



Universidade de Aveiro
2023

**Gonçalo Augusto
Bento Rebelo**

**KIT DE MEDIÇÃO DE RESPOSTAS IMPULSIONAIS
ACÚSTICAS**



Universidade de Aveiro
2023

**Gonçalo Augusto
Bento Rebelo**

KIT DE MEDIÇÃO DE RESPOSTAS IMPULSIONAIS ACÚSTICAS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob a orientação científica do Doutor António Guilherme Rocha Campos e do Doutor José Manuel Neto Vieira, Professores Auxiliares do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Professor Doutor João Manuel de Oliveira e Silva Rodrigues
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

vogais

Doutor Octávio José Patrício Fernandes Inácio
Ceo, Inacoustics – Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente, Lda.

Professor Doutor António Guilherme Rocha Campos
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à minha equipa de orientação, Professor António Campos e Professor José Vieira, por toda a atenção dada, pelo apoio em todo o percurso e pela grande partilha de conhecimento.

À Design Factory pelas excelentes condições disponibilizadas, em especial ao Alexandre Kumagai e César Rodrigues pelo apoio imprescindível dado a este trabalho.

Por fim, um agradecimento especial ao meu tio, António Rebelo, por toda a ajuda dada.

palavras-chave

acústica de salas, psicoacústica, tempo de reverberação, omnidirecionalidade, coluna dodecaédrica

resumo

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um *kit* de medição de respostas impulsivas acústicas. Assim, começa pelo estudo dos fenómenos acústicos no interior de salas e como estes estão relacionados com a psicoacústica, isto é, a perceção sonora do ouvinte. De seguida, são apresentados e discutidos vários métodos de obtenção de resposta impulsional acústica, propostos na literatura. As normas que regulam as medições de respostas impulsivas em salas preconizam a utilização de um fonte sonora omnidirecional. Neste sentido foi projetada e construída uma coluna dodecaédrica, cuja direcionalidade foi avaliada e validada experimentalmente. Como parte integrante do *kit* foi desenvolvida uma aplicação em *MATLAB* capaz de obter respostas impulsivas e através delas calcular os parâmetros acústicos caracterizantes do espaço. O *kit* desenvolvido é então utilizado para analisar acusticamente dois auditórios da Universidade de Aveiro. O valor dos parâmetros acústicos calculados com as medições efetuadas são comparados com resultados obtidos através do software *REW* e com estudos prévios nos mesmos espaços. O erro encontrado para as duas comparações é reduzido, validando assim o *kit* desenvolvido. Os parâmetros acústicos relativos aos dois auditórios revelam uma inadequação de qualidade acústica para a sua finalidade. Principalmente em termos de inteligibilidade do discurso.

keywords

room acoustics, psychoacoustics, reverberation time, omnidirectionality, dodecahedral loudspeaker.

abstract

The aim of this dissertation is the development of an acoustic impulse response measurement kit. It begins with an examination of acoustic phenomena within enclosed spaces and their connection to psychoacoustics, i.e., the auditory perception of the listener. Subsequently, various methods for acquiring acoustic impulse responses, as proposed in the literature, are presented, and discussed. Standards governing impulse response measurements in enclosed spaces recommend the use of an omnidirectional sound source. In this context, a dodecahedral loudspeaker was designed and constructed, and its directivity characteristics were experimentally evaluated and validated. As an integral part of the kit, a MATLAB application was developed to obtain impulse responses and, through them, compute acoustic parameters characterizing the space. The developed kit is then employed to acoustically analyze two auditoriums at the University of Aveiro. The values of the acoustic parameters calculated from the measurements are compared with results obtained using the REW software and previous studies in the same spaces. The error found in both comparisons is low, thus validating the developed kit. The acoustic parameters for the two auditoriums reveal an inadequacy in acoustic quality for their intended purpose, particularly in terms of speech intelligibility.

Índice

Índice de Figuras	iii
1 Introdução	2
1.1 Enquadramento	2
1.1.1 Acústica Base	2
1.1.2 Resposta Impulsional	8
1.2 Objetivos	10
1.3 Estrutura da dissertação	11
2 Medição de Resposta Impulsional	14
2.1 Princípios de acústica	14
2.1.1 Modos normais de vibração	14
2.1.2 Campo sonoro difuso	16
2.1.3 Densidade Energética	17
2.2 Parâmetros acústicos objetivos e subjetivos	18
2.2.1 Parâmetros Subjetivos	19
2.2.2 Parâmetros Objetivos	21
2.3 Medição de resposta Impulsional	23
2.3.1 Método de sequências de comprimento máximo	24
2.3.2 Método de <i>Sine-Sweep</i>	25
2.3.3 Comparação dos métodos apresentados	27
3 Coluna omnidirecional dodecaédrica	30
3.1 Fontes sonoras omnidirecionais	30
3.2 Modelação e construção da coluna	32
3.3 Esquema Elétrico	36
3.4 Validação de omnidirecionalidade	38
4 <i>Software</i> de medição e processamento	42
4.1 Aplicação <i>MATLAB</i>	42

4.2	Resposta Impulsional por Bandas de Frequência	44
4.3	Integração de Schröder	45
4.4	Compensação de Ruído	47
4.4.1	Método de Chu	47
4.4.2	Método de Lundeby	48
4.4.3	Compensação à truncagem	50
4.5	Cálculo de parâmetros objetivos	52
5	Validação do <i>kit</i> em testes de campo	57
5.1	Descrição do <i>kit</i>	57
5.2	Descrição dos testes.....	58
5.3	Caracterização dos espaços	61
5.3.1	Auditório José Grácio (Departamento de Engenharia Mecânica)	61
5.3.2	Auditório 23.1.6 (Complexo Pedagógico)	63
5.4	Resultados.....	64
5.4.1	Auditório José Grácio.....	65
5.4.2	Auditório do Complexo Pedagógico	67
5.5	Análise dos Resultados.....	70
6	Conclusões e trabalho futuro	78
7	Referências	80

Índice de Figuras

Figura 1.1: Características físicas de uma onda.....	3
Figura 1.2: Modelo de propagação sonora em campo livre.....	4
Figura 1.3: Exemplo simplificado de som direto (a tracejado) e sons refletidos.	5
Figura 1.4: Diferentes fases da percepção sonora	6
Figura 1.5: Acústica de salas representada por um sistema simplificado.....	8
Figura 1.6: Esquema de montagem para medição de repostas impulsionais.....	10
Figura 2.1: Pressão sonora dos modos normais de vibração numa sala de dimensões (Lx= 10, Ly= 5 e Lz= 3) em que a) representa um modo normal com (m=2, n=2 e l=0), b) representa um modo normal com (m=3, n=3 e l=0) e c) representa a coexistência dos dois modos normais.	15
Figura 2.2: Influência de modos individuais na resposta da sala. (adaptado de [14])...	16
Figura 2.3: Evolução temporal da densidade de energia sonora num campo difuso (adaptado de [15]).....	17
Figura 2.4: Exemplo da evolução energética no discurso. (adaptado de [20])	20
Figura 2.5: Medição de RIR com o método de MLS.	25
Figura 2.6: Medição de RIR segundo o método de Sine-Sweep.	26
Figura 2.7: Chirp Logarítmico.	26
Figura 2.8: Sinal proveniente do filtro inverso.	26
Figura 2.9: Resultado da convolução entre o sinal de entrada e o sinal proveniente do filtro aproxima um Dirac.....	27
Figura 3.1: Padrão de radiação sonora para diversos sólidos platônicos e frequências de excitação (adaptado de [37]).....	32
Figura 3.2: Peça de união da coluna ao tripé de suporte vista de duas perspectivas.	33
Figura 3.3: Modelo dos diferentes tipos de faces da coluna.....	33
Figura 3.4: a) Modelo estrutural da coluna b) Modelo da coluna com peça de suporte.	34
Figura 3.5: Processo de montagem dos dois hemisférios com anel de encaixe.	35
Figura 3.6: Faces pentagonais da coluna fabricadas em contraplacado marítimo e altifalante MONACOR SP-45/8.	35
Figura 3.7: Coluna omnidirecional dodecaédrica desenvolvida.....	36
Figura 3.8: Vista traseira do amplificador de 2 canais Audiphonics TPA-S25.....	37

