com recurso a um microfone cardióide, num processo que é repetido 6 vezes, uma para cada uma das direcções, tal como descrito no sub-capítulo 2.7.

Nesta tese, é proposto utilizar parte desse sistema de reprodução (a disposição dos 6 altifalantes numa câmara anecóica) mas associando a captação e registo das respostas impulsivas com recurso ao microfone *SoundField*, em vez de utilizar um microfone cardióide em 6 orientações diferentes no mesmo ponto. A ideia de utilizar o microfone *SoundField* para registar as respostas impulsivas, deriva do facto de este microfone ter como saída quatro sinais, sendo um deles uma componente omnidirecional e as restantes três equivalentes a captações efectuadas com microfones figura-de-oito.

Tendo este conhecimento presente, foi pensado testar se aplicando a técnica MS abordada no sub-capítulo 2.8 a cada um dos três eixos ortogonais do sistema de reprodução com os 6 altifalantes, se se poderia obter uma boa simulação da acústica das salas originais, sabendo que este processamento, permite reproduzir a direcionalidade das várias componentes obtidas, segundo o princípio de soma e cancelamento a nível electrónico das componentes omnidirecional com a respectiva componente figura-de-oito.

Assim, para cada uma das componentes X, Y e Z, o seu sinal figura-de-oito foi duplicado e invertida a fase do sinal duplicado, sendo o sinal original enviado para um canal e o sinal duplicado e invertido para o canal oposto do mesmo eixo, somando a cada um dos canais a componente omnidirecional, tal como é possível verificar na figura 48.

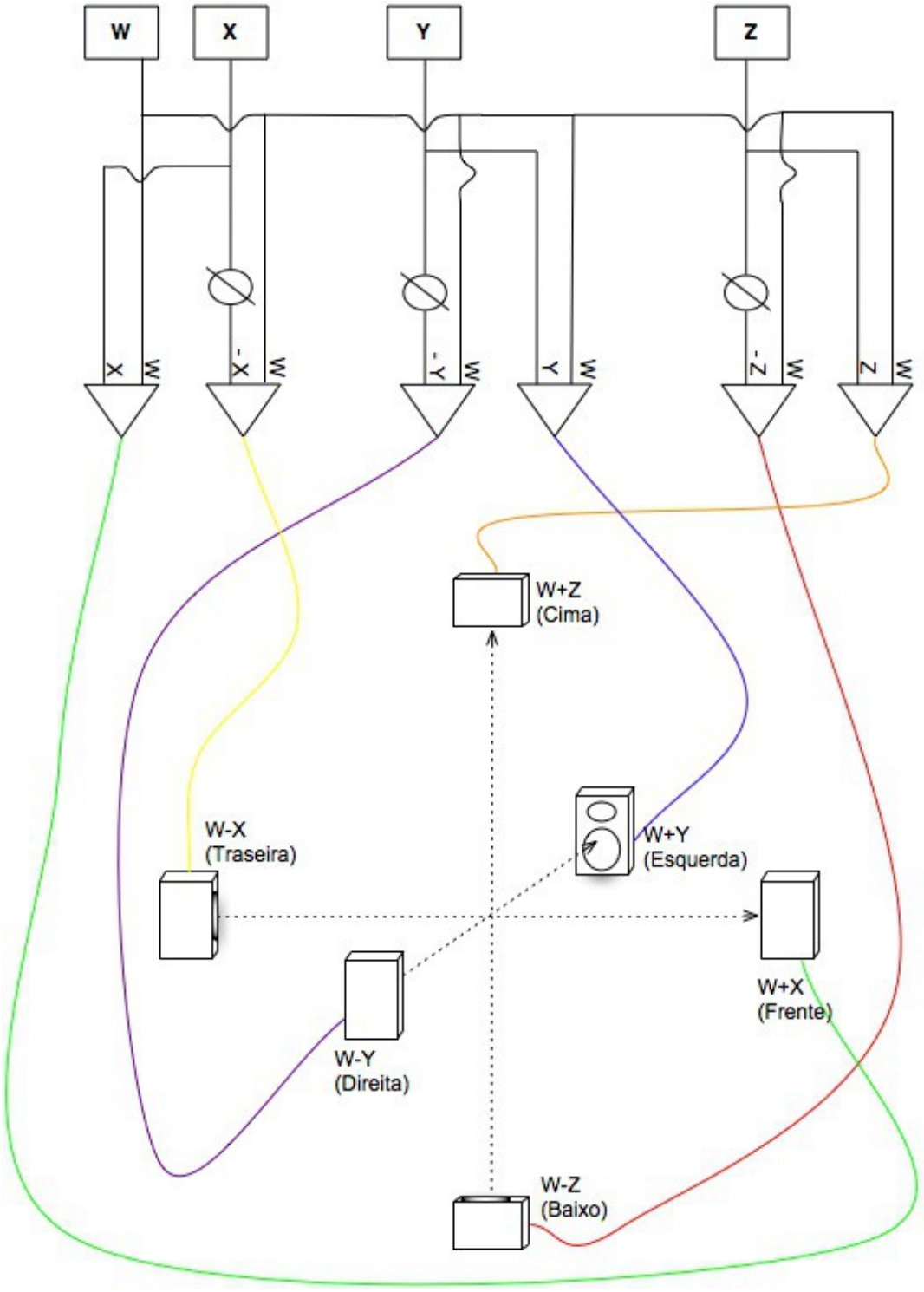


Figura 48: Esquema de processamento dos sinais registados e encaminhamento para sistema de reprodução

A montagem do sistema de simulação previamente pensado foi efectuada numa

câmara semi-anecóica (pertencente aos serviços de áudio do IPP), onde existe um ambiente acústico mais controlado, com recurso a 6 altifalantes *Genelec 1029A*, uma unidade de interface áudio *RME Fireface 800* e um computador com *software* de sequenciação *Digital Perfomer 6.*

Neste sequenciador, foi efectuado todo o encaminhamento e processamento de sinal necessário para reproduzir no sistema de simulação o resultado das respostas impulsivas previamente obtidas e registadas nos três espaços. Para se avaliar e poder comparar a reprodução das respostas impulsivas no sistema de simulação com as respostas impulsivas originais obtidas nos respectivos locais, foi colocado no centro deste sistema o mesmo microfone *SoundField* captando e registando no sequenciador o resultado da reprodução no sistema das respectivas respostas impulsivas.

Com vista a poder perceber e retirar conclusões sobre qual a relação de níveis de sinal, entre as componentes omnidirecional e figuras-de-oito dos três eixos, foram registadas as respostas com diferentes relações de sinal. Essa relação, é dada pela expressão:

$$Relação\ sinal = 10\log\left(\frac{X}{W}\right) = 10\log\left(\frac{Y}{W}\right) = 10\log\left(\frac{Z}{W}\right) \quad (dB) \tag{12}$$

O processo iniciou-se estabelecendo uma relação de sinal igual a 0 dB entre a componente omnidirecional e as componentes figura-de-oito (designada por *Sim 1*), seguindo-se depois o registo com uma relação -3dB, -6dB, +3dB e +6dB (designadas de *Sim 2* a *Sim 5* respectivamente). A tabela 2 resume as designações utilizadas nesta tese e respectiva relação de sinal entre componentes omnidirecional e figuras-de-oito.

Designação	Relação de sinal
Sim 1	0 dB
Sim 2	-3 dB
Sim 3	-6 dB
Sim 4	+3 dB
Sim 5	+6 dB

Tabela 2: Relações de sinal e respectivas designações utilizadas nas simulações efectuadas

Os altifalantes foram dispostos a 1,20m do centro do sistema, por forma a poder

manter o microfone de captação a 1,20m de altura tal como é sugerido na norma ISO 3382, excepto os altifalantes do eixo dos Z, que devido à limitação de altura da câmara utilizada, permitiu apenas que os altifalantes deste eixo distanciassem 0,90m do ponto de medição. Foi por isso calculado o atraso temporal necessário ser aplicado aos sinais de saída dos altifalantes do eixo dos Z, por forma a que esta diferença de distância fosse rectificada, e assim, houvesse um correcto alinhamento temporal dos sinais. Esse ajustamento temporal foi calculado com base na expressão:

$$Atraso\ Aplicado = \frac{diferença\ de\ distância}{velocidade\ do\ som} \tag{13}$$

Na montagem do sistema, houve ainda o cuidado de calibrar o sistema de reprodução, com recurso a um sinal de teste sinusoidal de 1000Hz, por forma a obter no ponto de medição, ou seja, no centro do sistema, o mesmo nível de pressão sonora produzido por cada um dos altifalantes.



Figura 49: Montagem do sistema de simulação na câmara utilizada como laboratório

4.1.1 Avaliação subjectiva do sistema de reprodução e simulação

Para além da avaliação do sistema de forma objectiva, através das respostas impulsivas e comparação dos parâmetros acústicos, foi preparada uma sessão para avaliação subjectiva do sistema de reprodução, para assim se poder perceber através da escuta a qualidade da reprodução do sistema proposto.

Foram gravados três excertos de uma peça musical em guitarra clássica e três da leitura de um texto por parte de um actor. As gravações foram efectuadas na mesma câmara utilizada como laboratório, e com recurso ao mesmo microfone *SoundField*. Os vários excertos foram gravados com os intérpretes colocados em locais e a distâncias diferentes do microfone, para assim se poder perceber se o ouvinte, pela reprodução no sistema de reprodução e respectivo processamento propostos, seria capaz de perceber e identificar correctamente os locais originais das execuções.

Foram escolhidos locais que situavam coincidentes com um dos eixos ortogonais, e em pontos intermédios entre eixos ortogonais.

Pretendeu-se também avaliar se a distância introduziria algum factor de importância na qualidade da captação e posterior reprodução. Assim, foram escolhidas três distâncias dos intérpretes ao microfone, de 0,5m, 1,2m e 2,0m.

Foi então perguntado a 15 pessoas, entre estudantes de ensino superior de música, teatro (interpretação) e de produção musical/técnicos de áudio, a cada excerto reproduzido se seriam capazes de identificar a localização do intérprete.

4.2 Câmara utilizada como laboratório

Como laboratório de trabalho, foi utilizada uma câmara semi-anecóica, situada nos estúdios dos Serviços de Áudio da ESMAE (figura 50). Considera-se uma câmara semi-anecóica, visto possuir algum tempo de reverberação, e possuir também algumas portas com superfícies de vidro, logo reflectoras a frequências mais elevadas. Nas figuras 51, 52 e 53, podem-se ver o gráfico relativo ao tempo de reverberação, bem como a resposta em frequência medidos nesta câmara. Na tabela 3 podem-se ver os valores do tempo de reverberação nas 5 bandas de oitava representadas.



Figura 50: Câmara utilizada como laboratório - Estúdio dos Serviços de Áudio da ESMAE [Fonte: www.esmae-ipp.pt]

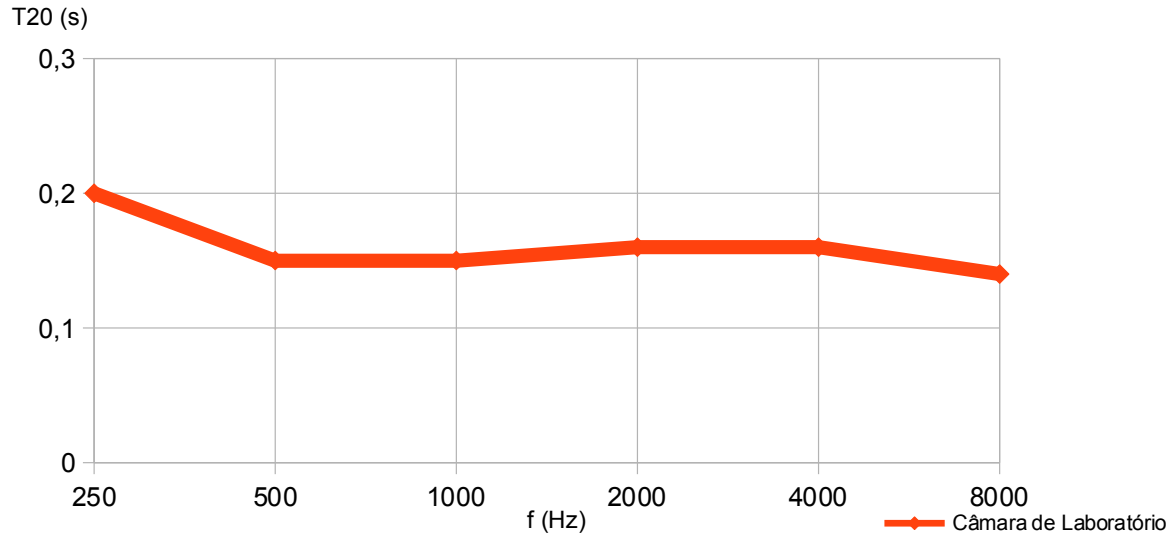


Figura 51: Gráfico ilustrativo do tempo de reverberação da câmara utilizada como laboratório

f (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	Med
TR (s)	0,2	0,15	0,15	0,16	0,16	0,14	0,16

Tabela 3: Tabela com tempos de reverberação da câmara utilizada como laboratório

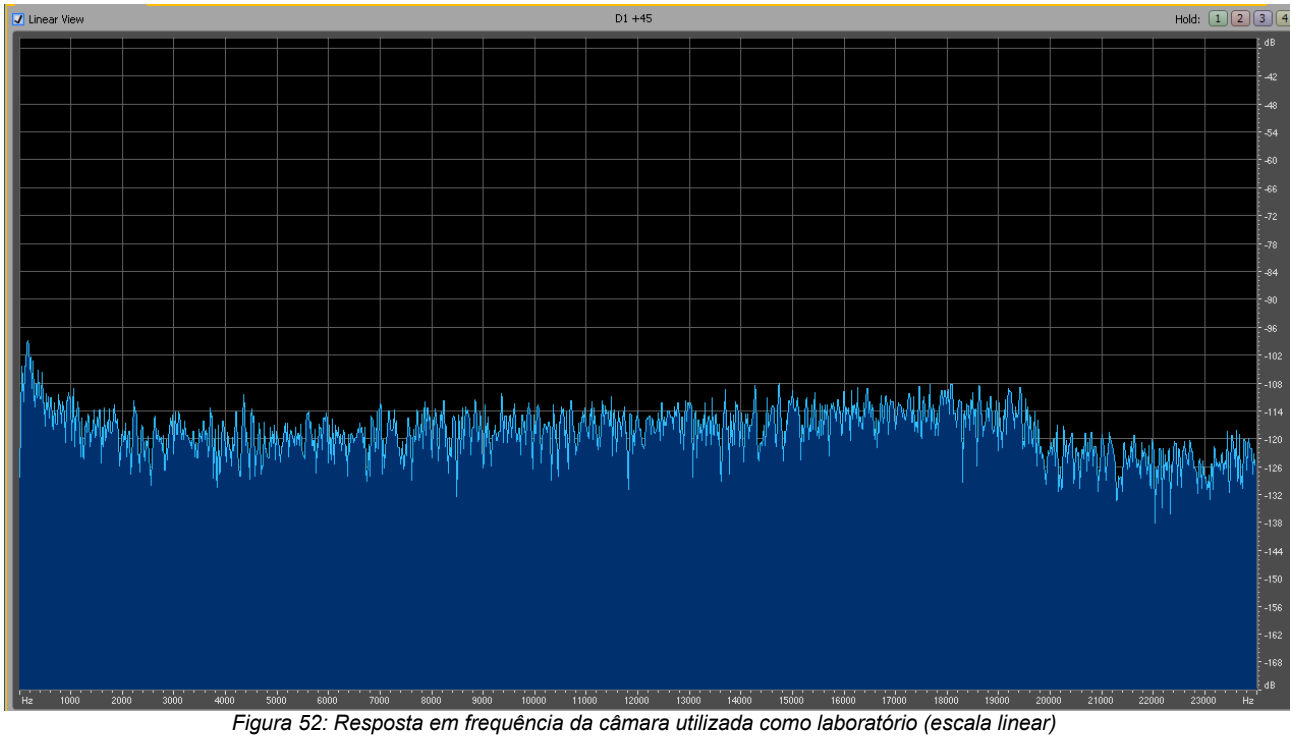


Figura 52: Resposta em frequência da câmara utilizada como laboratório (escala linear)

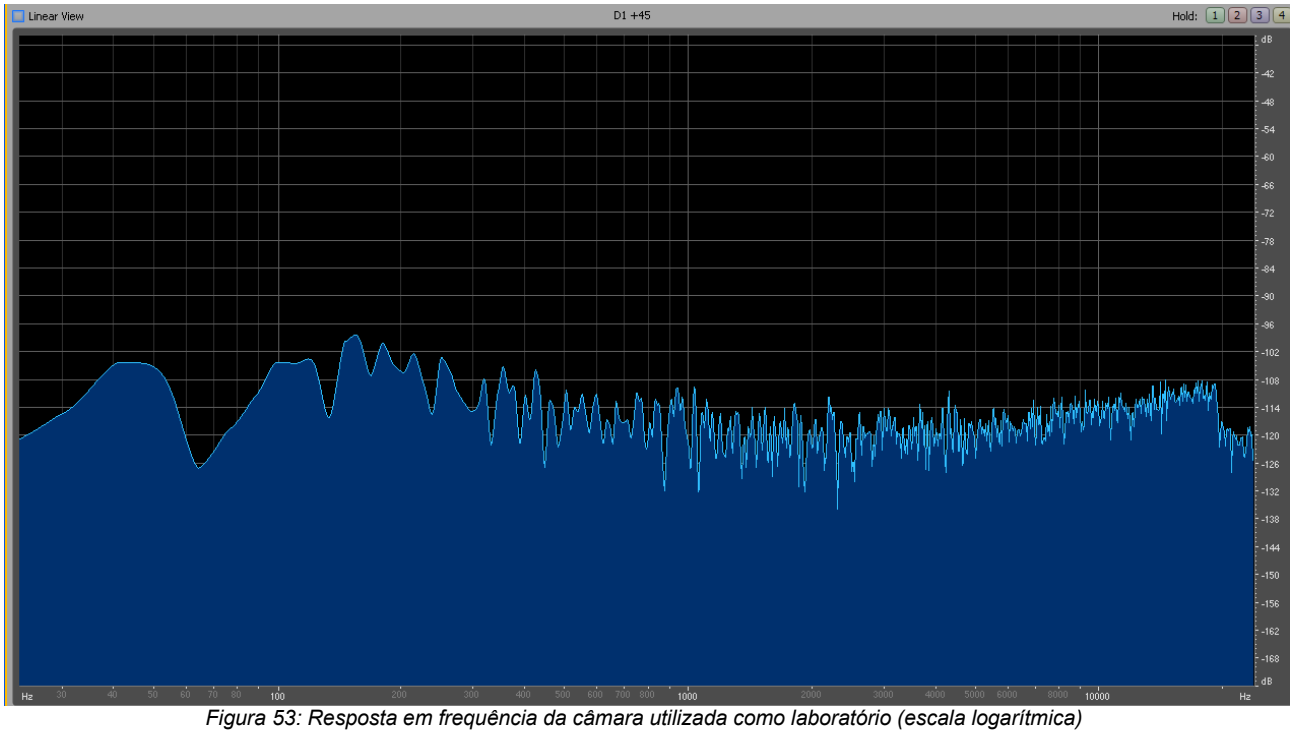


Figura 53: Resposta em frequência da câmara utilizada como laboratório (escala logarítmica)

5. Análise de Resultados Obtidos

No presente capítulo, serão analisados os vários resultados obtidos, começando pelas medições efectuadas no palco das três salas de espectáculos, seguindo-se a análise do desempenho do microfone *SoundField*,

5.1 Medições no Teatro Helena Sá e Costa

Na tabela 4 e na figura 54 podem-se ver os resultados médios obtidos para o tempo de reverberação nas medições efectuadas no palco do Teatro Helena Sá e Costa, pelas diversas medições efectuadas. No momento das medições, não se encontrava ninguém na sala, o palco encontrava-se com panejamento à italiana e com várias estruturas cénicas de um espectáculo que estava a ser preparado.

Comparando os valores obtidos com os que se encontram descritos no artigo de Francisco Santiago e Octávio Inácio (Santiago e Inácio 2007), podemos verificar que são ligeiramente inferiores, muito possivelmente pelo facto de no estudo desse mesmo autor, as medições terem sido efectuadas com um palco vazio, sem qualquer panejamento montado, logo com menor presença de materiais absorsores.

f (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	Med
TR med (s)	1,21	1,16	1,1	1,04	0,85	0,59	0,99

Tabela 4: Tempo de reverberação média no Teatro Helena Sá e Costa

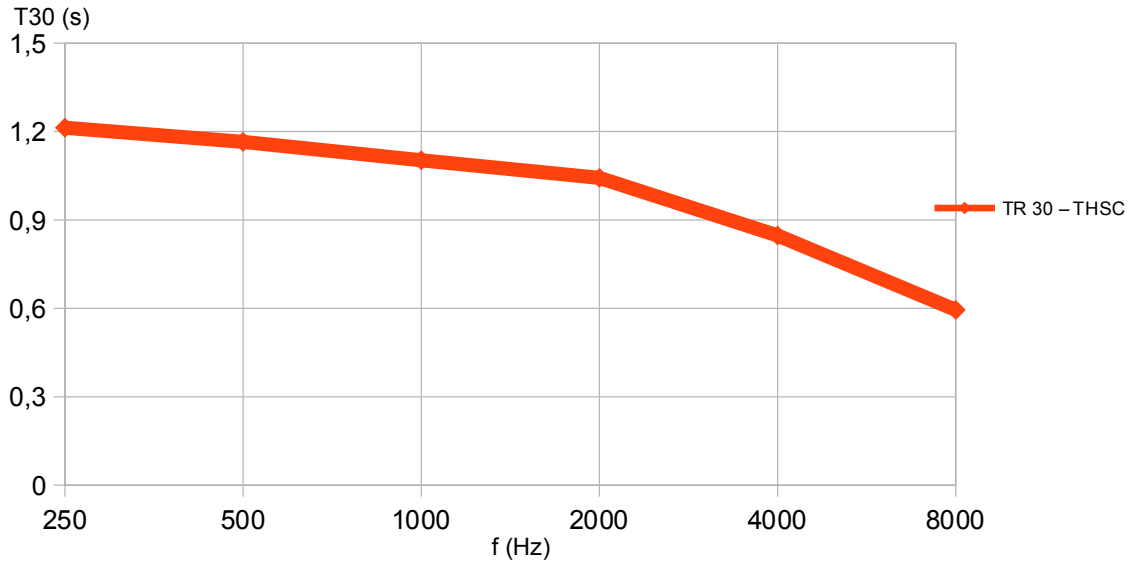


Figura 54: Gráfico de tempo de reverberação médio no palco do Teatro Helena Sá e Costa

5.2 Medições no Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

As medições realizadas neste auditório foram efectuadas no palco do auditório e sem a presença de pessoas em toda a sala. Os resultados do tempo de reverberação médio obtidos às várias bandas de frequência podem ser verificados na tabela 5 e na figura 55.

f (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	Med
TR med (s)	1,03	1,17	1,3	1,21	1,11	0,8	1,1

Tabela 5: Tempo de reverberação médio no auditório do Conservatório de Música do Porto

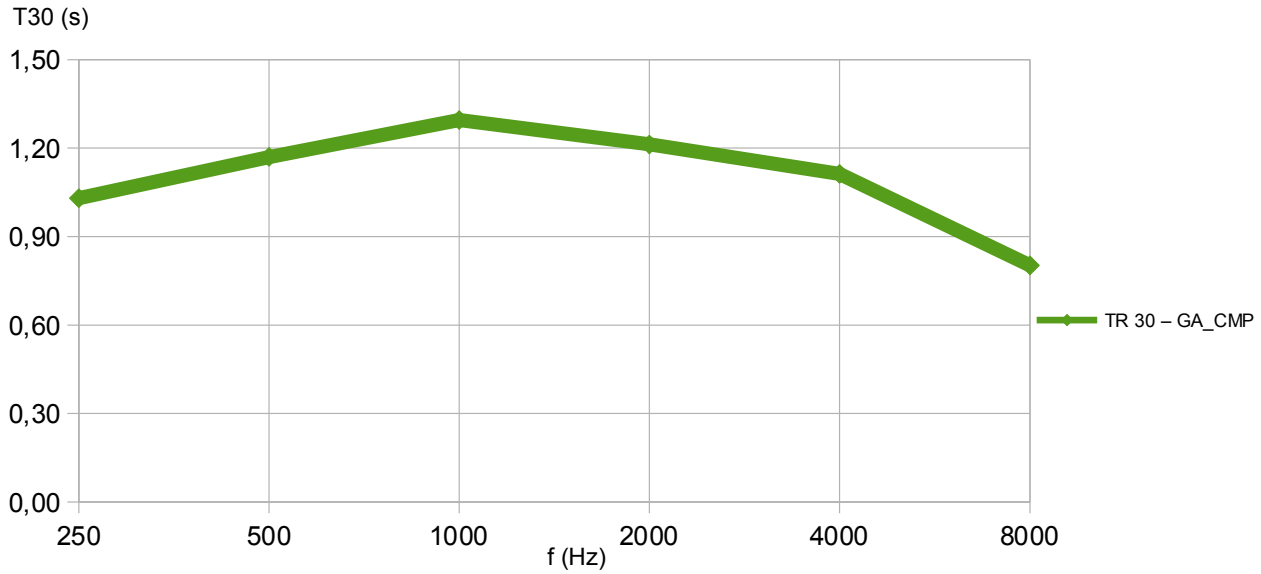


Figura 55: Gráfico de tempo de reverberação médio no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

Através da sua análise, e comparando com os valores apresentados por Octávio Inácio (Inácio 2011), verifica-se que se obteve valores médios de tempo de reverberação ligeiramente inferiores. Uma grande diferença nas duas medições está no facto de as medições realizadas para esta tese terem sido todas elas efectuadas no palco, ao passo que no caso do autor foram efectuadas em vários pontos da plateia, que apresenta nas

paredes laterais superfícies reflectoras, tal como descrito no capítulo 3.1.2 onde é feita a apresentação desta sala.

5.3 Medições na Sala Suggia da Casa da Música

Na tabela 6 e na figura 56 podem-se observar os valores médios do tempo de reverberação obtidos nas medições efectuadas nesta sala. Podemos verificar que são valores muito idênticos aos descritos no artigo de Francisco Santiago e Octávio Inácio (Santiago e Inácio 2008), podendo a pequena diferença ser resultante do facto de no momento das medições efectuadas para esta tese, as cortinas da sala estarem subidas, ou seja, com os vidros totalmente expostos, ao passo que no caso do autor mencionado, uma das cortinas estar completamente e outra parcialmente fechada, diminuindo assim o tempo de reverberação na sua medição.

f (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	Med
TR med (s)	1,74	1,89	2,21	2,17	1,79	1,06	1,81

Tabela 6: Tempo de reverberação média na Sala Suggia da Casa da Música

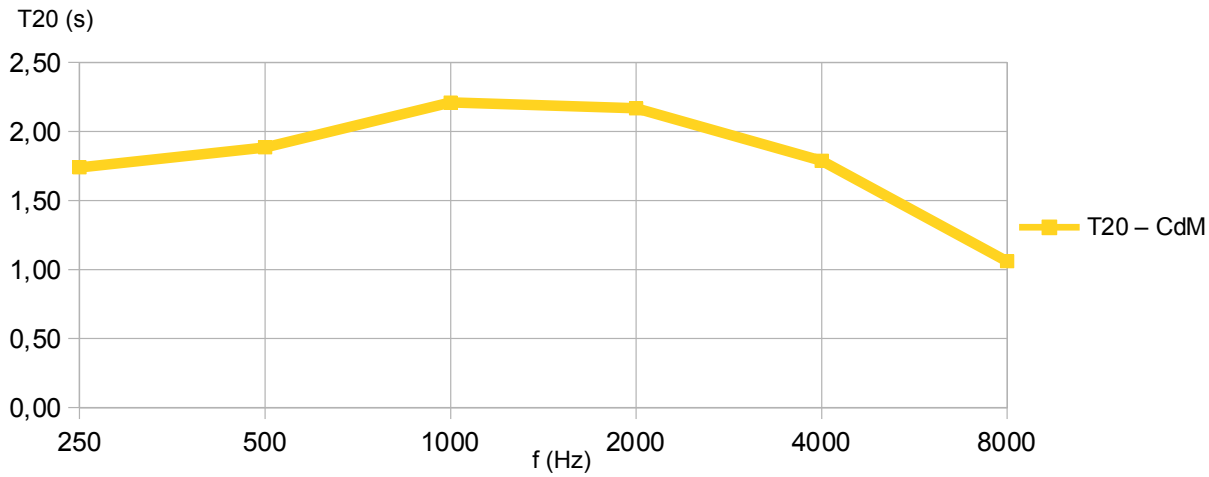


Figura 56: Gráfico de tempo de reverberação médio no palco da Sala Suggia da Casa da Música

5.4 Resposta do microfone *SoundField*

Através dos resultados obtidos nas medições efectuadas nas três salas, foi possível comprovar que o microfone *SoundField* permite fazer a aquisição de respostas impulsivas de forma fidedigna. Esta comprovação foi efectuada através da comparação entre a resposta impulsiva obtida pela componente omnidirecional do microfone *SoundField* e os resultados obtidos pelos microfones omnidirecionais de referência. Por motivos de fase, a resposta obtida através do microfone *SoundField* apresenta-se de forma invertida relativamente ao obtido pelos microfones omnidirecionais de referência. No entanto, fazendo a devida inversão, é possível verificar que as respostas dos dois microfones são muito semelhantes, tanto em amplitude como em espaço temporal das componentes directa e das primeiras reflexões. A figura 57 mostra a comparação das respostas impulsivas obtidas numa das recolhas efectuadas numa das salas, entre a componente omnidirecional do microfone *SoundField* e um dos microfones de referência.



Figura 57: Comparação das respostas impulsivas obtidas pela componente omnidirecional do microfone SoundField (cima) e dos microfones omnidirecionais de referência (baixo)

5.5 Simulações

Após efectuada a avaliação do microfone *SoundField,* será de seguida apresentada a análise dos resultados dos parâmetros acústicos obtidos.

5.5.1 Parâmetros acústico objectivos

Para todas as recolhas efectuadas, foram processadas as respectivas respostas impulsivas, tanto as obtidas nas três salas como nas várias simulações efectuadas em laboratório, por forma a obterem-se através do módulo *Acoustical Parameters* do *software Aurora* vários parâmetros acústicos, e assim se poder fazer uma comparação entre os resultados obtidos nas próprias salas, em cada uma das recolhas, e os resultados obtidos no laboratório com as várias simulações efectuadas.

Os parâmetros acústicos de cada simulação foram registados em tabelas (disponíveis nos anexos), por forma a analisar os desvios desses valores comparativamente com os valores obtidos nas salas reais.

Pela análise das referidas tabelas, é possível verificar que os resultados obtidos nas simulações das três salas, são sempre da mesma ordem de grandeza, não havendo desvios com grande discrepância em relação aos valores obtidos nas salas reais. No entanto, alguns valores se aproximam mais dos valores reais.

As figuras 58 a 61 são apenas alguns exemplos que permitem ter uma percepção dos desvios existentes entre os valores obtidos nas simulações e os valores obtidos nos palcos das três salas. Nos anexos encontram-se todos os gráficos comparativos do valores obtidos.

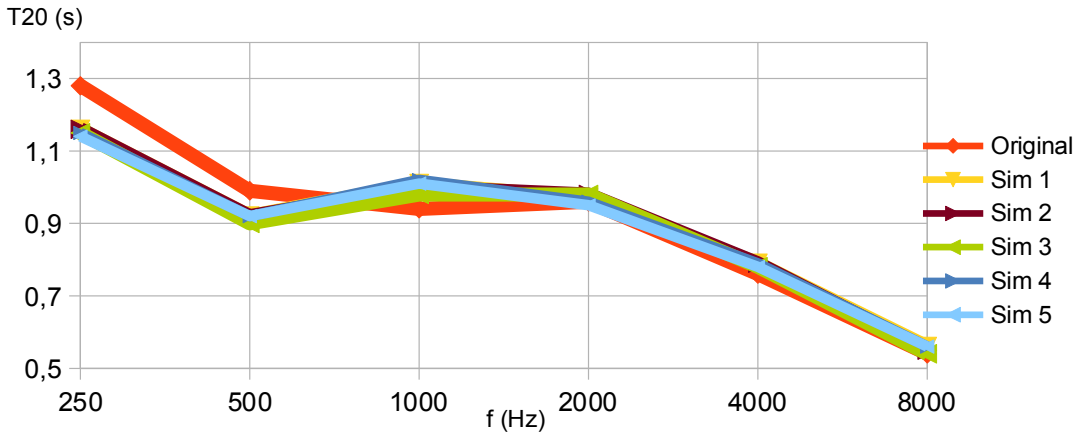


Figura 58: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 1

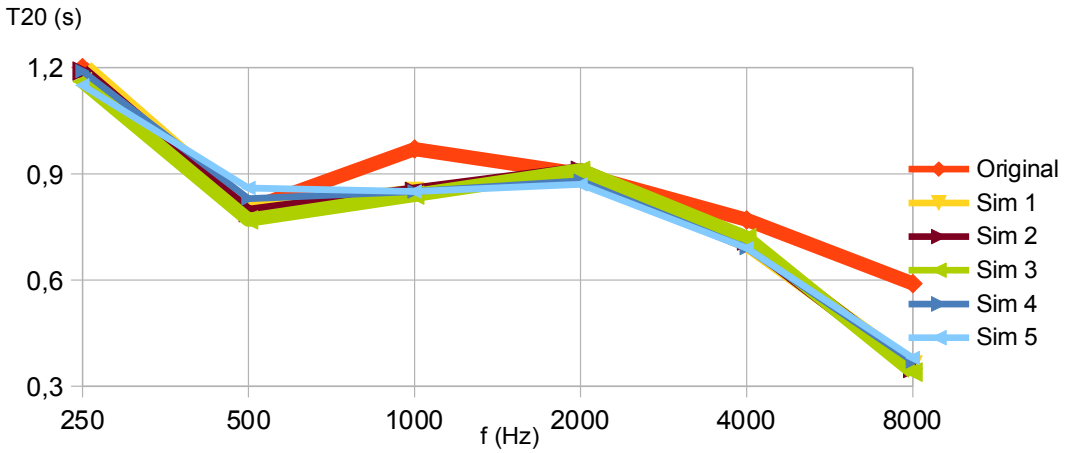


Figura 59: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 4

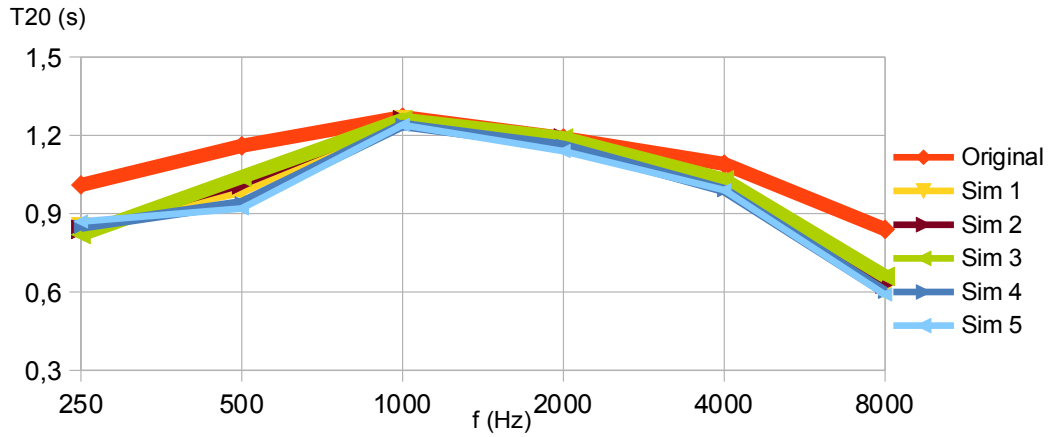


Figura 60: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações na configuração da recolha 2

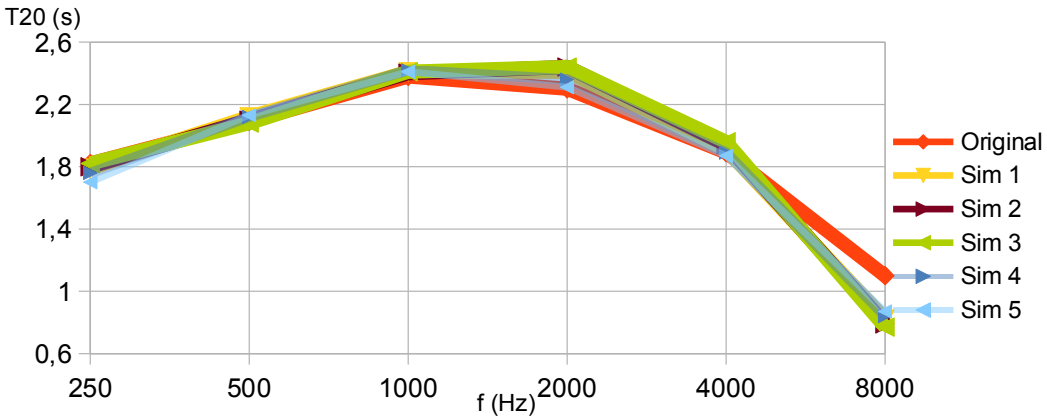


Figura 61: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações na configuração da recolha 5

Foi então feita uma contagem para cada valor obtido nos vários parâmetros acústicos (C50, C80, D50, EDT, T20 e T30) e em todas as simulações cujo desvio fosse o menor relativamente aos respectivos valores originais. Essa contagem teve como objectivo, saber qual a simulação que obteve maior número de resultados com o menor desvio para os valores obtidos na medições nas salas de espectáculo. Analisando esses dados, registados na tabela 7, é possível verificar que a simulação com a designação de *Sim 3*, foi a que obteve um maior registo de valores mais próximos dos originais. Nesta simulação, tal como referido anteriormente foi aplicada uma relação de nível de -6 dB às componentes X, Y e Z em relação à componente W.

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Sim 5
Total	62	56	260	72	175

Tabela 7: Contagem de resultados obtidos nas simulações em laboratório mais próximos dos resultados obtidos nas medições efectuadas nas salas estudadas

5.5.2 Respostas impulsivas

Após obter as respostas impulsivas obtidas nas simulações efectuadas, foi possível analisar e comparar essas mesmas respostas impulsivas e as respostas em frequência, com as obtidas nas medições efectuadas no palco das três salas estudadas.

A análise é feita comparando os resultados obtidos pela mesma componente do microfone *SoundField* nas medições efectuadas no palco das três salas e na simulação *Sim 3.*

Pela análise, não são notórias semelhanças muito evidentes na comparação das respostas impulsivas entre componentes iguais nas medições efectuadas no palco das três salas e nas simulações. No entanto, é possível verificar que existem alguns resultados, como por exemplo os representados nas figuras 62 e 63 onde se pode perceber que as componentes directa e de primeiras reflexões surgem com um intervalo temporal muito semelhante, mas em nenhum caso é explícito que se possam considerar respostas impulsivas idênticas com as originais.

Ainda pela análise das respostas impulsivas obtidas, é possível verificar um pequeno atraso temporal nas respostas obtidas nas simulações. Esse atraso deve-se à distância existente entre os altifalantes e o microfone *SoundField*, que não existe na realidade, quando são efectuadas e registadas as respostas impulsivas nas salas de espectáculo.

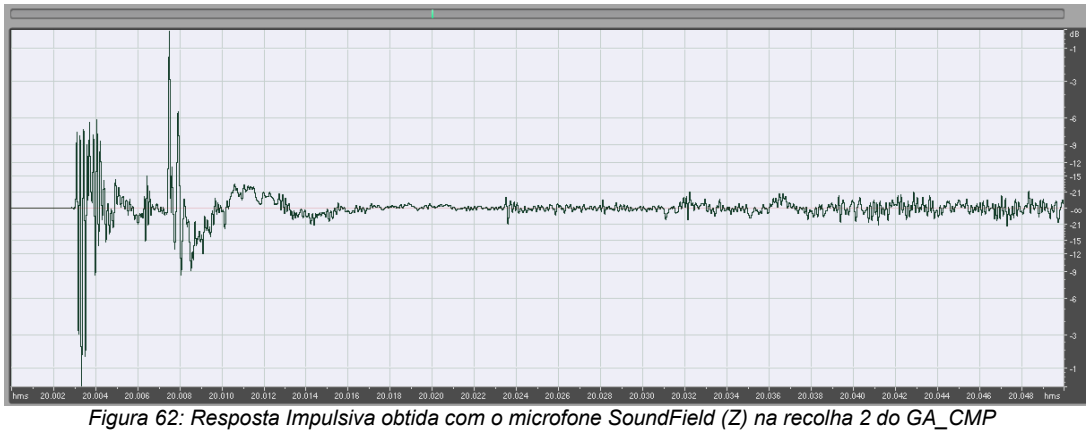


Figura 62: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 2 do GA_CMP

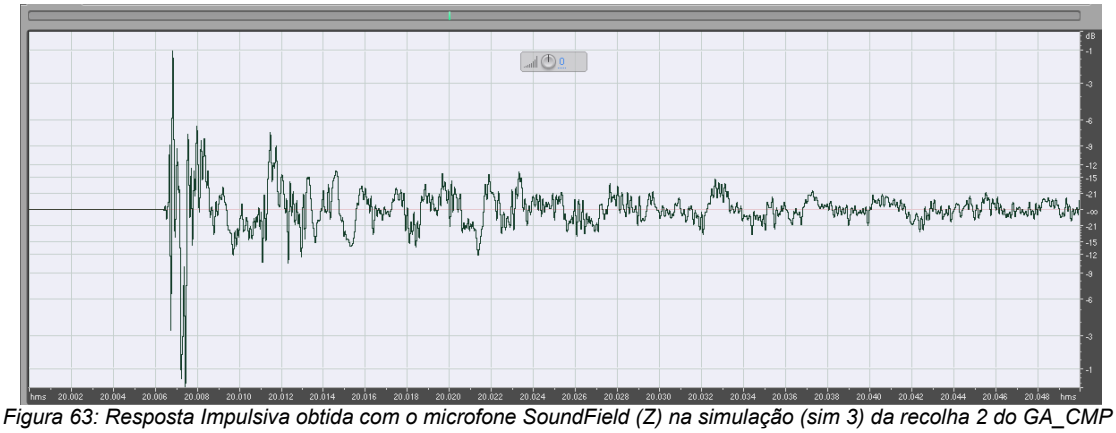


Figura 63: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP

5.5.3 Avaliação subjectiva

Para além da análise objectiva dos parâmetros acústicos, respostas impulsivas e em frequência obtidas, foi feita uma análise subjectiva da qualidade de reprodução do sistema de simulação proposto. Esta análise teve como objectivo perceber qual a percepção de direcionalidade sonora sentida pelas pessoas quando estas escutassem excertos gravados com o microfone *SoundField,* fazendo depois a avaliação, comparando as opiniões dos inquiridos com a localização real no momento da captação.

Os testes subjectivos foram efectuados na câmara de laboratório, fazendo um pequeno inquérito a um conjunto de 15 pessoas, na sua maioria músicos, mas também actores, produtores musicais e técnicos de áudio. Foi possível verificar que reproduzindo excertos sonoros registados com o microfone *SoundField* no sistema de simulação proposto (aplicando a relação de níveis de *Sim 3*), o sistema reproduz de uma forma geral a direcionalidade original, visto que a grande maioria das pessoas foi capaz de identificar correctamente ou de uma forma muito aproximada a localização original das captações que foram efectuadas a 1,2m e a 2,0m do microfone. As localizações utilizadas foram tanto nos eixos de reprodução, como em pontos intermédios dos eixos.

A identificação por parte dos inquiridos foi praticamente sempre correcta, havendo por vezes pequenas diferenças, mas sempre com respostas muito aproximadas, o que leva a que se aceite que este sistema seja capaz de reproduzir correctamente as captações efectuadas com o microfone *SoundField*.

Essa correcta identificação já não aconteceu para as captações que foram efectuadas a 0,5m do microfone *SoundField*, uma vez que quase todas as pessoas inquiridas sentiram que a reprodução era muito envolvente, não provindo de um local em concreto, isto é, quase que a sentirem-se imersas no som reproduzido. Tal sensação se pode dever ao facto de quando a captação é muito próxima do microfone, exista uma menor diferença temporal e de nível nas ondas sonoras em todas as cápsulas, através do fenómeno acústico da difração, bem como do fenómeno de proximidade.

6. Conclusões

Após análise dos resultados obtidos, será possível dizer que esta poderá ser uma boa alternativa ao sistema que a investigadora Kanaco Ueno e restantes colegas propõe. Na verdade, a proposta realizada na presente tese acaba por simplificar o método de captação e registo das respostas impulsivas, uma vez que apenas é necessária uma captação, ao contrário das seis descritas pelos autores.

Tal como avaliado no capítulo anterior, o microfone *SoundField* é uma ferramenta que permite fazer a aquisição de respostas impulsivas 3D num único ponto e através de uma única medição, o que vai de encontro com o que alguns estudos referem.

Ainda relativamente ao microfone *SoundField,* é possível também concluir que este microfone, através das suas diferentes componentes de saída, permite executar a medição de vários parâmetros acústicos de uma sala.

Foi possível concluir que o sistema de reprodução, utilizando os sinais obtidos com o microfone *SoundField* com distância pelo menos superior a 0,5m e com o processamento baseado na técnica MS, permite reproduzir correctamente a direcionalidade das componentes sonoras, resultando numa correcta localização sonora na reprodução face à localização da(s) fonte(s) sonoras na captação. Para distâncias inferiores e pelo menos iguais a 0,5m, foi possível concluir que a reprodução não é eficaz, fazendo com que o ouvinte não consiga perceber a localização da fonte sonora.

Também através da escuta das respostas impulsivas registadas nas três salas de espectáculo, é possível perceber a sensação do espaço, comprovado também pela semelhança dos resultados dos parâmetros acústicos objectivos obtidos na simulação, por comparação com os registados nas salas. Os resultados não foram exactamente os mesmos que os obtidos na situação real, mas as pequenas diferenças existentes permitem indicar uma utilização possível do sistema proposto.

Com esta tese, sistemas de captação e reprodução de simulação, os métodos nela descritos e resultados obtidos, fica em aberto no futuro a possibilidade de construir e desenvolver uma aplicação que permita a um utilizador fazer a captação e registo das respostas impulsivas de um determinado local e executar o seu processamento para

reprodução da simulação em tempo real através de convolução, sendo para isso ainda necessário desenvolver e implementar um sistema de remoção de realimentação. Esse sistema será necessário para evitar que o microfone que esteja a captar a execução de um músico em espaço anecóico, não capte novamente e execute a convolução do resultado que já estiver a ser reproduzido pelos altifalantes. Um sistema de suporte do altifalante superior seria também necessário, para uma eventual montagem mais fixa deste sistema num determinado local, ou câmara anecóica.