Figura 3.9: Diagrama elétrico das ligações internas da coluna, numa configuração que permite obter uma impedância de 5,2 ohms por canal.	37
Figura 3.10: Diagrama da medição experimental realizada na câmara anecoica do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações (DETI) da Universidade de Aveiro. ...	38
Figura 3.11: Padrão de radiação da coluna dodecaédrica para a frequências entre 125 Hz e 4000 Hz, normalizado relativamente ao nível médio de pressão sonora.	40
Figura 3.12: Índice de direcionalidade (DI) para a coluna dodecaédrica em comparação com os limites impostos pela norma ISO 3382 [23].	40
Figura 4.1: Janela inicial da aplicação desenvolvida em MATLAB.	43
Figura 4.2: Resposta Impulsional e Resposta em Frequência da sala.	43
Figura 4.3: Comportamento do filtro implementado, para uma frequência central de banda de oitava de 1 kHz comparado às especificações da norma ANSI S1.1-1986 [40] para um filtro digital de terceira ordem.	45
Figura 4.4: EDC com ruído sobreposta por: a) e b) EDC truncada em diferentes de tempos de truncagem c) curva de Schröder.	46
Figura 4.5: Comparação entre a EDC obtida com (a) e sem (b) o método de compensação de ruído proposto por Chu.	48
Figura 4.6: Representação da obtenção do ponto de cruzamento, correspondente ao tempo de truncagem, através do método de Lundeby.	49
Figura 4.7: Aplicação de uma compensação à energia descartada pela truncagem através de um modelo de decaimento exponencial da RIR após t_t	51
Figura 4.8: Comparação entre as EDC provenientes de a) Integral de Schroeder sem correção de ruído, b) resposta com correção de ruído com os métodos de Lundeby e Chu e c) resposta com correção de ruído com os métodos de Lundeby, Chu e compensação por truncagem.	52
Figura 4.9: Diagrama do processo de medição e processamento de <i>RIR</i> para encontrar a <i>EDC</i> que melhor se ajusta ao cálculo dos parâmetros acústicos.	54
Figura 5.1: a) Placa de som Rubix22 da marca Roland, b) Amplificador TPA-S25 da marca Audiphonics, c) Microfone de medição EMC8000 da marca Behringer, d) Coluna omnidirecional dodecaédrica desenvolvida neste trabalho.	57
Figura 5.2: Padrão de polaridade do microfone EMC8000 (à esquerda) e respetiva resposta em frequência (à direita).	58
Figura 5.3: Auditório José Grácio. (retirado de [51])	59
Figura 5.4: Auditório 23.1.6. (retirado de [52])	59

Figura 5.5: Vista do palco do auditório José Grácio do Departamento de Engenharia Mecânica com posição da fonte.	62
Figura 5.6: Planta simplificada do Auditório José Grácio com a posição da fonte sonora e as várias posições onde foram realizadas as medições.	62
Figura 5.7: Vista do palco do auditório do Complexo Pedagógico com posição da fonte.	63
Figura 5.8: Planta simplificada do Auditório do Complexo Pedagógico com a posição da fonte sonora e as várias posições onde foram realizadas as medições.	64
Figura 5.9: <i>RIR</i> medida na posição 1 no auditório José Grácio.	65
Figura 5.10: Resposta em frequência da posição 1 do auditório José Grácio.	65
Figura 5.11: Resposta impulsional acústica medida no auditório do Complexo Pedagógico.	67
Figura 5.12: Resposta em frequência do auditório do Complexo Pedagógico.	68
Figura 5.13: Tempo de reverberação medido no auditório José Grácio (DEM) e no auditório do Complexo Pedagógico (CP) para cada banda de frequência.	70
Figura 5.14: Comparação dos parâmetros acústicos medidos com kit desenvolvido com as medições efetuadas com o software <i>REW</i> e, quando possível, com as medições efetuadas em [50], para o Auditório José Grácio. Os parâmetros comparados são <i>RT</i> (em cima à esquerda), <i>EDT</i> (em cima à direita), <i>D</i> (no meio à esquerda), <i>C₅₀</i> (no meio à direita) e <i>C₈₀</i> (em baixo).	72
Figura 5.15: Comparação dos parâmetros acústicos medidos com kit desenvolvido com as medições efetuadas com o software <i>REW</i> e, quando possível, com as medições efetuadas em [50], para o Auditório 23.1.6. Os parâmetros comparados são <i>RT</i> (em cima à esquerda), <i>EDT</i> (em cima à direita), <i>D</i> (no meio à esquerda), <i>C₅₀</i> (no meio à direita) e <i>C₈₀</i> (em baixo).	73

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

1.1 Enquadramento

1.1.1 Acústica Base

A acústica é o campo do conhecimento que estuda o fenómeno físico causado pela vibração de materiais, ou seja, o som. A vibração gerada numa fonte sonora é transmitida à sua vizinhança, através do contacto com as partículas que formam o meio que a rodeia. A propagação desta vibração é um fenómeno ondulatório que se traduz numa sequência de compressão e rarefação das partículas constituintes do meio de propagação.

Após uma partícula ser movimentada da sua posição original, forças de restauro elásticas do meio entram em ação em conjunto com a inércia do sistema, permitindo a transmissão das chamadas ondas sonoras. A energia transportada por estas ondas resulta da energia cinética das partículas do meio em movimento, em conjunto com a energia potencial devida à compressão das partículas. Ou seja, a pressão do meio, ou pressão de equilíbrio, é perturbada com a passagem da onda sonora.

A propagação sonora trata-se, assim, de um fenómeno ondulatório, podendo ser descrita pela equação de onda apresentada na Equação 1.1. [1]

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

Em que p corresponde à variação da pressão acústica em torno da pressão de equilíbrio do meio, t corresponde ao instante de tempo e c à velocidade de propagação da onda, neste caso do som, no meio. Para o caso específico do meio de propagação ser o ar, a uma pressão atmosférica de 10^5 Pa e temperatura ambiente de 20°C , então c é igual a 343 m/s.

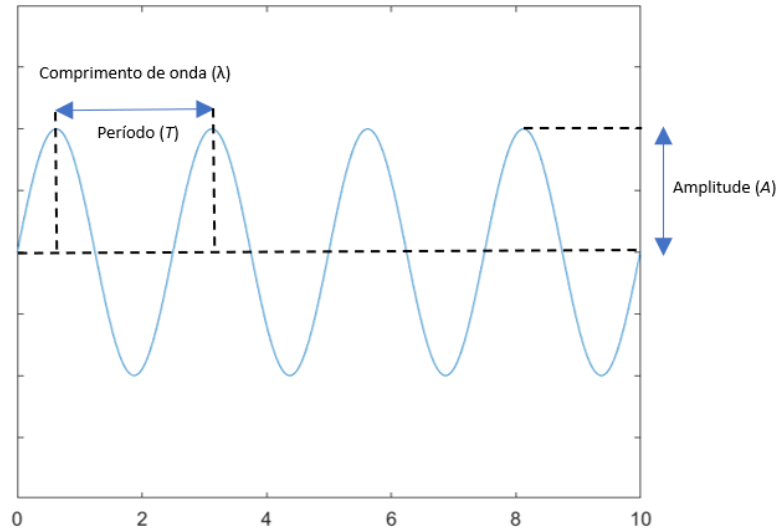


Figura 1.1: Características físicas de uma onda.

À semelhança de outros fenómenos ondulatórios, uma onda sonora pode ser caracterizada quanto à sua amplitude (A), comprimento de onda (λ) e período (T). A amplitude corresponde ao valor de pico da onda, o comprimento de onda e o período correspondem à distância e intervalo de tempo entre picos sucessivos, respetivamente, ilustrado pela Figura 1.1. O número de oscilações periódicas por unidade de tempo é a frequência da onda, dada em s^{-1} , ou seja, Hertz (Hz), correspondendo ao inverso do período. A fase de uma onda refere-se a um ponto de uma onda que é descrito pela sua amplitude local e pela variação local da propriedade periódica. [1] Ou seja, matematicamente, a fase é dada pelo valor da função e da derivada no ponto.

Quando é definido um plano perpendicular à direção de propagação, no qual a fase seja constante, para uma onda sonora considerada plana, a região no espaço definida por este plano é também chamada de frente de onda.

Uma fonte sonora pode ser considerada pontual se a maior dimensão da fonte, L , for menor que a distância, r , à fonte, à qual é avaliada a intensidade sonora, I . A intensidade sonora média no tempo na direção de propagação da onda plana é dada pela Equação 1.2, expressa em W/m^2 . [2]

$$I = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (1.2)$$

No caso de uma fonte sonora pontual que radie a mesma intensidade em todas as direções, ou seja, omnidirecional, posicionada num espaço cuja envolvente não interfira com a propagação, isto é, em campo livre, a região cujos pontos se encontram em fase forma uma frente de onda com superfície esférica, representada pela Figura 1.2. [2]

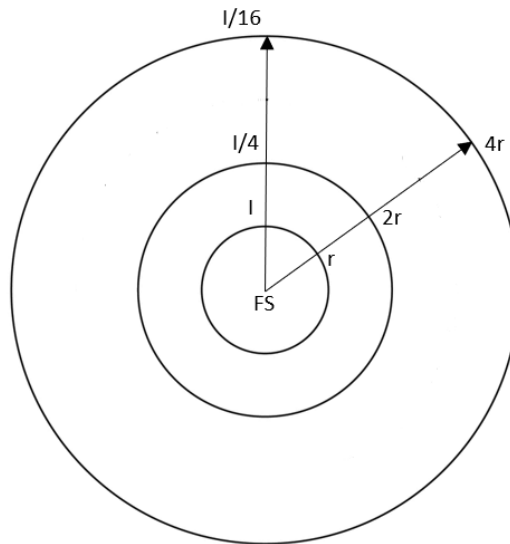


Figura 1.2: Modelo de propagação sonora em campo livre.

Para as situações em que o comprimento de onda do sinal propagado é de uma ordem de grandeza muito menor que o raio da superfície esférica, é possível admitir que cada elemento infinitesimal da frente de onda se comporta como uma onda plana. [2] Nestas circunstâncias, a intensidade sonora num determinado ponto do espaço é dada pela razão entre a potência da fonte, W , e a área da superfície esférica de raio r , como é expresso pela Equação 1.3.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1.3)$$

Esta atenuação de intensidade sonora pode ser melhor compreendida admitindo que a propagação se faz num meio cuja dissipação energética é desprezável, sendo assim a potência transmitida por uma frente de onda constante. Desta forma, com o aumento da distância à fonte, a área da superfície esférica que forma a frente de onda aumenta

mantendo-se constante a potência nela distribuída, traduzindo-se assim numa menor potência sonora por metro quadrado, isto é, uma menor intensidade sonora. Como pode ser também constatado pela análise da Equação 1.3 em conjunto com a Figura 1.2, um aumento da distância à fonte sonora para o dobro causa uma atenuação da intensidade sonora por um fator de 4, também referida como a lei de atenuação quadrática inversa. [3]

Uma vez que em contexto real a quase totalidade das fontes sonoras não se encontram em campo livre, a atenuação não é o único fenómeno que atua sobre a propagação sonora. A interação de fenómenos ondulatórios com o meio, em especial com a presença de superfícies de diferentes materiais, vem acompanhada de fenómenos de reflexão, difração, absorção, refração, interferência, entre outros, comuns à propagação de ondas de diversos tipos.

Assim sendo, o comportamento acústico não depende apenas das características da fonte sonora, mas também das características do espaço envolvente e como este influencia a propagação sonora. A acústica arquitetural assume assim o objetivo de estudar as interações das ondas sonoras com o meio, em particular no interior de espaços fechados. A Figura 1.3 ilustra, de uma forma simplificada, a propagação de ondas sonoras no interior de uma sala, permitindo compreender a distinção entre som direto, aquele que chega desde a fonte sonora até ao recetor sem interação com o meio envolvente, e som refletido, estando representados exemplos de reflexões de primeira e segunda ordem, sendo a ordem destas correspondente ao número de reflexões sofridas pela onda sonora até chegar ao destino.

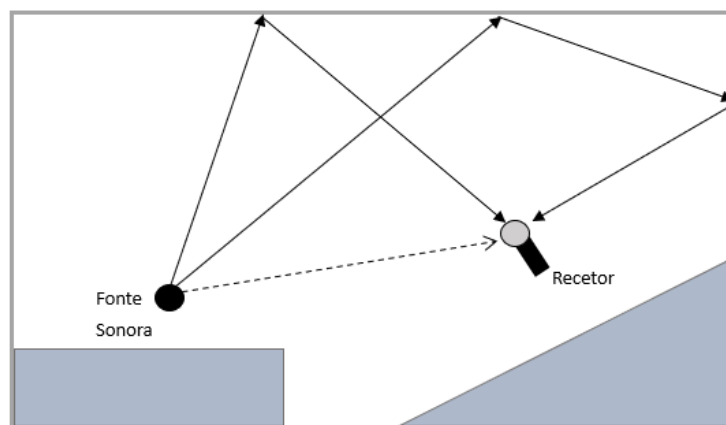


Figura 1.3: Exemplo simplificado de som direto (a tracejado) e sons refletidos.