7. Bibliografia

AE (Acoustics Engineering). 2011. *DIRAC.* http://www.acoustics-engineering.com/dirac/features.htm (Consultado a 06/10/2011)

Apple. 2009. *Impulse Response Utility* – User Manual. http://documentation.apple.com/en/impulseresponseutility/usermanual/Impulse%20Response%20Utility%20User%20Manual%20(en).pdf (Consultado a 24/10/2011)

Audio Ease. 2011. *Audio Ease Altiverb 7* – Sampling. http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/sampling.php. (Consultado a 24/10/2011)

Ballou, Glen. 2005. *Handbook For Sound Engineers (3rd Edition).* Focal Press

Barron, Michael. 2010. *Auditorium Acoustics and Architectural Design (2nd Edition).* Spon Press

Barron, Mike. 2005. *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results*. Acoust. Sci. & Tech. 26

Brandenburg, K. 2009. *Wave Field Synthesis: Basics and Applications. http://dafx09.como.polimi.it/data/WFS_dafx_0909.pdf* (Consultado a 22/07/2012)

BSI (British Standards Institution). 2002. *Acoustics Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters (ISO 3382:2002)*. British Standards Institute.

DRA Laboratories. 2009. *MLSSA Acoustical Measurement System*. http://www.mlssa.com/ (Consultado a 06/10/2011)

Farina, A. e Tronchin, L. 2011. *New Measurement Technique for 3D Sound Characterization in Theatres.* Artigo apresentado em The Acoustics of Ancient Theatres Conference. Patras.

Farina, Angelo e Tronchin, Lamberto. 2005. *Measurements and reproduction of spatial sound characteristics of auditoria*. Acoust. Sci. & Tech. 26

Farina, Angelo. 2007. *Impulse Response Measurements*. Artigo apresentado no 23rd Nordic Sound Symposium Training and information Seminar for Audio People. BolkesjØ

Henrique, Luís. 2002. *Acústica Musical*. Fundação Calouste Gulbenkian

Inácio, Octávio. 2011. *A Acústica do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto*. Palestra

ministrada durante a XIII Encontro da Associação Portuguesa de Engenharia Áudio. Porto

IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique). 2010. *Wave Field Synthesis @IRCAM:* http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/WFS_WEBSITE/Index_wfs_site.htm (Consultado a 23/07/2012)

ISVR (Institute of Sound and Vibration Research). 2011. *Virtual Acoustics and Audio Engineering: Stereo-Dipole.* http://resource.isvr.soton.ac.uk/FDAG/VAP/html/sd.html (Consultado a 11/10/2011)

LAE (Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica). 2011. *Aurora Plug-ins, Pakage.* http://www.aurora-plugins.com/Aurora_XP/Package.htm. (Consultado a 06/10/2011)

Morset Sound Development. 2004. *WinMLS 2004 Information*. http://www.winmls.com/ (Consultado a 06/10/2011)

Motu. 2011. *Motu.com – Proverb*. http://www.motu.com/products/software/dp/plug-ins/proverb.html. (Consultado a 24/10/2011)

Nelson, P. e Hamada, H. 2004. *Surround sound from all angle.* Ingenia (Maio)

Rumsey, F. 2001. *Spatial Audio.* Focal Press.

Santiago, Francisco e Inácio, Octávio. 2007. *Acoustical Characteristics of 33 Theatres And Concert Halls In Portugal.* Artigo apresentado no International Symposium on Room Acoustics. Sevilha

SoundField. 2011. *SoundField SP451 Surround Processor* – User Guide. http://www.soundfield.com/downloads/sp451_userguide.pdf. (Consultado a 17/10/2011)

SoundField. 2011. *SoundField Technology: How Does It Work?.* http://www.soundfield.com/downloads/b_format.pdf. (Consultado a 11/10/2011)

SoundField. 2011. *The Soundfield MKV Microphone* - User Guide.http://www.soundfield.com/downloads/mkv_userguide.pdf. (Consultado a 17/10/2011)

Streicher, Ron e Everest, F. Alton. 1998. *The New Stereo Soundbook* (2nd edition). Áudio Engineering Associates.

Talbot-Smith, Michael. 1999. *Audio Engineer's Reference Book* (2nd edition). Focal Press

Toole, Floyd E. 2008. *Sound Reproduction The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms.* Focal Press

Ueno, K., Yokoyama, S., e Tachibana, H.. 2007. *3D Sound Field Simulation of Concert Halls for Performing Musicians.* Artigo apresentado no *ICA, 19th International Congress on Acoustics*. Madrid.

Ueno, K., Yokoyama, S., Tachibana, H. e Sakamoto, S. 2002. *6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields.* Acoust. Sci. & Tech. 23, 2

Ueno, K. Yasuda, K. Tachibana, H. e Ono, T. 2001. *Sound field simulation for stage acoustics using 6-channel system.* Acoust. Sci. & Tech. 22, 4

Ueno, K. e Tachibana, H. 2003. *Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using a 6-channel sound simulation system.* Acoust. Sci. & Tech. 24, 3

Watkinson, J. 1998. *The Art of Sound Reproduction (1st Edition).* Focal Press.

Anexo I – Tabelas de resultados obtidos no palco e nas simulações do Teatro Helena Sá e Costa

THSC – Recolha 1 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	12,29	13,42	9,2	9,9	10,91	11,86
Sim 1	12,46	11,05	7,43	7,47	7,55	12,2
Sim 2	12,49	11,81	7,63	7,39	7,2	12,72
Sim 3	12,39	12,35	7,86	7,66	7,23	13,12
Sim 4	12,11	10,23	7,36	7,8	8,09	12,1
Sim 5	12,16	9,2	7,62	8,32	8,63	11,66
C80 (dB)						
Original	14,41	14,96	10,88	11,56	12,85	14,99
Sim 1	14,65	13,11	9,67	9,11	10,03	15,66
Sim 2	14,62	13,72	9,9	9,2	9,63	15,97
Sim 3	14,62	14,14	10,18	9,62	9,55	15,13
Sim 4	14,74	12,41	9,58	9,37	10,59	15,6
Sim 5	14,71	11,58	9,86	9,82	11,16	15,34
D50 (dB)						
Original	94,42	95,65	89,27	90,71	92,49	93,88
Sim 1	94,63	92,72	84,68	84,8	85,04	94,32
Sim 2	94,67	93,81	85,27	84,56	84,01	94,92
Sim 3	94,54	94,5	85,93	85,36	84,08	95,35
Sim 4	94,21	91,34	84,49	85,76	86,57	94,14
Sim 5	94,26	89,27	85,26	87,17	87,95	93,62
EDT (s)						
Original	0,09	0,08	0,49	0,59	0,63	0,48
Sim 1	0,24	0,21	0,61	0,77	0,6	0,36
Sim 2	0,24	0,19	0,61	0,74	0,62	0,34
Sim 3	0,24	0,17	0,59	0,69	0,62	0,33
Sim 4	0,24	0,23	0,62	0,76	0,56	0,37
Sim 5	0,24	0,34	0,58	0,7	0,5	0,4
T20 (s)						
Original	1,28	0,99	0,94	0,96	0,76	0,54
Sim 1	1,16	0,92	1,01	0,97	0,79	0,56
Sim 2	1,16	0,92	1	0,98	0,79	0,55
Sim 3	1,15	0,9	0,98	0,98	0,78	0,54
Sim 4	1,15	0,92	1,02	0,96	0,79	0,56
Sim 5	1,14	0,92	1,01	0,95	0,78	0,56

Tabela 8: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT e T20 no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 1

THSC - Recolha 2 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	12,25	14,6	16,14	13,64	17,12	19,15
Sim 1	10,39	12,47	16,18	14,71	15,75	16,79
Sim 2	11,02	12,9	16,06	14,72	15,78	15,39
Sim 3	11,4	13,2	15,88	14,59	15,92	13,67
Sim 4	9,65	11,94	16,4	14,74	15,68	17,69
Sim 5	8,69	11,56	16,46	14,65	15,53	18,46
C80 (dB)						
Original	14,92	15,93	17,54	15,14	19,37	22,04
Sim 1	13,62	13,82	17,58	16,11	18,6	19,95
Sim 2	14,17	14,29	17,48	16,14	18,61	18,62
Sim 3	14,68	14,68	17,43	16,12	18,62	17,19
Sim 4	13,19	13,37	17,73	16,12	18,52	20,86
Sim 5	12,54	13	17,85	16,06	18,45	21,54
D50 (%)						
Original	94,38	96,65	97,63	95,86	98,09	98,8
Sim 1	91,63	94,64	97,64	96,73	97,41	97,95
Sim 2	92,67	95,13	97,58	96,74	97,42	97,19
Sim 3	93,24	95,43	97,48	96,64	97,5	95,88
Sim 4	90,22	93,99	97,76	96,75	97,37	98,33
Sim 5	88,1	93,47	97,79	96,69	97,28	98,6
EDT (s)						
Original	0,09	0,05	0,02	0,04	0,01	0
Sim 1	0,29	0,2	0,18	0,16	0,19	0,2
Sim 2	0,27	0,15	0,17	0,16	0,18	0,22
Sim 3	0,26	0,1	0,16	0,16	0,17	0,23
Sim 4	0,33	0,26	0,17	0,18	0,2	0,16
Sim 5	0,39	0,26	0,18	0,18	0,21	0,15
T20 (s)						
Original	0,96	1	0,94	0,91	0,71	0,6
Sim 1	0,93	0,91	0,77	0,79	0,54	0,41
Sim 2	0,91	0,92	0,78	0,79	0,55	0,43
Sim 3	0,89	0,93	0,8	0,8	0,57	0,44
Sim 4	0,96	0,93	0,76	0,77	0,53	0,41
Sim 5	0,98	0,93	0,72	0,75	0,52	0,4
T30 (s)						
Original	1,15	1,07	1	0,93	0,79	0,54
Sim 1	1,1	1,12	0,94	0,89	0,72	0,5
Sim 2	1,1	1,08	0,94	0,9	0,73	0,53
Sim 3	1,09	1,05	0,95	0,9	0,74	0,54
Sim 4	1,15	1,17	0,95	0,89	0,71	0,49
Sim 5	1,2	1,24	0,94	0,88	0,7	0,48

Tabela 9: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 2

THSC – Recolha 3 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	19,71	21,44	21,33	23	21,41	24,88
Sim 1	14,3	17,99	17,82	22,82	19,34	20,99
Sim 2	14,97	18,7	18,39	22,68	19,34	20,94
Sim 3	15,38	19,13	18,85	22,42	19,19	20,76
Sim 4	14,85	18,24	17,76	18,27	17,87	24,42
Sim 5	14	17,32	17,62	18,8	18,12	24,06
C80 (dB)						
Original	22,76	22,54	22,71	24,39	23,46	27,99
Sim 1	22,02	20,71	20,92	25,5	22,56	25,84
Sim 2	21,71	21,06	21,11	25,34	22,58	25,89
Sim 3	21,35	21,33	21,27	25,04	22,69	25,99
Sim 4	22	20,87	20,76	21,03	21,24	28,6
Sim 5	21,69	20,77	20,97	21,74	21,52	28,29
D50 (%)						
Original	98,94	99,29	99,27	99,5	99,28	99,68
Sim 1	96,42	98,44	98,38	99,48	98,85	99,21
Sim 2	96,91	98,67	98,57	99,46	98,85	99,2
Sim 3	97,18	98,79	98,71	99,43	98,81	99,17
Sim 4	96,83	98,52	98,35	98,53	98,39	99,64
Sim 5	96,17	98,18	98,3	98,7	98,48	99,61
EDT (s)						
Original	0,05	0,03	0,02	0,01	-	0
Sim 1	0,26	0,17	0,17	0,04	0,17	0,16
Sim 2	0,26	0,15	0,15	0,05	0,18	0,15
Sim 3	0,26	0,12	0,13	0,07	0,19	0,15
Sim 4	0,24	0,17	0,17	0,25	0,19	0,04
Sim 5	0,24	0,17	0,18	0,24	0,19	0,05
T20 (s)						
Original	0,96	1	0,94	0,91	0,71	0,6
Sim 1	-	0,42	0,43	0,25	0,34	0,21
Sim 2	-	0,43	0,44	0,25	0,33	0,2
Sim 3	-	0,44	0,45	0,27	0,33	0,2
Sim 4	-	0,47	0,47	0,41	0,37	0,18
Sim 5	-	0,46	0,45	0,38	0,36	0,19
T30 (s)						
Original	1,15	1,07	1	0,93	0,79	0,54
Sim 1	1,05	0,76	0,72	0,59	0,55	0,37
Sim 2	1,07	0,75	0,72	0,59	0,55	0,36
Sim 3	1,07	0,75	0,72	0,6	0,55	0,37
Sim 4	0,97	0,75	0,75	0,71	0,59	0,35
Sim 5	0,91	0,76	0,75	0,68	0,58	0,36

Tabela 10: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 3

THSC – Recolha 4 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	12,45	14,73	15,41	11,06	15,33	19,1
Sim 1	13,51	12,43	13,11	7,8	13,51	19,09
Sim 2	13,39	12,88	13,47	7,46	13,3	19,36
Sim 3	13,12	13,18	13,72	7,58	13,26	19,64
Sim 4	13,38	11,9	12,61	8,67	13,98	18,93
Sim 5	13,42	11,4	12,41	9,66	14,21	18,66
C80 (dB)						
Original	15,02	16,86	16,98	13,15	17,37	21,66
Sim 1	15,37	15	15,26	10,17	15,9	22,57
Sim 2	15,18	15,35	15,47	9,99	15,64	22,79
Sim 3	15,03	15,63	15,68	10,27	15,5	22,97
Sim 4	15,67	14,59	14,97	10,86	16,28	22,54
Sim 5	16,05	14,37	15,01	11,67	16,48	22,28
D50 (%)						
Original	94,62	96,75	97,21	92,73	97,16	98,76
Sim 1	95,74	94,59	95,34	85,77	95,73	98,78
Sim 2	95,61	95,1	95,7	84,8	95,53	98,86
Sim 3	95,36	95,42	95,92	85,13	95,49	98,92
Sim 4	95,61	93,94	94,8	88,04	96,16	98,74
Sim 5	95,65	93,24	94,57	90,25	96,34	98,66
EDT (s)						
Original	0,07	0,05	0,02	0,34	0,06	0,01
Sim 1	0,23	0,24	0,23	0,65	0,2	0,05
Sim 2	0,23	0,21	0,22	0,67	0,22	0,06
Sim 3	0,23	0,2	0,17	0,66	0,24	0,06
Sim 4	0,24	0,26	0,24	0,56	0,18	0,06
Sim 5	0,23	0,25	0,24	0,44	0,17	0,07
T20 (s)						
Original	1,2	0,8	0,97	0,9	0,77	0,59
Sim 1	1,21	0,8	0,85	0,9	0,7	0,36
Sim 2	1,19	0,79	0,85	0,91	0,71	0,35
Sim 3	1,16	0,77	0,84	0,91	0,72	0,34
Sim 4	1,19	0,83	0,85	0,88	0,69	0,37
Sim 5	1,15	0,86	0,85	0,87	0,69	0,38
T30 (s)						
Original	1,12	1,05	1,04	1,02	0,84	0,57
Sim 1	1,1	1,08	1,02	1,23	0,81	0,48
Sim 2	1,08	1,07	1,01	1,34	0,83	0,47
Sim 3	1,05	1,07	1	1,28	0,84	0,46
Sim 4	1,14	1,13	1,02	1,11	0,8	0,48
Sim 5	1,16	1,16	1,03	1,05	0,8	0,49

Tabela 11: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 4

THSC – Recolha 5 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	10,27	10,61	12,11	7,69	11,96	15,65
Sim 1	9,15	8,7	9,64	5,32	9,06	16,29
Sim 2	9,08	8,92	10	5,05	8,64	16,64
Sim 3	9,1	9,04	10,39	5,32	8,53	16,93
Sim 4	9,18	8,42	9,5	6,03	9,65	16,06
Sim 5	9,05	8,26	9,74	6,95	10,21	15,71
C80 (dB)						
Original	11,21	12,58	13,47	9,35	14,07	18,32
Sim 1	10,27	10,44	11,51	7,34	10,86	18,67
Sim 2	10,29	10,75	11,76	7,12	10,43	18,94
Sim 3	10,29	10,94	12,12	7,35	10,38	19,08
Sim 4	10,12	10,04	11,48	8,01	11,44	18,45
Sim 5	9,95	9,82	11,8	8,87	11,99	18,24
D50 (%)						
Original	91,42	92,01	94,21	85,46	94,02	97,35
Sim 1	89,16	88,13	90,21	77,3	88,95	97,7
Sim 2	89	88,64	90,9	76,2	87,96	97,88
Sim 3	89,04	88,9	91,63	77,29	87,7	98,01
Sim 4	89,22	87,43	89,91	80,04	90,22	97,58
Sim 5	88,92	87,01	90,41	83,2	91,3	97,39
EDT (s)						
Original	0,24	0,18	0,08	0,84	0,35	0,04
Sim 1	0,4	0,67	0,43	0,87	0,47	0,11
Sim 2	0,42	0,64	0,4	0,86	0,54	0,11
Sim 3	0,43	0,62	0,37	0,83	0,55	0,11
Sim 4	0,38	0,67	0,41	0,85	0,39	0,12
Sim 5	0,38	0,62	0,33	0,78	0,34	0,12
T20 (s)						
Original	1,2	1,07	0,99	0,95	0,81	0,58
Sim 1	1,12	1,1	1,02	0,99	0,79	0,55
Sim 2	1,12	1,08	1,02	1	0,8	0,55
Sim 3	1,12	1,06	0,99	1	0,81	0,54
Sim 4	1,12	1,14	1,03	0,98	0,79	0,54
Sim 5	1,11	1,18	1,03	0,97	0,78	0,54
T30 (s)						
Original	1,37	1,41	1,08	1,15	0,89	0,63
Sim 1	1,3	-	1,26	-	0,91	0,58
Sim 2	1,3	-	1,22	-	0,96	0,58
Sim 3	1,3	-	1,16	-	1,01	0,59
Sim 4	1,35	-	1,27	-	0,88	0,58
Sim 5	1,35	-	1,21	-	0,87	0,58

Tabela 12: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 5

Anexo II – Gráficos comparativos dos resultados obtidos no palco e simulações do Teatro Helena Sá e Costa

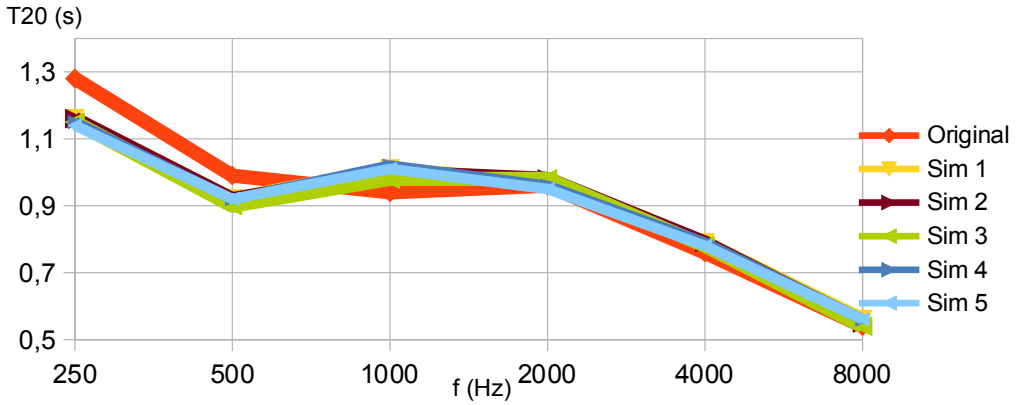


Figura 64: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 1

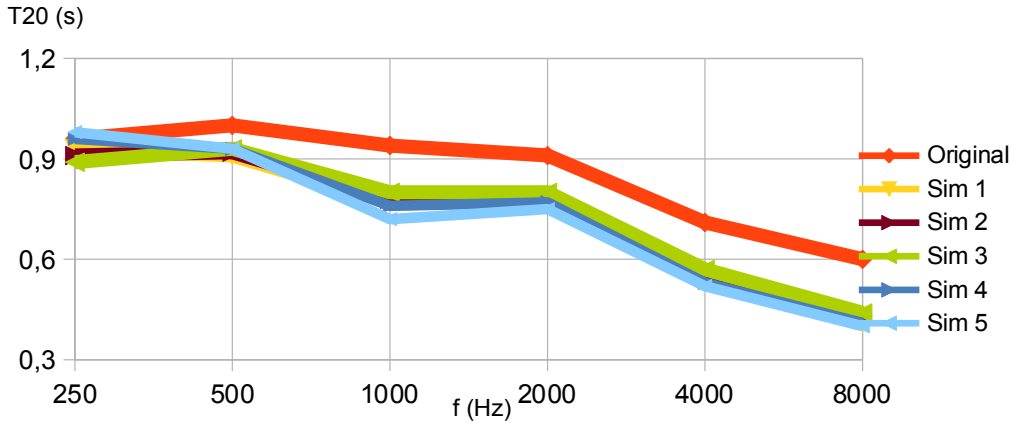


Figura 65: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 2

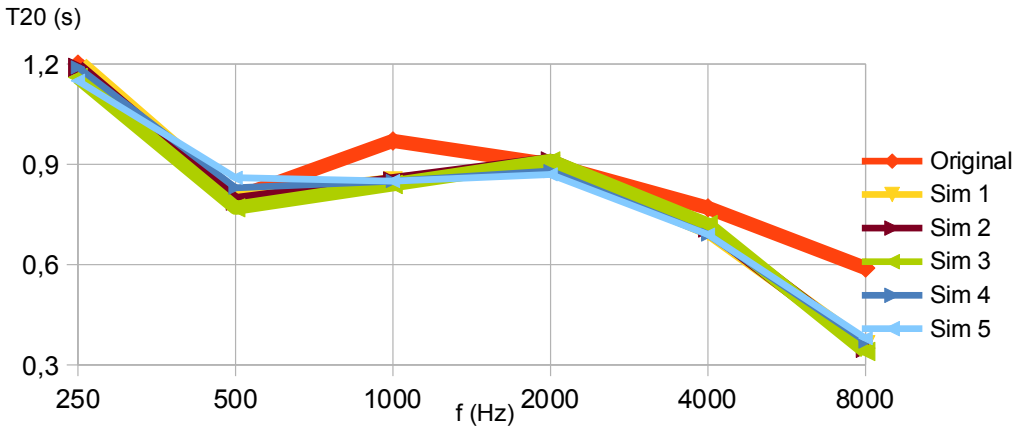


Figura 66: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 4

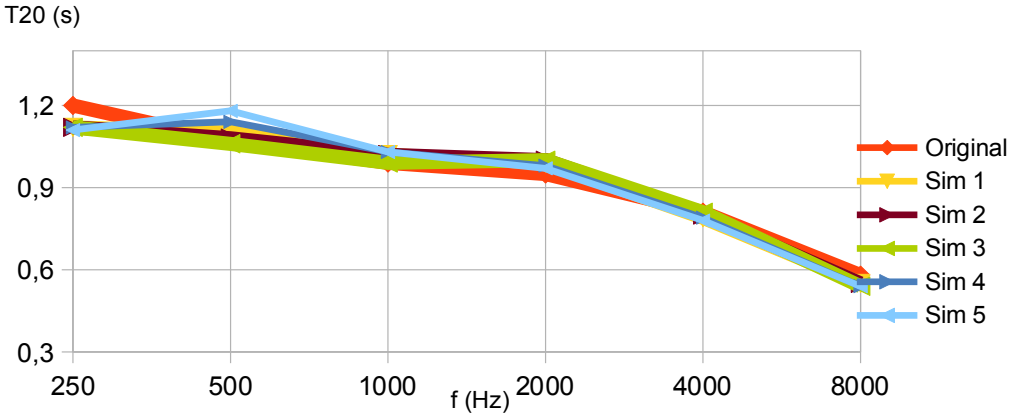


Figura 67: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Teatro Helena Sá e Costa e nas respectivas simulações na configuração da recolha 5

Anexo III – Resposta em frequência e impulsivas no palco e simulações do Teatro Helena Sá e Costa

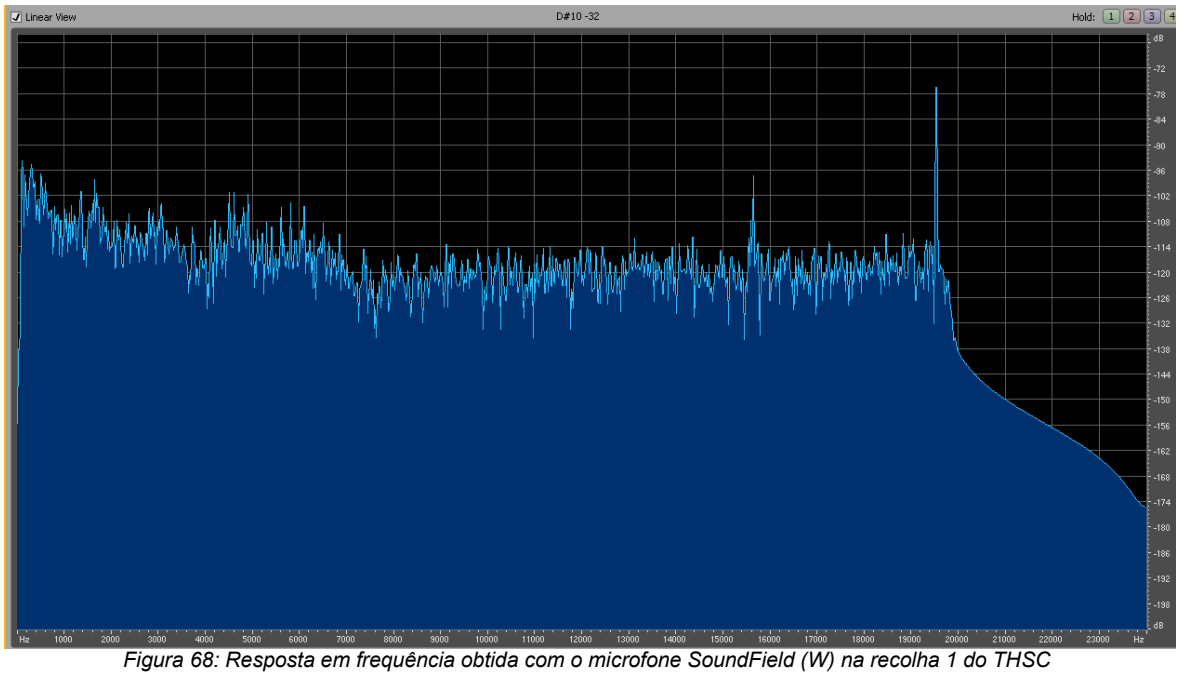


Figura 68: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 do THSC

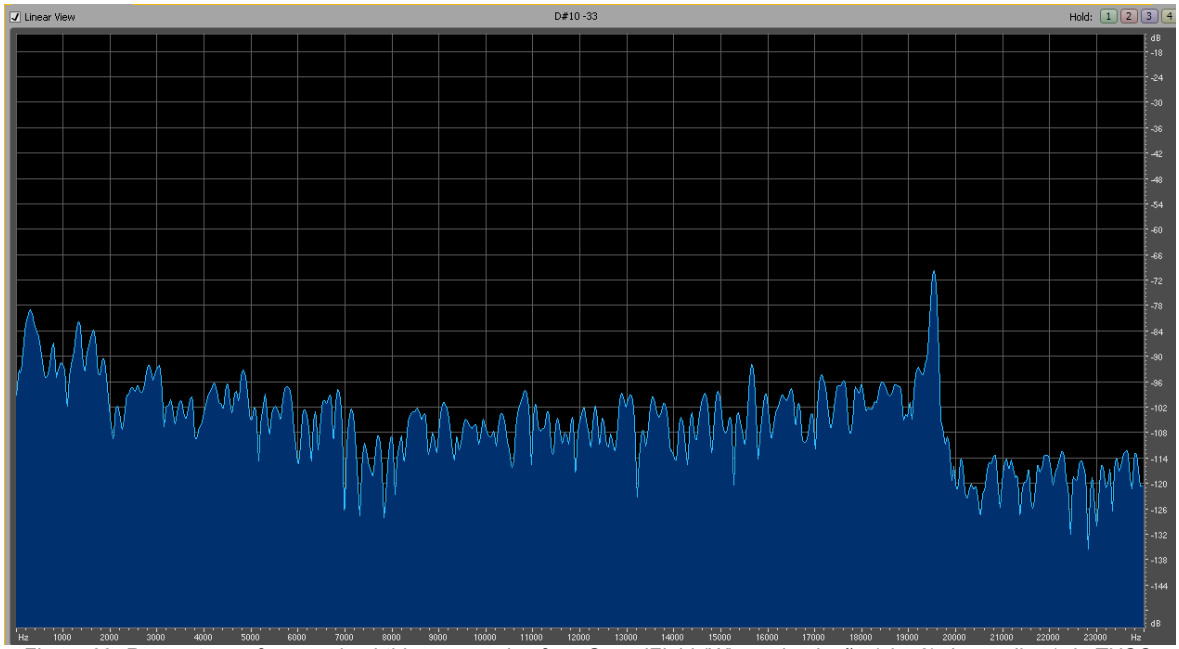


Figura 69: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 do THSC

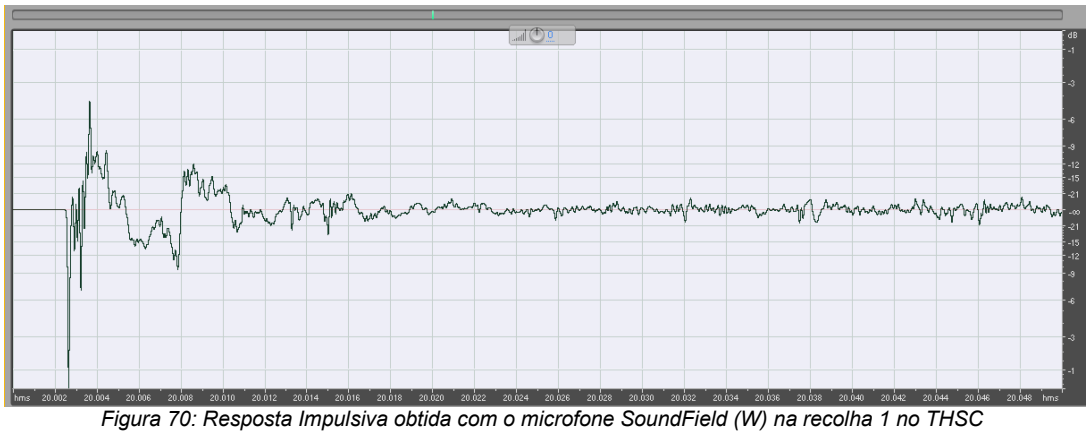


Figura 70: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 no THSC

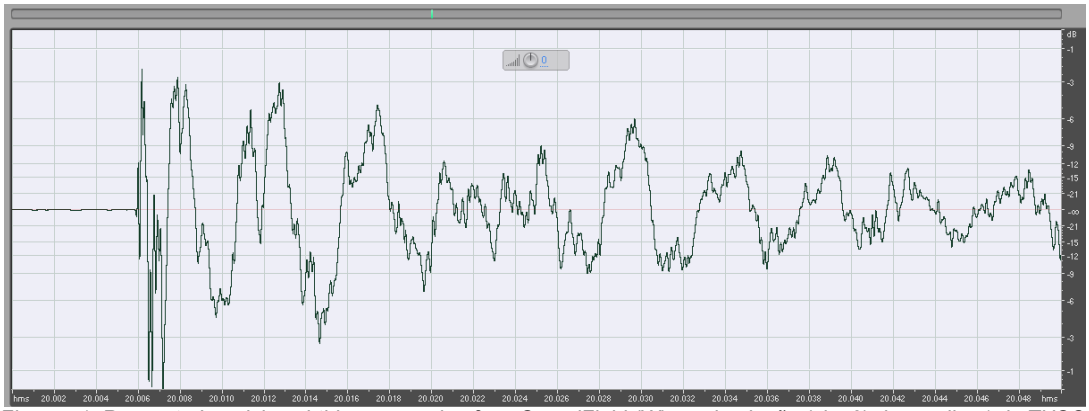


Figura 71: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 do THSC

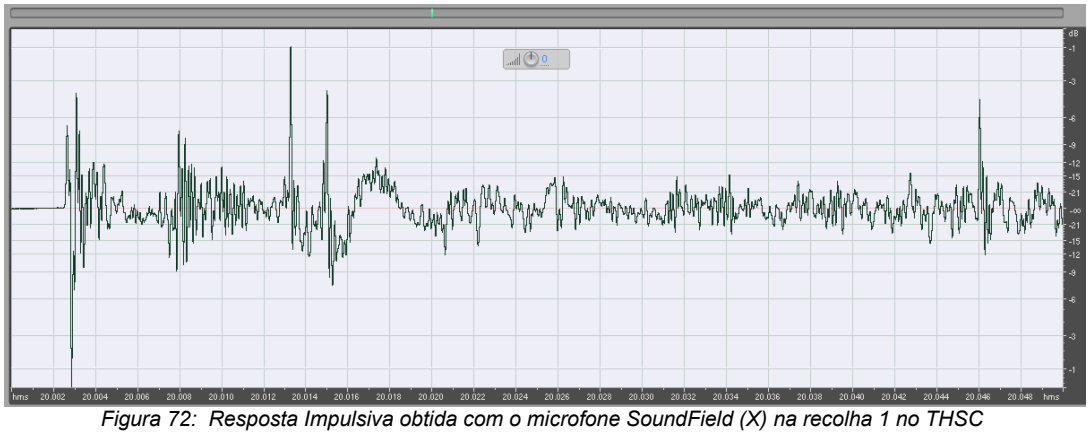


Figura 72: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 1 no THSC

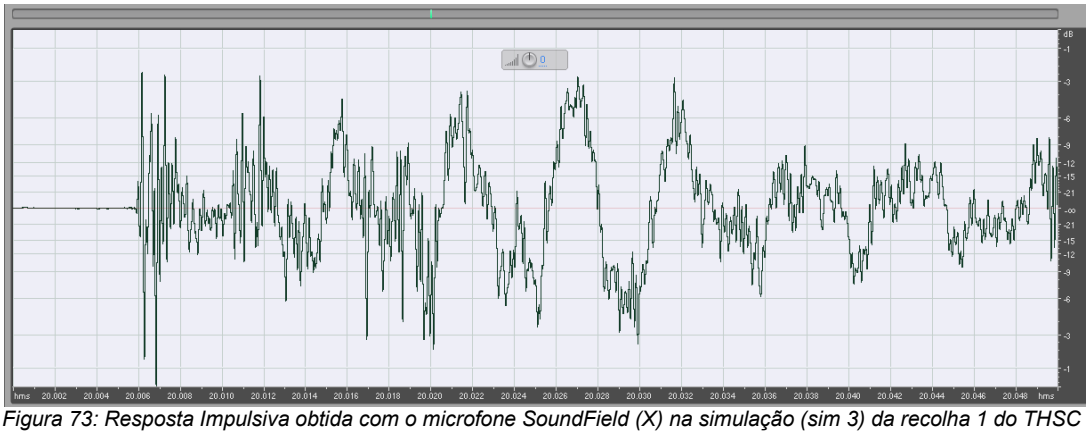


Figura 73: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 1 do THSC



Figura 74: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 1 do THSC

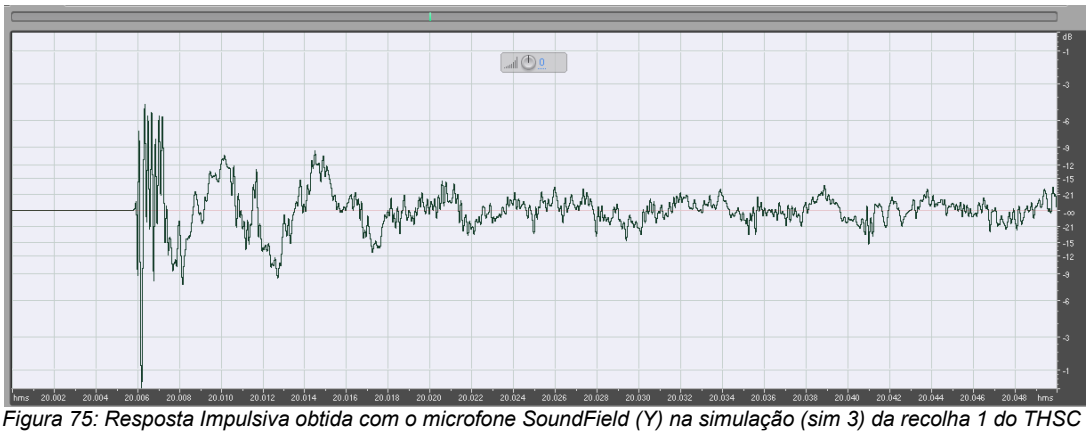


Figura 75: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 1 do THSC

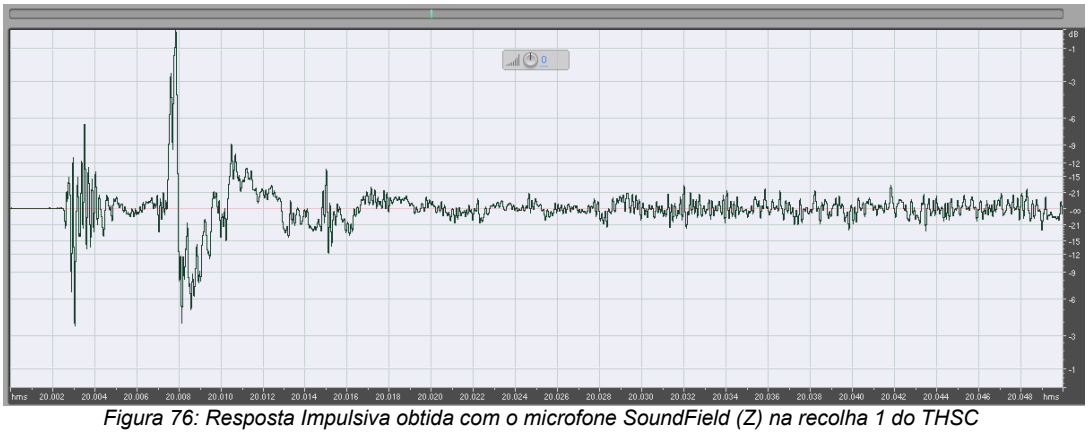


Figura 76: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 1 do THSC

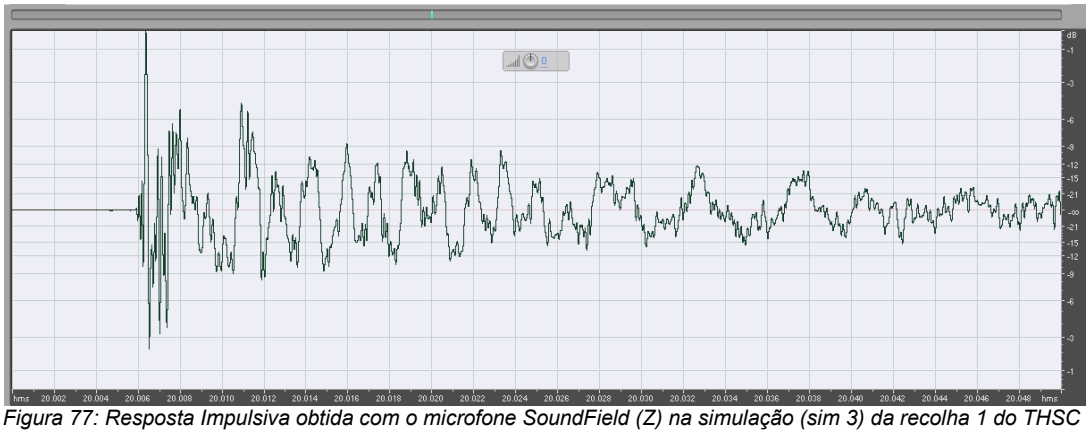


Figura 77: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 1 do THSC

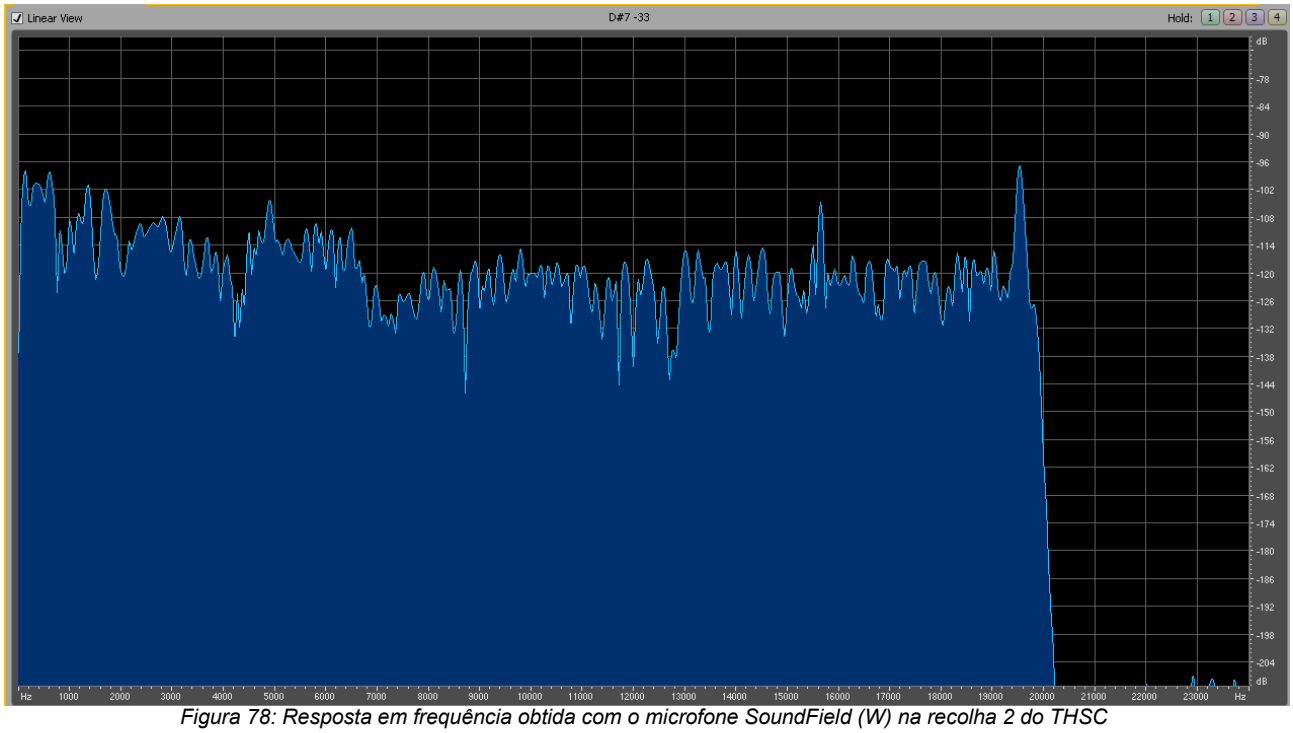


Figura 78: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 do THSC

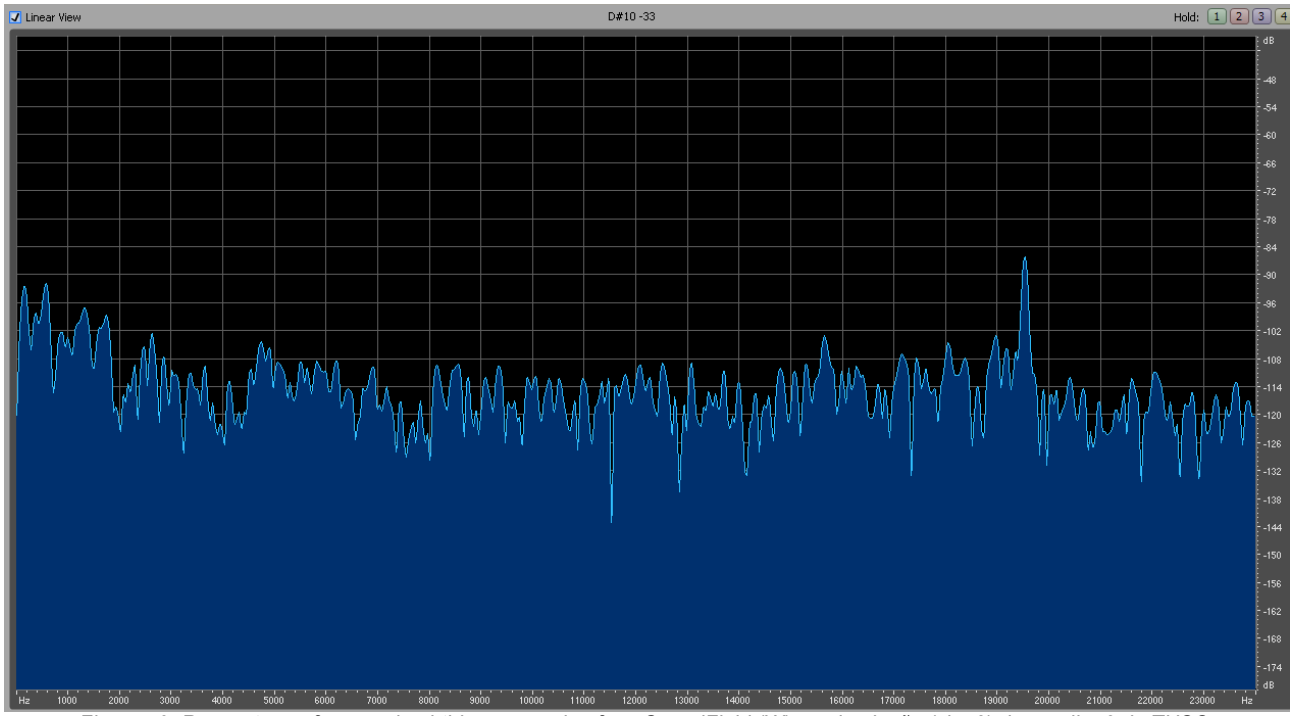


Figura 79: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 do THSC

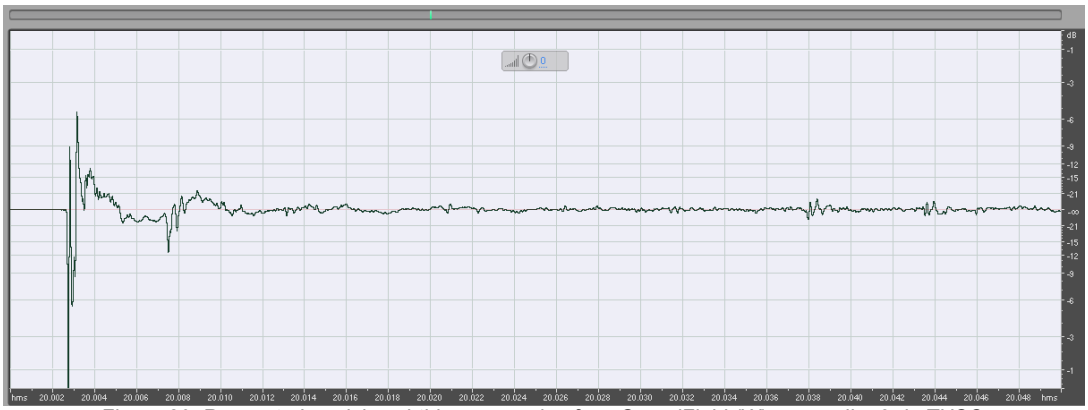


Figura 80: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 do THSC

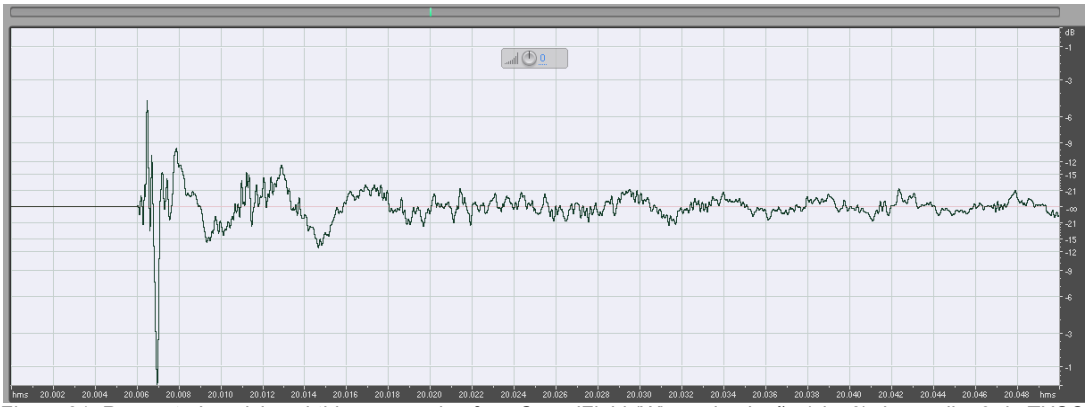


Figura 81: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 do THSC

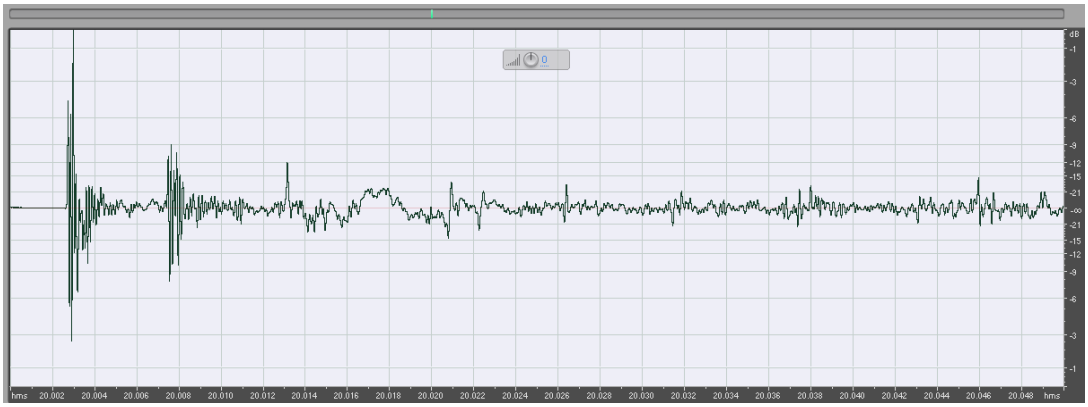


Figura 82: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 2 do THSC

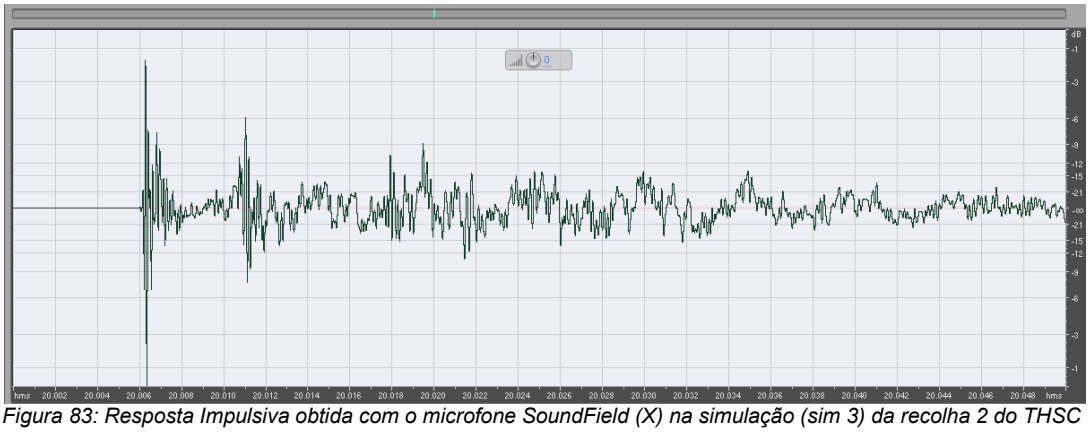


Figura 83: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 2 do THSC

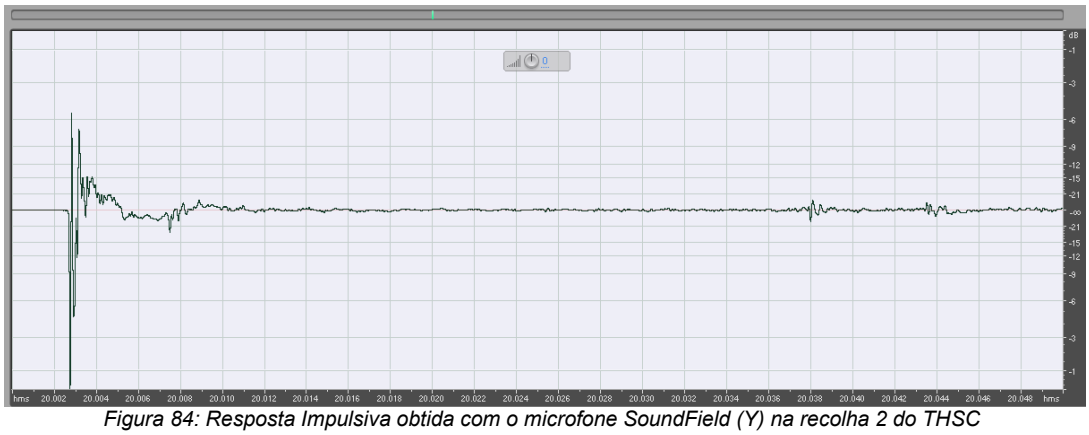


Figura 84: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 2 do THSC

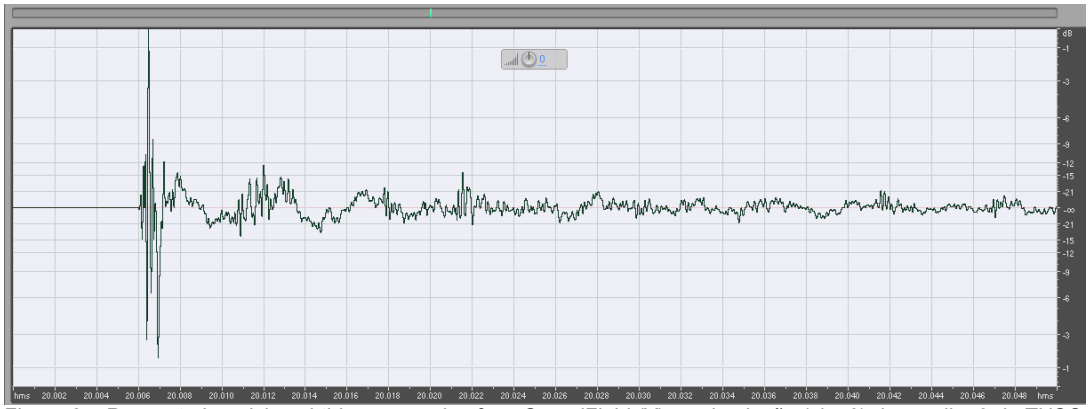


Figura 85: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 2 do THSC

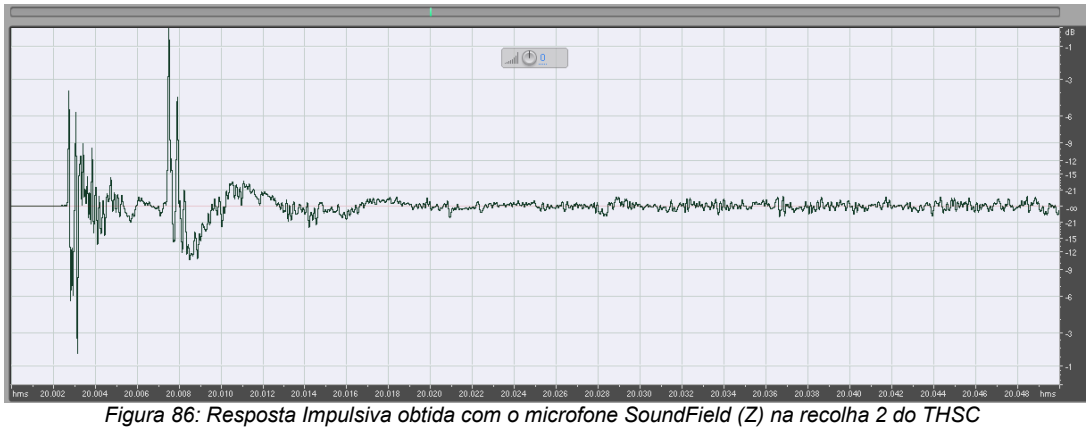


Figura 86: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 2 do THSC

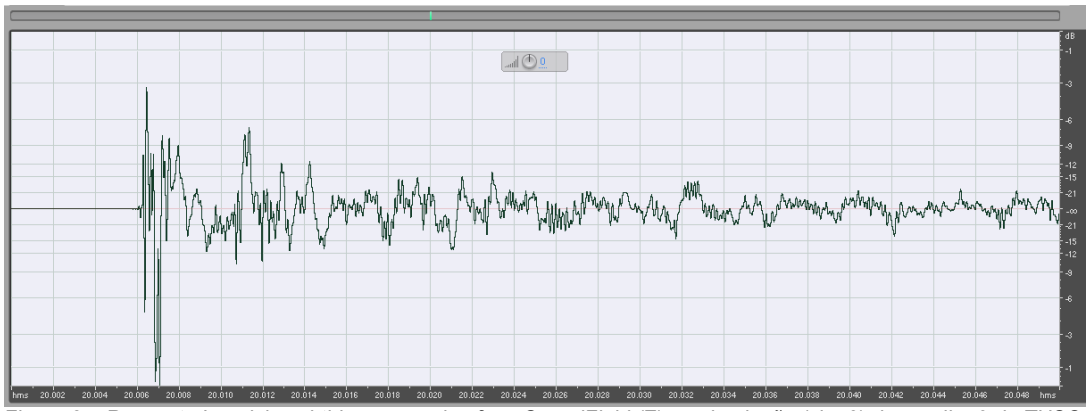


Figura 87: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 2 do THSC

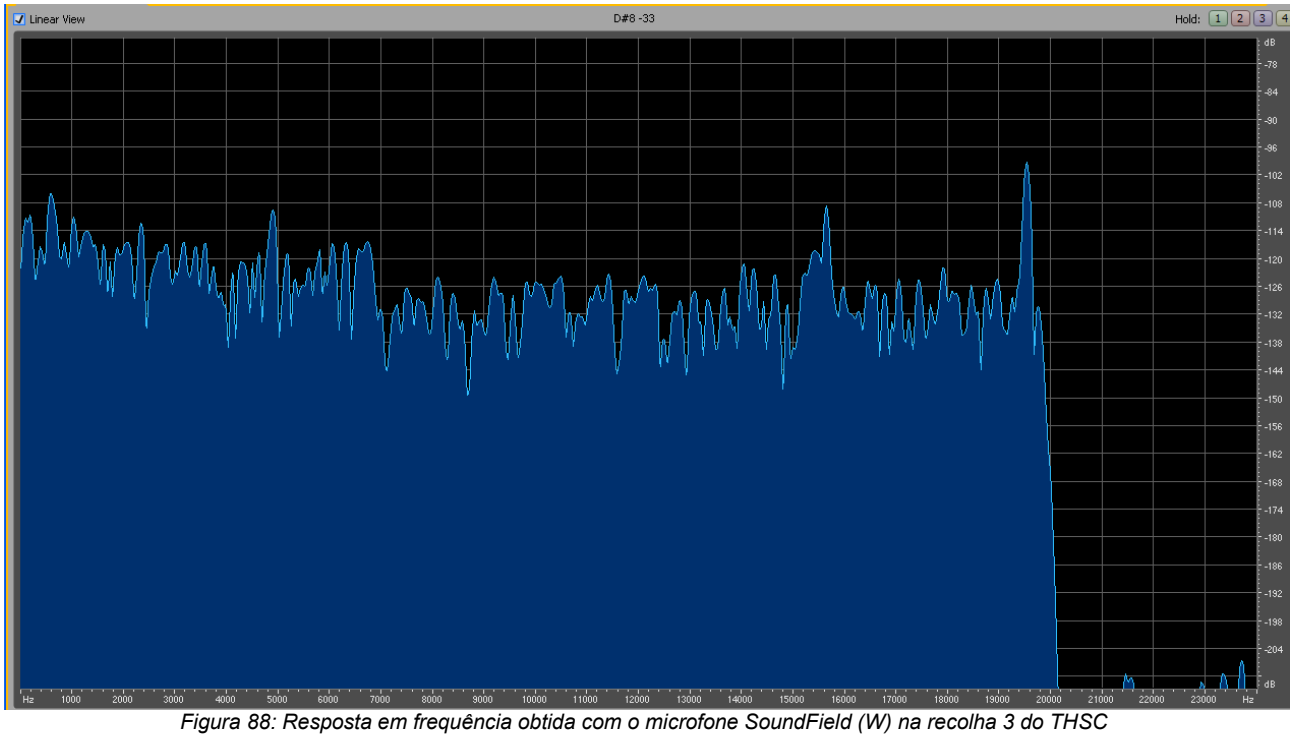


Figura 88: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 do THSC

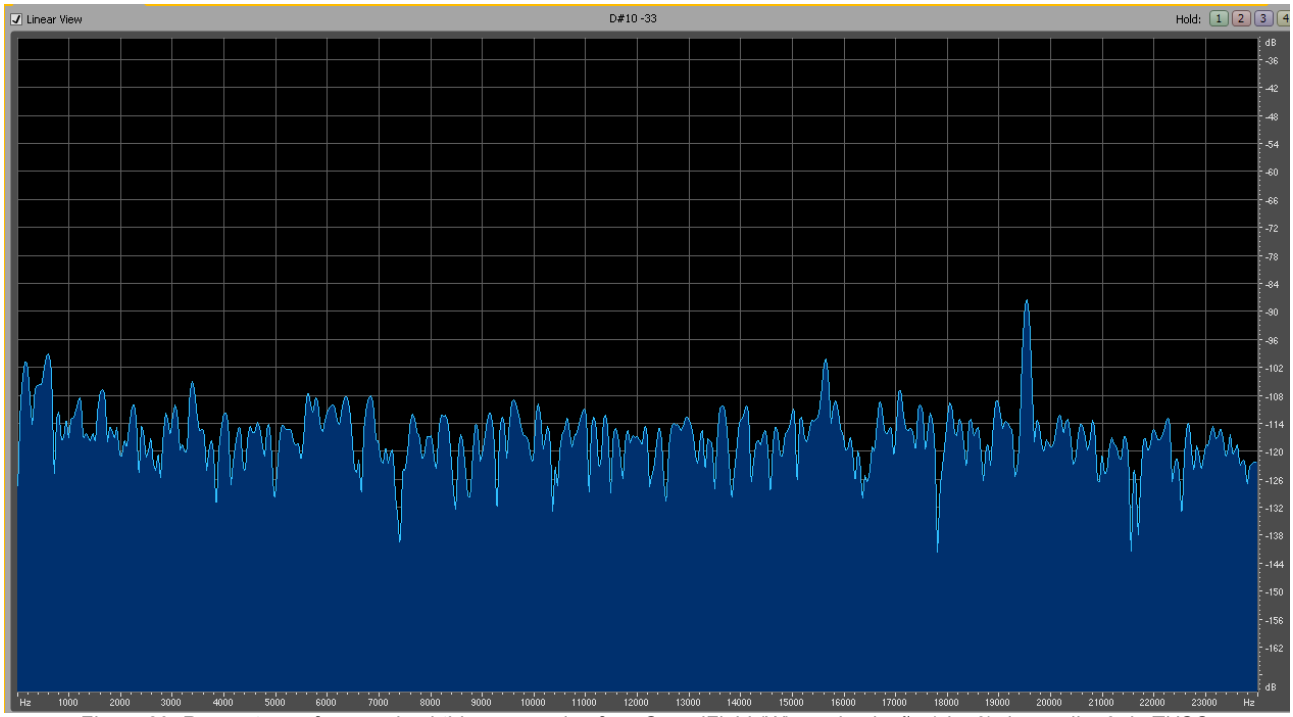


Figura 89: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 do THSC

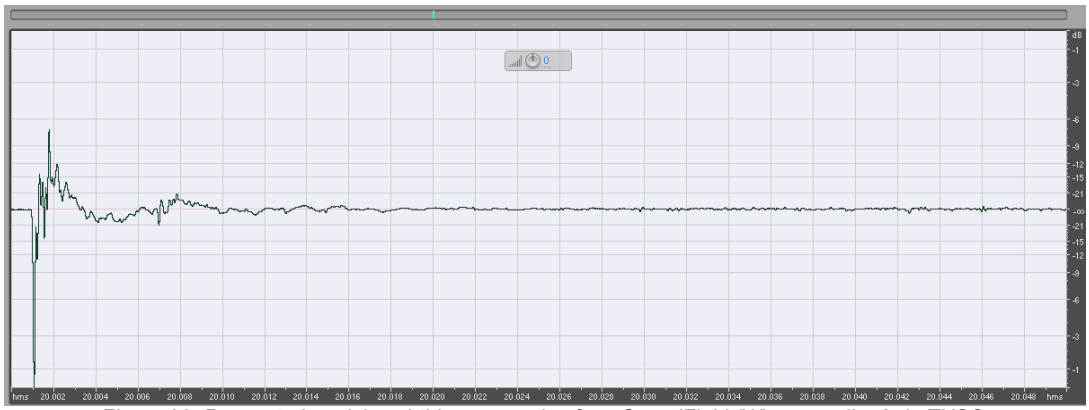


Figura 90: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 do THSC

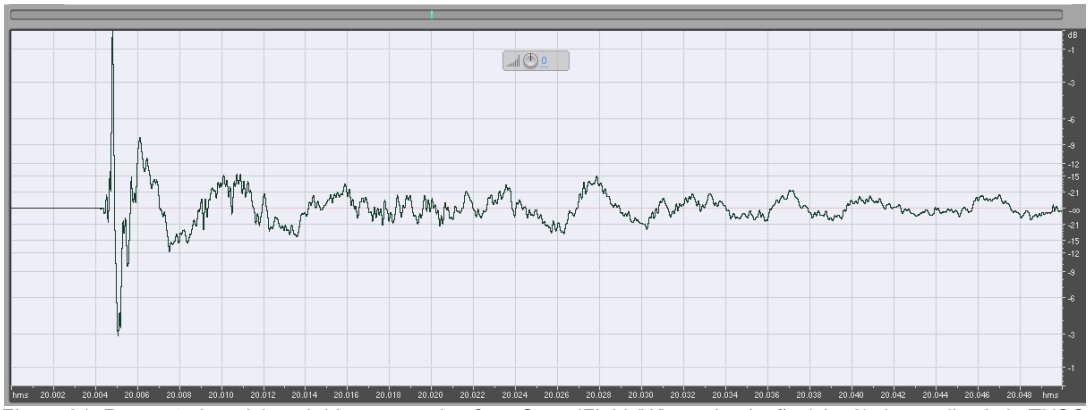


Figura 91: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 do THSC



Figura 92: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 3 do THSC

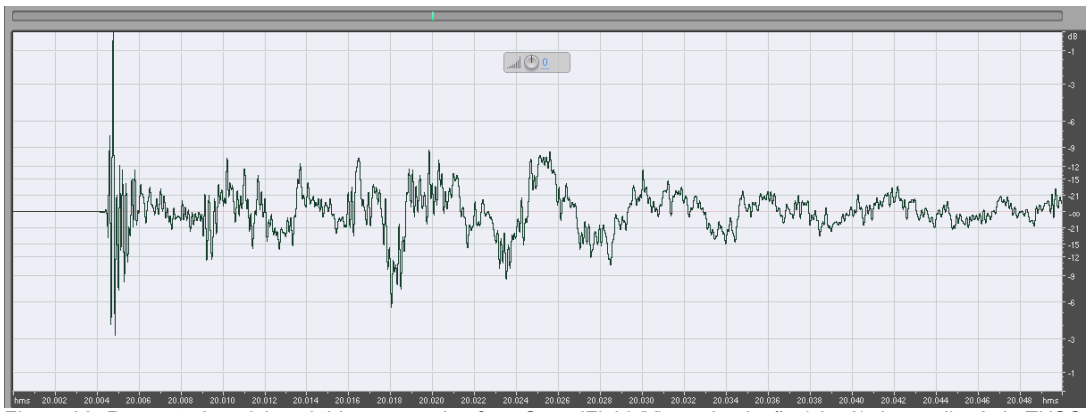


Figura 93: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 3 do THSC

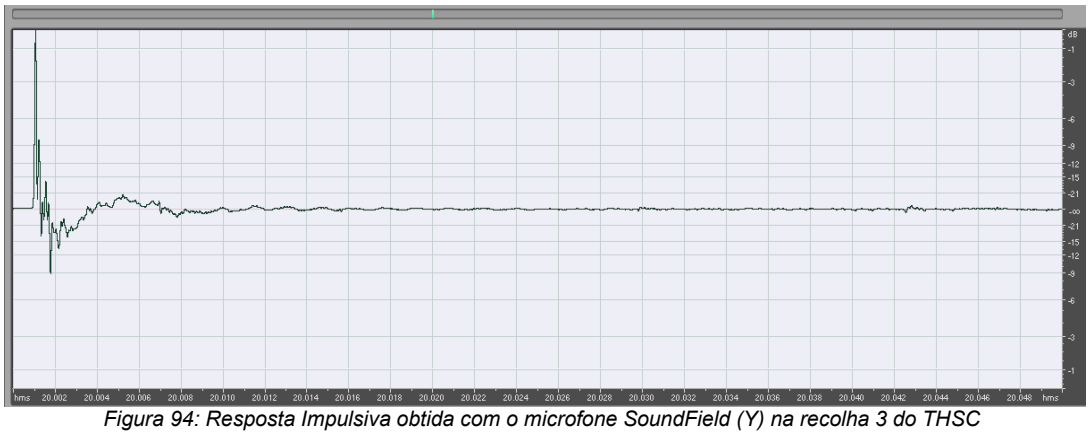


Figura 94: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 3 do THSC

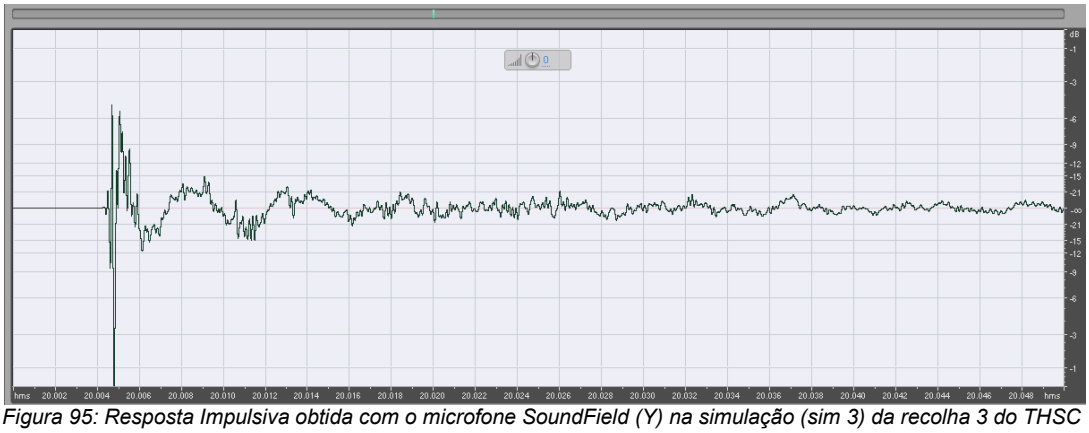


Figura 95: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 3 do THSC

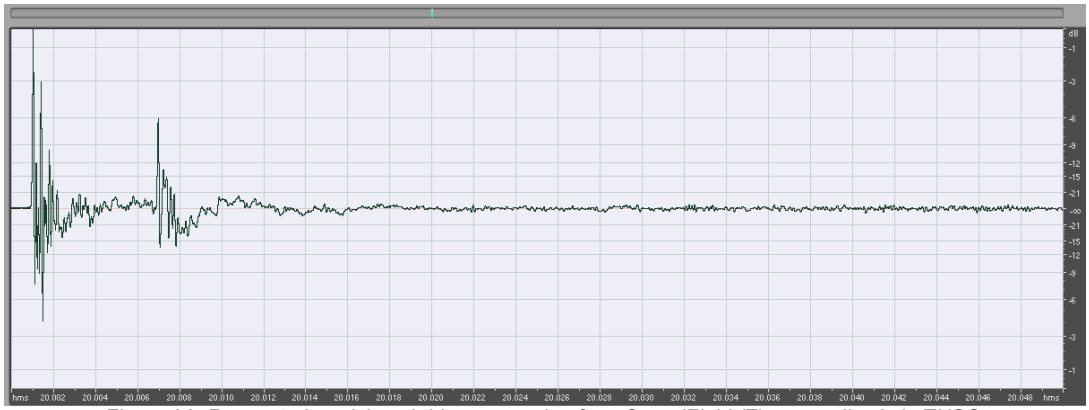


Figura 96: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 3 do THSC

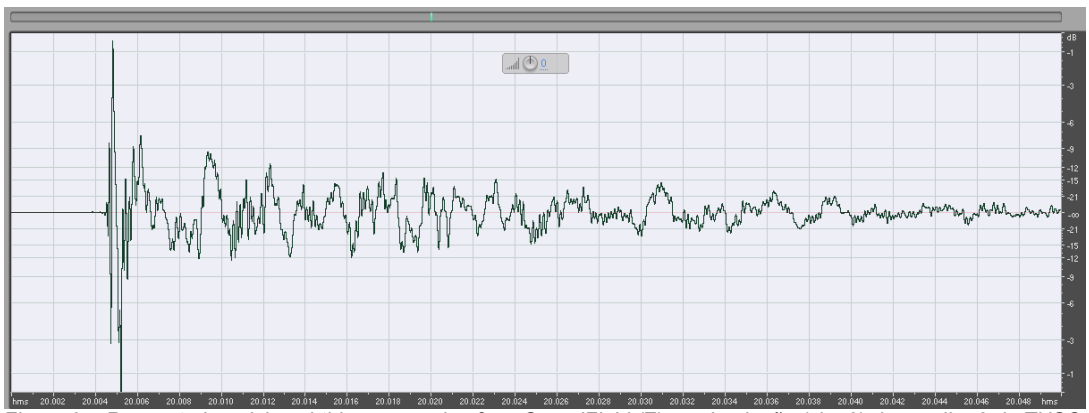


Figura 97: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 3 do THSC

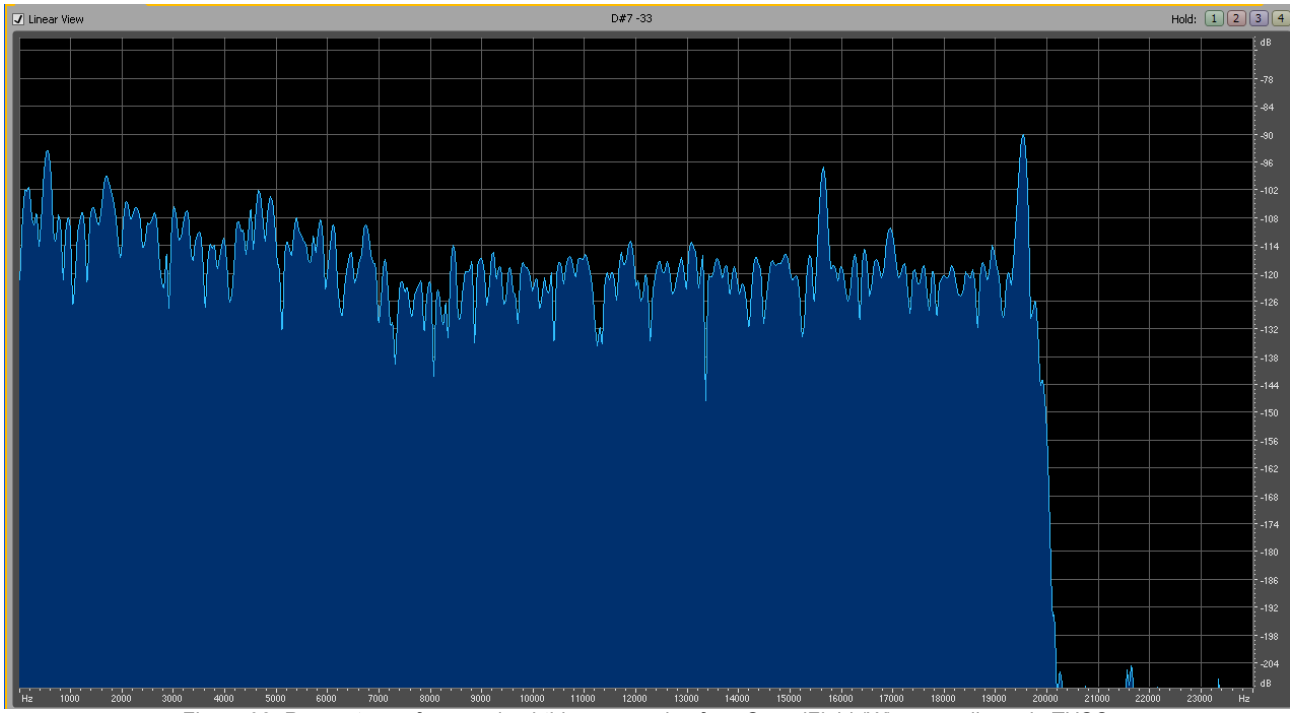


Figura 98: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 do THSC

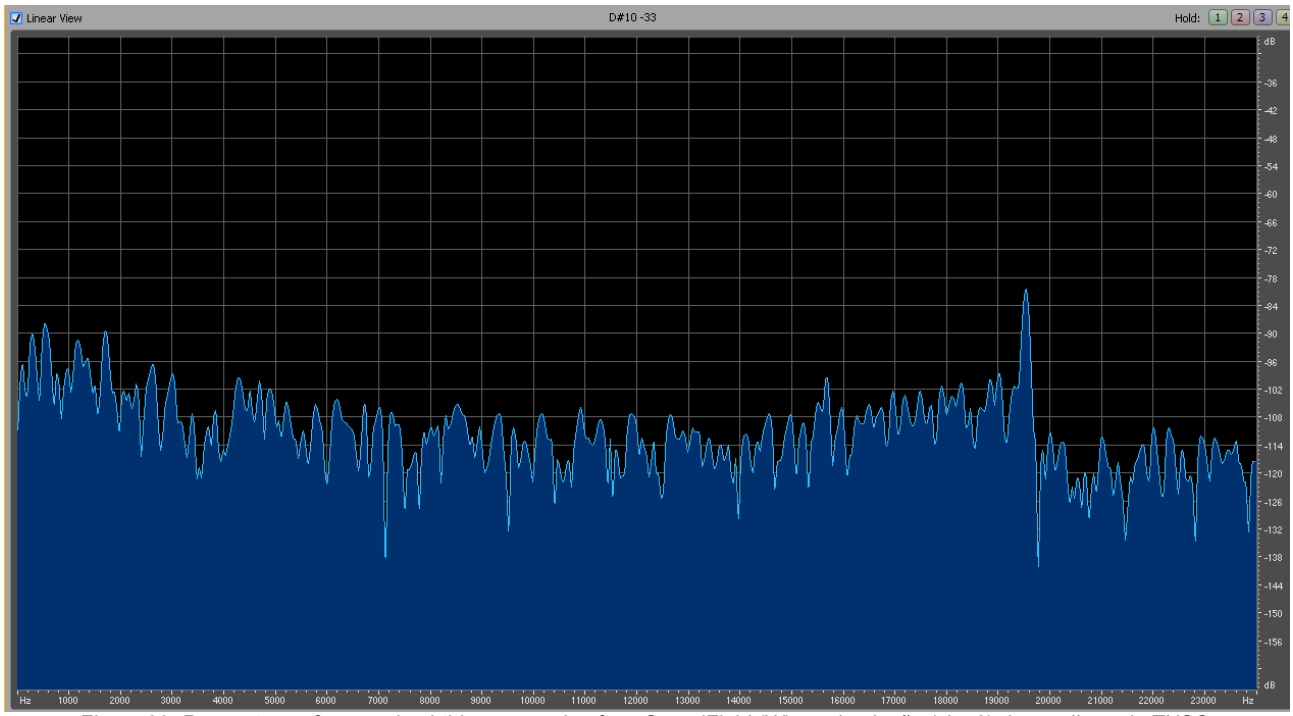


Figura 99: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 do THSC

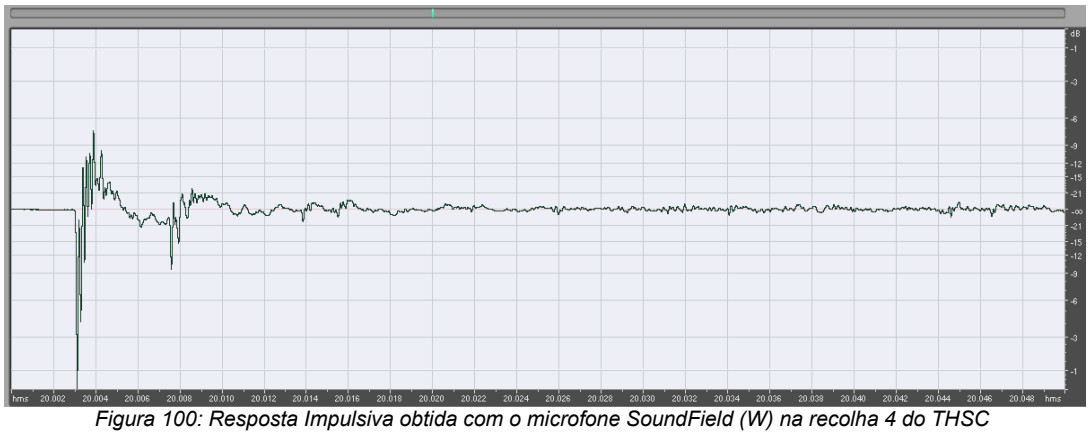


Figura 100: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 do THSC

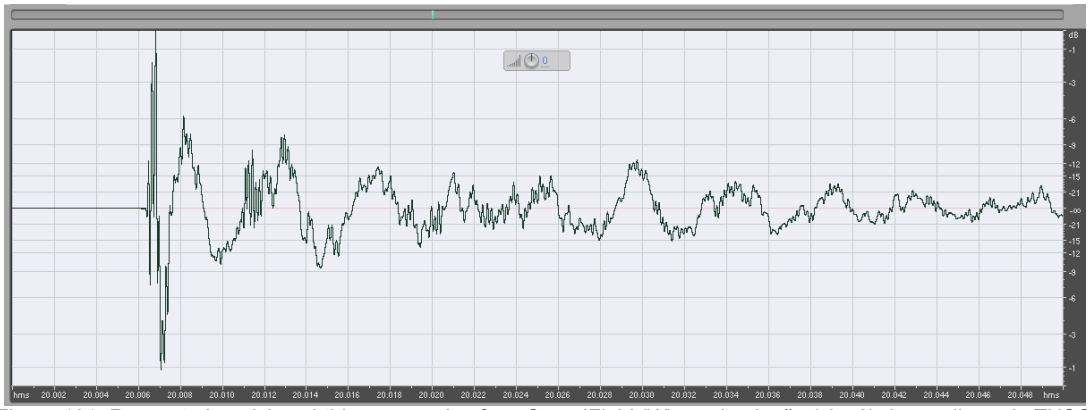


Figura 101: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 do THSC

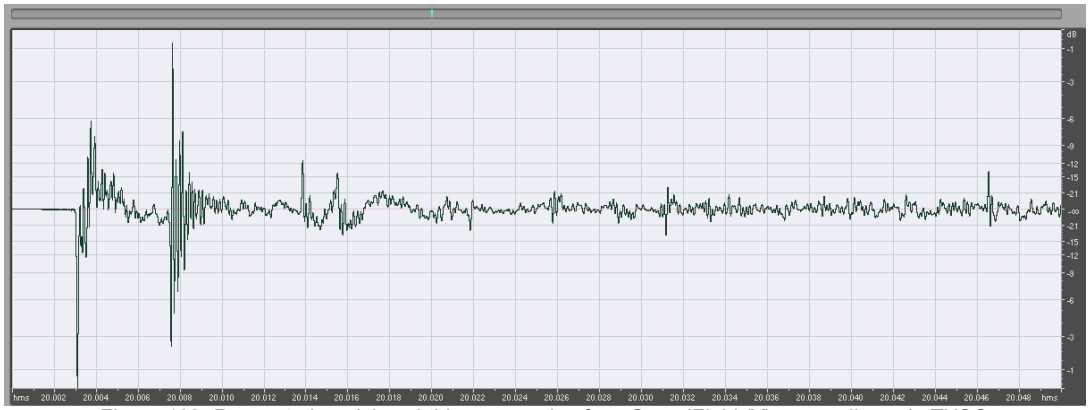


Figura 102: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 4 do THSC

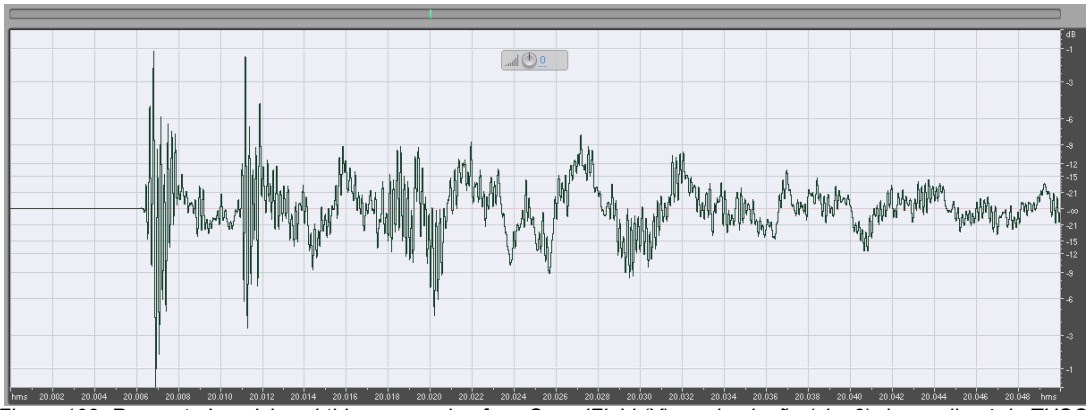


Figura 103: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 4 do THSC

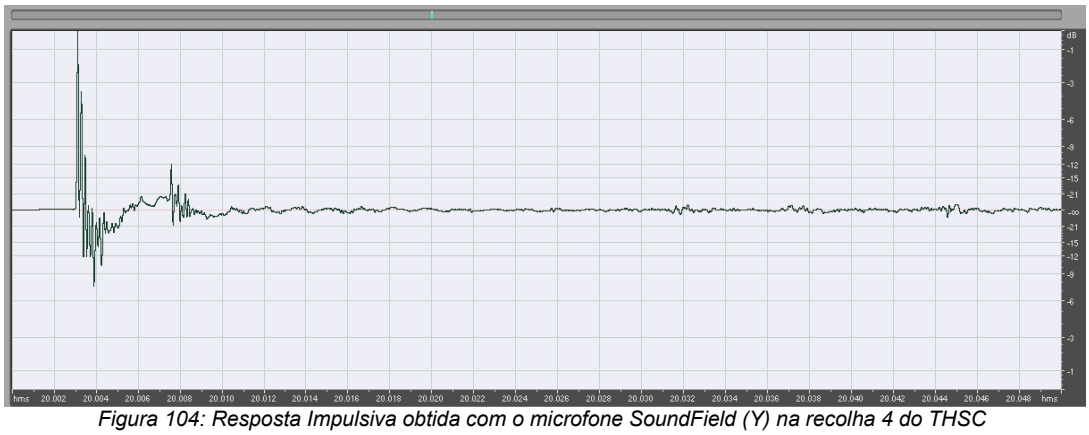


Figura 104: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 4 do THSC

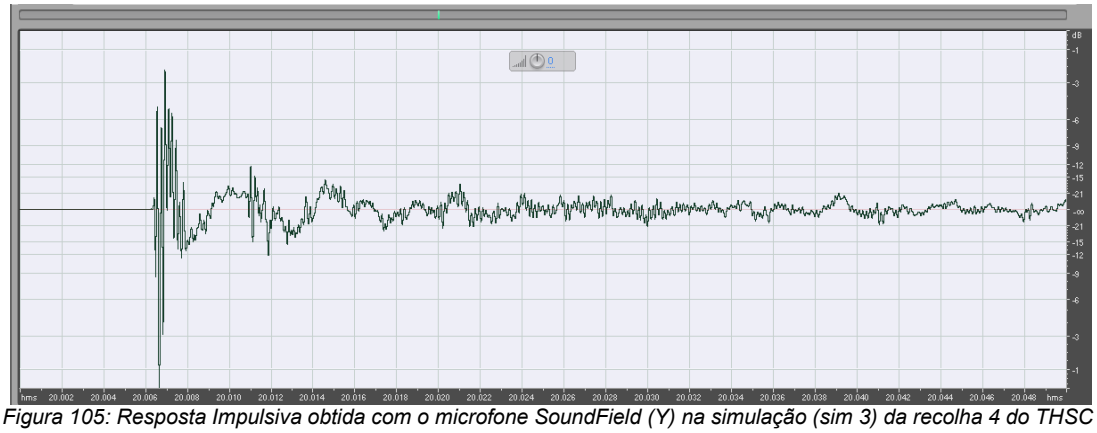


Figura 105: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 4 do THSC

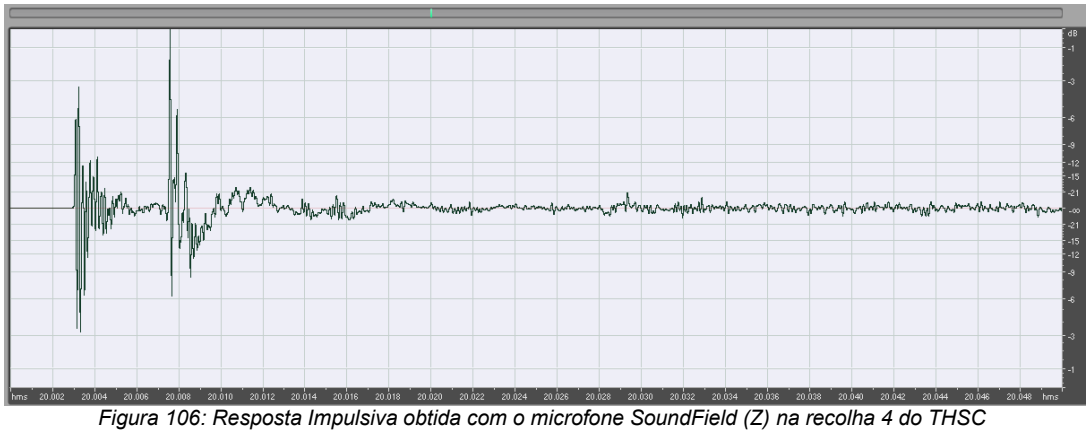


Figura 106: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 4 do THSC

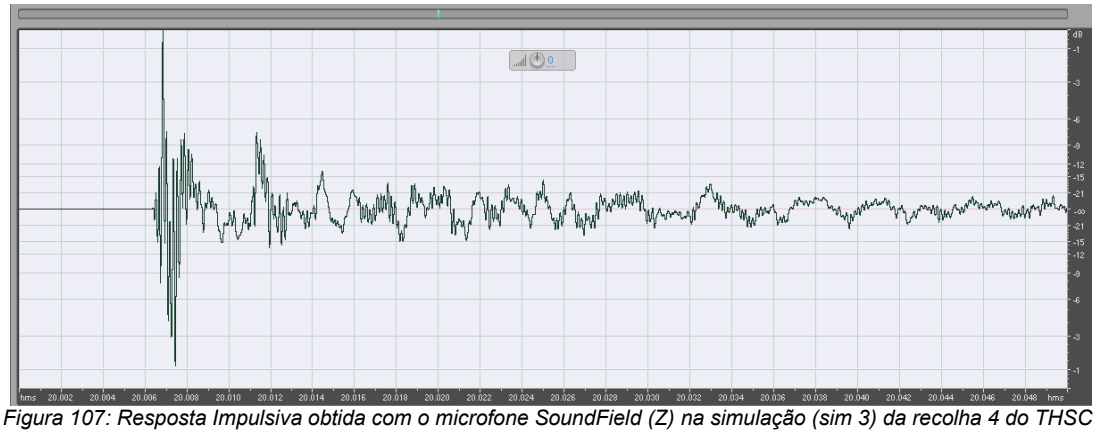


Figura 107: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 4 do THSC

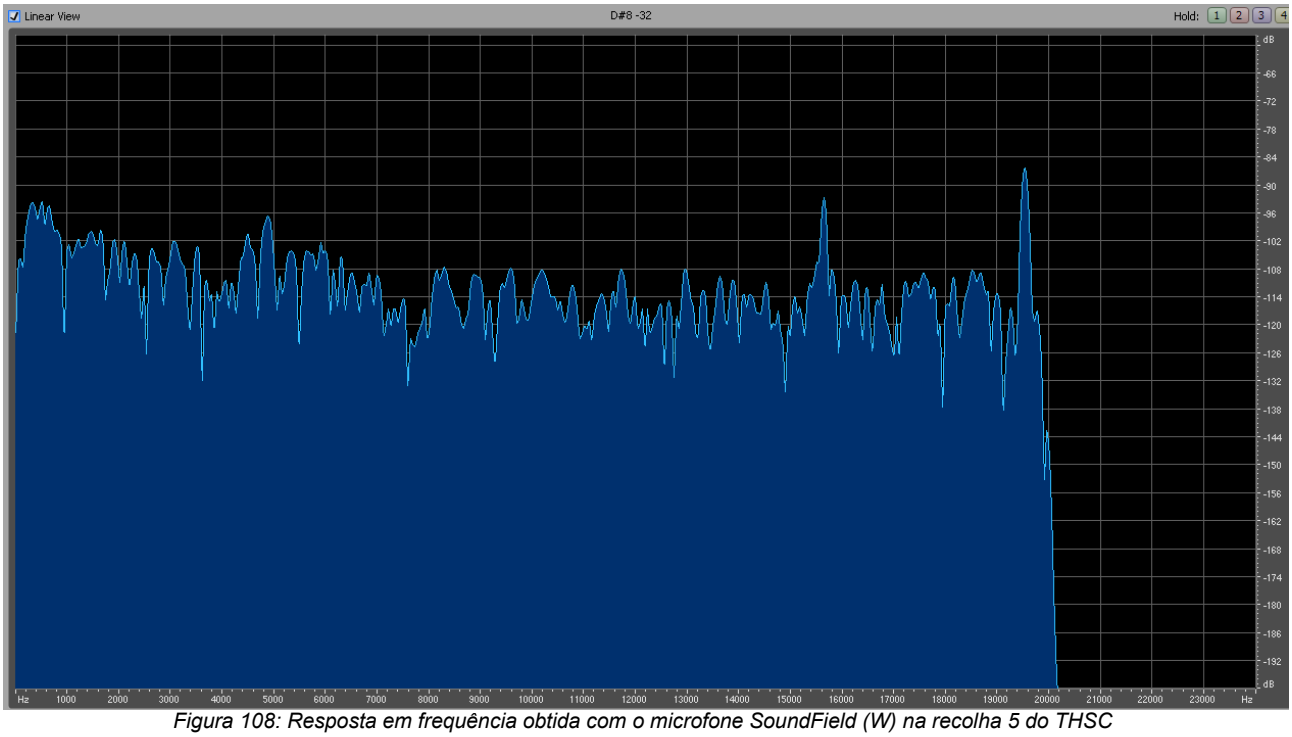


Figura 108: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 do THSC

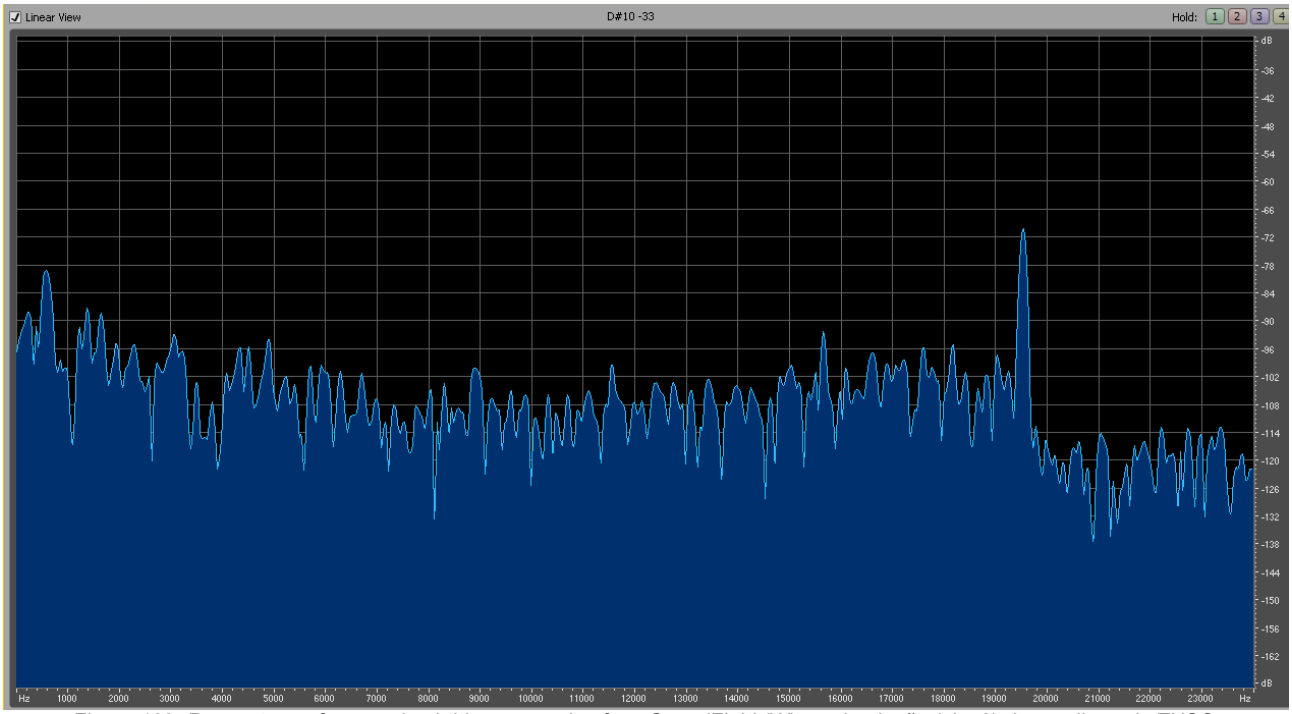


Figura 109: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 do THSC

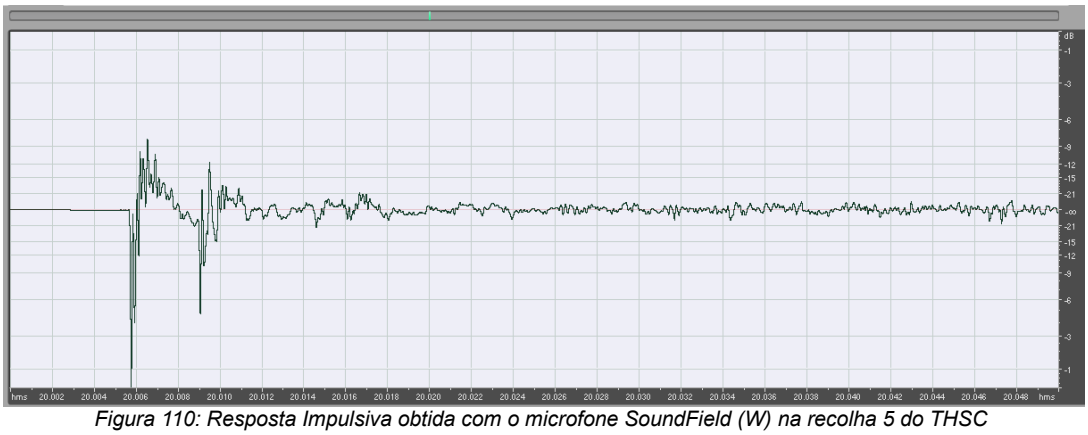


Figura 110: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 do THSC

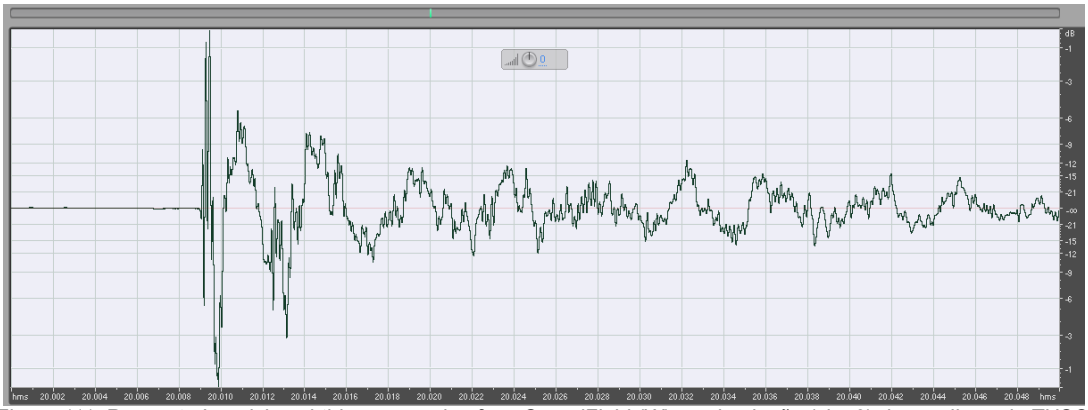


Figura 111: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 do THSC

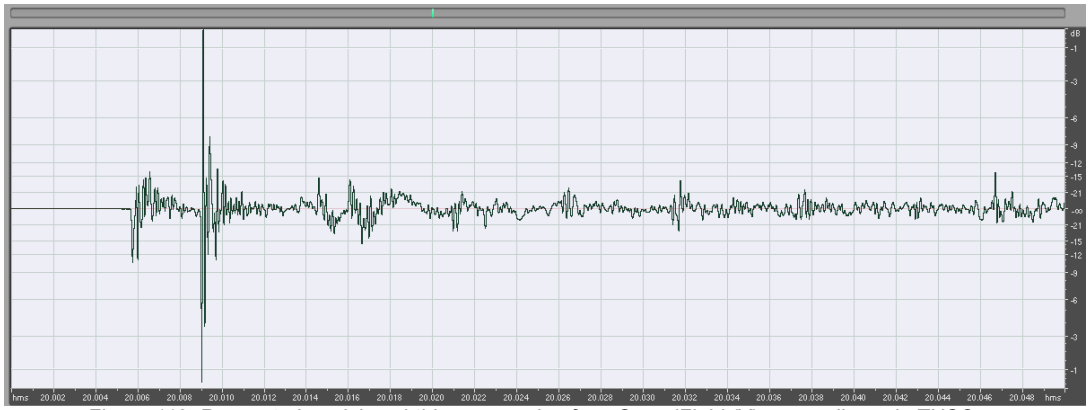


Figura 112: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 5 do THSC

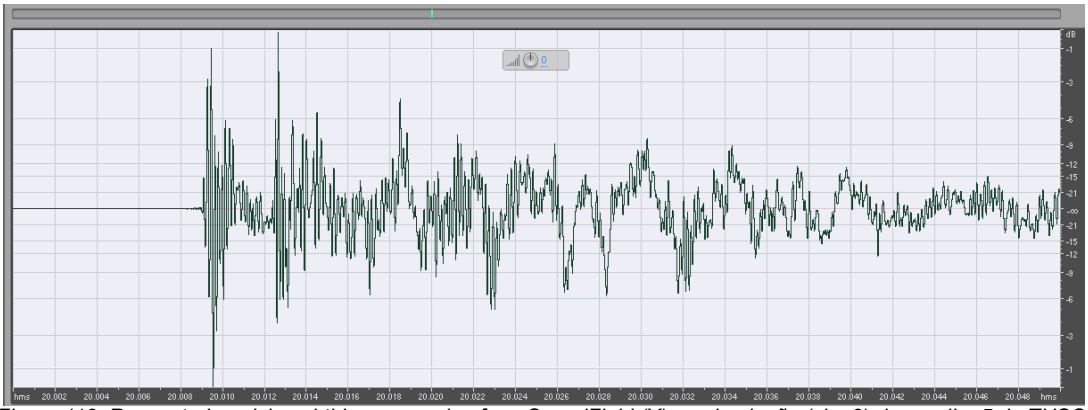


Figura 113: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 5 do THSC

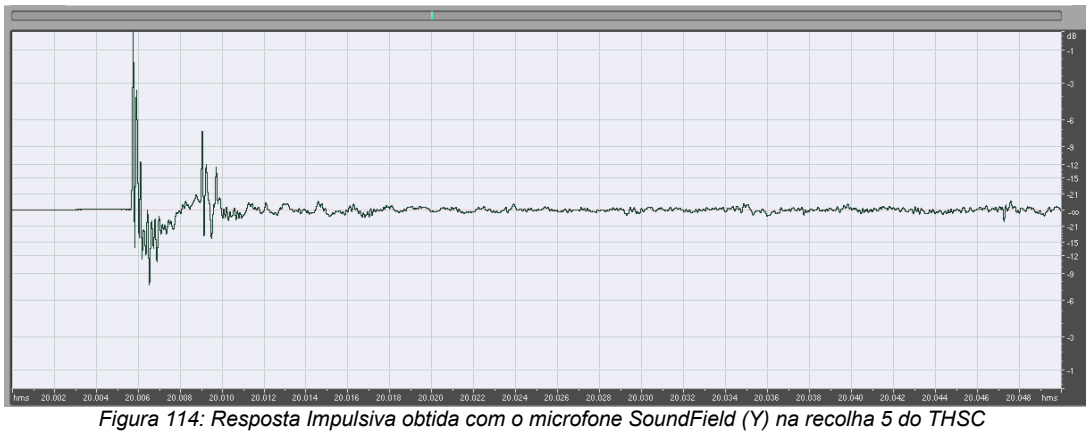


Figura 114: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 5 do THSC

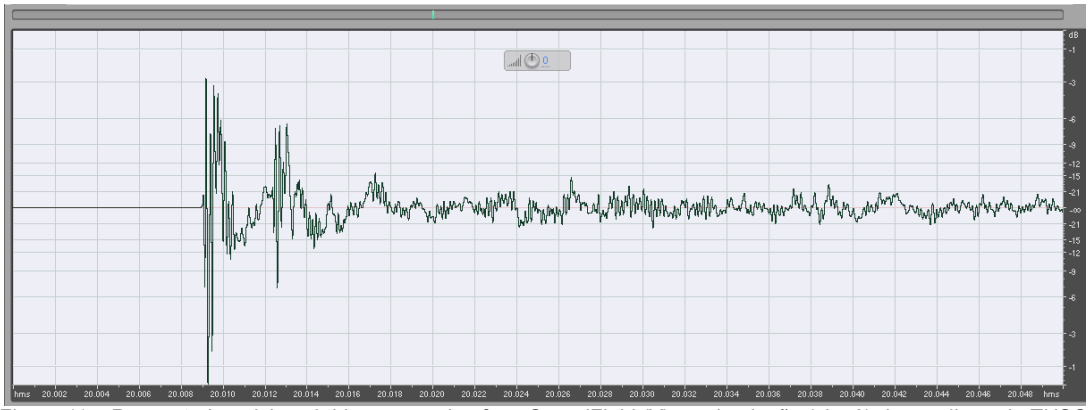


Figura 115: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 5 do THSC

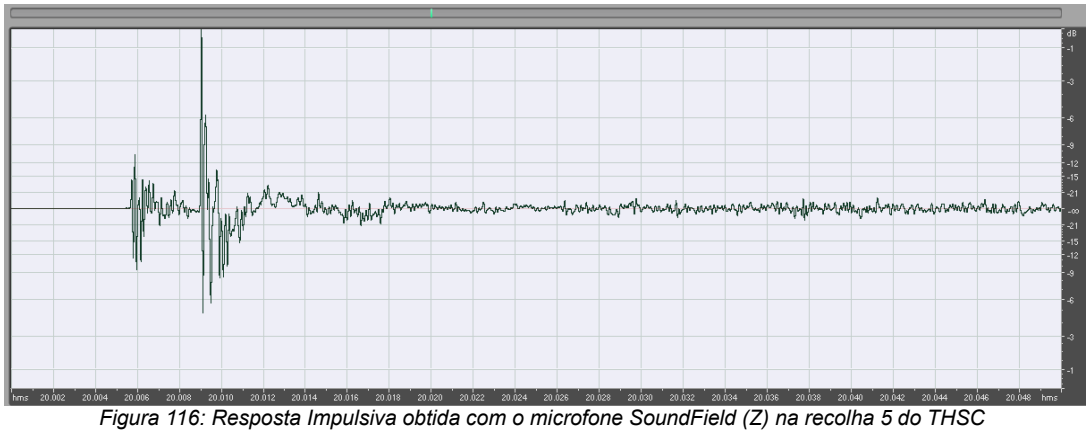


Figura 116: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 5 do THSC

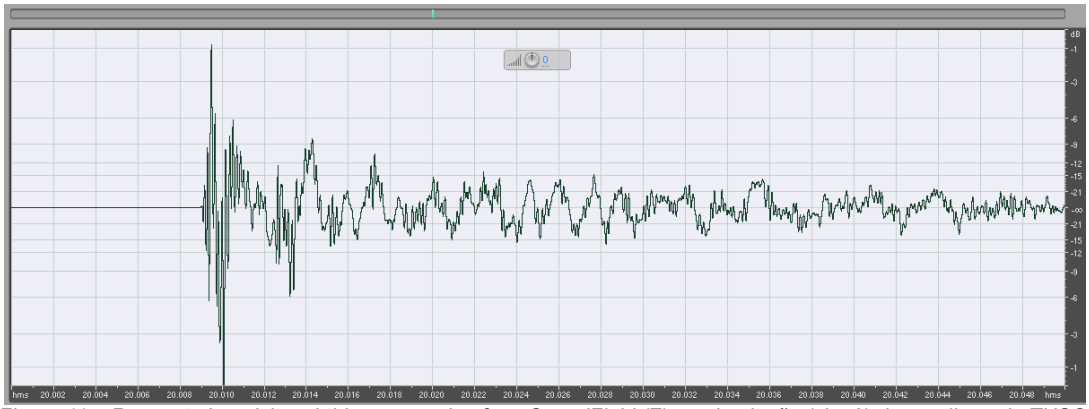


Figura 117: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 5 do THSC

Anexo IV – Tabelas de resultados obtidos no palco e nas simulações do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

GA_CMP – Recolha 1 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	11,16	10,88	9,49	6,25	8,44	15,8
Sim 1	8,53	9,38	8,57	4,33	8	17,68
Sim 2	8,6	9,82	8,73	4,33	7,67	18,11
Sim 3	8,5	10,04	8,94	4,67	7,39	18,4
Sim 4	8,21	8,74	8,47	4,78	8,27	17,3
Sim 5	8,19	8,16	8,53	5,39	8,48	16,86
C80 (dB)						
Original	14,37	13,02	11,09	8,44	10,52	18,33
Sim 1	12,73	10,8	10,38	6,54	10,02	20,13
Sim 2	12,69	11,47	10,47	6,47	9,76	20,45
Sim 3	12,5	11,98	10,59	6,7	9,62	20,61
Sim 4	12,59	10,08	10,35	6,95	10,29	19,88
Sim 5	12,67	9,33	10,45	7,57	10,51	19,61
D50 (%)						
Original	92,89	92,45	89,89	80,85	87,47	97,43
Sim 1	87,7	89,65	87,79	73,06	86,32	98,32
Sim 2	87,88	90,56	88,18	73,06	85,4	98,48
Sim 3	87,62	90,98	88,67	74,56	84,58	98,58
Sim 4	86,88	88,21	87,55	75,05	87,03	98,17
Sim 5	86,82	86,74	87,69	77,58	87,57	97,98
EDT (s)						
Original	0,28	0,1	1,4	1,06	1,31	0
Sim 1	0,39	0,6	0,74	1,07	0,72	0,08
Sim 2	0,4	0,37	0,79	1,06	0,78	0,08
Sim 3	0,41	0,31	0,83	1,05	0,81	0,1
Sim 4	0,46	0,88	1,04	1,09	0,98	0,24
Sim 5	0,37	0,69	0,6	1,04	0,63	0,08
T20 (s)						
Original	0,92	1,13	1,28	1,13	1,06	0,81
Sim 1	0,71	1,03	1,29	1,1	1,05	0,61
Sim 2	0,7	1,04	1,29	1,11	1,06	0,59
Sim 3	0,69	1,05	1,29	1,11	1,06	0,58
Sim 4	0,71	1,03	1,3	1,11	1,06	0,62
Sim 5	0,73	1,02	1,3	1,11	1,06	0,63
T30 (s)						
Original	1,04	1,17	1,3	1,2	1,12	0,78
Sim 1	0,99	1,12	1,32	1,18	1,11	0,7
Sim 2	0,98	1,13	1,32	1,19	1,13	0,7