Do ponto de vista da percepção humana do som, isto é, da psicoacústica, apenas é possível compreender variações na pressão sonora relativas à pressão atmosférica acima dos 20 Hz e abaixo dos 20 kHz. Correspondendo as variações mais lentas de pressão sonora a sons graves e as variações de alta frequência a sons agudos, podendo então ser relacionada a frequência, uma característica objetiva, com a percepção subjetiva de altura.

Outro fenómeno perceptual do ouvido humano está relacionado com a forma como este interpreta o som direto seguido de sons de sucessivas reflexões. Quando o intervalo de tempo entre som direto e a primeira reflexão for inferior a aproximadamente 20 ms, o ouvido humano não tem a capacidade de perceber os dois como sons distintos, mas sim como um único som, sofrendo este, no entanto, uma coloração tonal associada ao reforço ou cancelamento, em determinadas frequências, devidos à interação entre os vários sinais recebidos. Este fenómeno é denominado de reverberação. Caso, por outro lado, o intervalo de tempo entre som direto e som refletido for superior ao valor anterior, existe uma distinção na percepção dos dois sons, estando assim perante a existência de eco.

A reverberação é assim um processo que inicia com o começo da reprodução sonora numa sala, na qual a onda sonora se expande radialmente, afastando-se da fonte até chegar às superfícies da sala onde a sua energia é absorvida e refletida. O ouvinte irá então receber primeiro o som direto, seguido das primeiras reflexões. Após alguns instantes a densidade de reflexões torna-se de tal modo elevada que deixa de ser possível identificar cada reflexão individual criando um efeito denominado de reverberação tardia, ou cauda de reverberação.

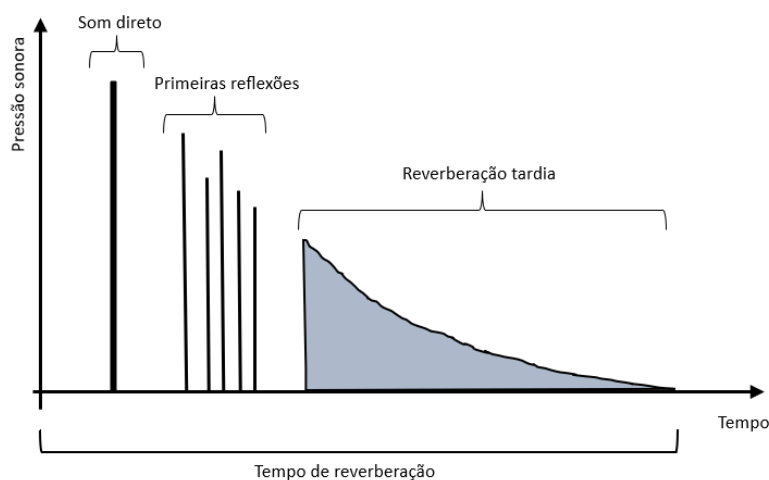


Figura 1.4: Diferentes fases da percepção sonora

O efeito de Haas está relacionado diretamente com os fenômenos acima descritos. Uma vez que a sucessão da chegada do som direto pela chegada de som refletido, quando separada por um instante de tempo suficientemente pequeno, resulta na percepção de apenas um som único, o efeito de Haas, afirma que a localização da direção de origem do som é caracterizada pela direção do som direto, sobrepondo-se este ao efeito dos sucessivos sons refletidos. [4]

No entanto, reflexões laterais, relativas à direção da propagação do som direto, contribuem para a impressão de espacialidade da sala, um fator desejável para a experiência auditiva [5]. A presença destas reflexões influencia a percepção binaural, introduzindo diferenças no som que chega a cada ouvido. [6]

A relação que cada espaço tem com a propagação sonora no seu interior é reconhecida desde muito cedo na história da humanidade. No entanto, mais recentemente, uma relação mais concreta entre as características da sala e a forma como estas determinam o tempo de reverberação foi estabelecida, de forma pioneira, pelo físico Wallace Sabine em 1927. [7]

Esta relação passa por levar em consideração o volume do espaço, a área da superfície das paredes, teto e piso, bem como a absorção sonora dessas superfícies. O tempo de reverberação, RT , é assim obtido pela Equação 1.4.

$$RT = 0.161 \frac{V}{\alpha S} \quad (1.4)$$

Onde RT é o tempo de reverberação, V é o volume do espaço em metros cúbicos, α é o coeficiente de absorção do material e S é a área das superfícies. No Capítulo 2 esta fórmula é analisada de forma mais detalhada, compreendendo assim melhor as suas implicações.

O tempo de reverberação, como visto acima, corresponde ao tempo após a fonte sonora cessar a sua reprodução até que a pressão sonora no ambiente decaia até níveis energéticos reduzidos. A pressão sonora pode obter valores numa ordem de grandeza muito variável, sendo que a sensibilidade humana à mesma abrange também uma gama elevada. Esta tem como limite inferior a sensibilidade a variações de pressão sonora de apenas 10^{-12} W/m^2 , variando para cada caso individual. Quando este valor é

superior a 10^{14} vezes superior ao limite mínimo encontramos no limiar da dor para o ouvido humano.

Desta forma, a escala mais adequada para medir o nível de pressão sonora (SPL – *Sound Pressure Level*) é uma escala logarítmica de base 10. [8] A unidade desta escala é o bel, em homenagem a Alexander Graham Bell, sendo, no entanto, mais comum encontrar o valor de SPL expresso em decibel, *dB*. O valor de 1 *dB* corresponde ao valor de variação mínimo de SPL que o ouvido humano é sensível. [9]

Para o caso do tempo de reverberação, a fórmula proposta por Sabine, na Equação 1.4, corresponde ao intervalo de tempo em que o nível de pressão sonora no ambiente leva a decair em 60 *dB*.

1.1.2 Resposta Impulsional

Os fenómenos acústicos numa sala podem ser observados como um sistema que aplica modificações ao sinal gerado pela fonte sonora, sendo obtido um sinal distinto do original à chegada a um qualquer recetor. O sistema completo pode ser descrito, assim, como a resposta da sala, $h(t)$, excitada por um sinal de entrada, $x(t)$, do qual se obtém um sinal, $y(t)$, captado pelo recetor, tal como representado na Figura 1.5.



Figura 1.5: Acústica de salas representada por um sistema simplificado.

No caso de um sistema verificar as condições de homogeneidade e de aditividade, este pode ser considerado como um sistema linear. Adicionalmente, quando se dá uma translação temporal no sinal de entrada resultando numa igual translação do sinal de saída, diz-se que o sistema é invariante no tempo.

Partindo do princípio de que a fonte e o recetor se mantêm imóveis, o comportamento acústico do espaço em estudo pode ser considerado como um sistema Linear e

Invariante no Tempo, *LTI*, sendo os sistemas deste tipo caracterizados por poderem ser totalmente descritos pela sua resposta impulsional. [10] Esta é nada mais que resposta, neste caso da sala, a um impulso como sinal de excitação. Uma vez que esta descreve totalmente um sistema *LTI*, é possível, através dela, retirar informação que permita caracterizar a sala em estudo, entre outros, o tempo de reverberação é um dos parâmetros que podem ser calculados através da resposta impulsional.