Sim 3	0,96	1,14	1,31	1,19	1,14	0,7
Sim 4	1,02	1,13	1,32	1,18	1,11	0,71
Sim 5	1,06	1,12	1,33	1,18	1,1	0,72

Tabela 13: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 1

GA_CMP - Recolha 2 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	10,78	11,17	9,83	8,84	11,13	16,64
Sim 1	8,47	9,44	10,94	10,48	11,75	13,83
Sim 2	8,92	9,81	10,59	10,5	11,83	12,4
Sim 3	9,18	10,15	10,26	10,41	11,85	10,75
Sim 4	7,84	9,03	11,15	10,37	11,73	14,63
Sim 5	7,09	8,62	11,49	10,03	11,56	15,17
C80 (dB)						
Original	14,53	13,17	11,56	10,77	13,16	19,41
Sim 1	12,01	12,21	12,21	12,22	13,74	16,42
Sim 2	12,55	12,57	11,9	12,16	13,72	15,06
Sim 3	12,9	12,82	11,56	12,02	13,65	13,67
Sim 4	11,25	11,74	12,38	12,17	13,78	17,32
Sim 5	10,54	11,33	12,72	12,01	13,68	17,9
D50 (%)						
Original	92,28	92,91	90,58	88,45	92,84	97,88
Sim 1	87,55	89,78	92,54	91,78	93,73	96,02
Sim 2	88,62	90,53	91,98	91,81	93,84	94,56
Sim 3	89,22	91,19	91,39	91,65	93,87	92,24
Sim 4	85,88	88,89	92,87	91,58	93,71	96,67
Sim 5	83,64	87,93	93,37	90,97	93,47	97,05
EDT (s)						
Original	0,27	0,07	0,97	1,05	0,42	0
Sim 1	0,46	0,49	0,26	0,41	0,24	0,23
Sim 2	0,43	0,47	0,3	0,4	0,25	0,26
Sim 3	0,4	0,46	0,4	0,44	0,26	0,31
Sim 4	0,48	0,48	0,26	0,49	0,24	0,18
Sim 5	0,49	0,48	0,25	0,57	0,25	0,14
T20 (s)						
Original	1,01	1,16	1,27	1,19	1,09	0,84
Sim 1	0,85	0,98	1,26	1,17	1	0,61
Sim 2	0,84	1,01	1,26	1,19	1,02	0,63
Sim 3	0,82	1,04	1,26	1,19	1,03	0,66
Sim 4	0,85	0,94	1,24	1,16	0,99	0,6
Sim 5	0,87	0,92	1,24	1,14	0,99	0,59
T30 (s)						
Original	1,02	1,21	1,28	1,22	1,12	0,8
Sim 1	1,04	1,14	1,3	1,2	1,06	0,72
Sim 2	1,02	1,16	1,29	1,21	1,08	0,74
Sim 3	0,99	1,17	1,29	1,21	1,09	0,77
Sim 4	1,07	1,11	1,29	1,2	1,06	0,71
Sim 5	1,11	1,09	1,29	1,19	1,06	0,7

Tabela 14: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 2

GA_CMP - Recolha 3 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	16,75	19,03	17,42	14,11	19,73	23,23
Sim 1	12,07	16,64	15,92	15,56	19,05	18,97
Sim 2	12,64	17,28	16,05	15,5	19,15	19,01
Sim 3	13,09	17,68	16,2	15,26	19,06	19,23
Sim 4	12,72	15,73	14,86	13,29	17,3	22,86
Sim 5	12,17	14,91	14,64	14,09	17,61	22,44
C80 (dB)						
Original	18,07	20,1	18,54	16,24	21,63	26,35
Sim 1	17,63	18,07	17,87	17,52	21,93	22,78
Sim 2	17,55	18,54	17,96	17,43	22,08	23,08
Sim 3	17,5	18,91	18,09	17,21	22,08	23,45
Sim 4	18,46	17,54	16,38	14,92	19,91	27,06
Sim 5	18,55	17,13	16,22	15,72	20,28	26,68
D50 (%)						
Original	97,93	98,76	98,22	96,26	98,95	99,53
Sim 1	94,15	97,88	97,51	97,3	98,77	98,75
Sim 2	94,84	98,16	97,57	97,26	98,8	98,76
Sim 3	95,32	98,32	97,65	97,11	98,77	98,82
Sim 4	94,93	97,4	96,84	95,53	98,17	99,49
Sim 5	94,28	96,87	96,67	96,25	98,3	99,43
EDT (s)						
Original	0,07	0,03	0,02	0,01	0	0
Sim 1	0,26	0,16	0,18	0,07	0,14	0,16
Sim 2	0,26	0,14	0,17	0,07	0,16	0,15
Sim 3	0,26	0,12	0,16	0,08	0,18	0,15
Sim 4	0,26	0,21	0,24	0,58	0,18	0,22
Sim 5	0,24	0,17	0,21	0,15	0,17	0,06
T20 (s)						
Original	0,9	0	1,15	1,12	0,96	0
Sim 1	0,62	0,79	0,79	0,91	0,47	0,34
Sim 2	0,65	0,8	0,8	0,91	0,45	0,33
Sim 3	0,67	0,81	0,81	0,92	0,44	0,31
Sim 4	0,59	0,73	0,89	0,94	0,57	0,23
Sim 5	0,58	0,72	0,88	0,9	0,56	0,24
T30 (s)						
Original	1,04	1,03	1,28	1,21	1,06	0,73
Sim 1	0,94	0,89	1,11	1,12	0,82	0,54
Sim 2	0,95	0,9	1,13	1,13	0,8	0,54
Sim 3	0,96	0,9	1,15	1,13	0,8	0,52
Sim 4	0,94	0,9	1,18	1,13	0,89	0,45
Sim 5	0,92	0,91	1,18	1,12	0,87	0,47

Tabela 15: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 3

GA_CMP - Recolha 4 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	11,64	12,17	9	9,11	7,92	15,36
Sim 1	8,97	10,3	7,39	5,74	6,43	16,84
Sim 2	8,81	10,74	7,63	5,2	5,9	17,49
Sim 3	8,91	11,08	7,83	5,41	5,73	17,78
Sim 4	8,65	9,64	7,28	6,63	6,97	16,61
Sim 5	8,57	9	7,19	7,67	7,52	16,3
C80 (dB)						
Original	14,67	14,01	11,21	11,19	10,47	18,23
Sim 1	13,05	11,68	9,64	7,69	8,58	19,85
Sim 2	12,8	12,4	9,86	7,13	8,13	20,29
Sim 3	12,79	12,93	10,1	7,29	8	20,45
Sim 4	12,92	10,92	9,54	8,54	9,13	19,61
Sim 5	12,94	10,16	9,55	9,61	9,71	19,27
D50 (%)						
Original	93,58	94,28	88,82	89,07	86,09	97,17
Sim 1	88,74	91,46	84,56	78,95	81,47	97,97
Sim 2	88,38	92,23	85,27	76,81	79,55	98,25
Sim 3	88,6	92,77	85,86	77,64	78,91	98,36
Sim 4	88	90,2	84,23	82,16	83,27	97,87
Sim 5	87,79	88,83	83,98	85,41	84,97	97,71
EDT (s)						
Original	0,22	0,05	1,38	1,15	1,14	0,01
Sim 1	0,37	0,3	0,86	1	0,83	0,07
Sim 2	0,39	0,27	0,91	1,01	0,88	0,07
Sim 3	0,39	0,26	0,94	1	0,91	0,07
Sim 4	0,37	0,37	0,82	1,01	0,78	0,07
Sim 5	0,36	0,55	0,77	0,95	0,71	0,07
T20 (s)						
Original	0,93	1,14	1,17	1,14	1,03	0,77
Sim 1	0,71	1,03	1,19	1,16	1,06	0,58
Sim 2	0,69	1,04	1,19	1,14	1,06	0,56
Sim 3	0,69	1,05	1,18	1,13	1,05	0,56
Sim 4	0,71	1,02	1,2	1,17	1,06	0,59
Sim 5	0,72	1,02	1,21	1,18	1,06	0,59
T30 (s)						
Original	1,04	1,17	1,28	1,19	1,08	0,79
Sim 1	0,99	1,12	1,29	1,19	1,09	0,68
Sim 2	0,98	1,13	1,29	1,18	1,1	0,69
Sim 3	0,97	1,14	1,29	1,17	1,1	0,69
Sim 4	1,01	1,11	1,29	1,19	1,09	0,69
Sim 5	1,03	1,11	1,29	1,19	1,1	0,7

Tabela 16: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 4

GA_CMP - Recolha 5 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	7,49	8,11	6,1	6,78	6,51	10,19
Sim 1	5,47	6,21	4,33	3,99	5,17	11,49
Sim 2	5,38	6,47	4,47	3,52	4,98	12,02
Sim 3	5,44	6,68	4,69	3,62	4,91	12,35
Sim 4	5,21	5,9	4,37	4,71	5,44	10,87
Sim 5	4,98	5,61	4,65	5,5	5,61	10,45
C80 (dB)						
Original	9,74	9,23	8,21	9,13	8,66	12,82
Sim 1	9,59	7,57	6,6	6,18	7,53	14,01
Sim 2	9,22	7,87	6,61	5,79	7,25	14,33
Sim 3	9,02	8,13	6,75	5,89	7,1	14,53
Sim 4	9,78	7,21	6,61	6,9	7,82	13,63
Sim 5	9,88	6,91	6,94	7,69	8,03	13,34
D50 (%)						
Original	84,87	86,62	80,29	82,65	81,74	91,27
Sim 1	77,88	80,71	73,06	71,47	76,69	93,38
Sim 2	77,52	81,62	73,66	69,21	75,89	94,09
Sim 3	77,76	82,33	74,64	69,72	75,58	94,5
Sim 4	76,87	79,56	73,25	74,72	77,78	92,44
Sim 5	75,9	78,43	74,47	78	78,43	91,73
EDT (s)						
Original	0,87	1,16	1,34	1,23	1,1	0,76
Sim 1	0,54	1,18	1,25	1,1	0,93	0,29
Sim 2	0,61	1,17	1,3	1,12	0,96	0,26
Sim 3	0,64	1,16	1,3	1,13	0,99	0,25
Sim 4	0,51	1,13	1,23	1,06	0,88	0,33
Sim 5	0,49	1,05	1,16	1,04	0,87	0,4
T20 (s)						
Original	1,06	1,17	1,3	1,21	1,09	0,81
Sim 1	0,95	1,22	1,27	1,18	1,09	0,76
Sim 2	0,95	1,2	1,27	1,17	1,08	0,77
Sim 3	0,95	1,18	1,27	1,17	1,08	0,76
Sim 4	0,92	1,24	1,26	1,17	1,08	0,75
Sim 5	0,9	1,25	1,26	1,17	1,09	0,75
T30 (s)						
Original	1,02	1,13	1,32	1,24	1,13	0,84
Sim 1	1,08	1,15	1,31	1,27	1,14	0,81
Sim 2	1,06	1,14	1,3	1,27	1,14	0,81
Sim 3	1,06	1,13	1,3	1,26	1,14	0,82
Sim 4	1,09	1,17	1,31	1,26	1,13	0,8
Sim 5	1,11	1,18	1,31	1,25	1,14	0,8

Tabela 17: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 5

Anexo V – Gráficos comparativos dos resultados obtidos no palco e simulações do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

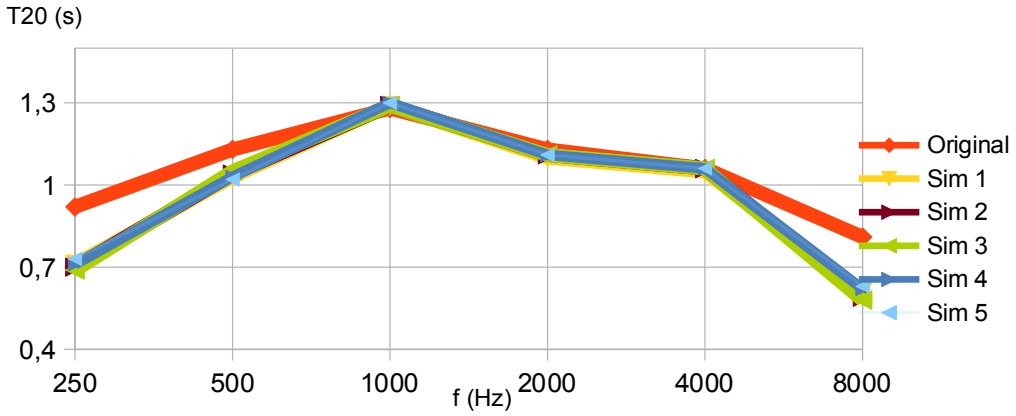


Figura 118: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações na configuração da recolha 1

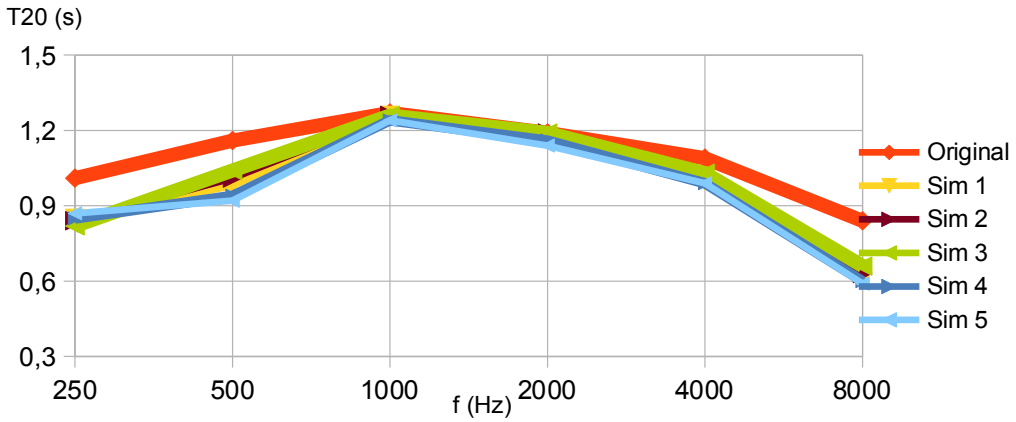


Figura 119: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações na configuração da recolha 2

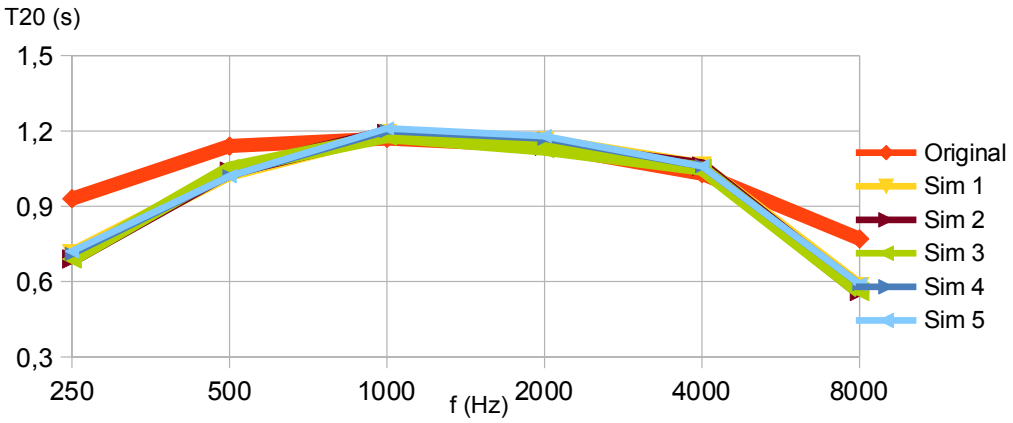


Figura 120: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações na configuração da recolha 4

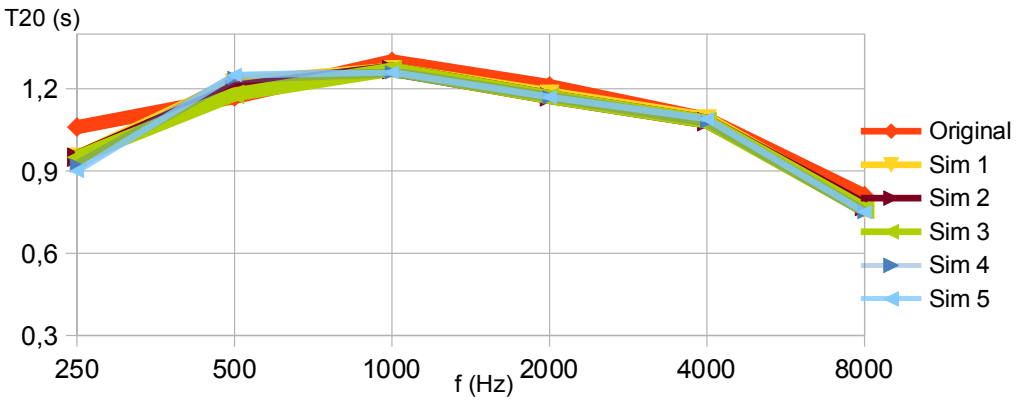


Figura 121: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e nas respectivas simulações na configuração da recolha 5

Anexo VI – Resposta em frequência e impulsivas no palco e simulações do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

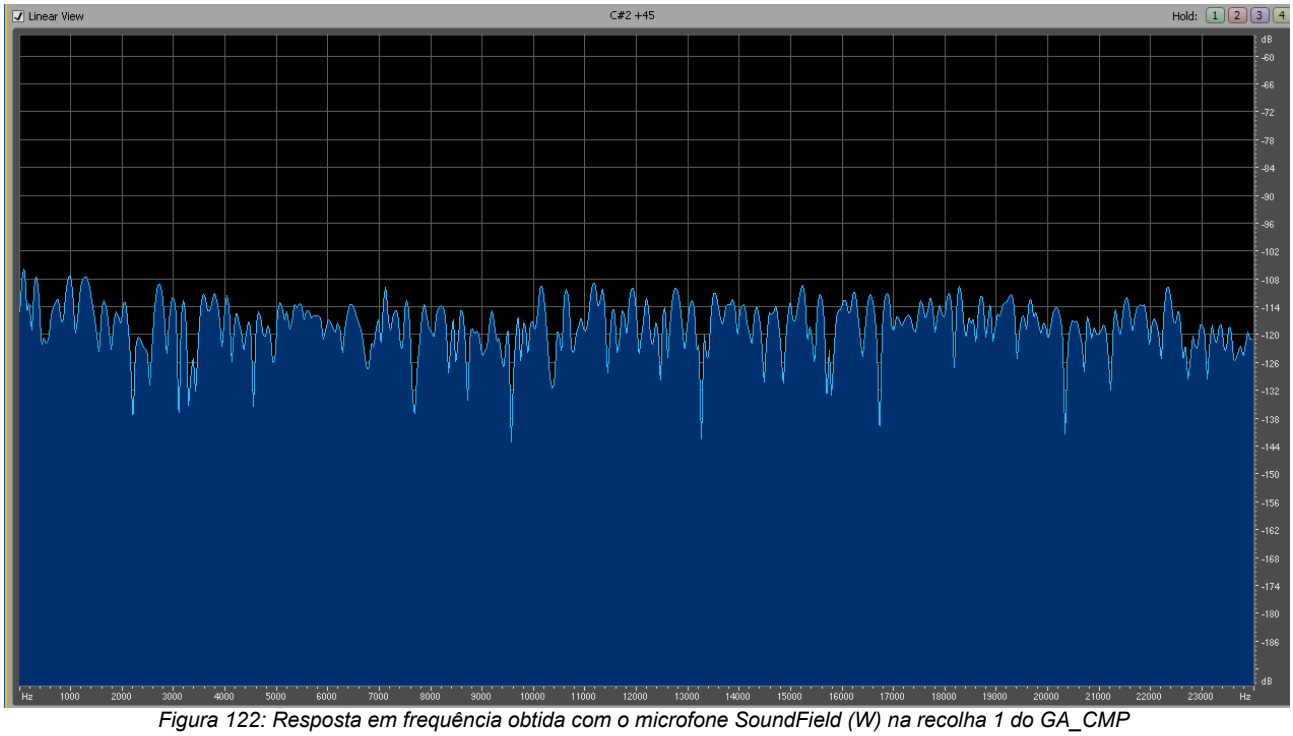


Figura 122: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 do GA_CMP

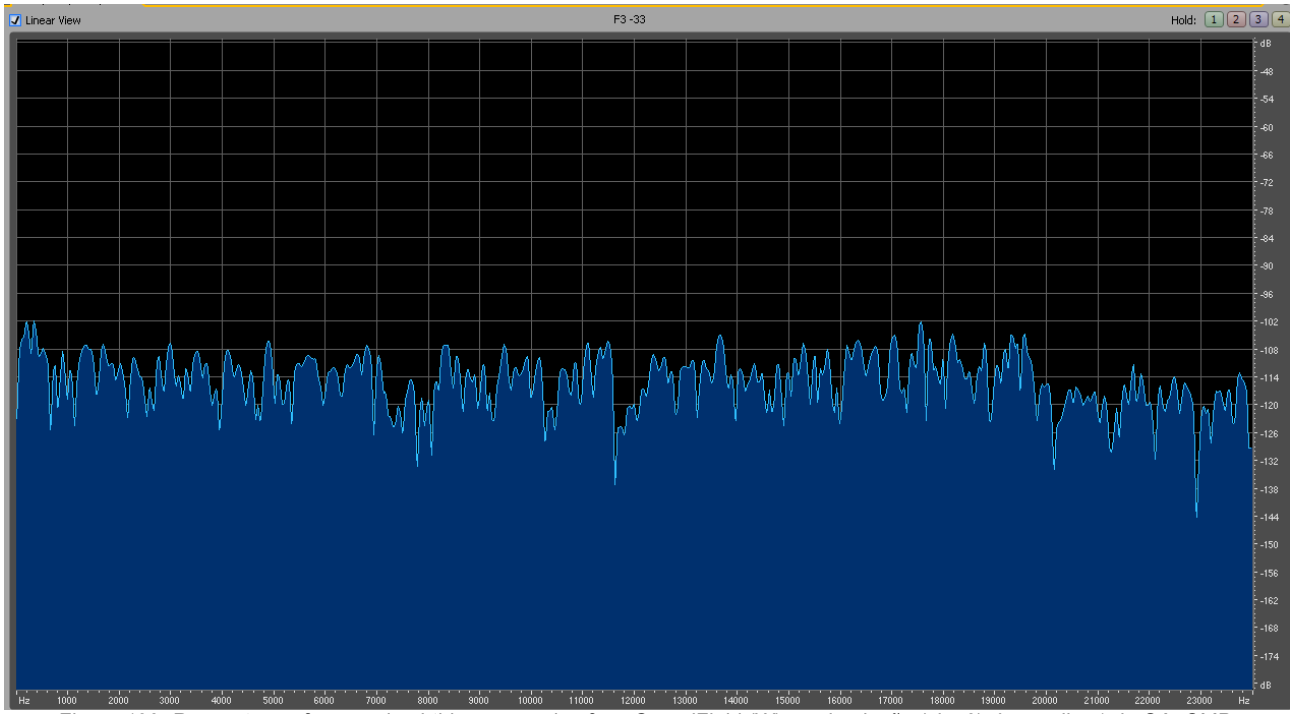


Figura 123: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 do GA_CMP

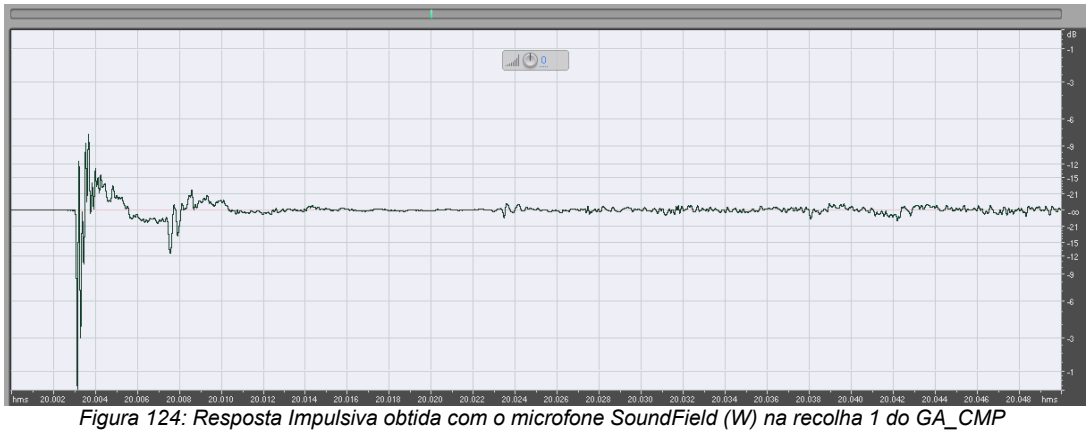


Figura 124: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 do GA_CMP

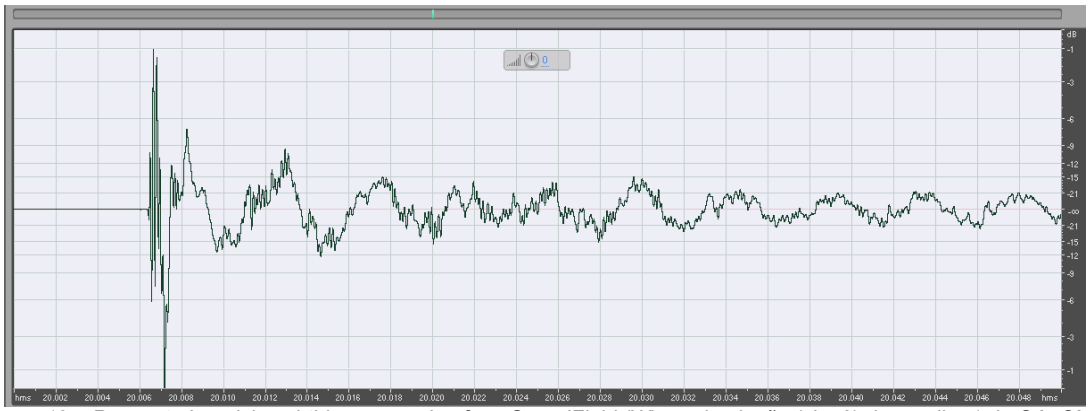


Figura 125: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 do GA_CMP

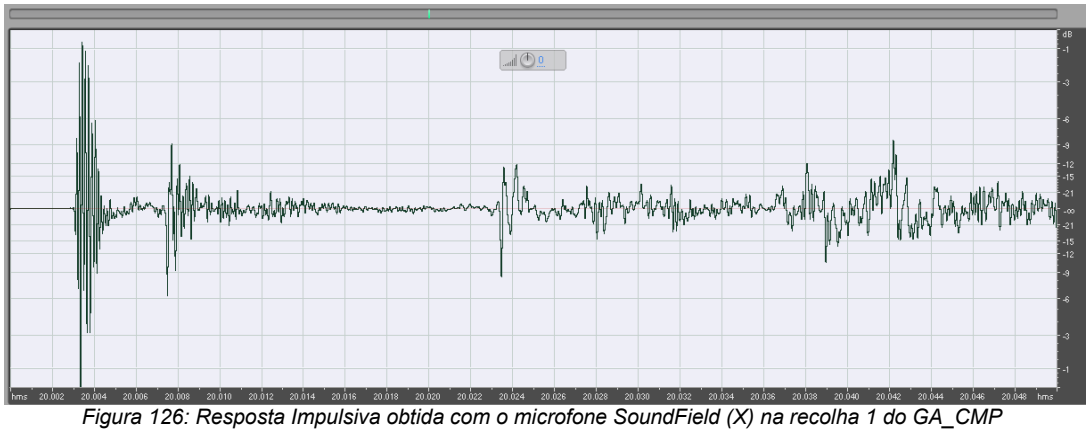


Figura 126: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 1 do GA_CMP

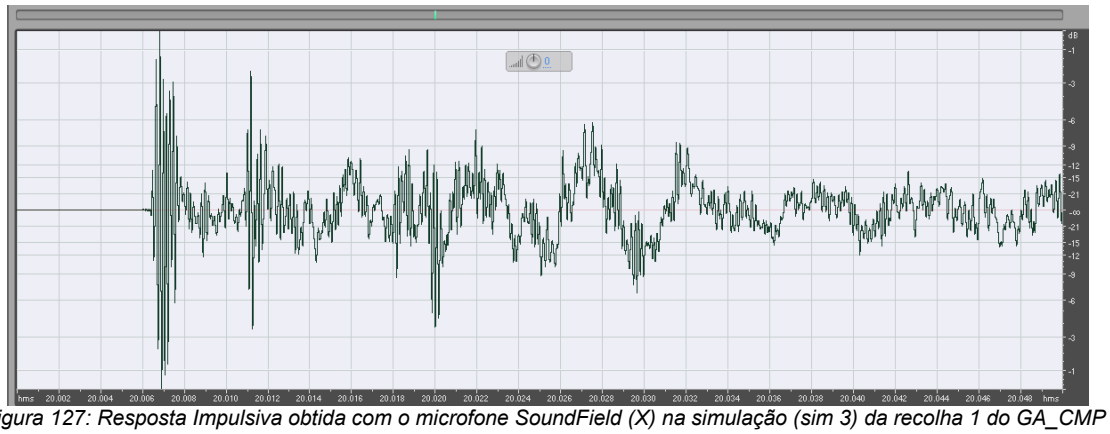


Figura 127: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 1 do GA_CMP

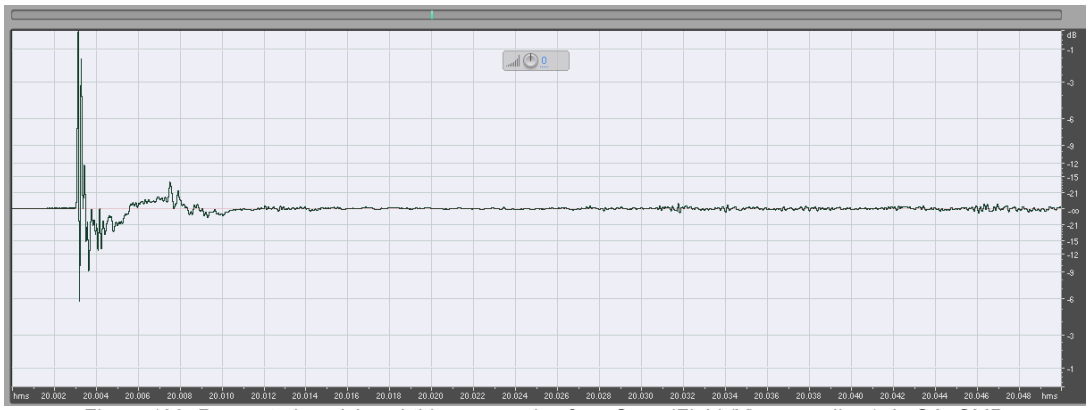


Figura 128: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 1 do GA_CMP

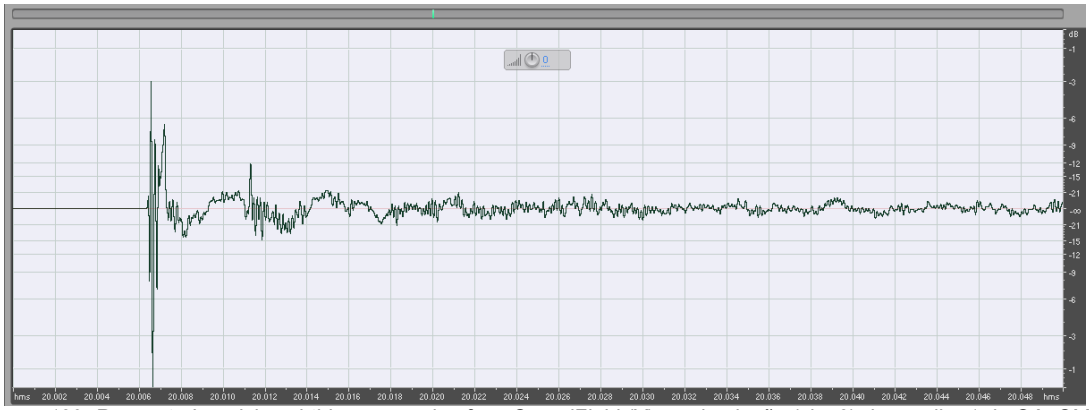


Figura 129: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 1 do GA_CMP

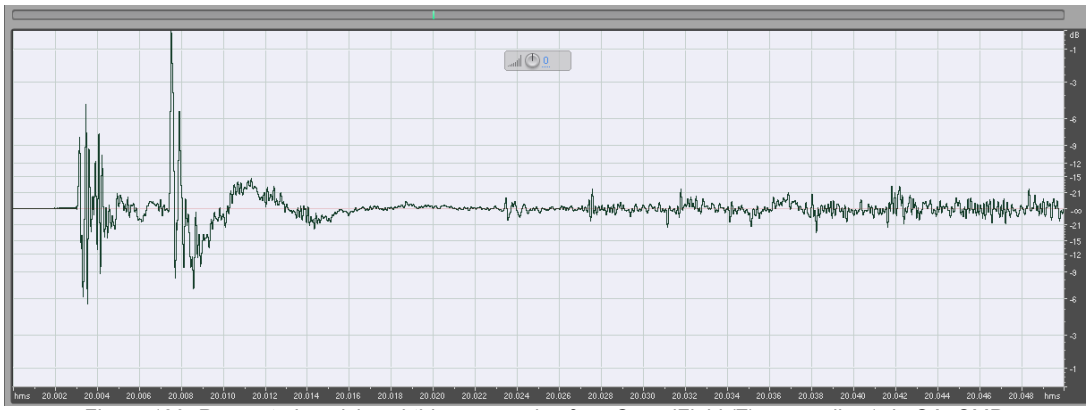


Figura 130: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 1 do GA_CMP

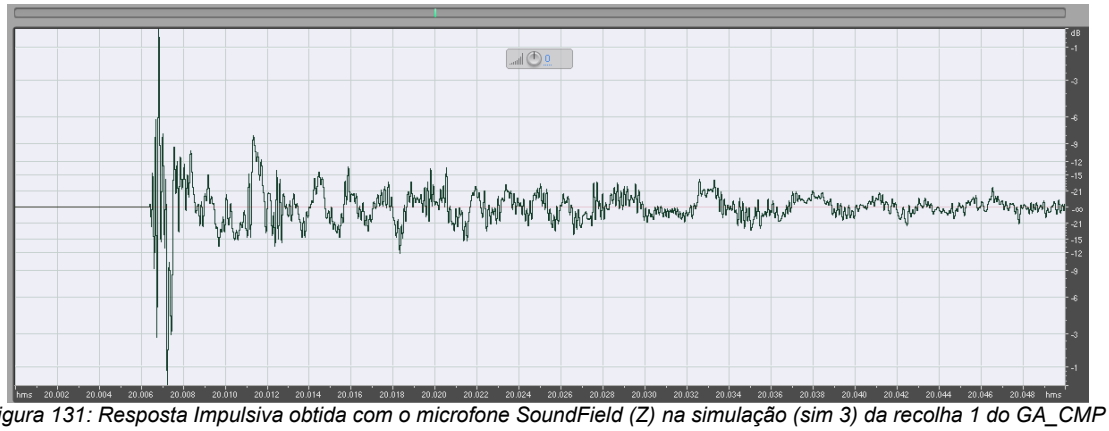


Figura 131: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 1 do GA_CMP

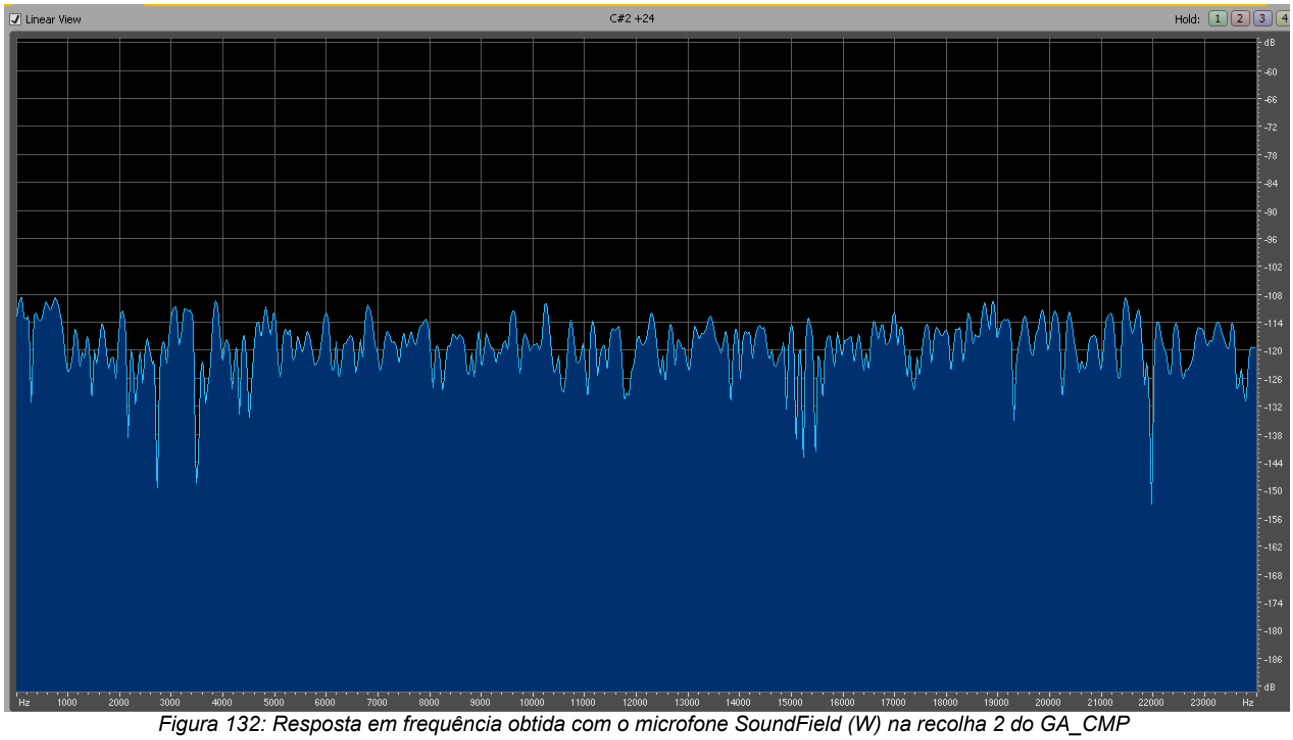


Figura 132: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 do GA_CMP

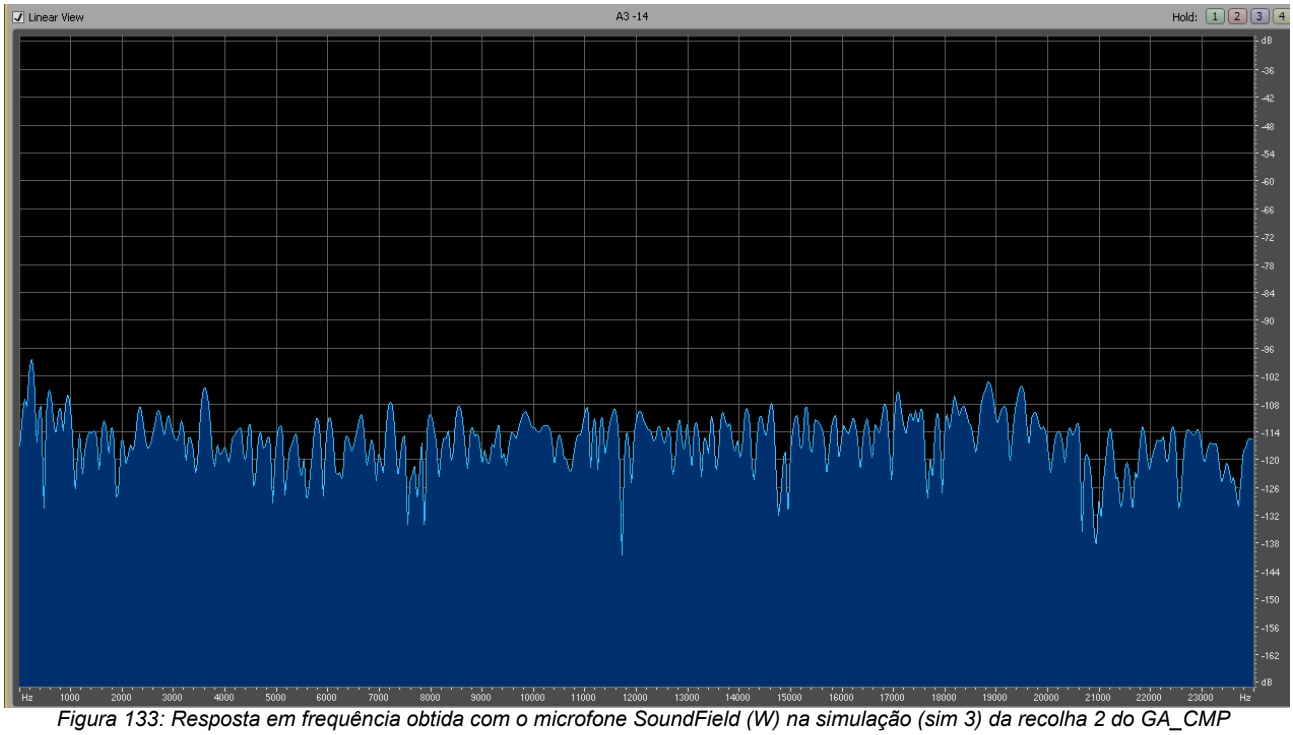


Figura 133: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP

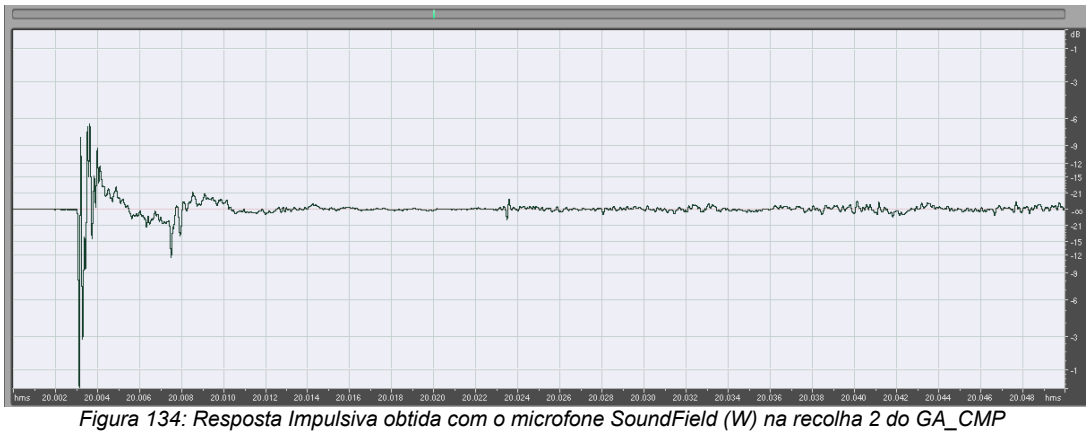


Figura 134: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 do GA_CMP

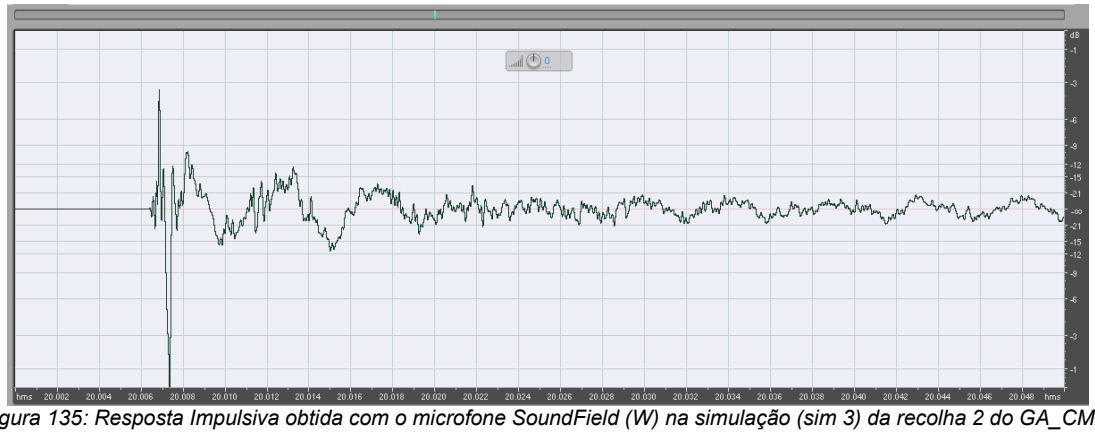


Figura 135: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP



Figura 136: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 2 do GA_CMP

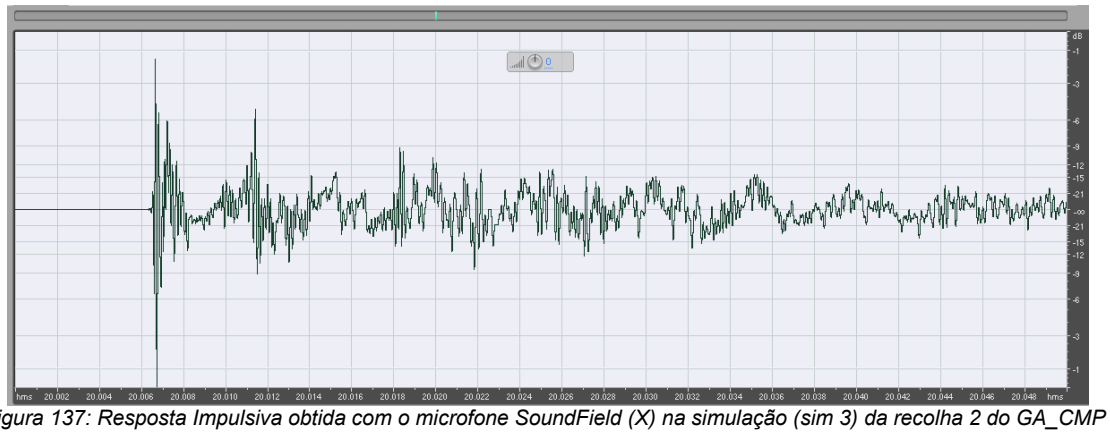


Figura 137: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP

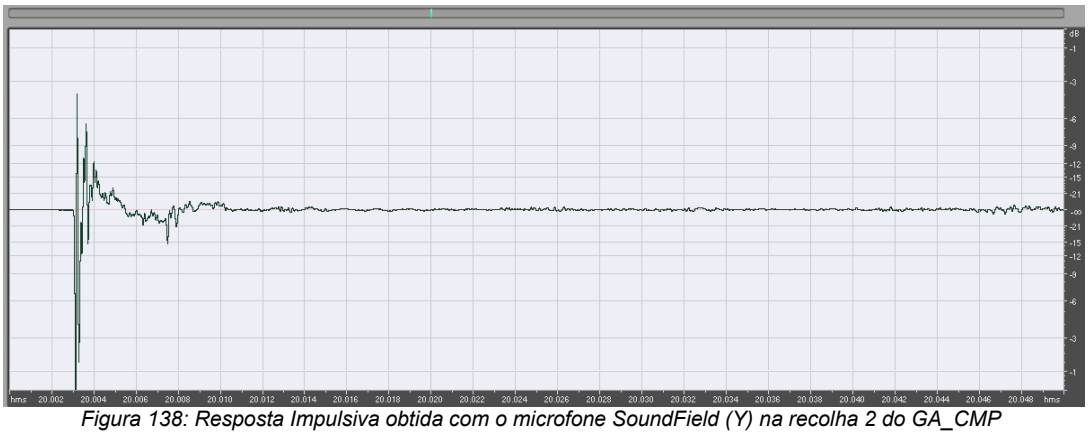


Figura 138: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 2 do GA_CMP

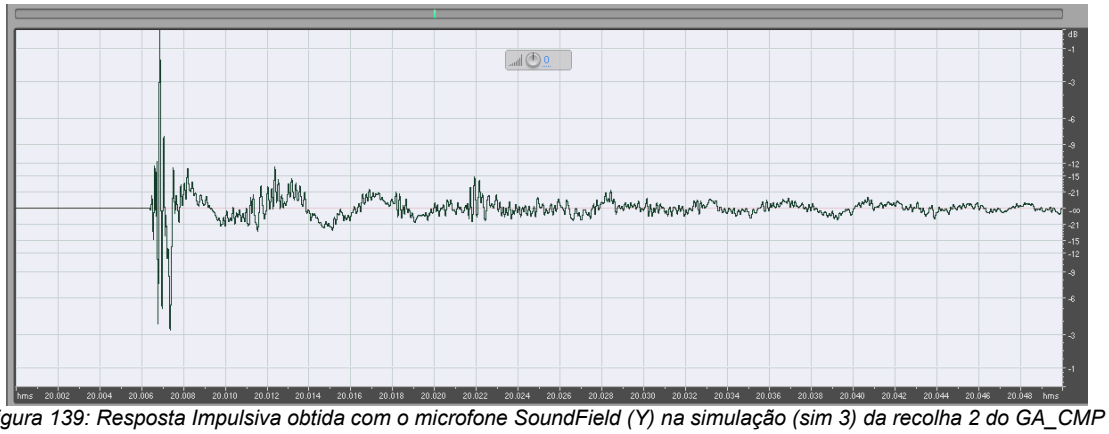


Figura 139: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP



Figura 140: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 2 do GA_CMP

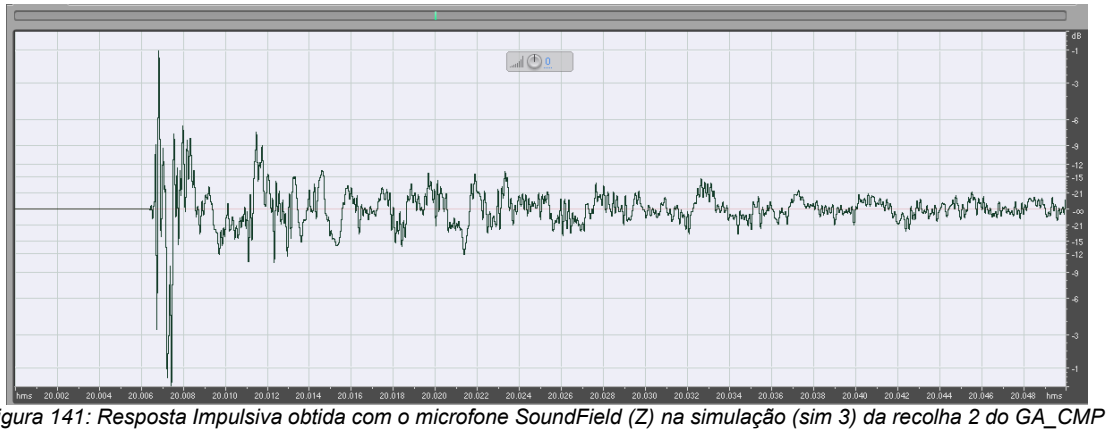


Figura 141: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 2 do GA_CMP

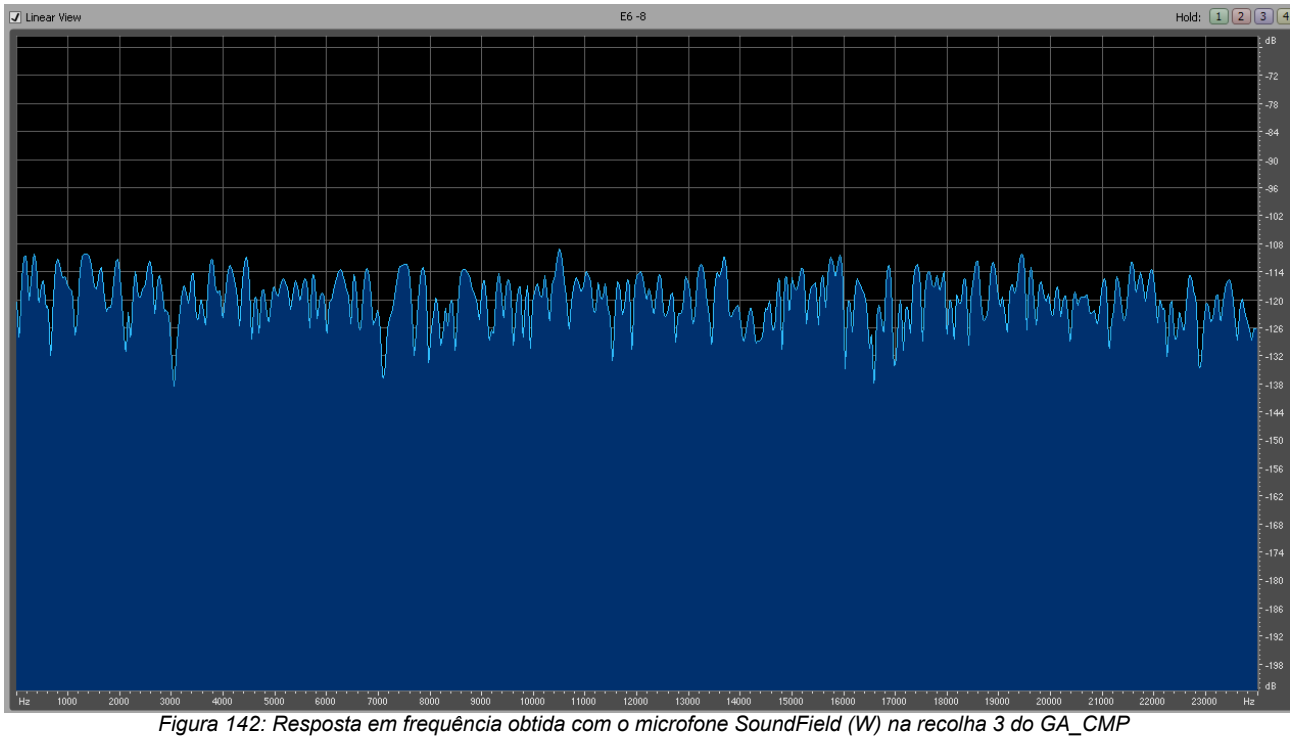


Figura 142: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 do GA_CMP

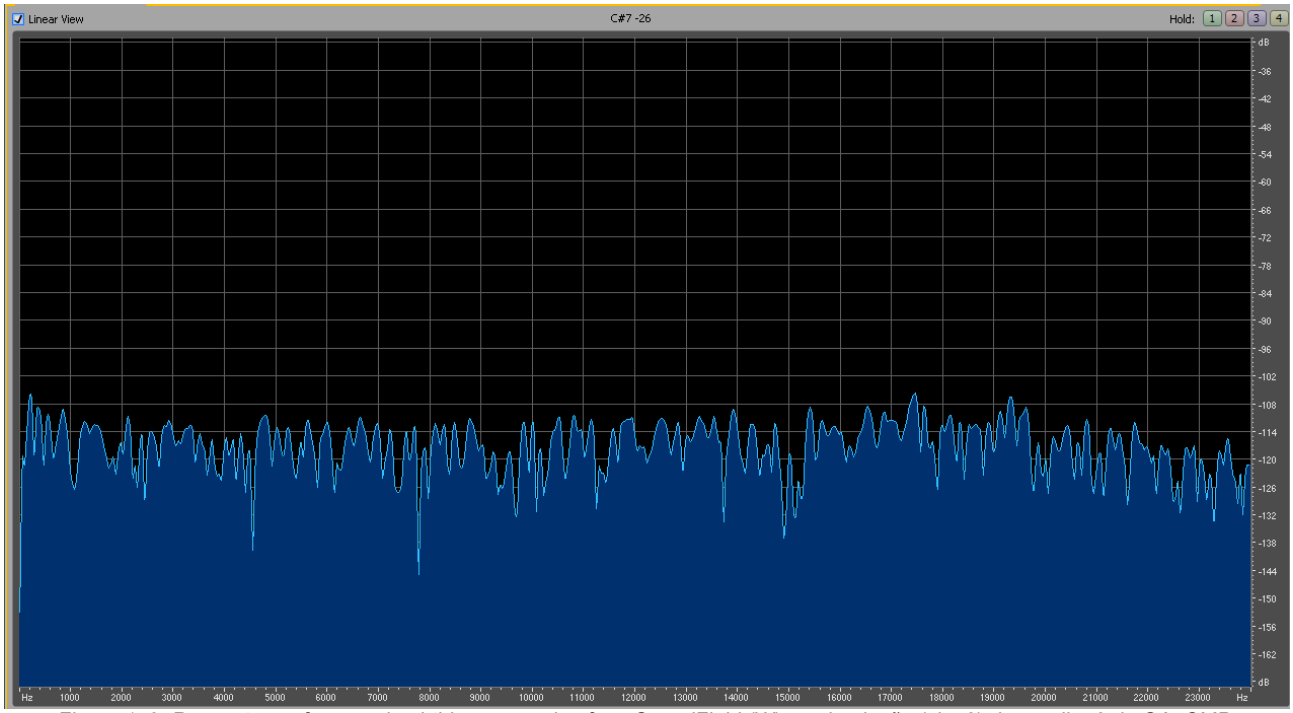


Figura 143: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 do GA_CMP

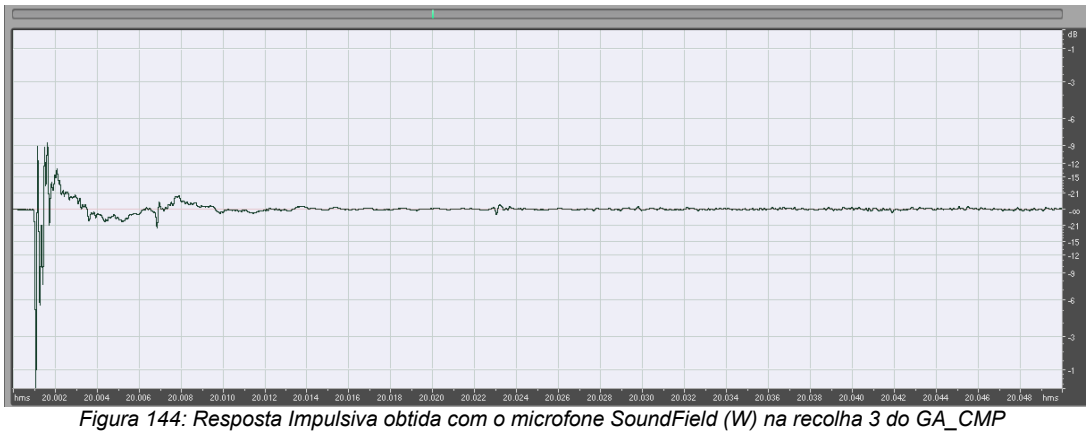


Figura 144: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 do GA_CMP

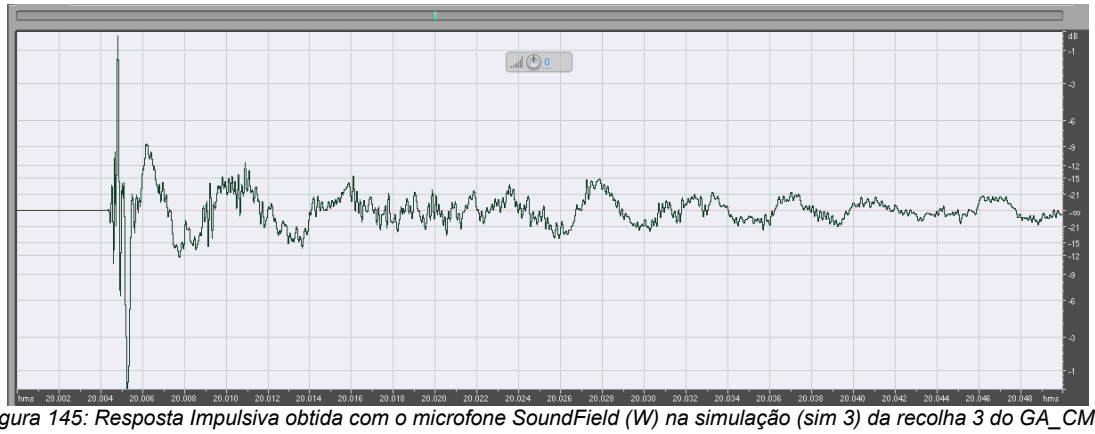


Figura 145: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 do GA_CMP

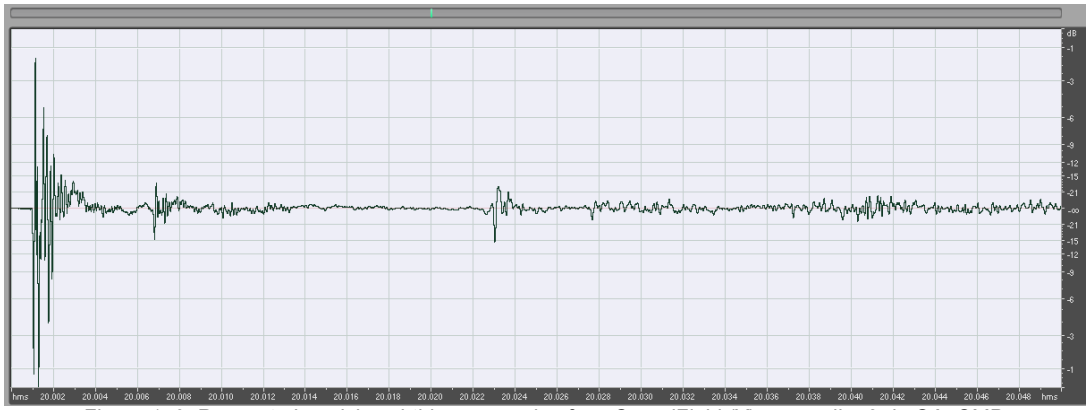


Figura 146: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 3 do GA_CMP

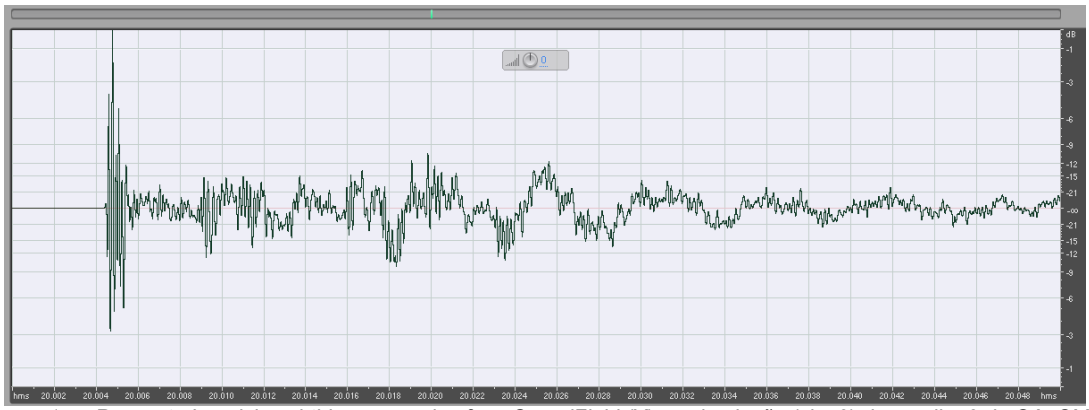


Figura 147: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 3 do GA_CMP

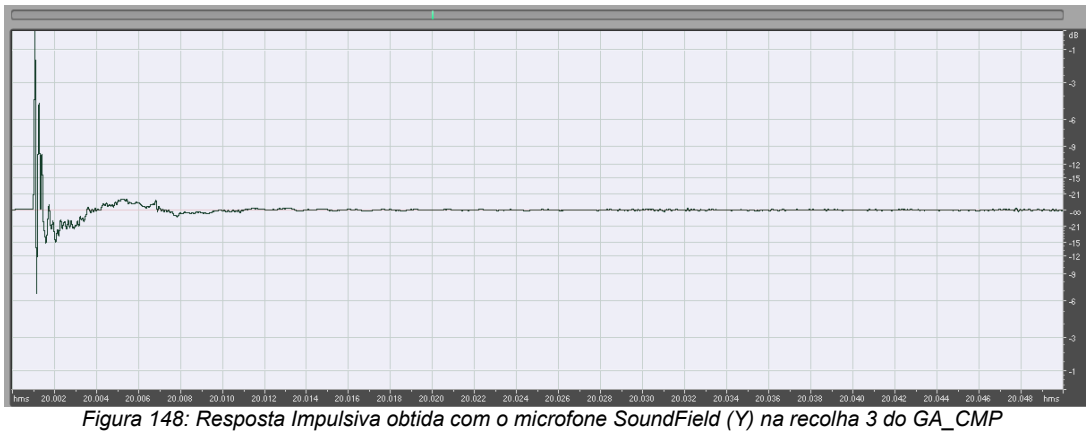


Figura 148: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 3 do GA_CMP

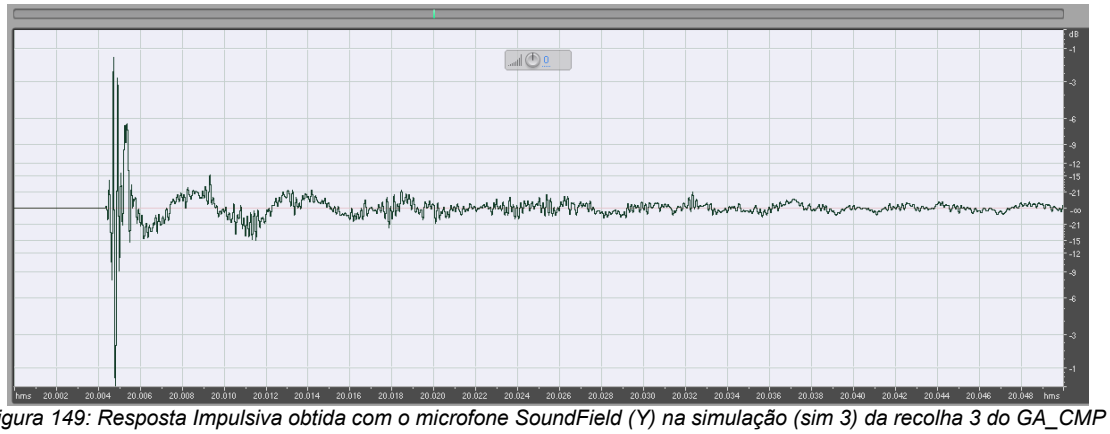


Figura 149: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 3 do GA_CMP

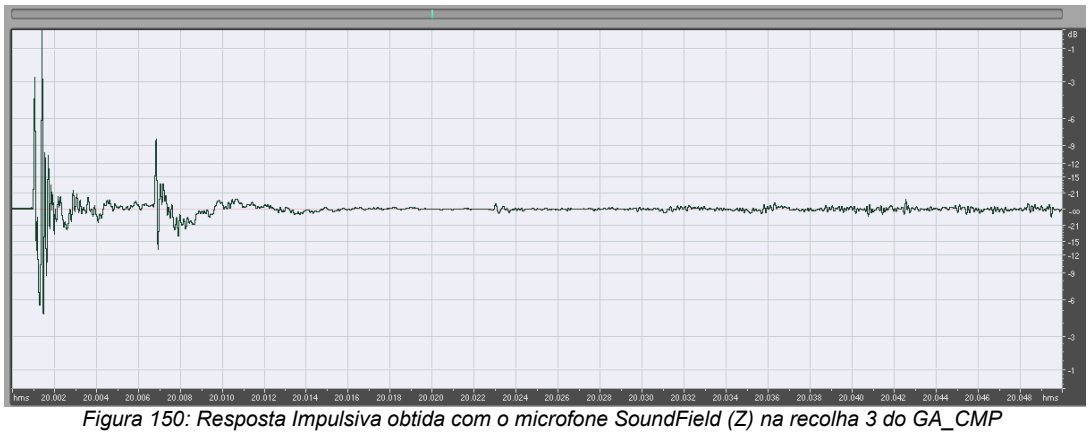


Figura 150: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 3 do GA_CMP

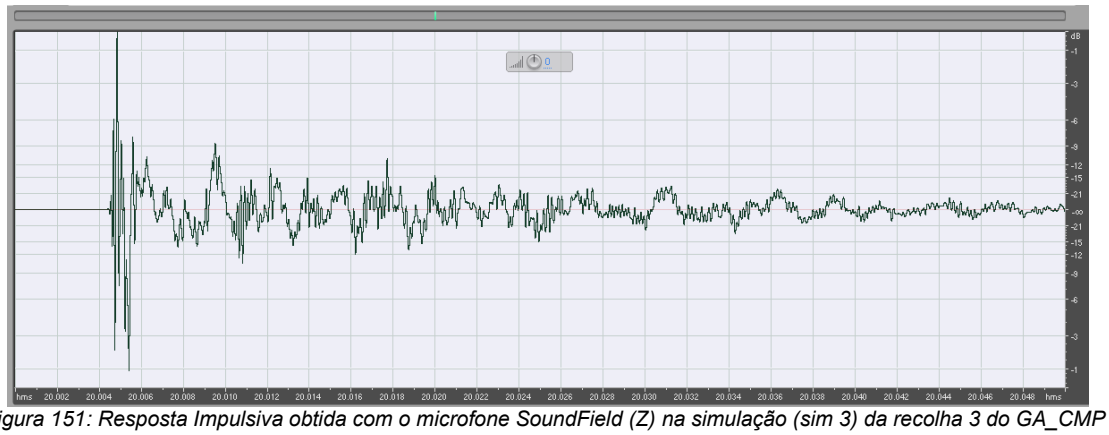


Figura 151: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 3 do GA_CMP

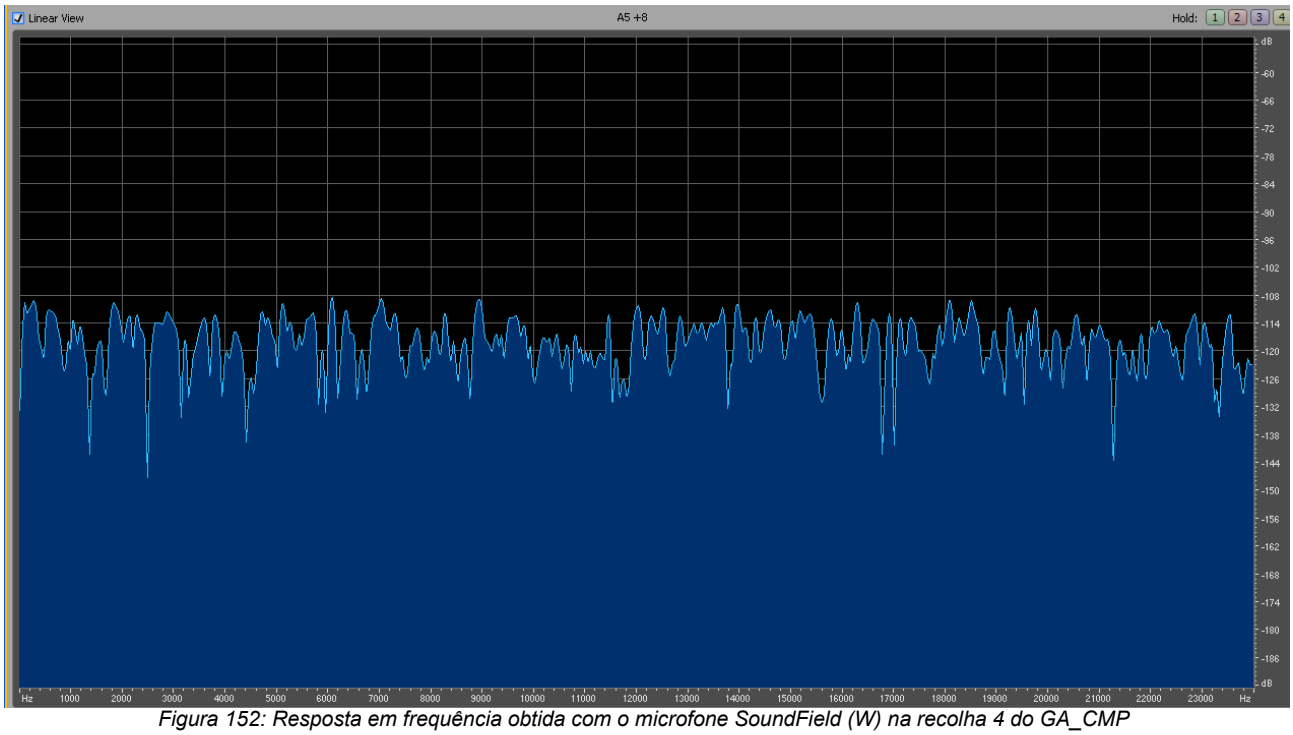


Figura 152: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 do GA_CMP

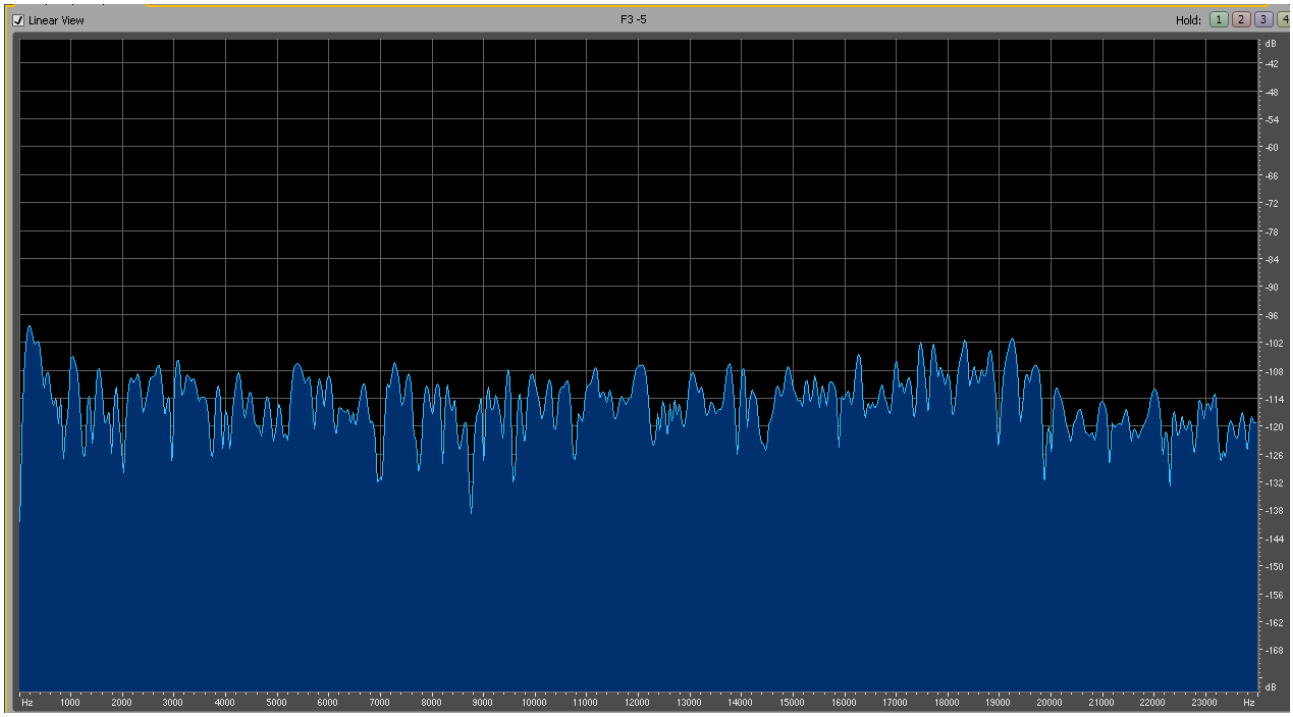


Figura 153: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 do GA_CMP



Figura 154: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 do GA_CMP

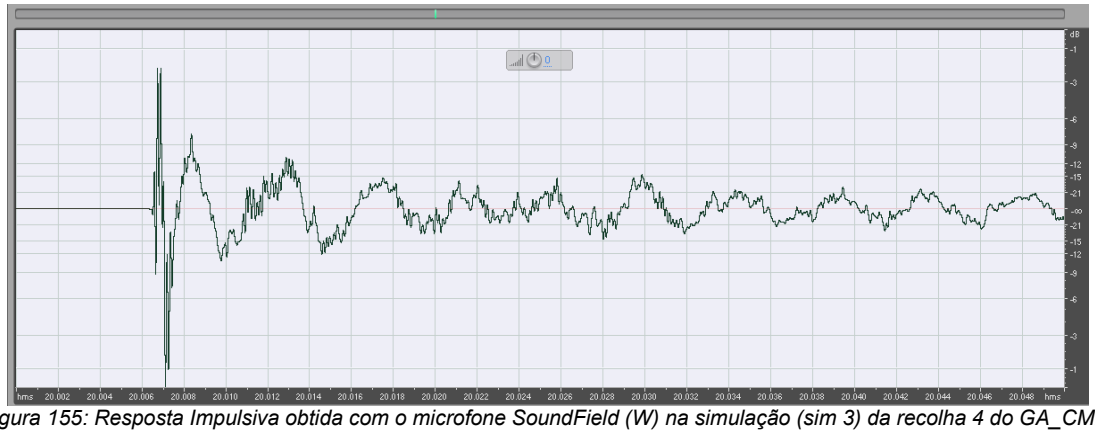


Figura 155: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 do GA_CMP



Figura 156: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 4 do GA_CMP

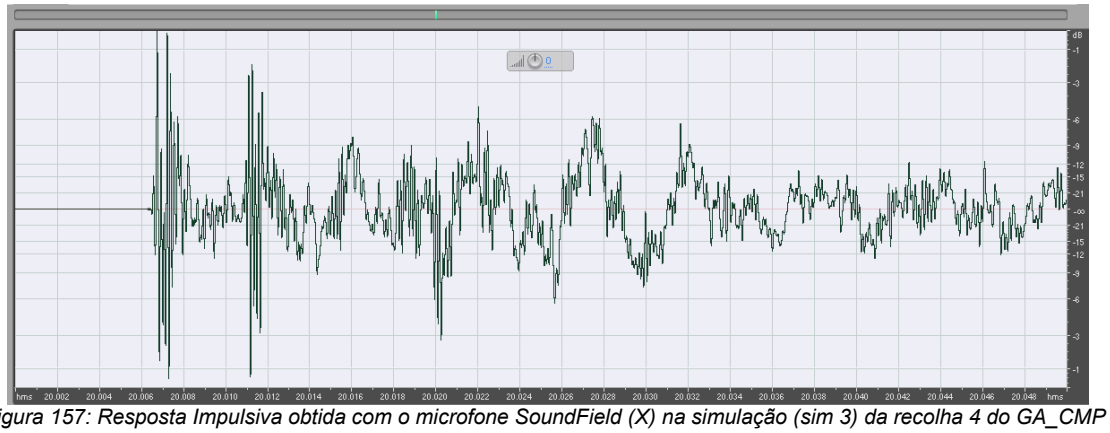


Figura 157: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 4 do GA_CMP

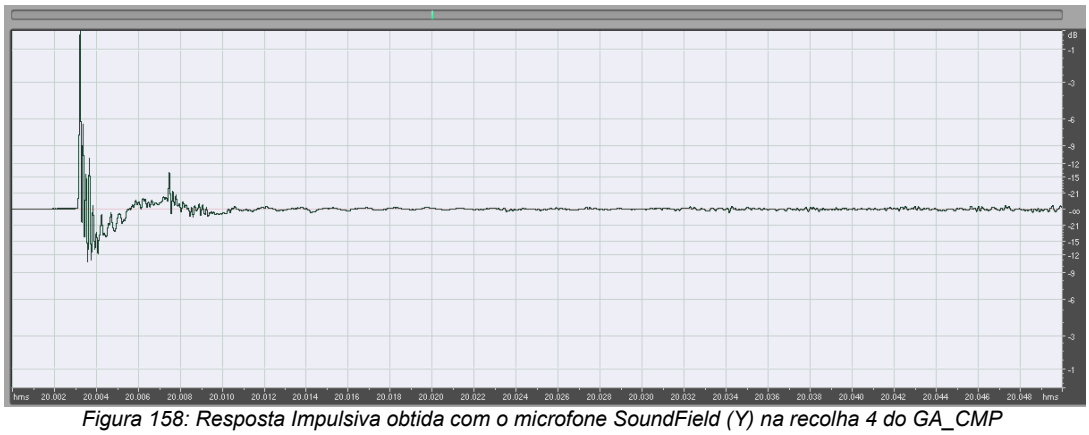


Figura 158: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 4 do GA_CMP

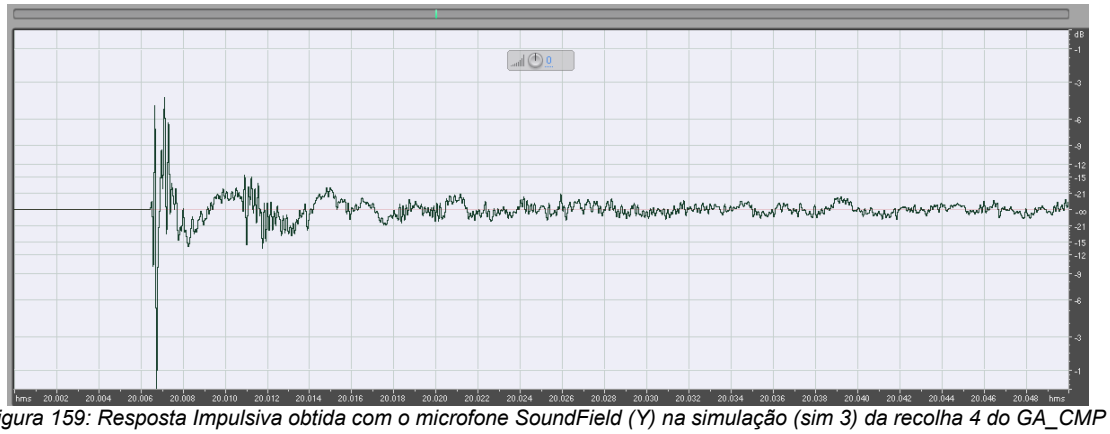


Figura 159: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 4 do GA_CMP

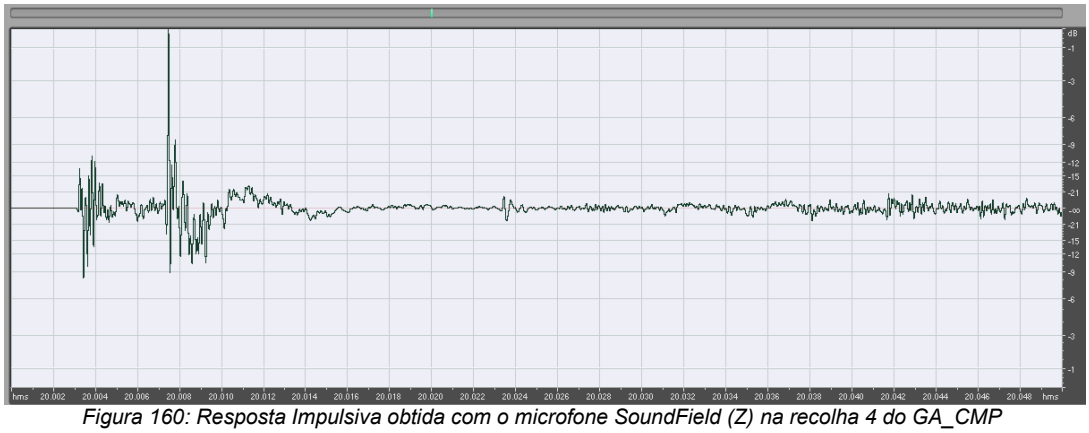


Figura 160: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 4 do GA_CMP

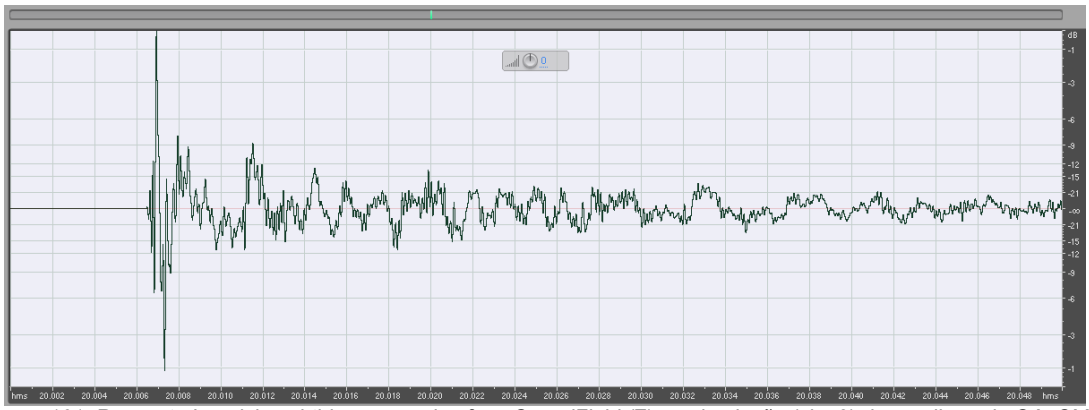


Figura 161: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 4 do GA_CMP

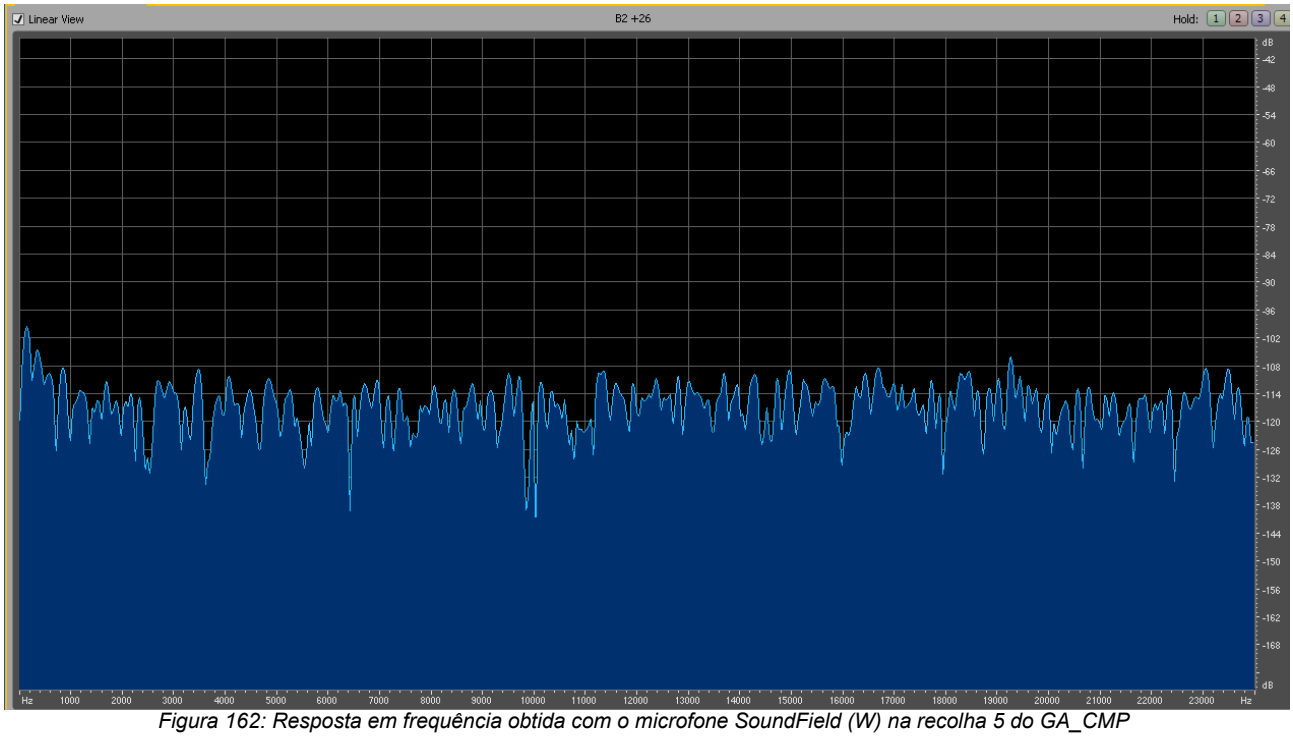


Figura 162: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 do GA_CMP

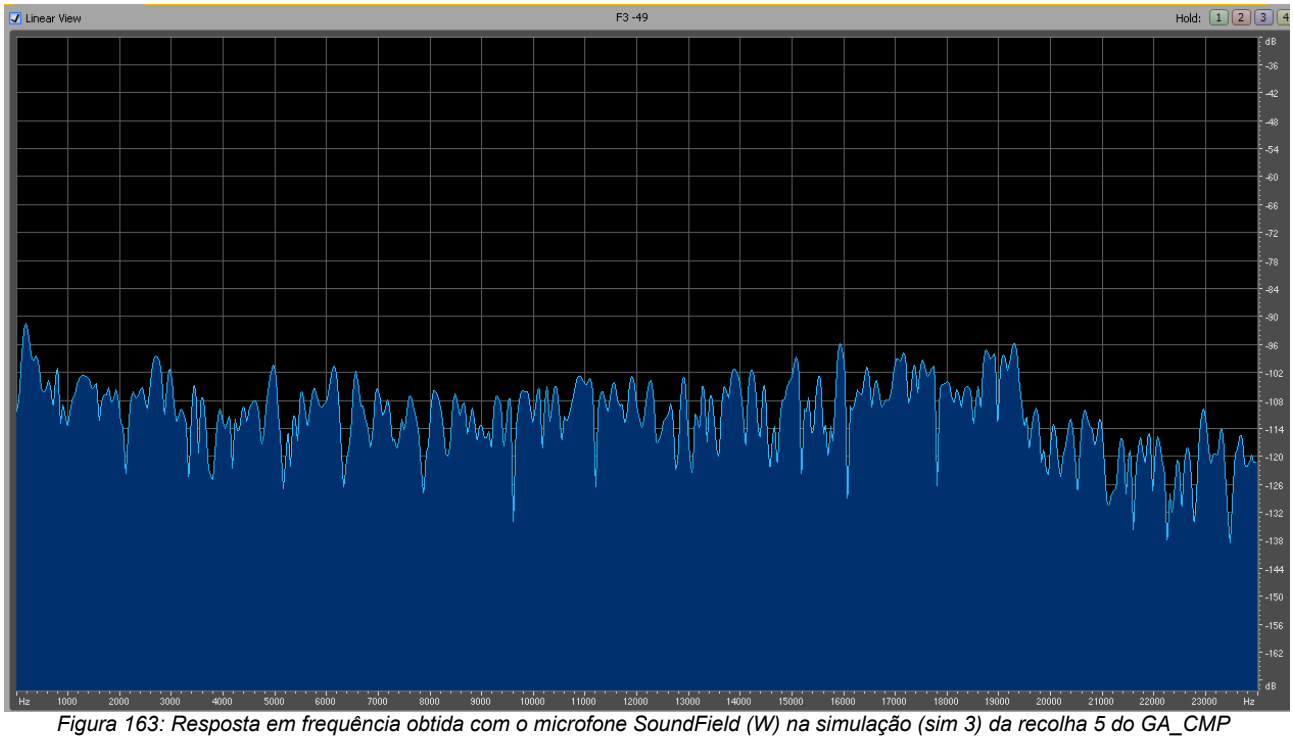


Figura 163: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 do GA_CMP

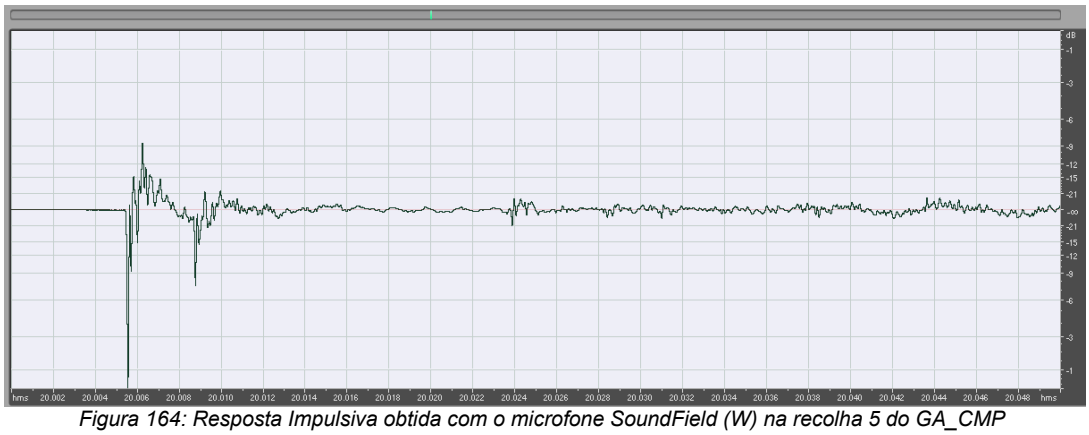


Figura 164: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 do GA_CMP

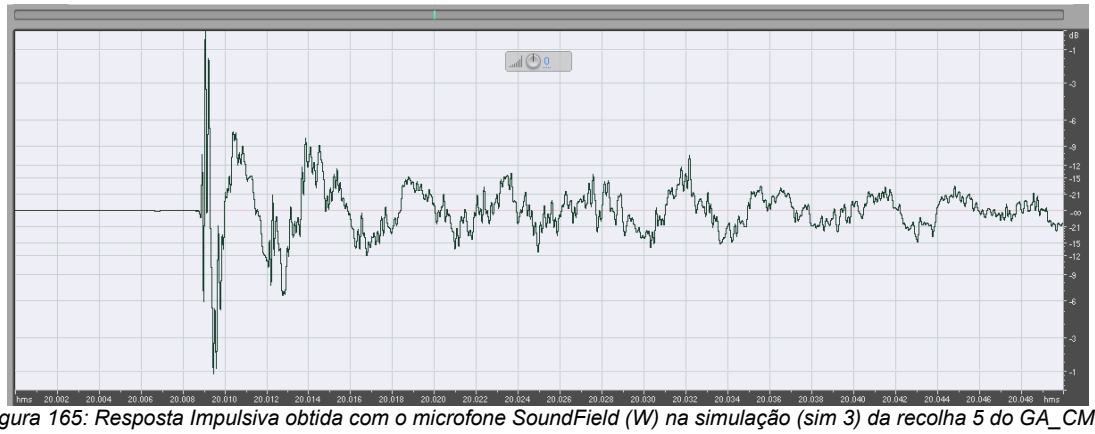


Figura 165: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 do GA_CMP

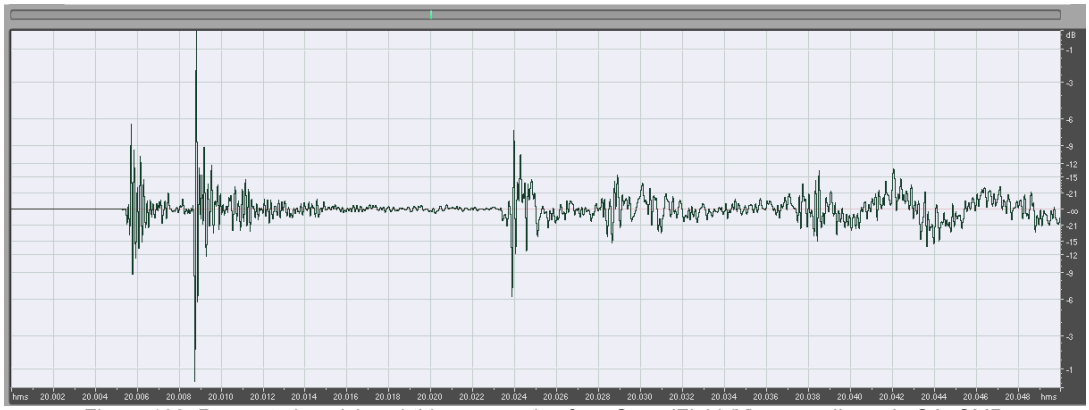


Figura 166: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 5 do GA_CMP

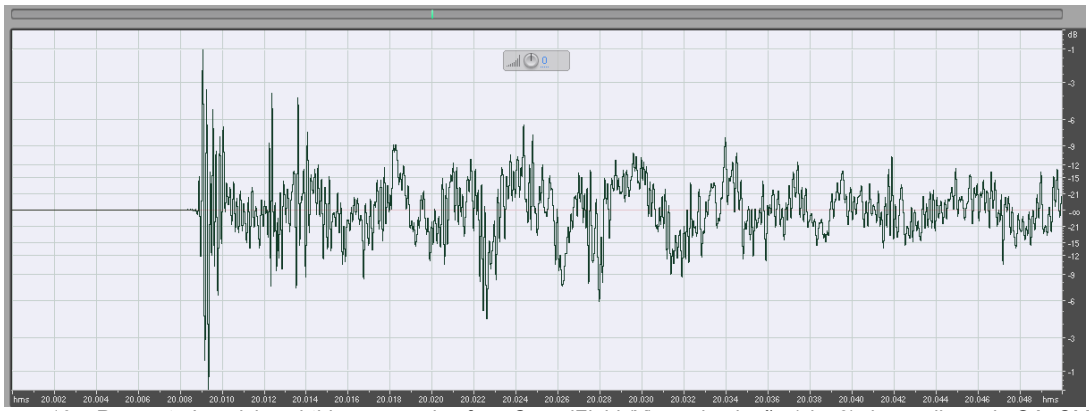


Figura 167: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 5 do GA_CMP

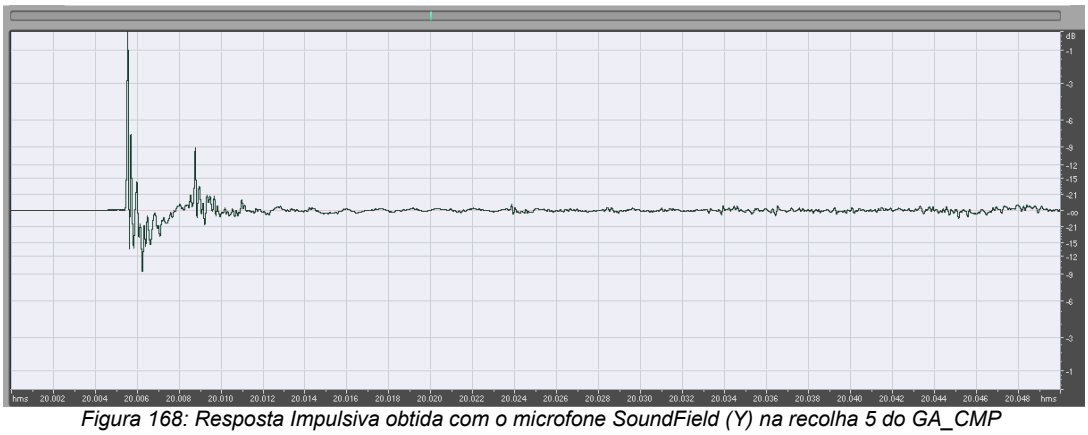


Figura 168: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 5 do GA_CMP

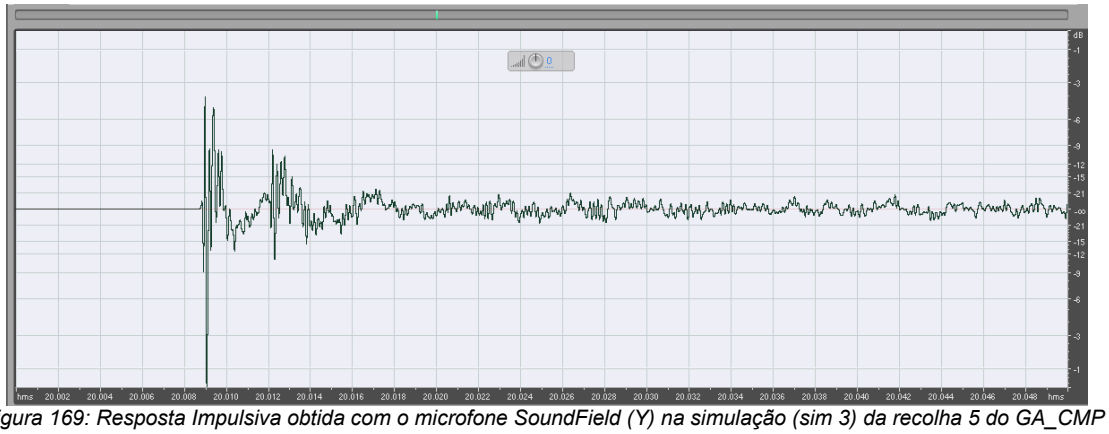


Figura 169: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 5 do GA_CMP



Figura 170: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 5 do GA_CMP

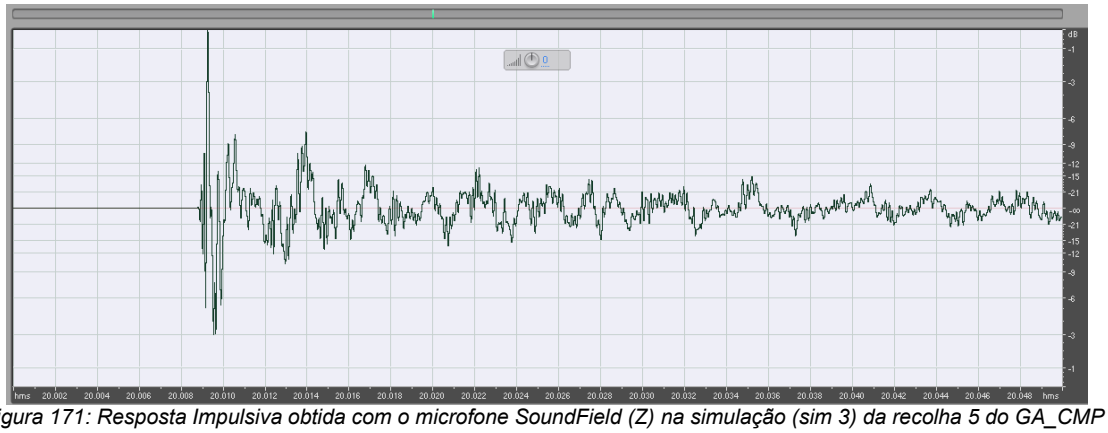


Figura 171: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 5 do GA_CMP

Anexo VII - Tabelas de resultados obtidos no palco e nas simulações da Sala Suggia da Casa da Música

CdM – Recolha 1 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	14,04	12,16	12,23	11,13	10,73	13,74
Sim 1	13,24	11,06	10,99	8,41	8,39	14,07
Sim 2	13,44	11,47	11,22	7,79	7,34	14,55
Sim 3	13,66	11,6	11,49	7,9	7,06	14,88
Sim 4	12,81	10,6	10,72	9,46	9,58	13,41
Sim 5	12,04	10,37	10,72	10,52	10,49	12,92
C80 (dB)						
Original	15,13	13,92	13,65	12,85	12,19	16,29
Sim 1	16,2	12,89	12,2	10,15	10,11	17,47
Sim 2	16,32	13,1	12,41	9,41	9,12	17,94
Sim 3	16,43	13,25	12,66	9,41	8,81	18,21
Sim 4	16,03	12,57	12,06	11,29	11,27	17,08
Sim 5	15,61	12,28	12,12	12,4	12,2	16,69
D50 (%)						
Original	96,21	94,27	94,36	92,84	92,2	95,95
Sim 1	95,47	92,73	92,62	87,4	87,35	96,23
Sim 2	95,67	93,34	92,98	85,73	84,43	96,61
Sim 3	95,87	93,53	93,37	86,05	83,55	96,85
Sim 4	95,02	91,99	92,19	89,82	90,08	95,64
Sim 5	94,12	91,59	92,19	91,85	91,8	95,14
EDT (s)						
Original	0,07	0,11	0,03	0,06	0,96	0,01
Sim 1	0,23	0,34	0,26	0,67	0,71	0,21
Sim 2	0,24	0,35	0,27	0,8	0,79	0,21
Sim 3	0,24	0,36	0,26	0,82	0,82	0,21
Sim 4	0,23	0,32	0,28	0,5	0,49	0,21
Sim 5	0,23	0,31	0,26	0,33	0,35	0,23
T20 (s)						
Original	1,74	1,72	1,94	2,02	1,74	1,05
Sim 1	-	1,69	1,99	2,1	1,77	0,83
Sim 2	-	1,65	1,98	2,15	1,84	0,81
Sim 3	-	1,65	1,98	2,16	1,87	0,81
Sim 4	-	1,73	1,98	2,05	1,7	0,84
Sim 5	1,5	1,74	1,97	1,98	1,66	0,85
T30 (s)						
Original	2,03	1,99	2,33	2,33	1,93	1,21