Para qualquer sinal de entrada do sistema, é possível obter o sinal de saída recorrendo a um método denominado por convolução. Sendo este enunciado pelo integral de convolução apresentado na Equação 1.5.

$$h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (1.5)$$

O método da correlação cruzada, que tem como exigência que o sinal de entrada tenha autocorrelação próxima de um impulso de Dirac, ou seja, autocorrelação unitária, permite obter um sinal aproximado à resposta impulsional do sistema ao fazer a correlação entre o sinal de entrada e o sinal de saída. [11]

Desta forma, a medição de resposta impulsional pode ser efetuada através de um método direto que aplica à sala um sinal de excitação impulsional, historicamente feito com recurso a um tiro ou rebentamento de um balão. No entanto, este método direto tem limitações evidentes. Uma delas passa pelo sinal conseguido na realidade não ser um impulso Dirac perfeito, uma vez que está limitado energeticamente. Outra destas desvantagens prende-se com a fraca repetibilidade da utilização deste método, por exemplo, o rebentamento de dois balões não será exatamente igual mesmo que garantindo a mesma pressão no seu interior. A direcionalidade das fontes sonoras utilizadas nestes métodos é também ela não ideal, tema que será mais à frente aprofundado.

Como consequência do fraco desempenho do método direto, surgiram técnicas indiretas de medir a resposta impulsional de salas. Estes métodos indiretos utilizam um sinal de entrada do sistema com características específicas, mais detalhas no Capítulo 2, cuja autocorrelação é igualmente unitária.

A implementação destes métodos indiretos é feita com recurso a uma coluna, capaz de injetar a sala com um sinal de excitação sonoro, caracterizado mais à frente, um amplificador, um microfone, que capta a respetiva excitação da sala, uma placa de som e um dispositivo de processamento, normalmente um computador, como ilustrado na Figura 1.6.

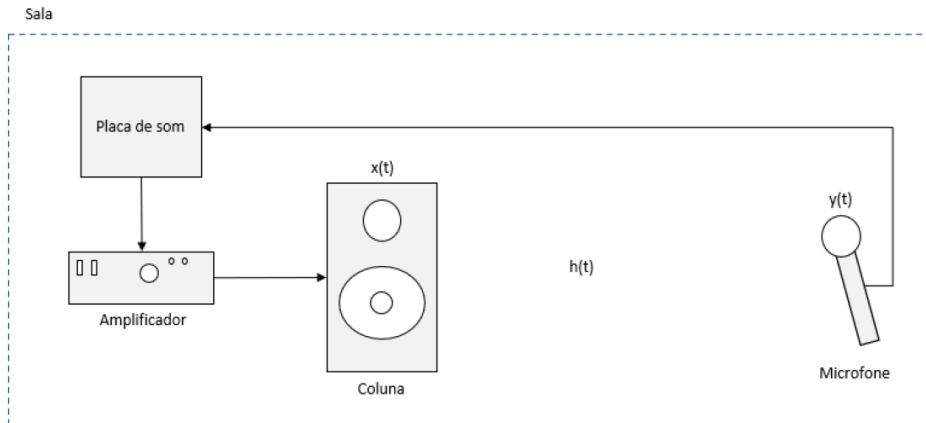


Figura 1.6: Esquema de montagem para medição de repostas impulsionais.

Numa situação ideal a fonte sonora seria pontual, radiando a mesma intensidade sonora em todas as direções, na forma de uma onda esférica. Uma coluna tradicional apresenta um comportamento direcional, podendo ser fonte de imprecisão para as medições. Neste sentido, é recomendável a utilização de colunas omnidirecionais de forma a garantir uma mais correta excitação da sala.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho foi então desenvolver um kit que agregue o equipamento necessário para a realização de medições de repostas impulsionais, incluindo o desenvolvimento de *software* de processamento. Este devia incluir uma fonte sonora omnidirecional, cuja vantagem de utilização já foi abordada, tendo sido também um dos objetivos desde trabalho o seu projeto e construção. O kit devia, igualmente, incluir um microfone de medição, amplificador e placa de som adequados. O *software* desenvolvido não se devia limitar a encontrar a resposta impulsional, como também permitir, a partir dela, extrair informação que permita caracterizar acusticamente as salas medidas.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. Após este capítulo introdutório, no segundo capítulo, são abordados alguns princípios de acústica, e psicoacústica. É feita uma introdução aos principais parâmetros utilizados para descrever a acústica de um espaço. São também abordados vários métodos de medição de respostas impulsivas, as suas vantagens e desvantagens e qual o princípio de escolha.

O terceiro capítulo apresenta as vantagens na utilização de uma fonte omnidirecional, fazendo uma análise das diferentes quanto a tipo e morfologia da fonte. De seguida, é descrito o processo de modelação e construção de uma coluna dodecaédrica, do ponto de vista quer estrutural, quer do seu esquema elétrico. São também apresentados os resultados relativos à medição da direcionalidade da coluna desenvolvida.

No quarto capítulo é descrito o desenvolvimento da aplicação de medição. É detalhada a implementação de algoritmo de processamento da resposta impulsional e cálculo dos parâmetros acústicos.

O capítulo cinco aborda a componente de teste e validação do trabalho. São caracterizados os auditórios alvo de estudo e apresentados resultados das medições. Os parâmetros acústicos, obtidos com o kit desenvolvido, foram comparados com resultados obtidos com o software profissional e com os resultados de um estudo anterior, realizado nos mesmos espaços.

O sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho. São também tecidas algumas considerações quanto para eventual trabalho futuro.

Capítulo 2

Medição de Resposta Impulsional

2 Medição de Resposta Impulsional

2.1 Princípios de acústica

2.1.1 Modos normais de vibração

O fenómeno de propagação sonora é, tal como já foi abordado, um fenómeno ondulatório regido pela equação de onda apresentada na Equação 1.1. Assumindo um modelo de um espaço retangular de dimensões L_x , L_y e L_z , segundo uma abordagem espacial para a análise da propagação da sonora, podemos encontrar a equação de onda para a pressão sonora, para um meio não dissipativo e assumindo soluções harmónicas, como dada pela Equação 2.1.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (2.1)$$

A equação de onda anterior pode ser seccionada em três equações espaciais, para cada uma das coordenadas retangulares. Para a direção segundo o eixo x , obtemos a Equação 2.2, de forma análoga podem ser obtidas as equações para as orientações dos outros dois eixos.

$$\frac{\partial^2 p_x(x)}{\partial x^2} + k_m^2 p_x(x) = 0 \quad (2.2)$$

Em que k_m representa o número de onda para a componente da propagação sonora na direção do eixo x . O número de onda para cada uma das orientações, $k_{m,n,l}$, é dado pela Equação 2.3, cujas frequências características destas ondas estacionárias são definidas por $f_{m,n,l}$, na Equação 2.4.

$$k_{m,n,l} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L_z}\right)^2} \quad (2.3)$$

$$f_{m,n,l} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{l}{L_z}\right)^2} \quad (2.4)$$

Sendo que m , n e l são números inteiros, em que a diferente combinação dos seus valores descreve tipos diferentes de ondas estacionárias. No caso de apenas um destes valores ser diferente de zero, temos ondas orientadas de acordo com um dos eixos.

Quando um dos valores é igual a zero, temos ondas cuja sua frente de onda é tangencial às paredes da divisão. Por fim, quando todos os valores são diferentes de zero, temos ondas oblíquas, não alinhadas com nenhum dos eixos. Para cada um dos valores próprios das variáveis m , n e l , podemos achar então uma função própria, comumente denominada de modo normal. A pressão sonora destes é obtida através da Equação 2.5, em que A é a amplitude de onda, a Figura 2.1 apresenta exemplos de modos normais. [12]

$$p_{m,n,l}(x, y, z) = A \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{L_x} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{L_y} y\right) \cdot \cos\left(\frac{l\pi}{L_z} z\right) \quad (2.5)$$

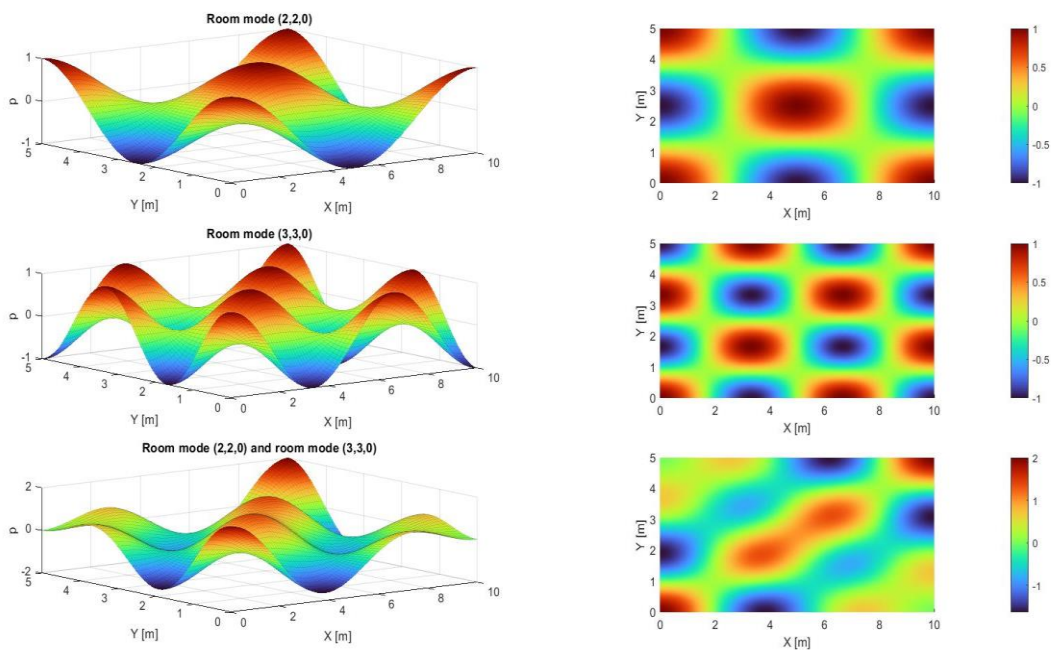


Figura 2.1: Pressão sonora dos modos normais de vibração numa sala de dimensões ($L_x= 10$, $L_y= 5$ e $L_z= 3$) em que a) representa um modo normal com ($m=2$, $n=2$ e $l=0$), b) representa um modo normal com ($m=3$, $n=3$ e $l=0$) e c) representa a coexistência dos dois modos normais.

A densidade modal descreve o número de modos encontrados no intervalo de frequências entre 0 e f , onde V é o volume do espaço, S é a área das superfícies e L o somatório do comprimento das arestas da região, sendo dada pela Equação 2.6

$$N = \frac{4}{3} \frac{\pi V}{c^3} f^3 + \frac{\pi S^2}{4c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f \quad (2.6)$$

Pela análise da Equação 2.6, é possível verificar que com o aumento da frequência, especialmente pela influência do primeiro termo da equação, dá-se um aumento elevado no número de modos normais de vibração presentes do espaço. Para uma densidade modal reduzida é possível distinguir a influência que cada modo individual terá sobre a resposta da sala, ilustrada na Figura 2.2, no entanto, o aumento da frequência torna impossível a separação das várias influências. [13]

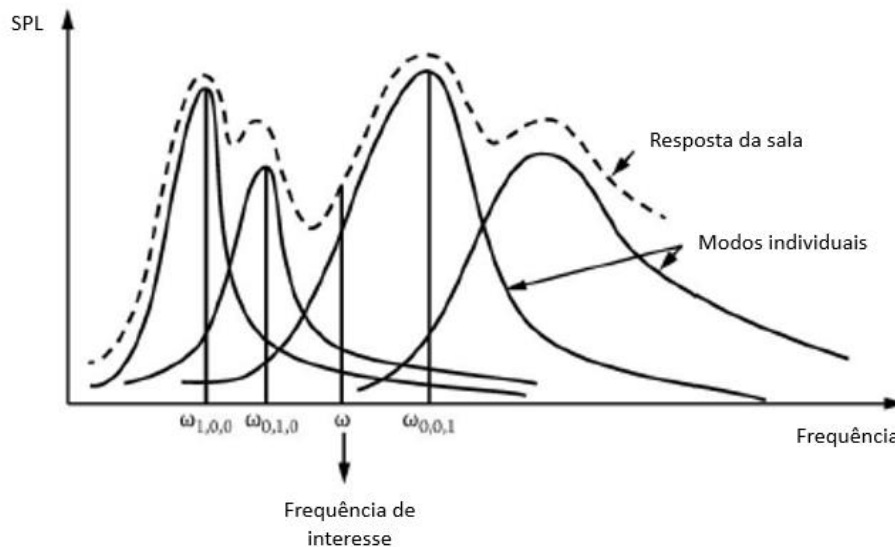


Figura 2.2: Influência de modos individuais na resposta da sala. (adaptado de [14])

2.1.2 Campo sonoro difuso

Em acústica arquitetural, um dos conceitos fundamentais, é o campo sonoro difuso. Enquanto o campo sonoro direto é composto pelas ondas sonoras que se propagam diretamente da fonte sonora para o ponto de recepção, o campo sonoro difuso é formado pelas múltiplas reflexões e dispersões sonoras nas superfícies do ambiente. O acumular de reflexões sucessivas tem como resultando uma distribuição de energia sonora mais uniforme no espaço, assim sendo, a probabilidade da energia sonora recebida ser proveniente de qualquer direção é aproximadamente a mesma, sendo impossível identificar a influência de frentes de onda únicas. Isto acontece quando as dimensões no espaço são grandes o suficiente para a existência de uma elevada densidade modal.

Uma vez que o aumento da densidade modal está relacionado, também, com o aumento da frequência, é proposto por Schröder uma forma de encontrar um patamar de frequência acima do qual a densidade modal será elevada o suficiente para ser gerado um campo sonoro difuso, também chamado de frequência de Schröder (f_s), sendo esta dada pela Equação 2.7, em que V é o volume do espaço e RT é o tempo de reverberação.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.7)$$

2.1.3 Densidade Energética

Para caracterizar a distribuição de energia sonora no campo sonoro difuso, utiliza-se a densidade energética, representando esta a quantidade de energia sonora por unidade de volume num determinado ponto do espaço. A fonte sonora, ao emitir uma potência constante, W , observa, nos instantes iniciais, um crescimento na densidade de energia sonora até um valor máximo, correspondente ao valor do regime estacionário. Neste, o campo sonoro atinge um estado de equilíbrio, em que a distribuição de energia se torna constante ao longo do tempo. Após a fonte cessar de emitir, devido à absorção das superfícies do espaço, dá-se um decaimento de energia exponencial ao longo tempo. O comportamento da evolução temporal da densidade de energia sonora é ilustrado na Figura 2.3.