Sim 1	1,94	1,93	2,37	2,42	2,11	1,17
Sim 2	1,95	1,89	2,36	2,45	2,2	1,18
Sim 3	1,96	1,89	2,36	2,45	2,25	1,21
Sim 4	1,92	1,98	2,37	2,38	2,03	1,16
Sim 5	1,9	2,05	2,39	2,35	1,99	1,17

Tabela 18: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 1

CdM - Recolha 2 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	13,8	10,38	13,33	10,8	10,61	14,32
Sim 1	11,79	8,85	14,07	12,51	11,4	12,12
Sim 2	12,45	9,12	13,74	12,31	11,26	11,11
Sim 3	12,78	9,5	13,51	12,07	11,02	10
Sim 4	10,9	8,54	14,37	12,7	11,56	12,85
Sim 5	9,97	8,23	14,52	12,62	11,62	13,39
C80 (dB)						
Original	14,74	11,86	14,54	12,51	12,2	16,84
Sim 1	14,44	10,96	15,64	14,56	12,97	15,06
Sim 2	15,16	11,1	15,35	14,37	12,81	13,87
Sim 3	15,63	11,28	15,09	14,12	12,53	12,63
Sim 4	13,45	10,79	15,94	14,64	13,08	15,84
Sim 5	12,49	10,78	16,2	14,55	13,15	16,43
D50 (%)						
Original	96	91,6	95,56	92,32	92,01	96,44
Sim 1	93,79	88,47	96,23	94,69	93,24	94,22
Sim 2	94,62	89,1	95,94	94,45	93,04	92,82
Sim 3	94,99	89,91	95,73	94,16	92,67	90,9
Sim 4	92,49	87,72	96,47	94,9	93,47	95,07
Sim 5	90,84	86,94	96,59	94,82	93,55	95,62
EDT (s)						
Original	0,07	0,49	0,04	0,05	0,32	0,01
Sim 1	0,28	0,55	0,15	0,18	0,3	0,25
Sim 2	0,27	0,54	0,14	0,19	0,34	0,27
Sim 3	0,26	0,47	0,14	0,21	0,42	0,33
Sim 4	0,28	0,54	0,16	0,19	0,29	0,23
Sim 5	0,3	0,5	0,16	0,19	0,27	0,2
T20 (s)						
Original	1,7	1,95	2,35	2,11	1,8	1,12
Sim 1	1,47	1,95	2,05	1,88	1,69	0,98
Sim 2	1,42	1,91	2,09	1,89	1,7	1,05
Sim 3	1,36	1,9	2,12	1,91	1,72	1,1
Sim 4	1,56	1,97	1,98	1,87	1,69	0,95
Sim 5	1,67	2	1,92	1,87	1,7	0,93
T30 (s)						
Original	2,06	2,19	2,48	2,36	1,96	1,23
Sim 1	2,04	2,23	2,4	2,33	1,99	1,25
Sim 2	2,01	2,21	2,41	2,33	2,01	1,4
Sim 3	1,99	2,21	2,43	2,33	2,05	-
Sim 4	2,08	2,26	2,38	2,34	1,97	1,2
Sim 5	2,13	2,3	2,37	2,34	1,97	1,19

Tabela 19: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 2

CdM - Recolha 3 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	20,15	20,19	20,92	15,86	17,22	24,01
Sim 1	14,23	18,27	17,79	13,3	16,37	24,26
Sim 2	14,5	18	18,22	13,22	15,95	24,99
Sim 3	14,97	17,94	18,62	13,61	15,49	25,27
Sim 4	13,53	17,91	17,28	13,95	16,76	23,68
Sim 5	12,4	17,26	17,14	14,92	17,22	23,23
C80 (dB)						
Original	21,24	22,47	22,28	17,11	18,74	26,63
Sim 1	20,54	21,14	20,7	15,25	18,47	28,18
Sim 2	20,45	21,2	21,13	14,91	18,02	28,64
Sim 3	20,62	21,2	21,49	15,22	17,57	28,93
Sim 4	20,14	21,05	20,37	16,05	19,03	27,91
Sim 5	19,23	20,91	20,21	17,04	19,51	27,53
D50 (%)						
Original	99,04	99,05	99,2	97,47	98,14	99,6
Sim 1	96,37	98,53	98,37	95,54	97,74	99,63
Sim 2	96,58	98,44	98,51	95,46	97,52	99,68
Sim 3	96,91	98,42	98,65	95,83	97,25	99,7
Sim 4	95,75	98,41	98,16	96,13	97,94	99,57
Sim 5	94,56	98,16	98,1	96,88	98,14	99,53
EDT (s)						
Original	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
Sim 1	0,24	0,17	0,18	0,26	0,17	0,02
Sim 2	0,24	0,16	0,17	0,26	0,18	0,02
Sim 3	0,24	0,15	0,15	0,26	0,19	0,04
Sim 4	0,24	0,18	0,18	0,25	0,17	0,03
Sim 5	0,23	0,17	0,18	0,22	0,17	0,05
T20 (s)						
Original	-	-	-	1,81	1,48	-
Sim 1	0,44	-	-	1,62	-	0,19
Sim 2	0,45	-	-	1,66	1,12	0,17
Sim 3	0,48	-	-	1,61	1,17	0,16
Sim 4	0,42	-	-	1,53	-	0,22
Sim 5	0,42	-	-	1,45	-	0,23
T30 (s)						
Original	1,63	1,82	2,2	2,23	1,84	0,96
Sim 1	-	1,62	1,97	2,17	1,72	-
Sim 2	-	1,57	1,99	2,2	1,77	-
Sim 3	-	-	2	2,19	1,81	-
Sim 4	-	1,64	1,97	2,13	1,68	0,6
Sim 5	-	1,71	1,95	2,11	1,65	0,62

Tabela 20: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 3

CdM - Recolha 4 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	14,42	13,68	12,63	8,09	13,27	20,24
Sim 1	13,66	11,87	11,58	6,98	12,3	20,87
Sim 2	13,86	12,44	11,64	6,97	12,12	21,48
Sim 3	14,13	12,68	11,75	7,36	11,98	21,82
Sim 4	13,17	11,21	11,45	7,33	12,44	20,12
Sim 5	12,29	10,8	11,53	7,83	12,53	19,63
C80 (dB)						
Original	15,68	14,8	13,87	9,96	14,88	22,92
Sim 1	16,88	13,43	12,84	8,85	14,22	24,86
Sim 2	17,03	13,68	12,91	8,94	14,02	25,14
Sim 3	17,18	13,91	13	9,32	13,85	25,26
Sim 4	16,57	13,07	12,74	9,11	14,42	24,3
Sim 5	15,98	12,78	12,85	9,55	14,51	23,87
D50 /%)						
Original	96,51	95,89	94,82	86,57	95,5	99,06
Sim 1	95,88	93,89	93,5	83,31	94,44	99,19
Sim 2	96,05	94,61	93,59	83,26	94,21	99,29
Sim 3	96,28	94,88	93,74	84,48	94,04	99,35
Sim 4	95,4	92,96	93,32	84,38	94,61	99,04
Sim 5	94,42	92,31	93,43	85,86	94,71	98,92
EDT (s)						
Original	0,07	0,04	0,02	1,16	0,08	0
Sim 1	0,24	0,24	0,26	0,9	0,22	0,05
Sim 2	0,23	0,24	0,25	0,89	0,24	0,05
Sim 3	0,24	0,23	0,23	0,82	0,24	0,07
Sim 4	0,23	0,26	0,25	0,84	0,22	0,05
Sim 5	0,22	0,28	0,25	0,77	0,21	0,06
T20 (s)						
Original	1,7	1,78	2,17	2,24	1,72	0,97
Sim 1	-	1,67	2,07	2,28	1,62	0,32
Sim 2	-	1,68	2,07	2,3	1,63	0,3
Sim 3	-	1,67	2,07	2,28	1,64	0,28
Sim 4	1,51	1,71	2,09	2,25	1,6	0,35
Sim 5	1,45	1,74	2,08	2,21	1,58	0,37
T30 (s)						
Original	2,07	2,12	2,35	2,41	1,92	1,14
Sim 1	2	1,99	2,31	2,48	1,96	0,88
Sim 2	2,01	2	2,3	2,48	1,99	0,85
Sim 3	2,01	2,01	2,29	2,46	2,01	0,84
Sim 4	1,97	2,02	2,34	2,46	1,94	0,89
Sim 5	1,94	2,04	2,36	2,44	1,92	0,9

Tabela 21: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 4

CdM - Recolha 5 SoundField W	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
C50 (dB)						
Original	9,57	9,04	9,61	5,83	8,7	14,42
Sim 1	8,65	7,61	8,3	4,09	7,61	15,34
Sim 2	8,71	7,98	8,41	4	7,36	15,97
Sim 3	8,89	8,25	8,61	4,43	7,16	16,31
Sim 4	8,42	7,21	8,2	4,6	7,86	15,12
Sim 5	7,78	7,09	8,25	5,28	8,1	14,71
C80 (dB)						
Original	12,28	10,74	10,4	7,66	10,32	17,79
Sim 1	12,24	9,19	9,37	5,84	9,51	19,24
Sim 2	12,19	9,48	9,43	5,64	9,12	19,76
Sim 3	12,21	9,71	9,57	5,94	8,85	20,05
Sim 4	12,13	8,98	9,33	6,44	9,85	18,79
Sim 5	11,59	8,97	9,46	7,17	10,16	18,37
D50 (%)						
Original	90,06	88,92	90,14	79,3	88,11	96,51
Sim 1	88	85,23	87,11	71,93	85,22	97,16
Sim 2	88,14	86,28	87,4	71,51	84,47	97,53
Sim 3	88,57	86,97	87,9	73,51	83,87	97,71
Sim 4	87,43	84,02	86,85	74,27	85,94	97,02
Sim 5	85,72	83,64	86,97	77,13	86,58	96,73
EDT (s)						
Original	0,54	0,91	1,1	1,52	1,25	0,01
Sim 1	0,35	0,87	0,87	1,46	0,79	0,1
Sim 2	0,37	0,87	0,95	1,53	0,88	0,1
Sim 3	0,37	0,8	0,99	1,53	0,94	0,12
Sim 4	0,35	0,84	0,83	1,37	0,74	0,11
Sim 5	0,36	0,77	0,73	1,28	0,7	0,12
T20 (s)						
Original	1,82	2,09	2,38	2,3	1,89	1,1
Sim 1	1,79	2,12	2,41	2,41	1,91	0,82
Sim 2	1,8	2,1	2,4	2,44	1,94	0,79
Sim 3	1,82	2,08	2,41	2,44	1,96	0,77
Sim 4	1,76	2,12	2,42	2,36	1,89	0,84
Sim 5	1,7	2,13	2,41	2,31	1,87	0,87
T30 (s)						
Original	2,53	2,29	2,49	2,44	2,02	1,28
Sim 1	2,69	2,34	2,63	2,64	2,16	1,18
Sim 2	2,62	2,28	2,58	2,64	2,25	1,2
Sim 3	2,54	2,26	2,54	2,63	2,34	1,23
Sim 4	2,78	2,38	2,68	2,61	2,11	1,16
Sim 5	2,96	2,42	2,72	2,58	2,11	1,17

Tabela 22: Tabela comparativa dos valores obtidos de C50, C80, D50, EDT, T20 e T30 no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações para a configuração da recolha 5

Anexo VIII - Gráficos comparativos dos resultados obtidos no palco e simulações da Sala Suggia da Casa da Música

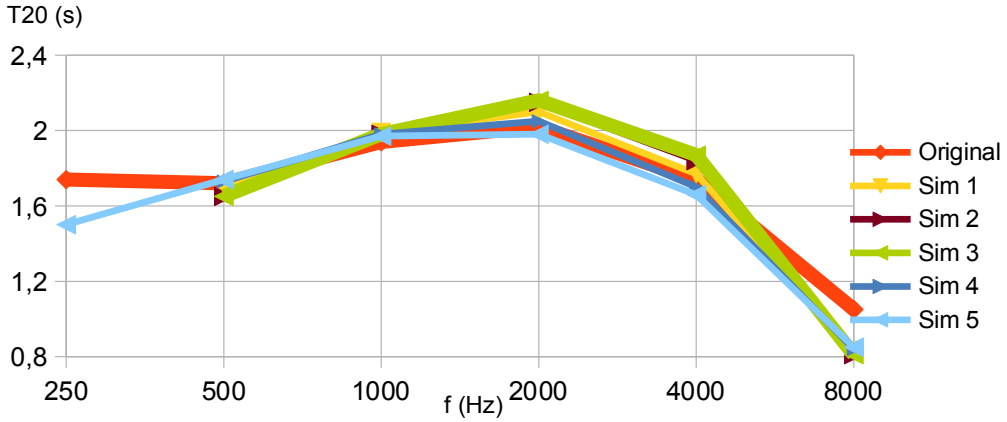


Figura 172: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações na configuração da recolha 1

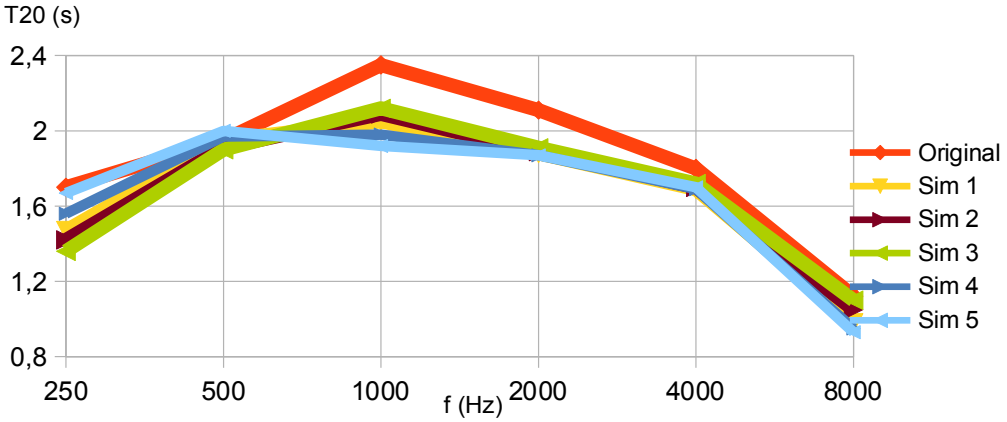


Figura 173: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações na configuração da recolha 2

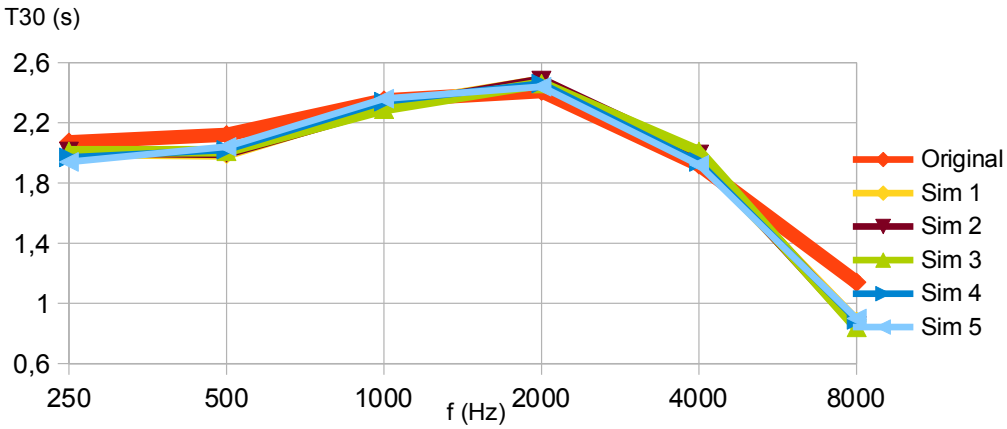


Figura 174: Gráfico comparativo do T30 obtido no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações na configuração da recolha 4

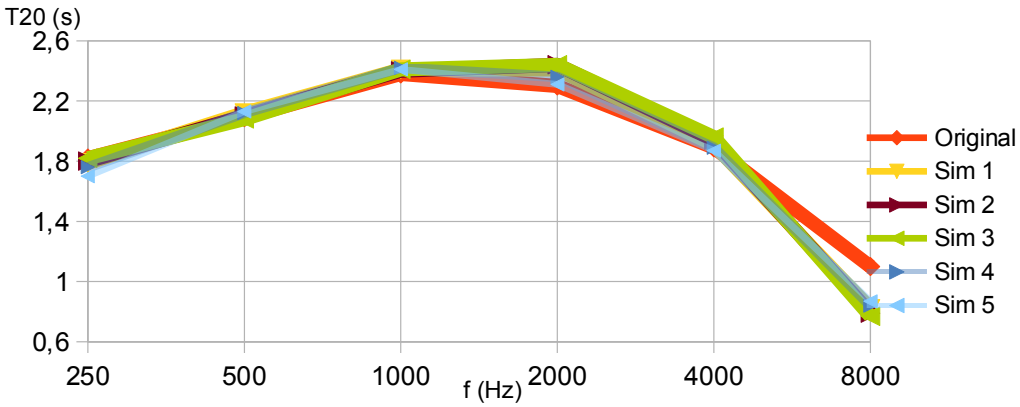


Figura 175: Gráfico comparativo do T20 obtido no palco da Sala Suggia da Casa da Música e nas respectivas simulações na configuração da recolha 5

Anexo IX - Resposta em frequência e impulsivas no palco e simulações da Sala Suggia da Casa da Música