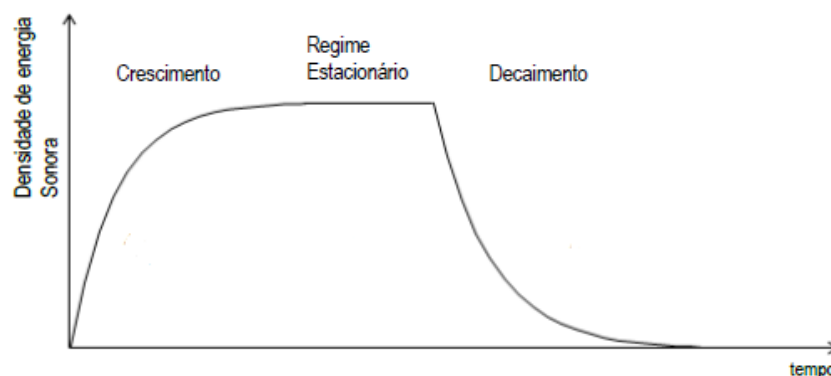


Figura 2.3: Evolução temporal da densidade de energia sonora num campo difuso (adaptado de [15])

O decaimento de energia, pode ser obtido através da taxa de redução da intensidade sonora, em que a densidade de energia após a fonte sonora ser desligada é dada pelo Equação 2.8, em que w_0 é a densidade energética inicial, c é velocidade de propagação do som no meio, α é o coeficiente de absorção do material, S é a área das superfícies e V o volume da sala.

$$w(t) = w_0 e^{-\left(\frac{c\alpha S}{4V}\right)t} \quad (2.8)$$

2.2 Parâmetros acústicos objetivos e subjetivos

A qualidade acústica de uma sala é em grande forma subjetiva, dependendo esta da finalidade da sala, da sua utilização e, acima de tudo, da percepção humana individual do som. [3] Desta forma, ao analisar um espaço quando à sua adequação para a reprodução sonora, é preciso fazer a ponte entre aquilo que são fenómenos físicos mensuráveis, ou seja, parâmetros objetivos, e a percepção psicoacústica, isto é, parâmetros subjetivos.

Os parâmetros subjetivos permitem, assim, reconhecer quais os atributos de uma sala que mais influenciam a experiência do ouvinte. Beranek [16] e, mais tarde, Ando [17] realizaram trabalhos nos quais atribuem pesos quantitativos à relevância de cada parâmetro subjetivo para a sensação acústica global do espaço.

Os parâmetros objetivos permitem quantificar características da acústica da sala, permitindo, assim, estabelecer uma relação entre fenómenos físicos e fenómenos perceptuais do ouvinte. Desde então, estes parâmetros, têm sido alvo de mais estudos sobre a sua adequação para descrever uma sala. [18] [19] Na Tabela 2.1 são apresentados os parâmetros objetivos agrupados relativamente aos parâmetros subjetivos com que se relacionam.

Tabela 2.1: Relação entre parâmetros subjetivos e objetivos

Parâmetros Subjetivos	Parâmetros Objetivos
<i>Loudness</i>	G
Reverberância	RT EDT
Inteligibilidade	D C ₅₀ C ₈₀
Intimidade	EDT RT

2.2.1 Parâmetros Subjetivos

2.2.1.1 Loudness

Em campo livre o único som que chega ao ouvinte é o som direto, no entanto, dentro de uma sala, o som refletido acaba por ter um efeito de reforço na percepção de intensidade sonora. O parâmetro de *loudness* relaciona-se assim com a capacidade de uma sala em amplificar passivamente uma fonte sonora. A absorção das ondas por parte das superfícies influencia largamente este parâmetro. Numa sala vazia de paredes pouco absorvedoras a sensação de *loudness* é muito superior a uma sala ocupada com mobiliário e paredes que aumentem a absorção sonora no seu interior.

2.2.1.2 Reverberância

A reverberância é usada para descrever a percepção de permanência do som na sala após a interrupção da fonte sonora. Uma sala reverberante pode ser chamada de “viva”, enquanto o seu oposto pode ser descrito como uma sala “seca”. Em música, a permanência de um som pode ser de interesse estético, podendo ser, no entanto, desagradável quando em excesso. Em locais como catedrais este efeito também era desejado por conferir uma sensação de grandeza ao discurso.

2.2.1.3 Inteligibilidade

A inteligibilidade é um parâmetro subjetivo complexo, uma vez que, segundo Beranek, [16] pode ser entendido de uma forma horizontal, que se refere à distinção de sons sucessivos, bem como de uma forma vertical, correspondente à capacidade de distinção entre tons sobrepostos.

Relativamente à inteligibilidade entre sons distintos sucessivos, é de elevada importância a relação entre a energia das primeiras reflexões e a energia das reverberações tardias. Se considerarmos o modelo de campo difuso, a evolução temporal da densidade de energia sonora para cada sílaba, no caso da fala, acaba por se sobrepor. Neste caso, uma vez que a potência sonora não é constante entre sílabas é possível gerar-se confusão na distinção de cada sílaba individual. Everest exemplifica este fenómeno com a propagação da palavra “back”, [20] ilustrado na Figura 2.4. As diferenças entre a pronúncia de “ba” e “ck”, tornam esta palavra sensível a ser inteligível quando as características da sala não forem favoráveis.

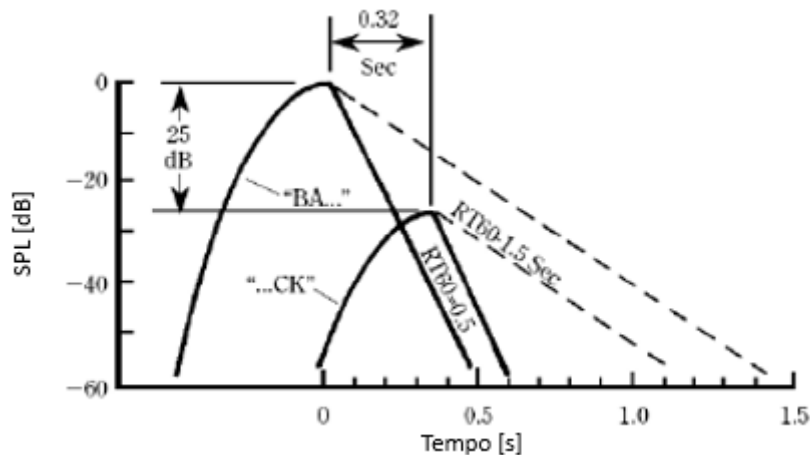


Figura 2.4: Exemplo da evolução energética no discurso. (adaptado de [20])

2.2.1.4 Intimidade

O parâmetro de intimidade relaciona-se com a sensação do ouvinte se encontrar num espaço de pequenas dimensões. Em contexto musical pode descrever o quanto o ouvinte se sente envolvido pela performance musical. O curto intervalo de tempo entre a chegada de som direto e a chegada das primeiras reflexões, bem como a

proximidade na intensidade sonora entre estas ondas contribui para o aumento da sensação de intimidade.