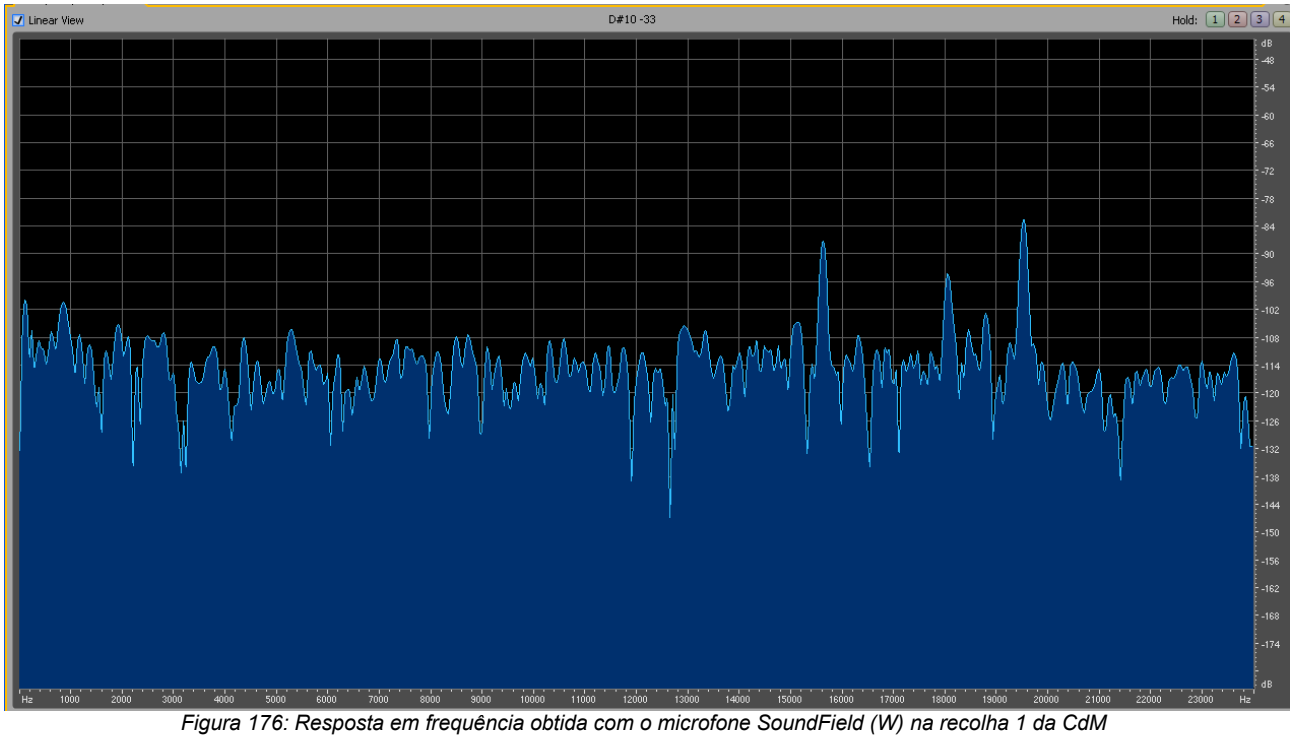


Figura 176: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 da CdM

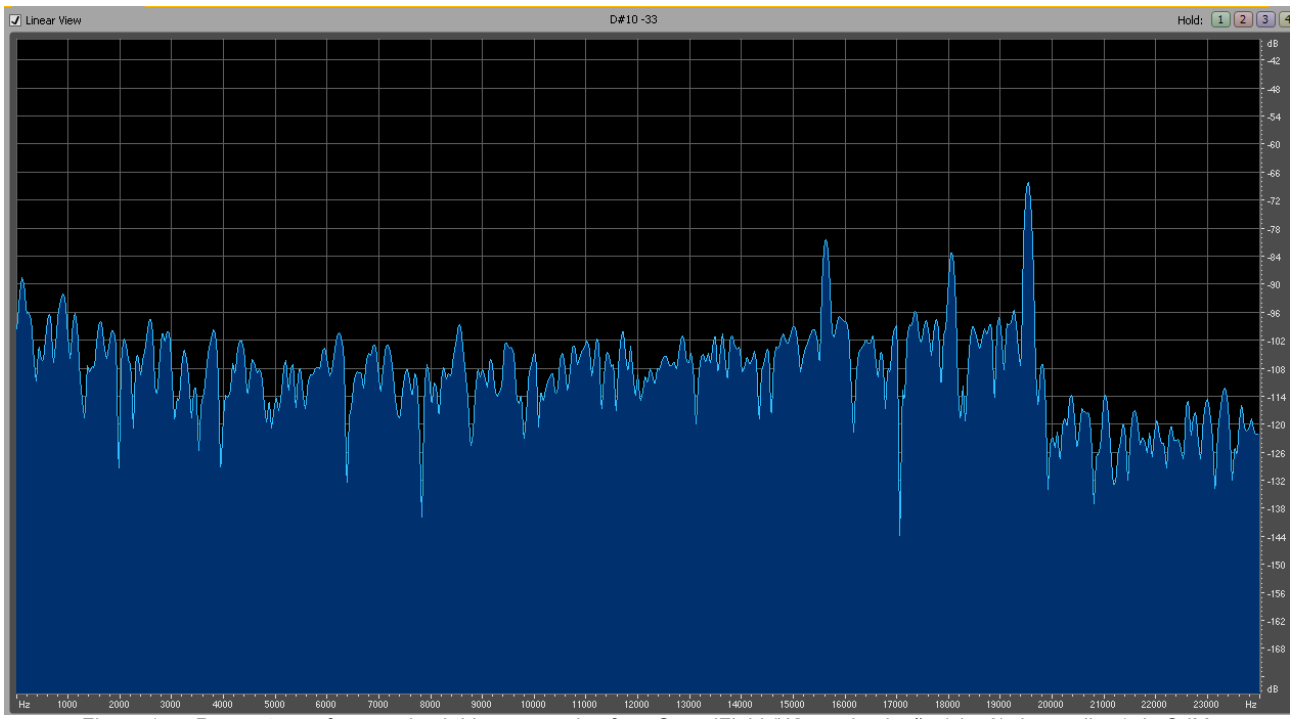


Figura 177: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 da CdM

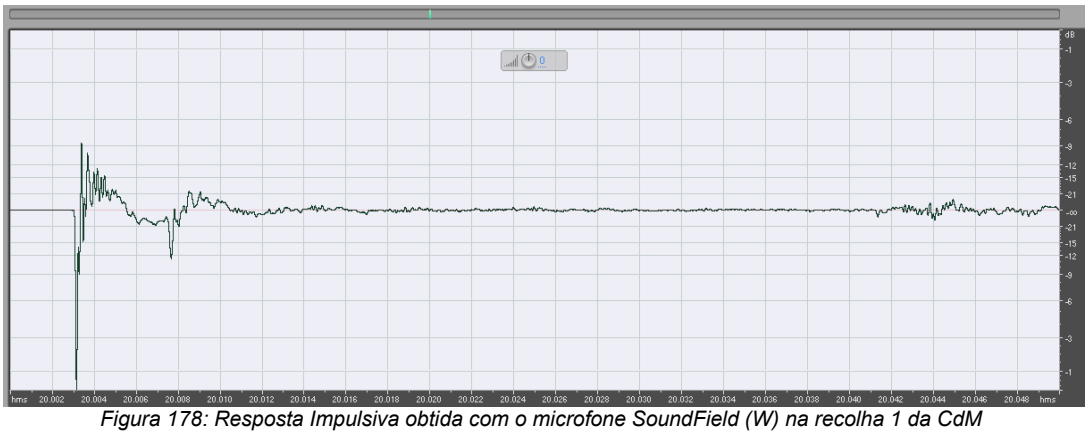


Figura 178: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 1 da CdM

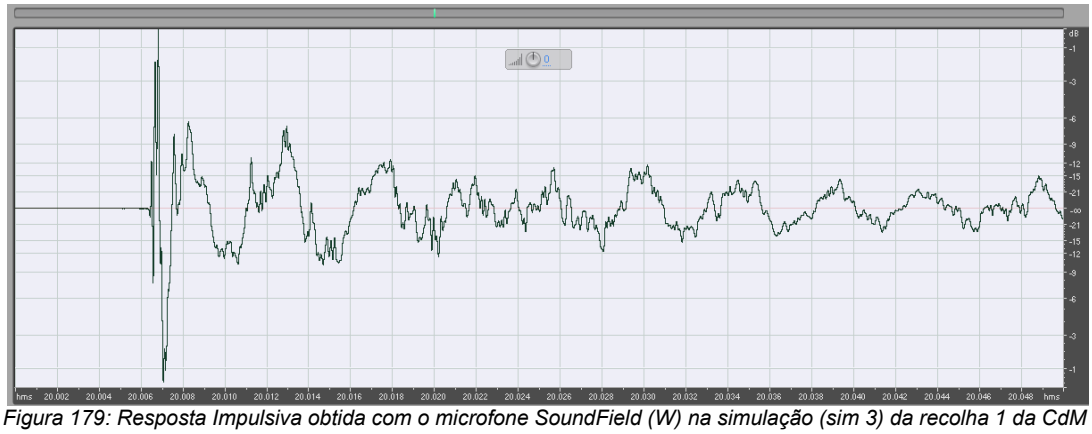


Figura 179: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 1 da CdM

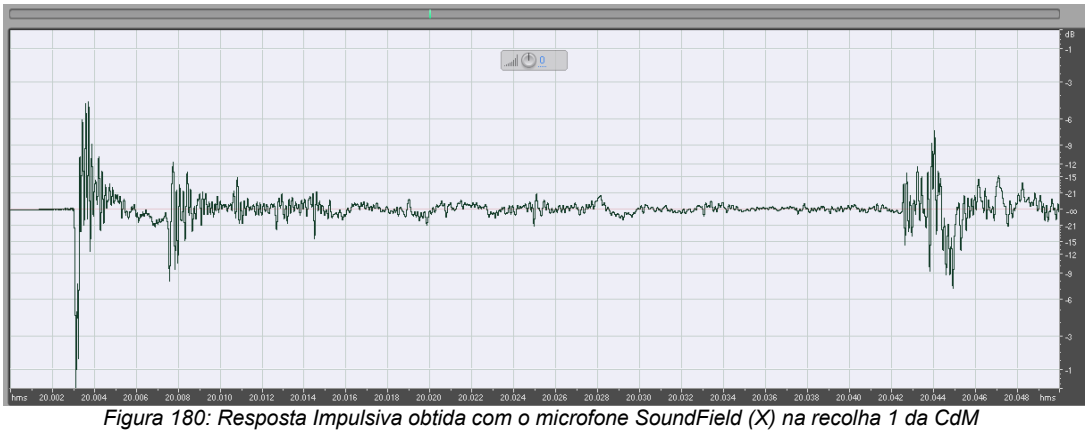


Figura 180: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 1 da CdM

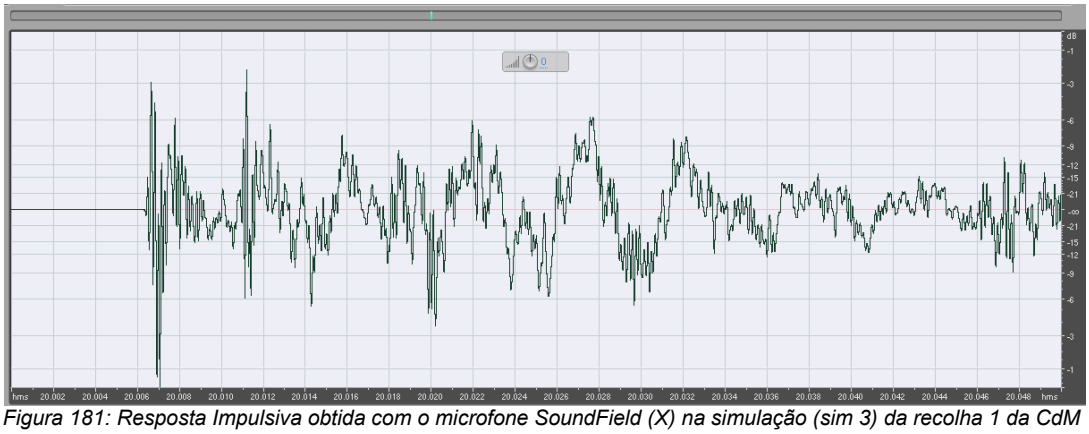


Figura 181: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 1 da CdM

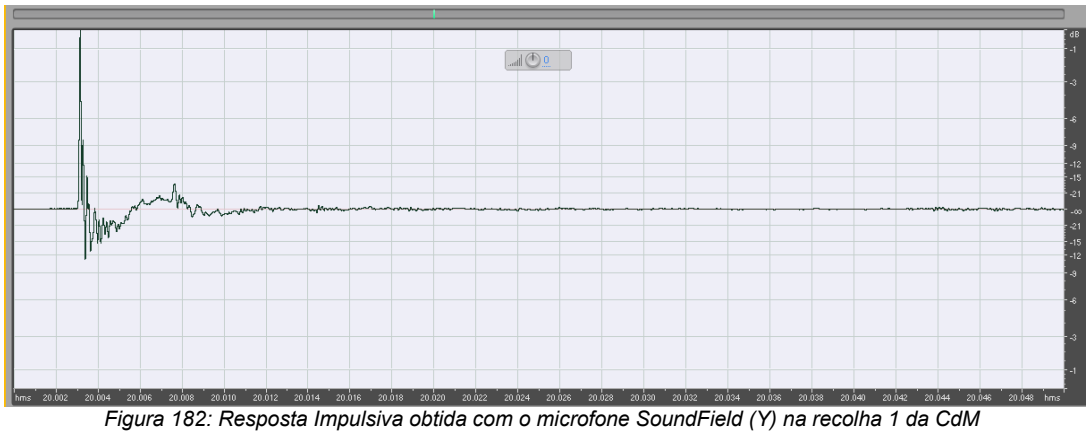


Figura 182: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 1 da CdM

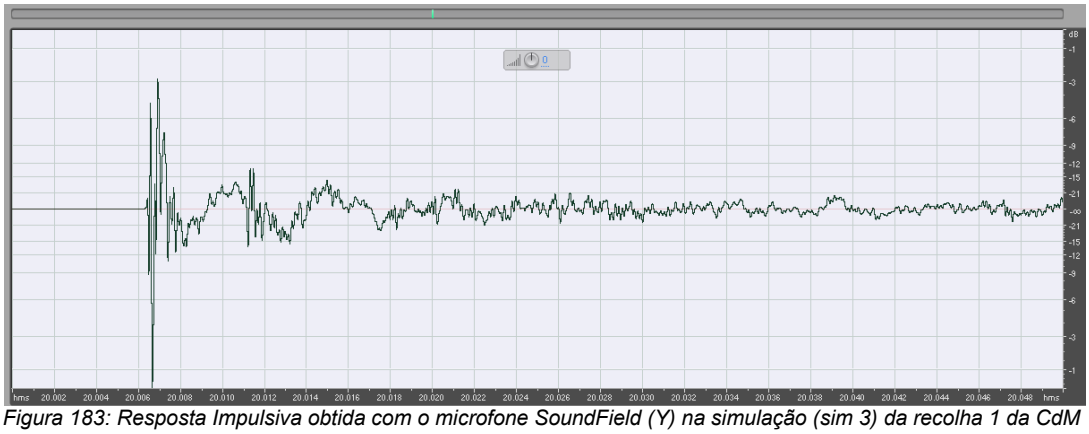


Figura 183: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 1 da CdM

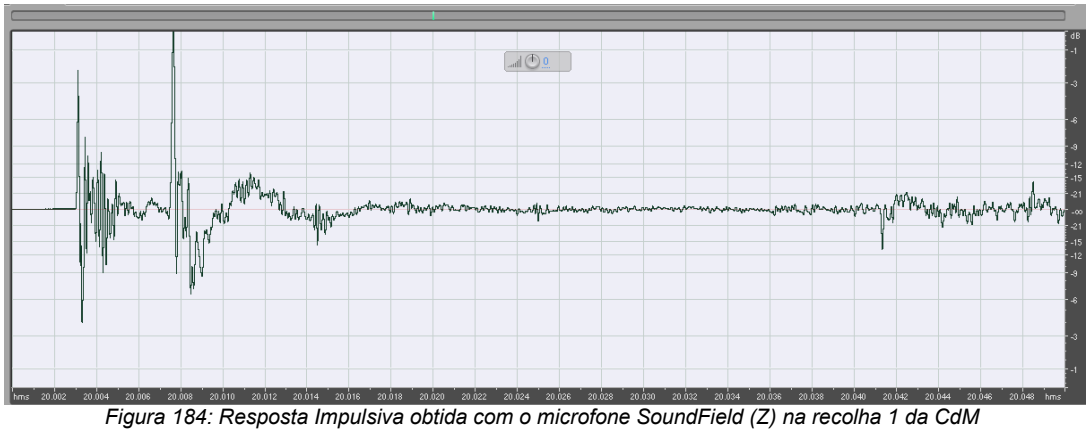


Figura 184: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 1 da CdM

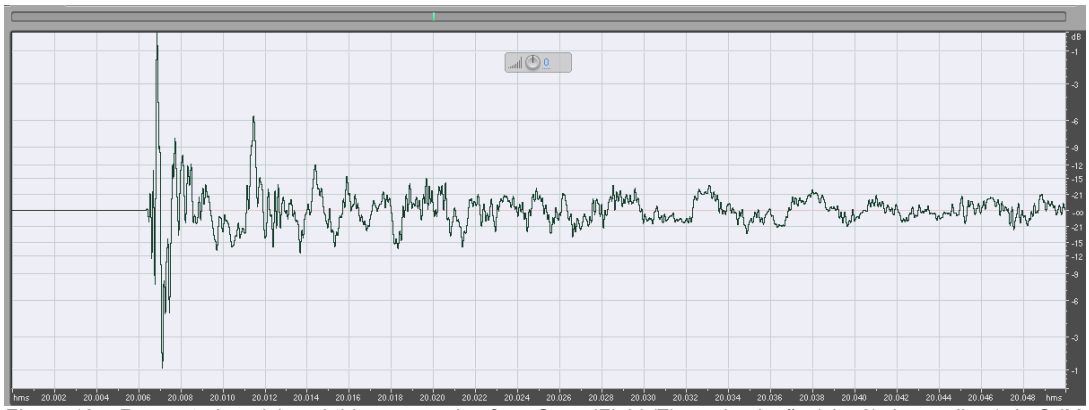


Figura 185: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 1 da CdM

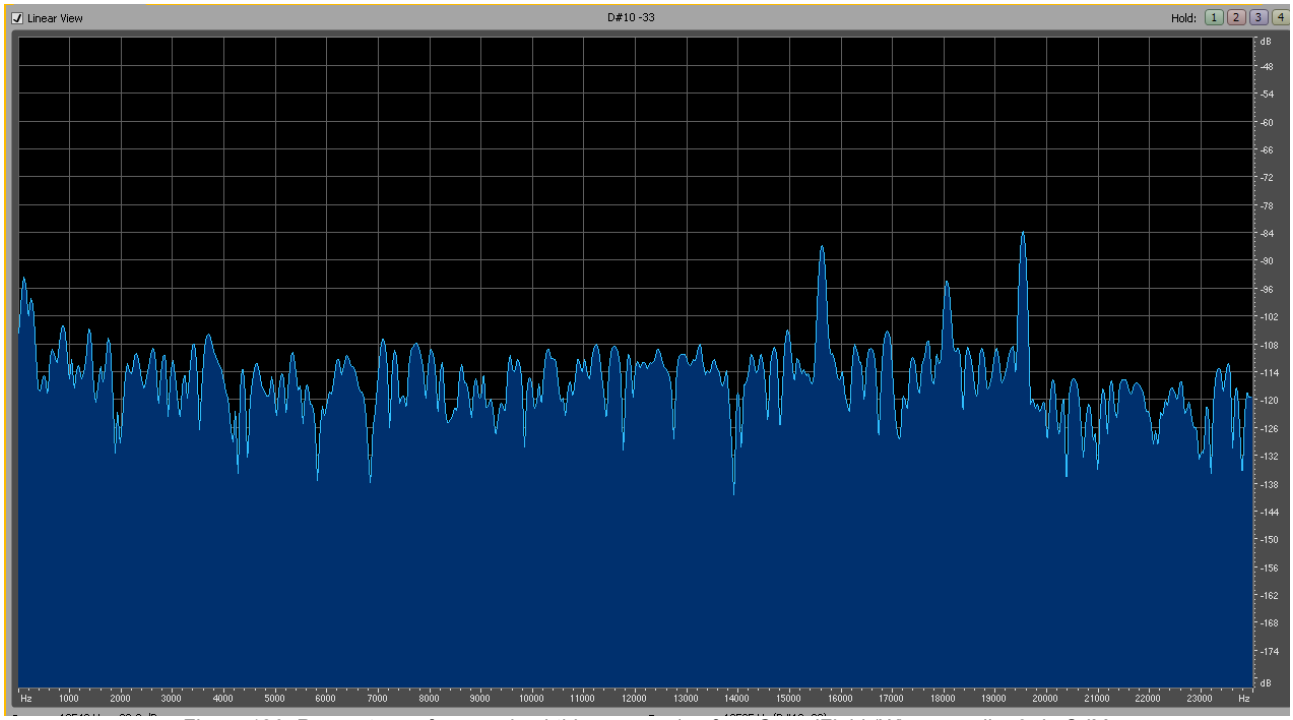


Figura 186: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 da CdM

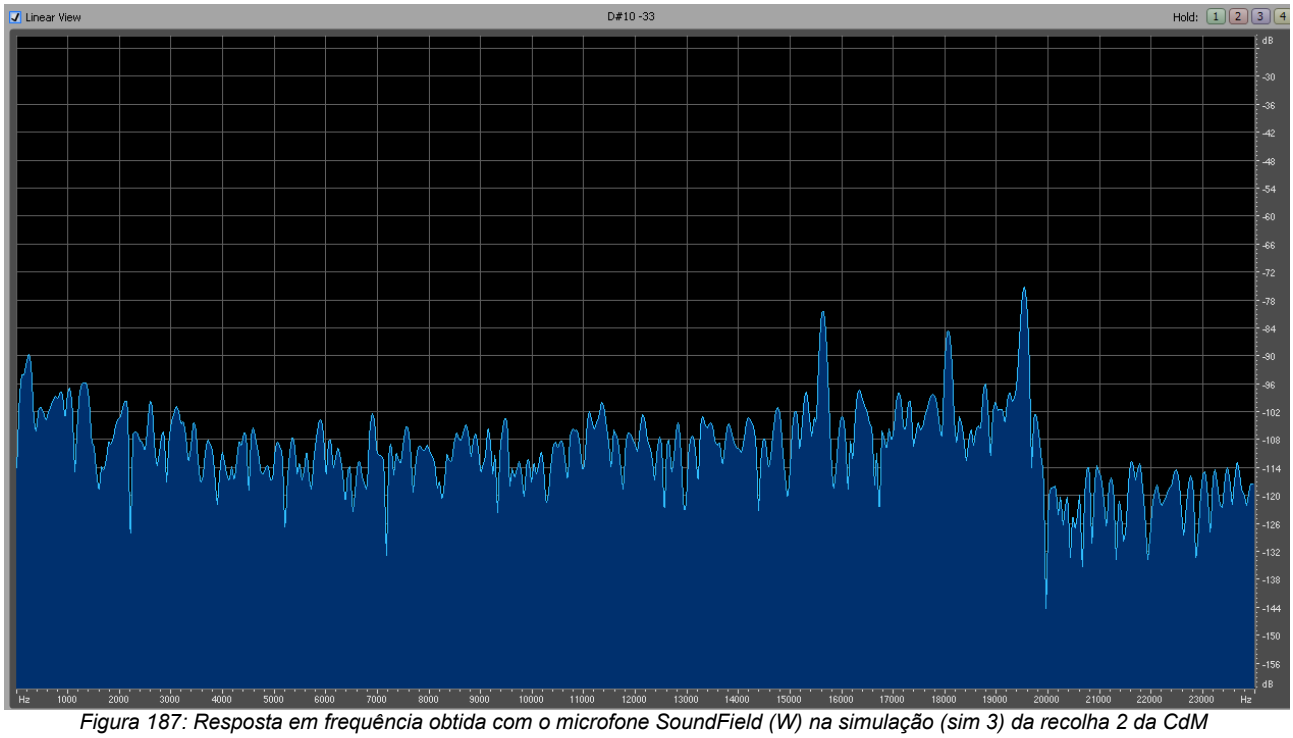


Figura 187: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 da CdM

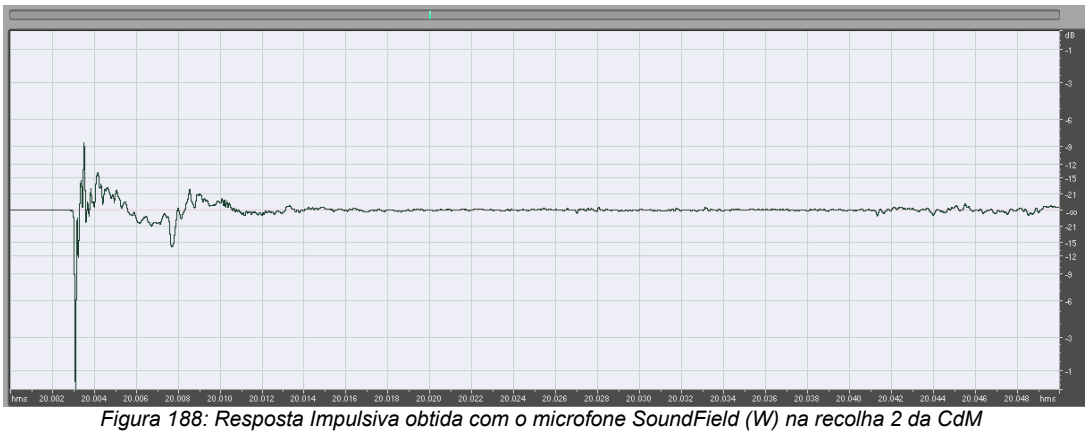


Figura 188: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 2 da CdM

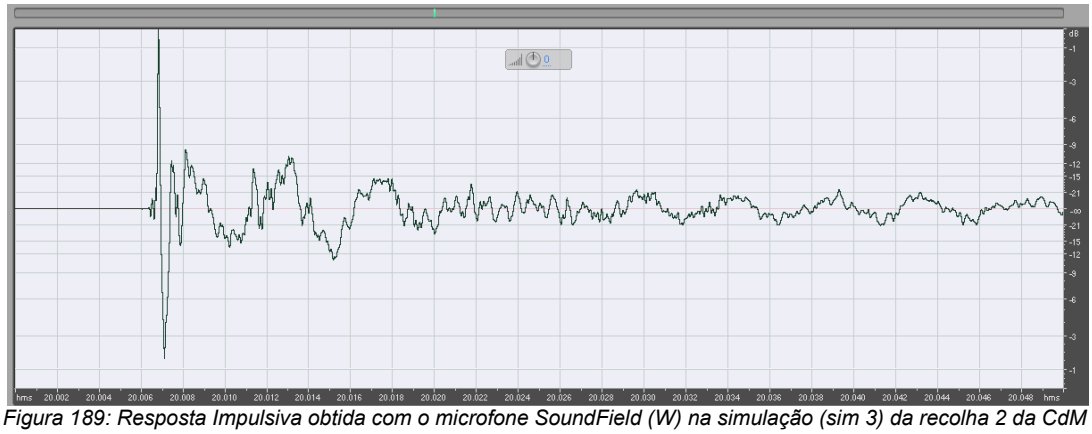


Figura 189: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 2 da CdM

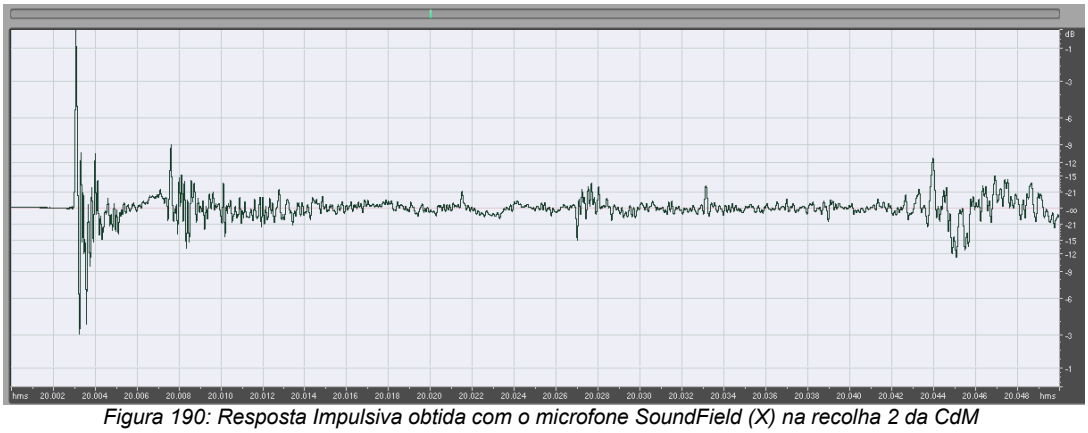


Figura 190: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 2 da CdM

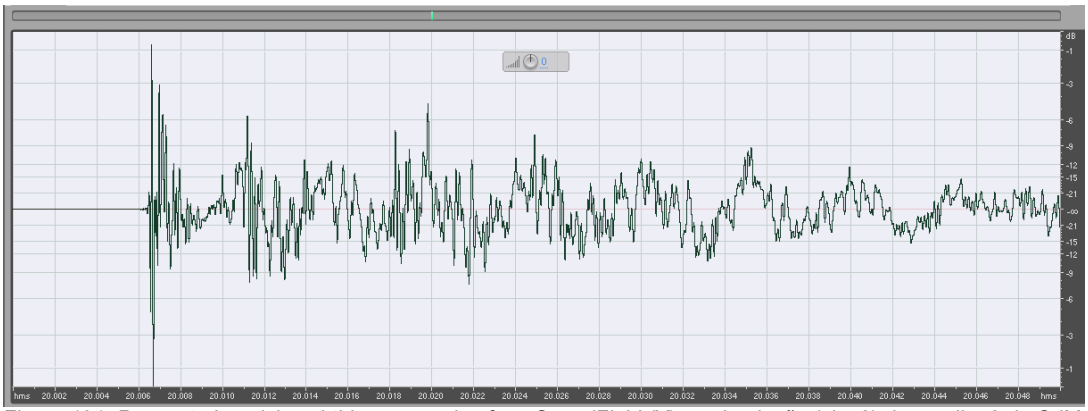


Figura 191: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 2 da CdM

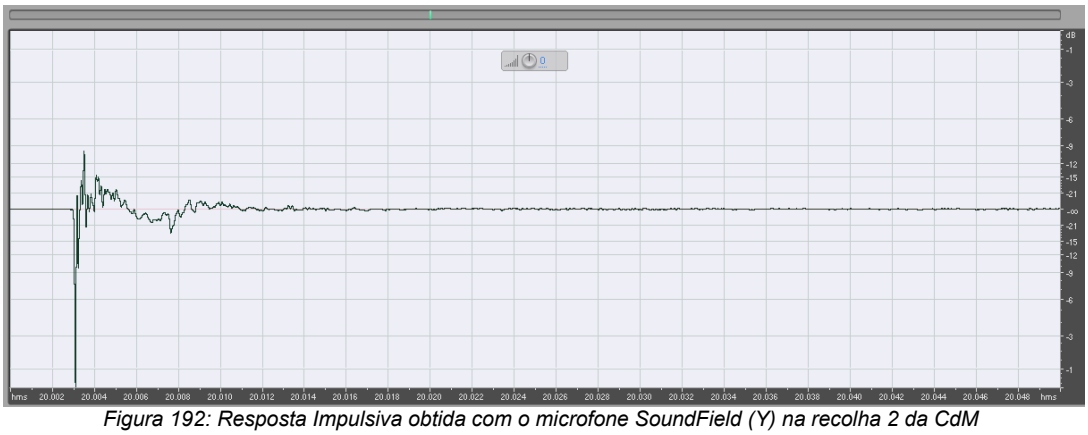


Figura 192: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 2 da CdM

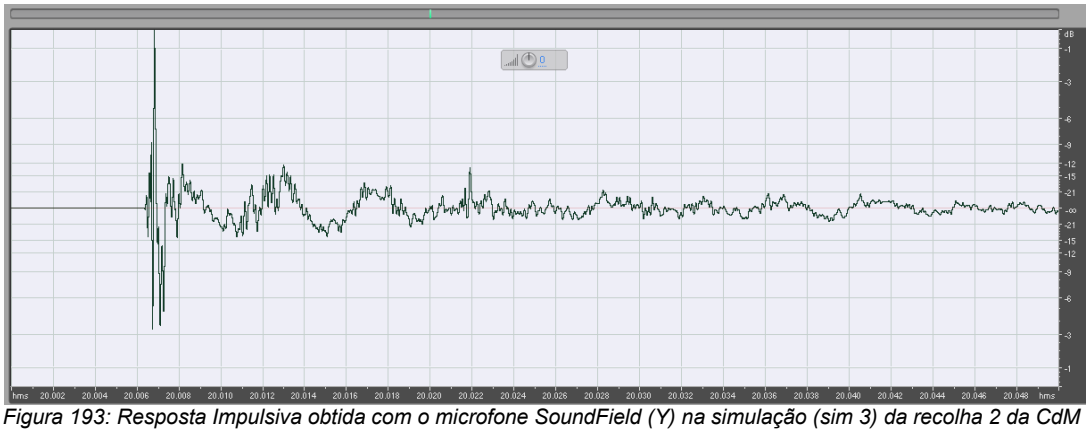


Figura 193: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 2 da CdM

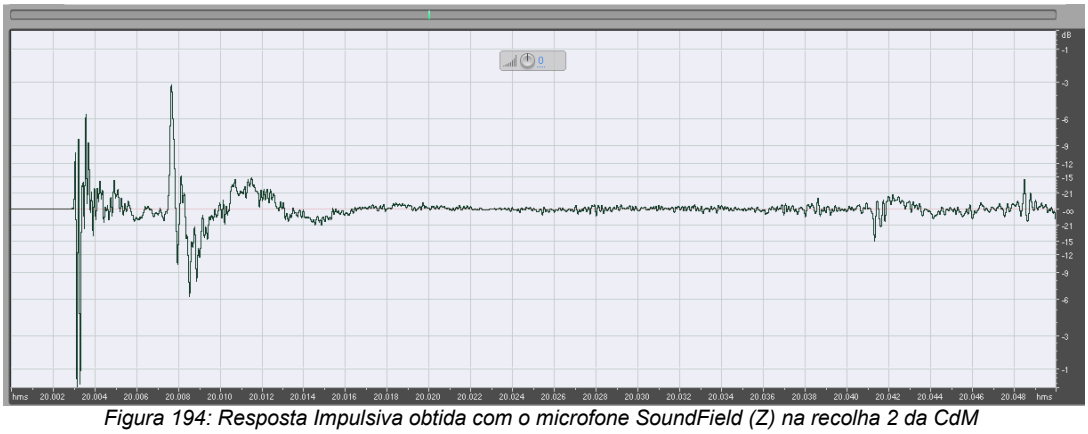


Figura 194: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 2 da CdM

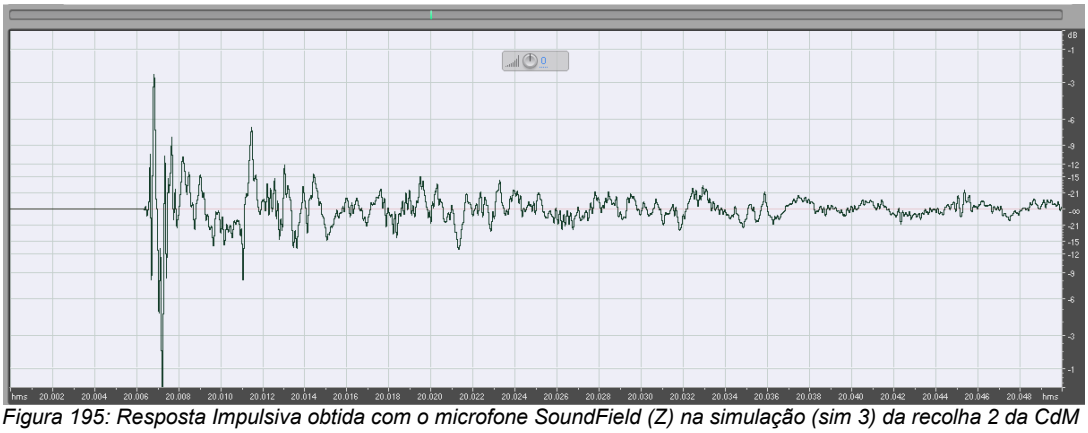


Figura 195: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 2 da CdM

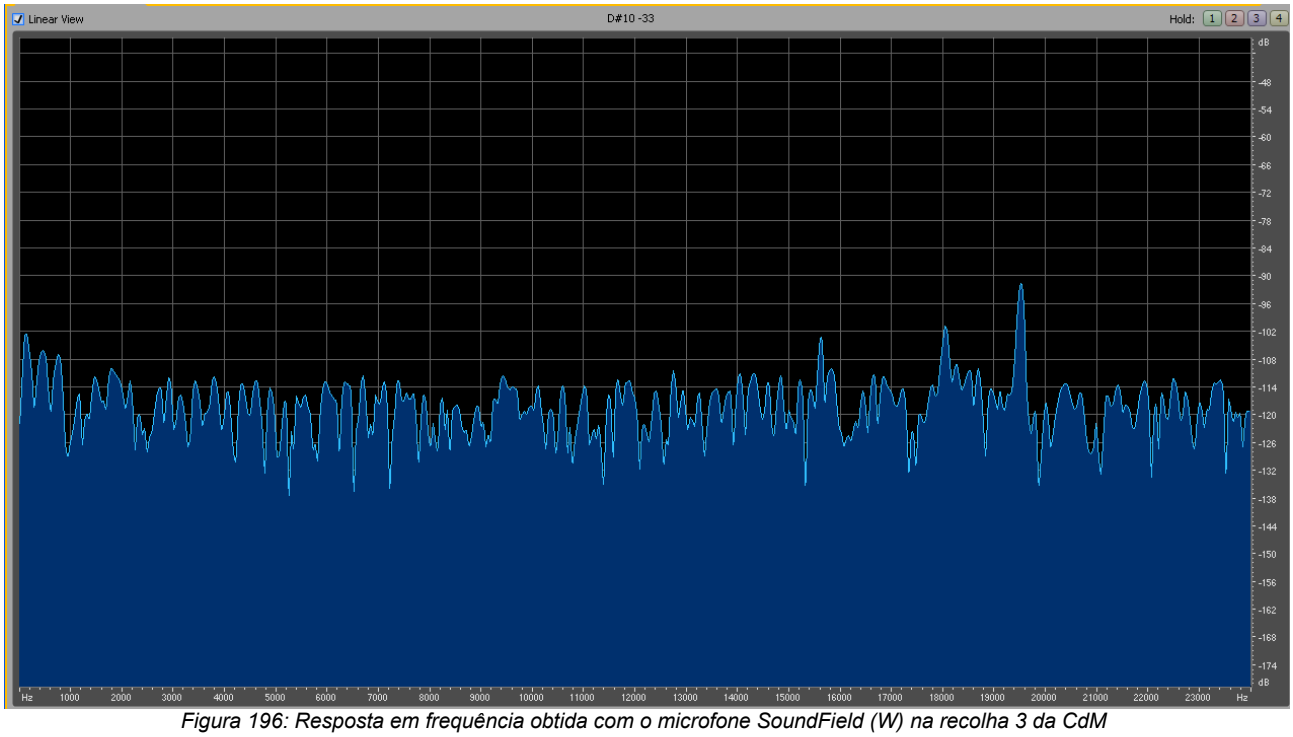


Figura 196: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 da CdM

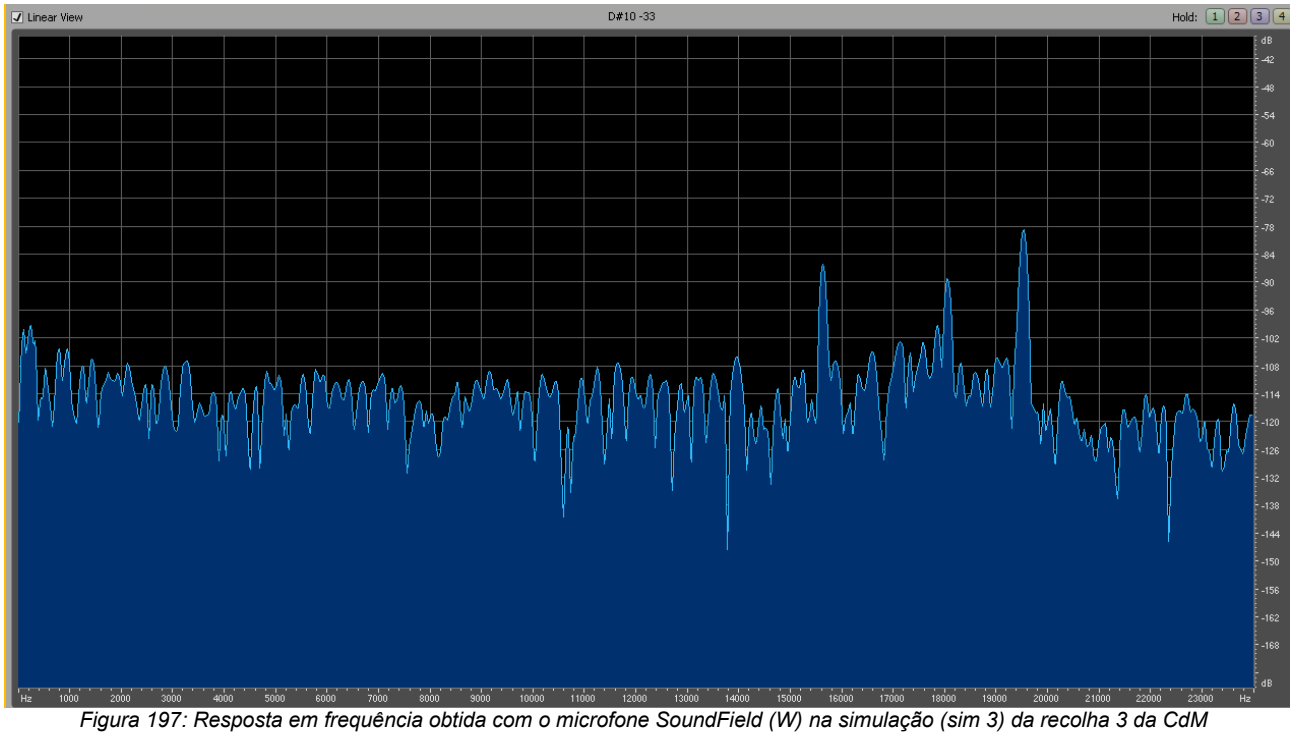


Figura 197: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 da CdM

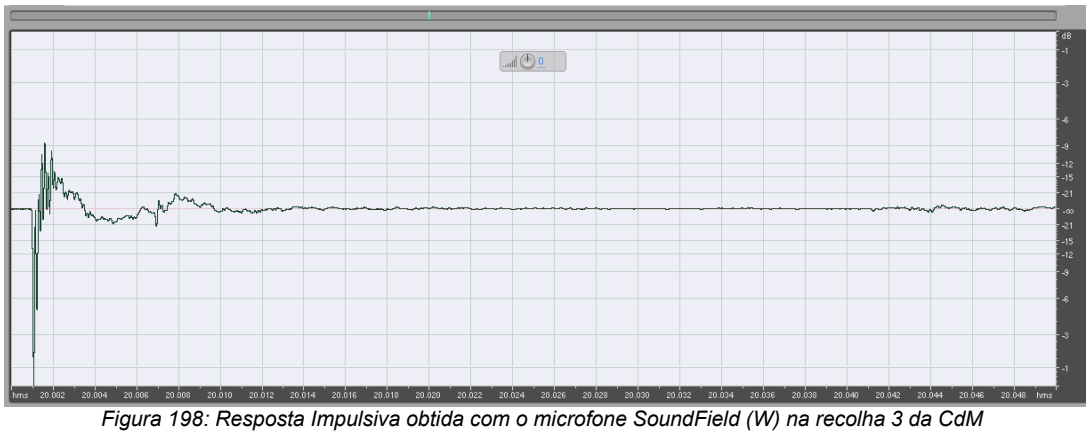


Figura 198: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 3 da CdM

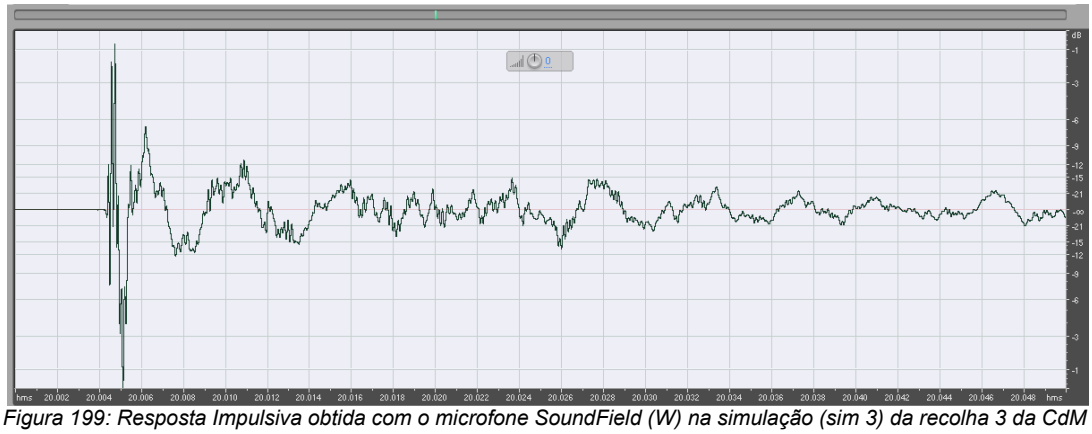


Figura 199: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 3 da CdM

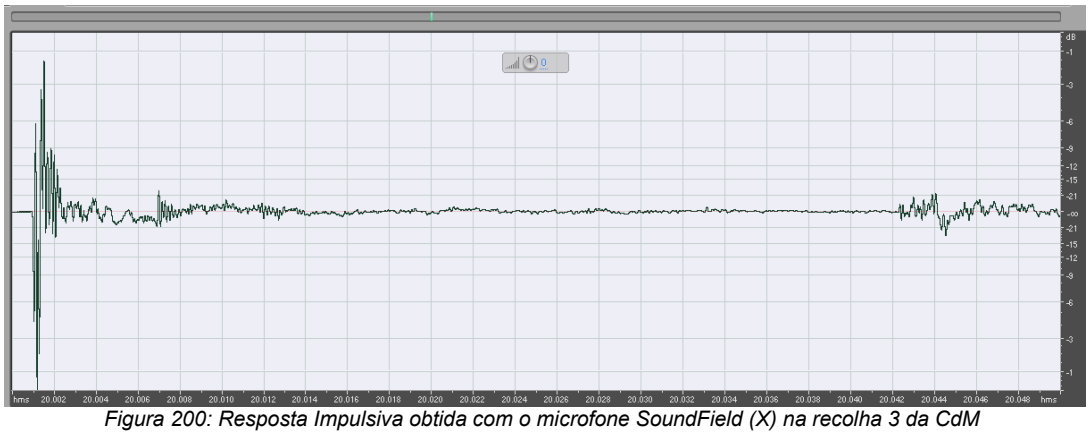


Figura 200: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 3 da CdM

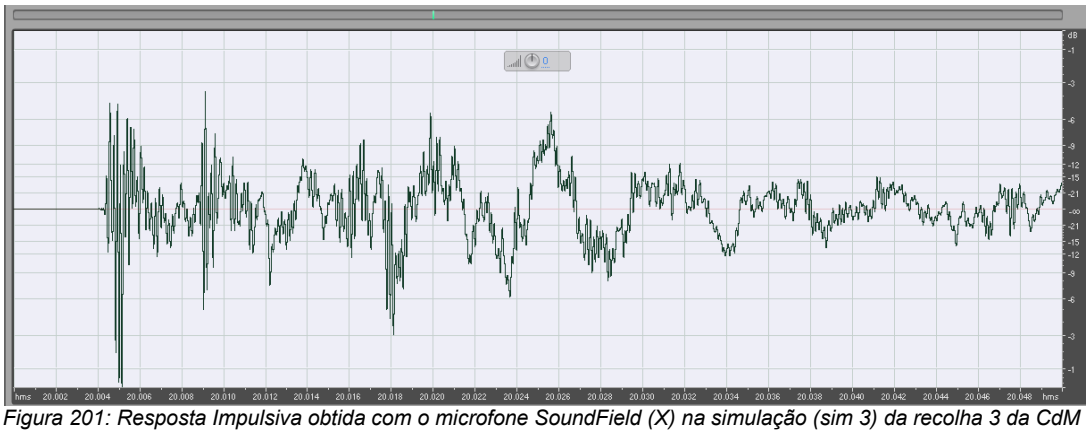


Figura 201: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 3 da CdM

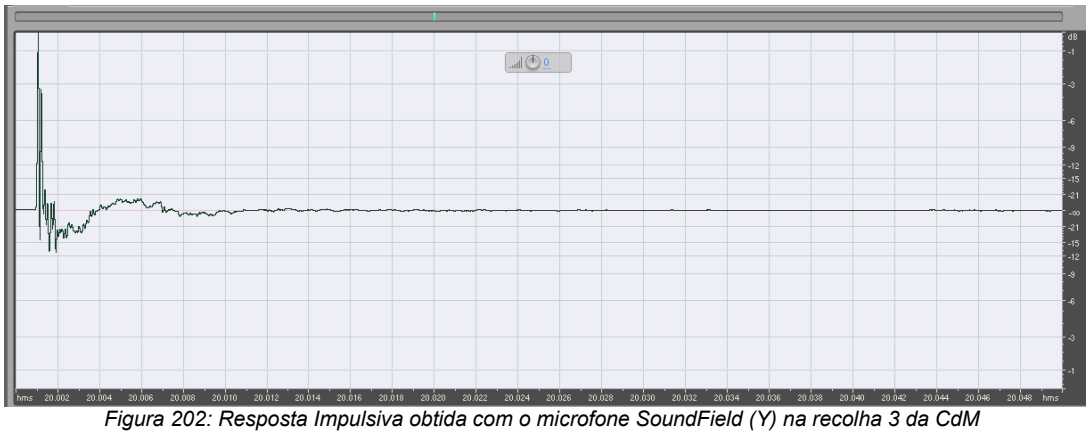


Figura 202: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 3 da CdM

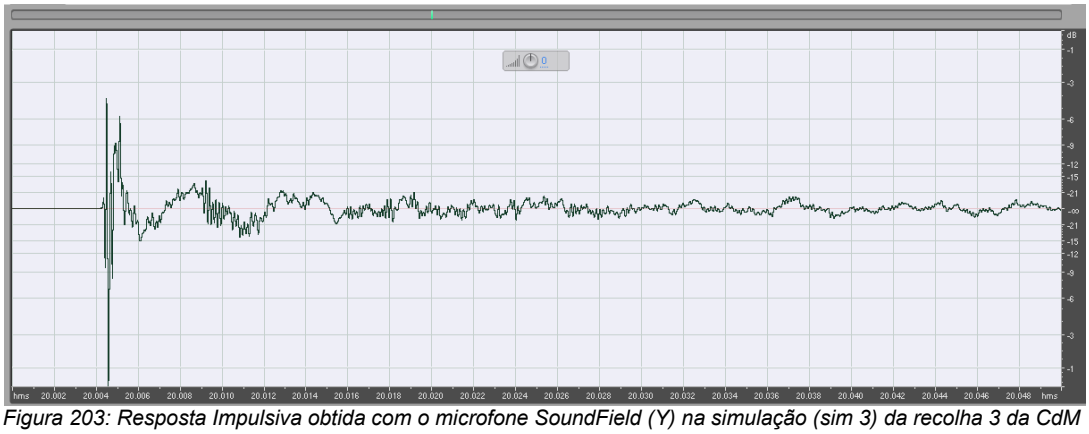


Figura 203: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 3 da CdM

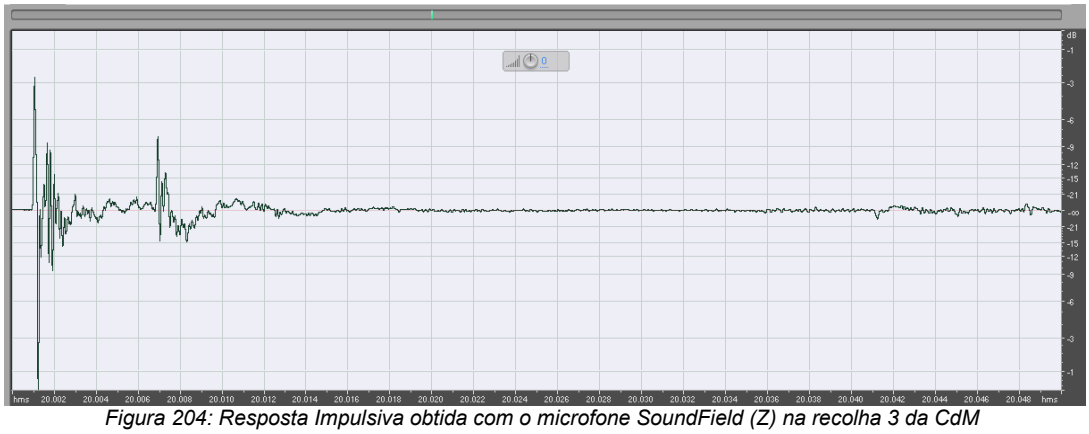


Figura 204: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 3 da CdM

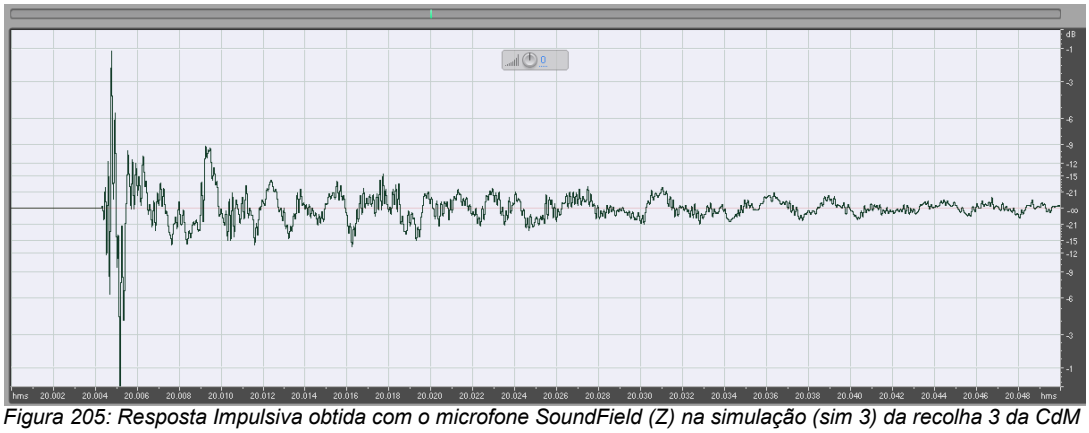


Figura 205: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 3 da CdM

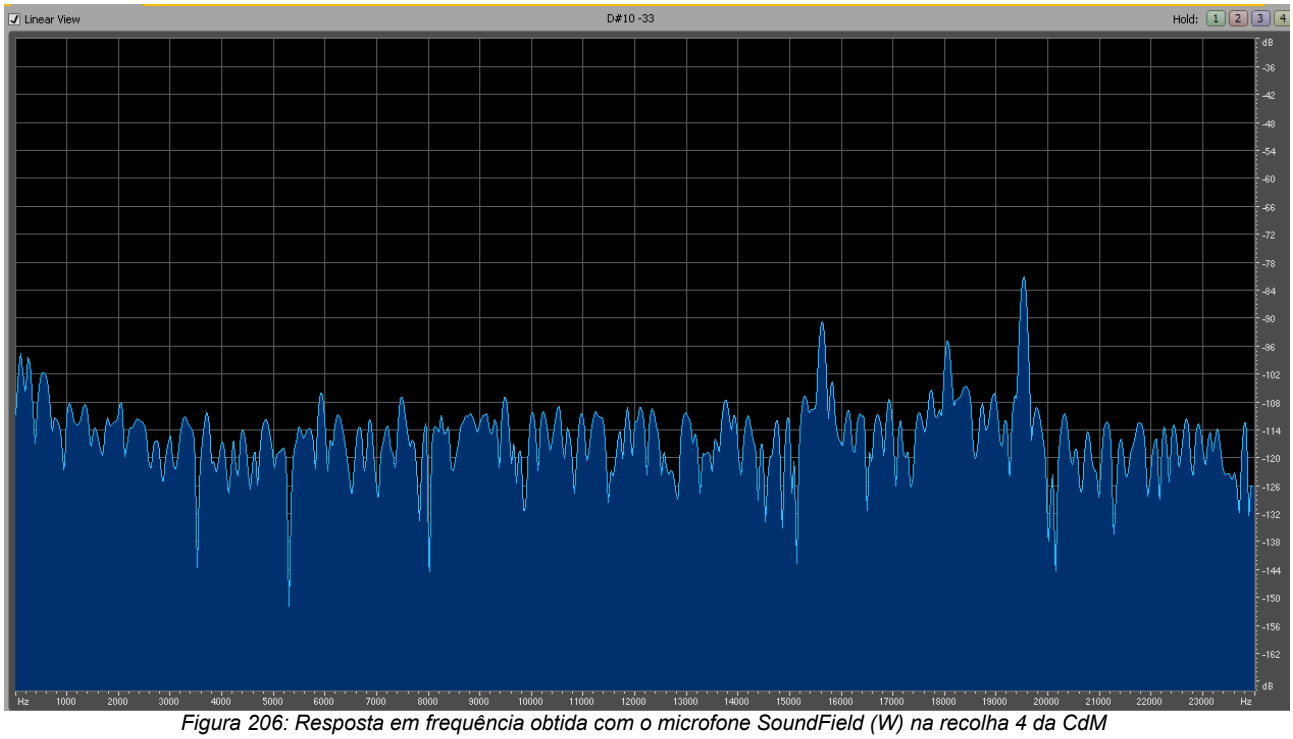


Figura 206: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 da CdM

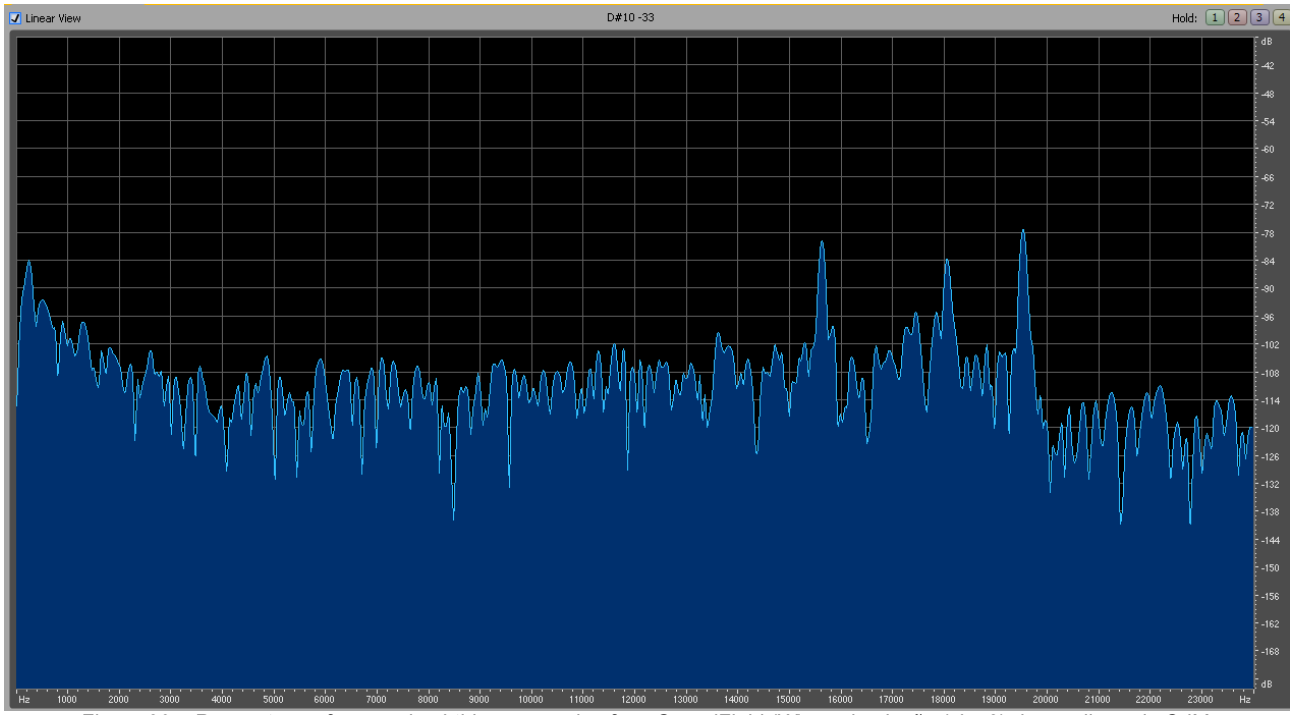


Figura 207: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 da CdM

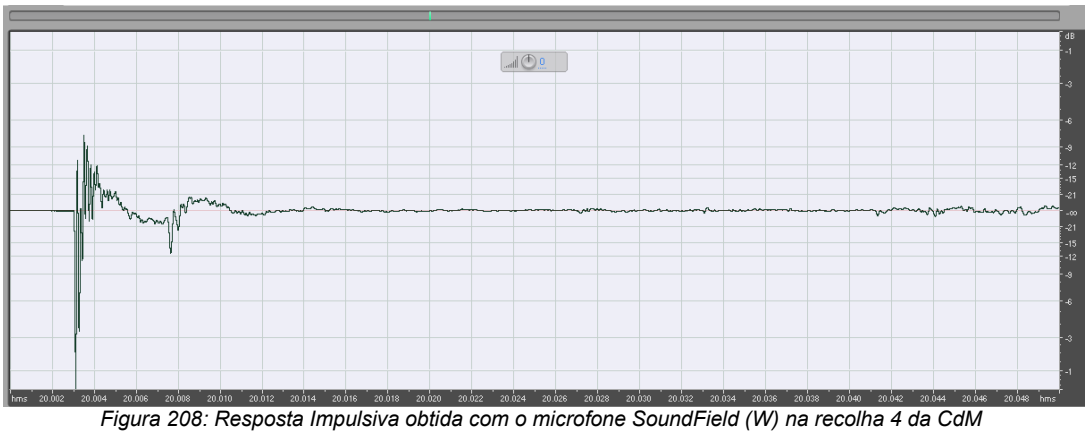


Figura 208: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 4 da CdM

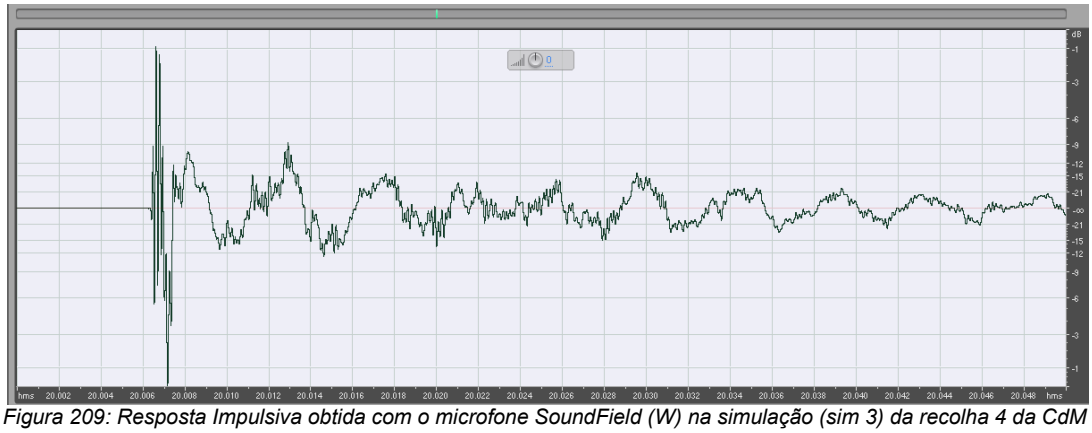


Figura 209: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 4 da CdM

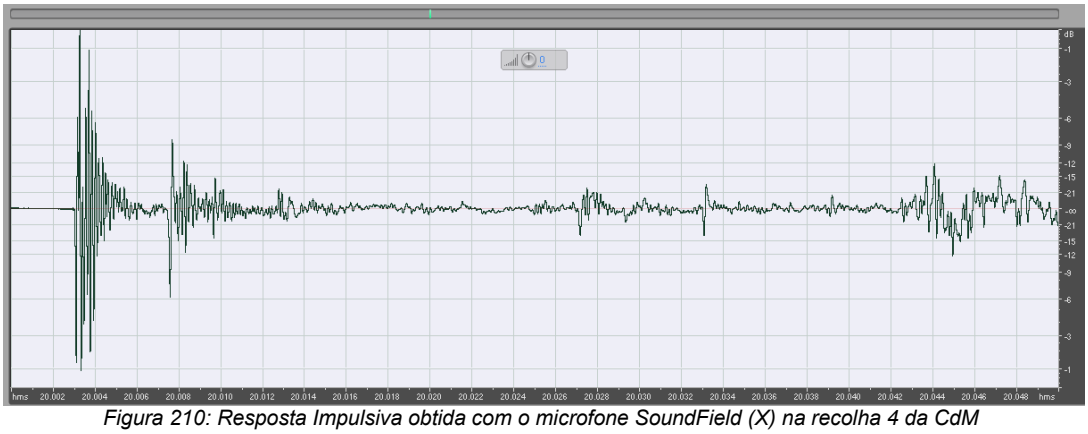


Figura 210: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 4 da CdM

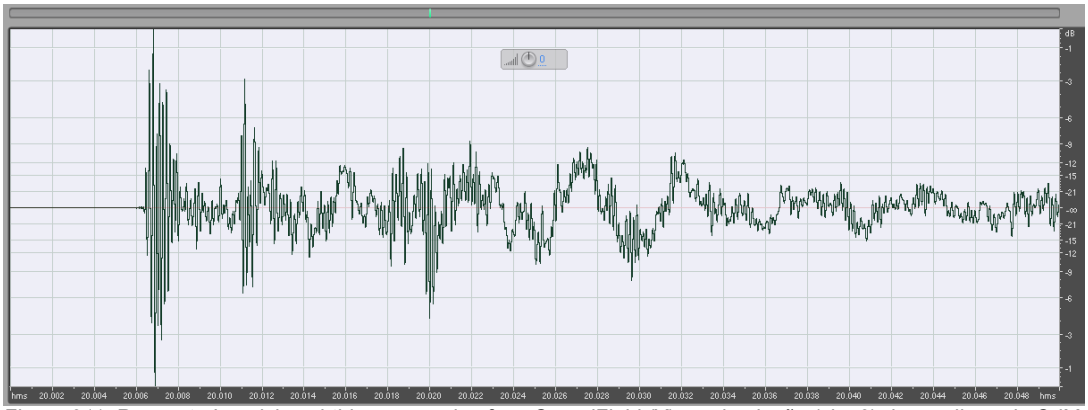


Figura 211: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 4 da CdM

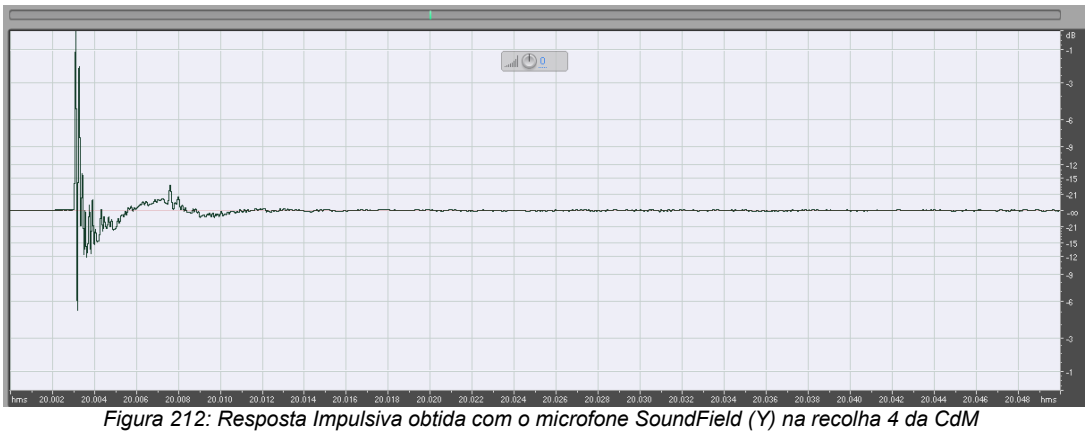


Figura 212: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 4 da CdM

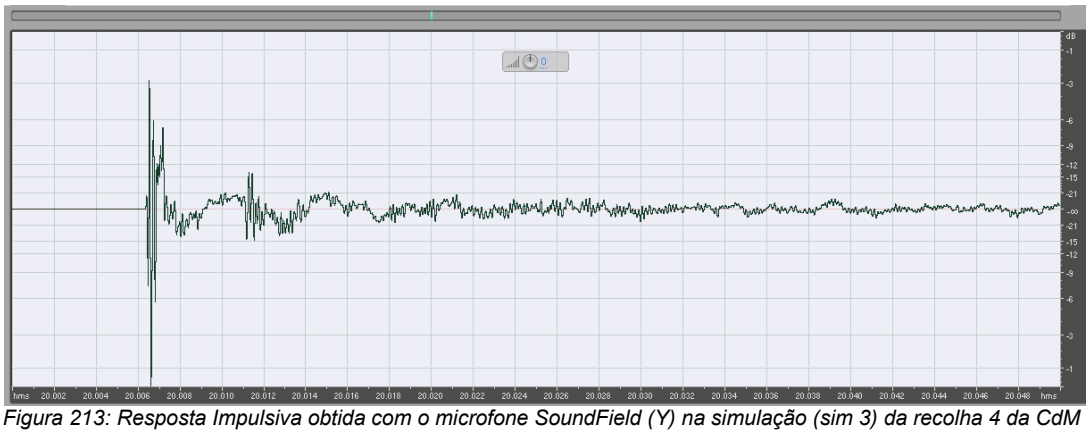


Figura 213: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 4 da CdM

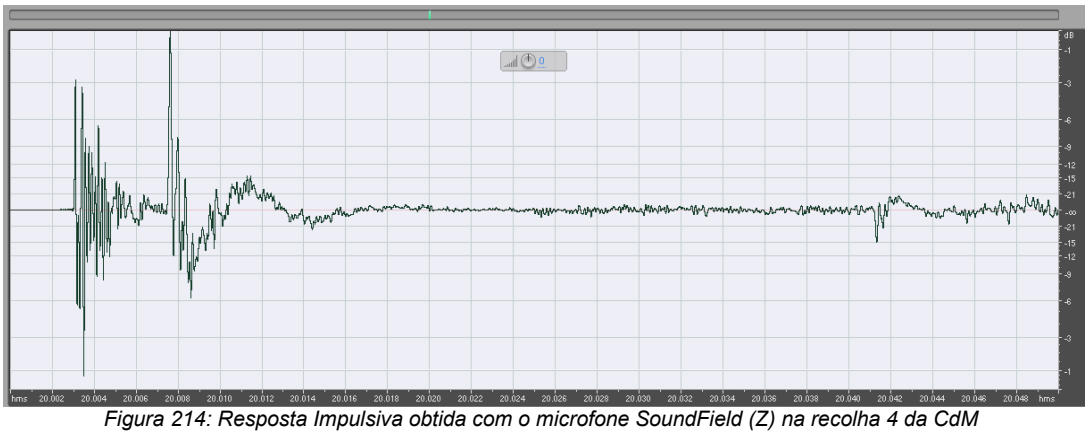


Figura 214: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 4 da CdM

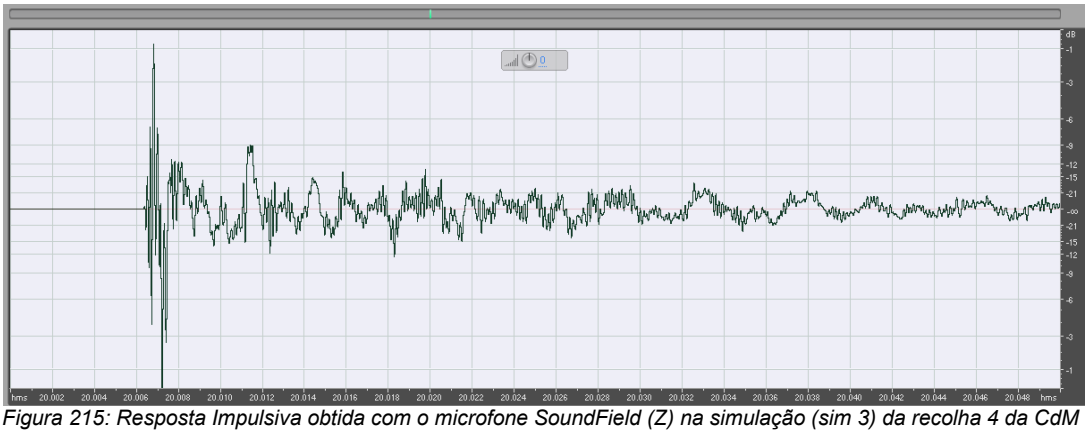


Figura 215: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 4 da CdM

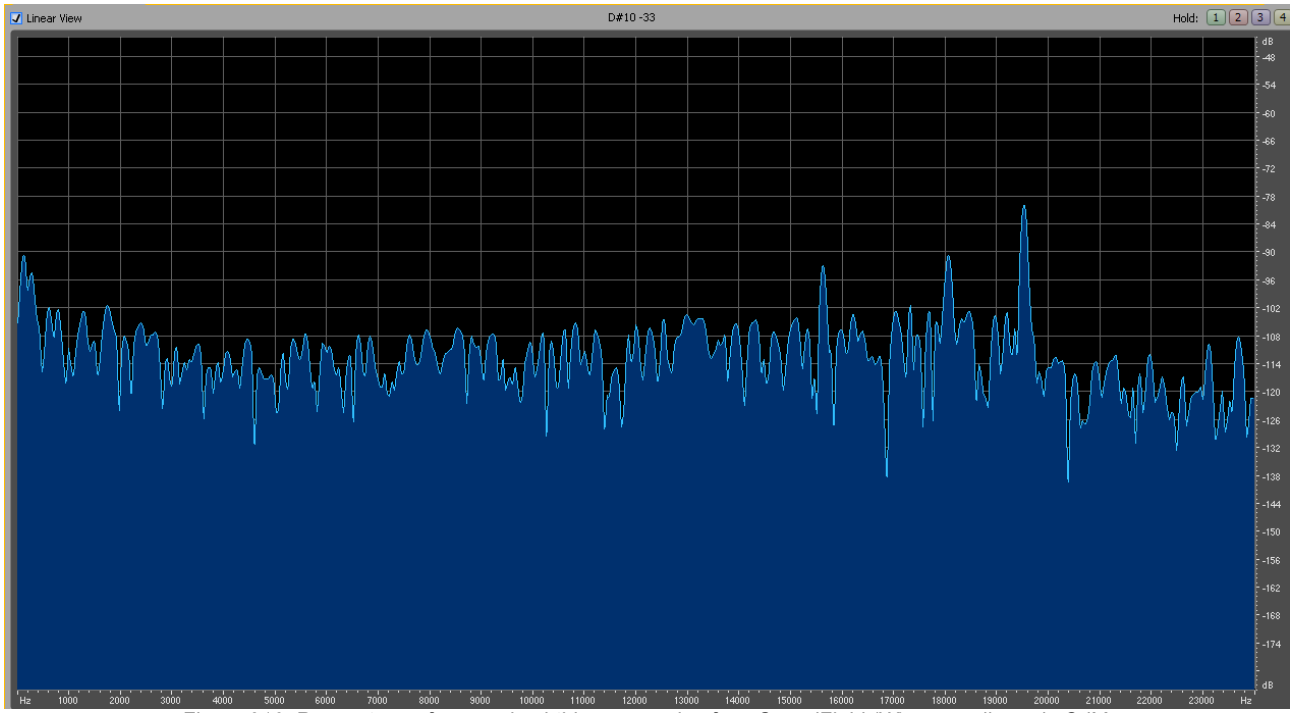


Figura 216: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 da CdM

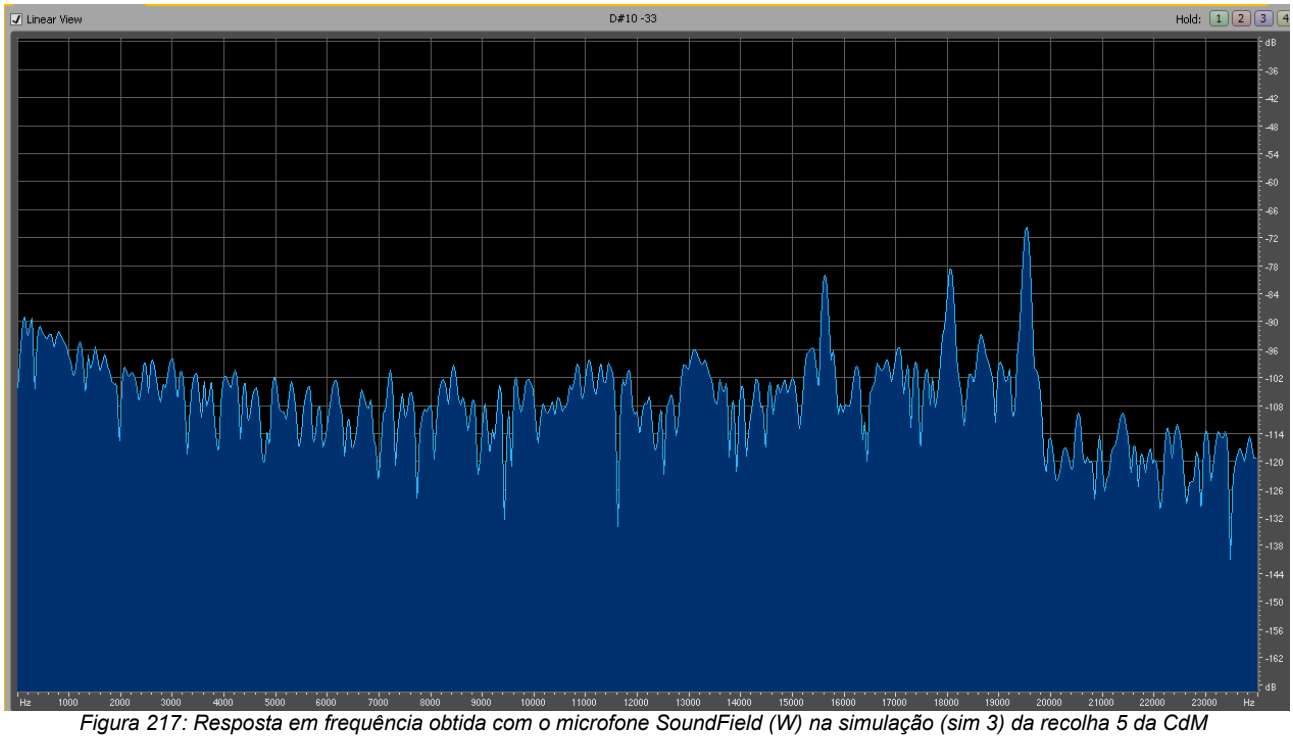


Figura 217: Resposta em frequência obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 da CdM

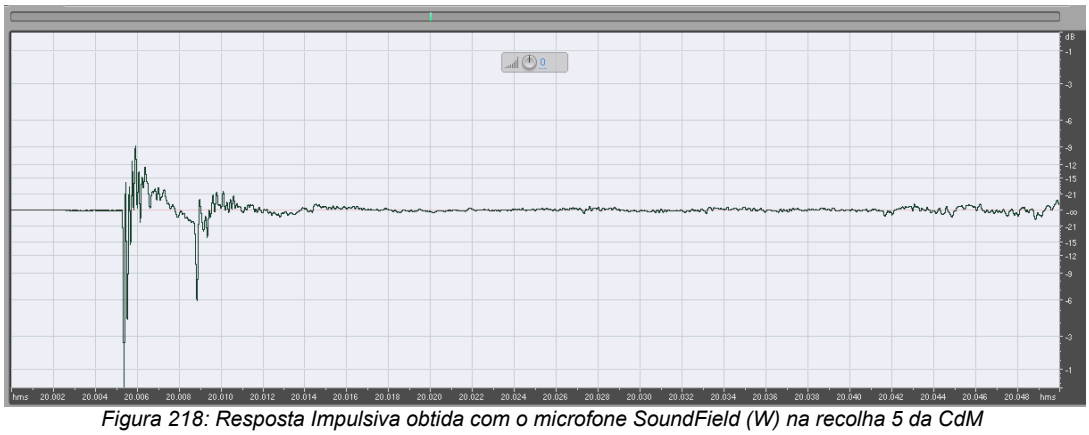


Figura 218: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na recolha 5 da CdM

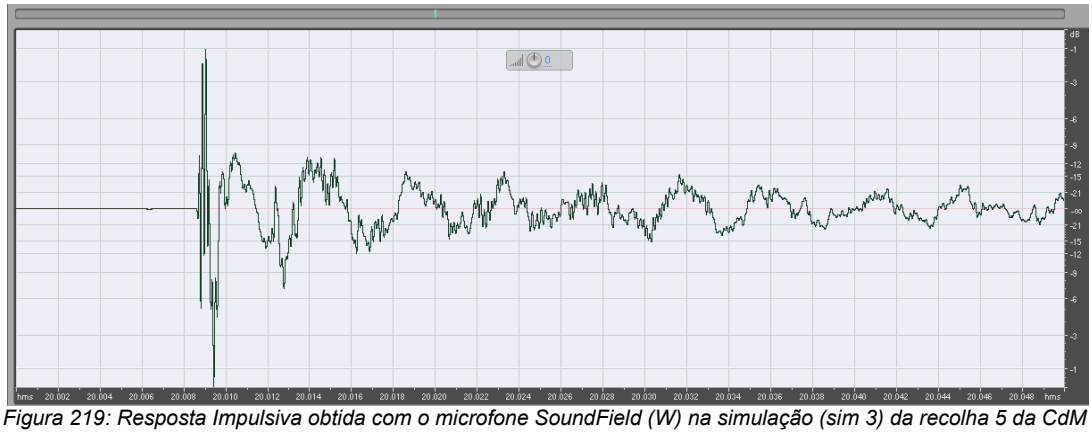


Figura 219: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (W) na simulação (sim 3) da recolha 5 da CdM

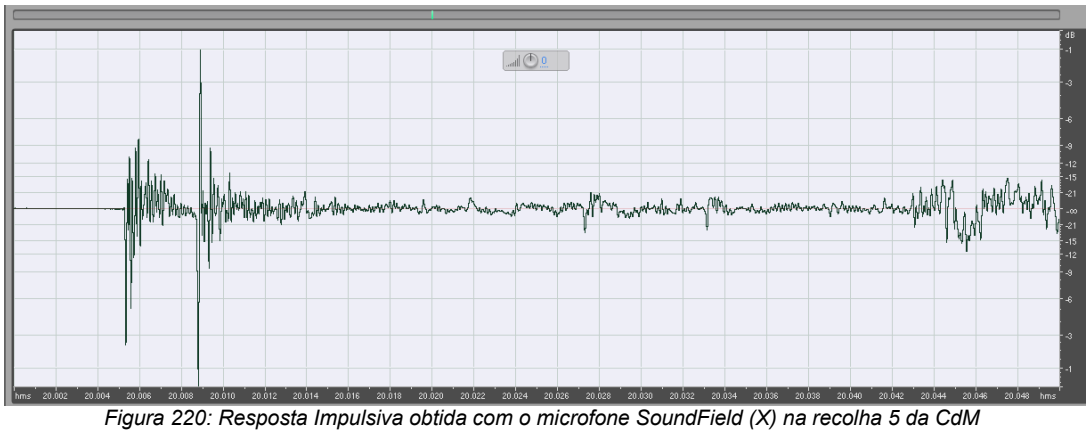


Figura 220: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na recolha 5 da CdM

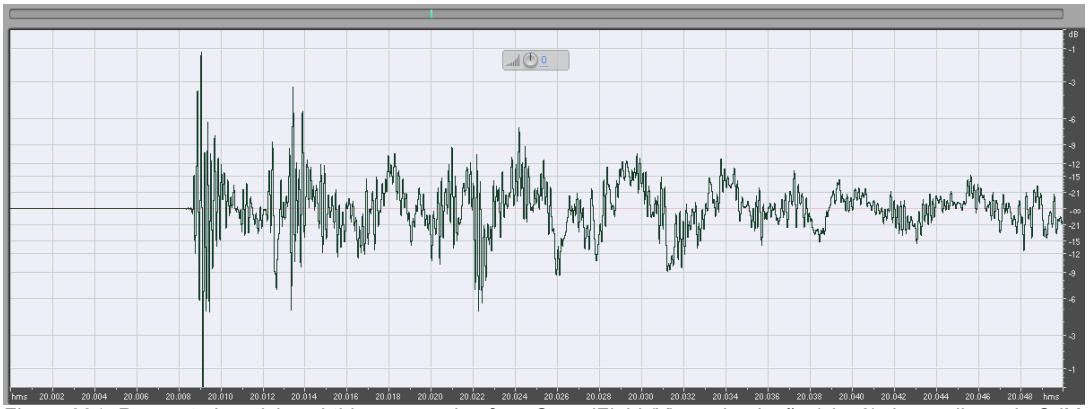


Figura 221: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (X) na simulação (sim 3) da recolha 5 da CdM

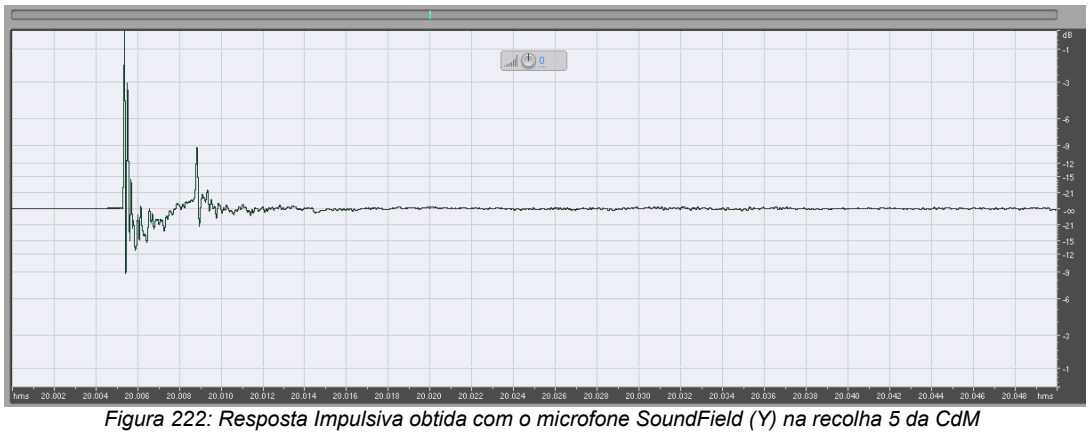


Figura 222: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na recolha 5 da CdM

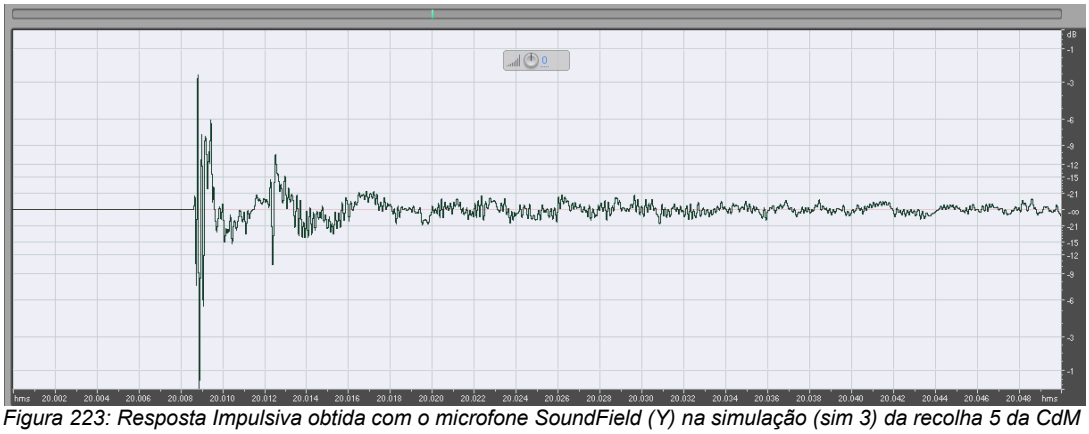


Figura 223: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Y) na simulação (sim 3) da recolha 5 da CdM

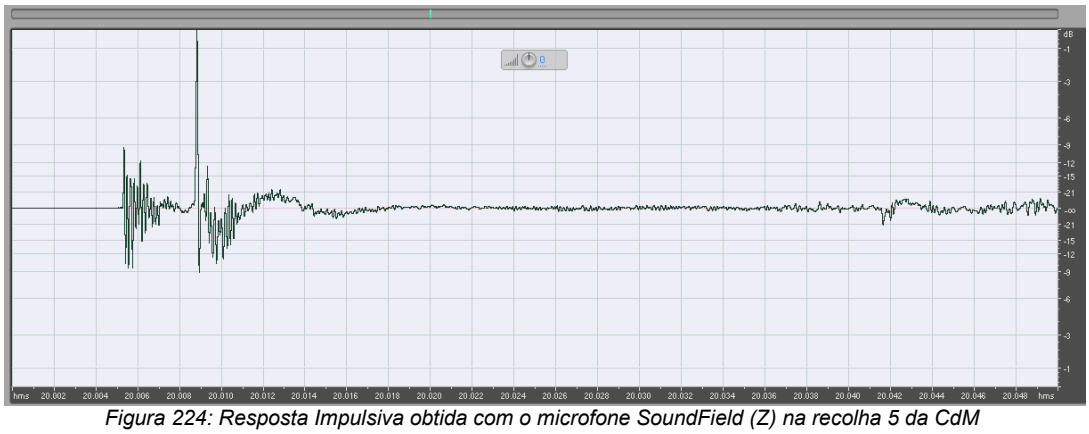


Figura 224: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na recolha 5 da CdM

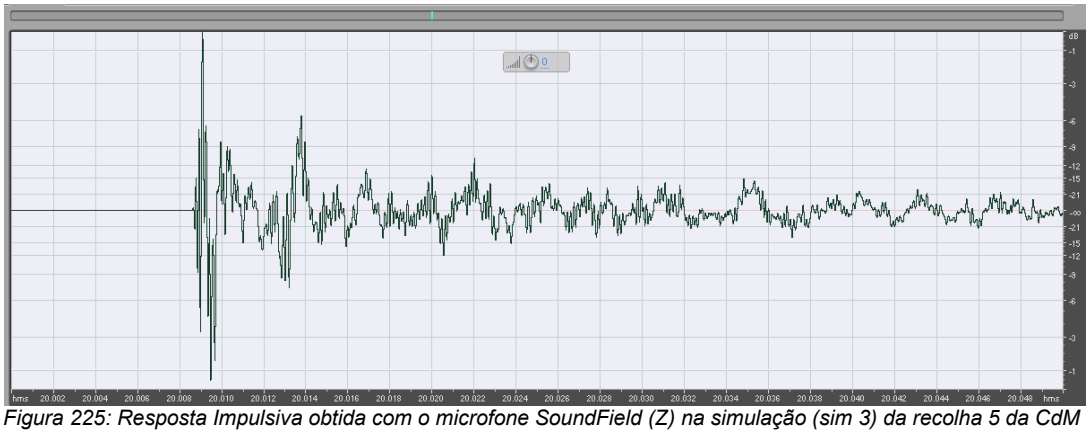


Figura 225: Resposta Impulsiva obtida com o microfone SoundField (Z) na simulação (sim 3) da recolha 5 da CdM