2.2.2 Parâmetros Objetivos

2.2.2.1 Força

A força, G , define-se como a razão entre a energia total recebida num determinado ponto da sala e a energia que seria recebida por um recetor em campo livre, a 10 metros da fonte sonora, dada pela Equação 2.9. Quantificando o aumento da energia total recebida pelo recetor devido às reflexões no interior da sala, que em contexto de campo livre, não chegariam àquele ponto do espaço.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad (2.9)$$

2.2.2.2 Tempo de reverberação

Tal como já foi abordado anteriormente, o tempo de reverberação é definido como o tempo que leva para que a pressão sonora no ambiente decaia em 60 dB após o término da emissão sonora, [21] tendo sido a sua relação com as características do espaço aproximada por Sabine, como visto na Equação 1.4. Ao assumir um modelo de campo difuso e considerando o decaimento de 60 dB, a Equação 2.8 é possível obter a Equação 2.10.

$$\frac{w(T)}{w_0} = e^{-\left(\frac{c\alpha S}{4V}\right)t} = 10^{-6} \quad (2.10)$$

Resolvendo a equação anterior obtemos assim a fórmula de Sabine, como é demonstrado na Equação 2.11.

$$RT = \frac{24}{c \log_{10}(e)} \frac{V}{\alpha S} = 0.161 \frac{V}{\alpha S} \quad (2.11)$$

Tendo em consideração que nem todas as superfícies são feitas do mesmo material, o termo αS é dado pelo somatório do produto entre o coeficiente de absorção de cada material, α_i , e a área da superfície formada por esse material, S_i .

Se o efeito da absorção sonora do ar não for desprezado então um novo termo é acrescentado à fórmula de Sabine. A Equação 2.12, apresenta uma versão mais completa da fórmula de Sabine, em que m representa o coeficiente de absorção sonora no ar.

$$RT = 0.161 \frac{V}{4mV + \sum \alpha_i S_i} \quad (2.12)$$

Apesar da sua ampla utilização, a fórmula de Sabine tem suas limitações, não levando em consideração a dispersão sonora, a presença de obstáculos no espaço, a posição da fonte sonora e dos ouvintes, entre outros fatores. Por isso, pesquisas recentes têm proposto novos modelos para estimar o tempo de reverberação em ambientes mais complexos.

2.2.2.3 Tempo de decaimento inicial

O tempo de decaimento inicial (*EDT*) é um parâmetro acústico que descreve a rapidez com que a pressão sonora diminui logo após a fonte sonora ter sido desligada. Este parâmetro é definido como o tempo necessário para que a pressão sonora caia em 10 *dB* após o término da emissão sonora. Ele é influenciado pelas características do espaço, bem como pelas propriedades da fonte sonora. Ambientes com maior absorção sonora, como salas revestidas com materiais acústicos, tendem a ter tempos de decaimento inicial mais curtos, comparativamente a salas onde o campo sonoro é mais difuso. [3]

2.2.2.4 Definição

A definição (*D*) é um parâmetro utilizado para descrever a separação dos diferentes elementos sonoros, estando relacionada à capacidade de separar e identificar cada instrumento, voz ou efeito sonoro numa mistura complexa de sons. Esta inteligibilidade do som está relacionada com a razão entre a soma da energia das primeiras reflexões e a energia total.

2.2.2.5 Clareza

O parâmetro de Clareza (C_{50} para fala e C_{80} para música) em acústica é uma medida da inteligibilidade da fala num espaço reverberante, definido como a razão entre a energia das primeiras reflexões e a energia da cauda de reverberação.

Um valor alto de C_{80} indica que o ouvinte consegue detetar, de forma mais clara, detalhes da composição musical por detrás do efeito da reverberação da sala. De igual modo, um valor alto de C_{50} indica que o ambiente tem uma boa inteligibilidade da fala, enquanto um valor mais baixo indica que o ambiente pode ser difícil para entender a fala claramente.

2.3 Medição de resposta Impulsional

Tal como já adiantado no Capítulo 1, a análise da sala como um sistema *LTI* permite concluir que a sua resposta a um impulso de *Dirac* contem toda a informação relativa ao seu comportamento acústico. Um impulso deste tipo é caracterizado por ter uma amplitude infinita e excitar uniformemente todas as frequências (espectro plano). Tal não é possível atingir de forma direta.

No passado, alguns dos métodos de excitação da sala recorriam a fontes sonoras que tentavam recriar um impulso ideal, como o rebentamento de balões, tiros de pistola (pólvora seca) ou palmas. No entanto, todas estas técnicas ofereciam problemas de repetibilidade, para além do sinal ser limitado energeticamente e não cobrir a totalidade do espectro de frequências. Outra limitação associada a estes métodos diretos passa pela propagação sonora não se fazer de igual modo em todas as direções.

No caso do uso de balões, a radiação sonora do balão é predominantemente na direção da punção [22]. Para frequências abaixo de 500 Hz, regista-se um desvio da direcionalidade de propagação consideravelmente acima do limite imposto pela norma ISO 3382-1:2009 [23], variando este desvio de acordo com o material do balão, pressão e tipo de gás [24]. Os tiros de pistola, também apresentam um comportamento altamente direcional para baixas frequências, além de o seu espectro de frequências ter um pico entre 1 kHz e 2 kHz, caindo rapidamente abaixo destes valores. [25] No entanto, são ainda referidas como uma opção na norma ISO 354:2003. [26]

As desvantagens destas técnicas levaram à criação de métodos indiretos, como já referido anteriormente, cujo sinal de excitação tenta compensar as limitações energéticas com um aumento do tempo de reprodução. Vários métodos apresentam sinais de excitação com características distintas, cada um com vantagens e desvantagens próprias. Comum é todos eles é a sua autocorrelação unitária, característica fundamental para o cálculo da resposta da sala através do método da correlação cruzada. Em seguida são apresentados os dois principais métodos indiretos de medição de repostas impulsionais.

2.3.1 Método de sequências de comprimento máximo

O método de sequências de comprimento máximo (MLS – *Maximum Length Sequence*) passa pela utilização de uma sequência binária como sinal de excitação do sistema. Os valores binários variam a uma frequência fixa, igual à frequência de amostragem a que é feita a captação da resposta. A variação do valor binário do sinal é feita de forma pseudoaleatória. [27] [28] [29]

O sinal *MLS*, de ordem N , tem uma duração, L , dada pela Equação 2.13. A repetição da sequência é feita de forma periódica a uma frequência de repetição, f_r , dada pela Equação 2.14, em que N é a ordem do sinal *MLS* e f_c é a frequência de variação do valor binário, igual à frequência de amostragem.

$$L = 2^N + 1 \quad (2.13)$$

$$f_r = \frac{f_c}{2^{N+1}} \quad (2.14)$$

A ordem N do sinal *MLS* é calculada utilizando uma estimativa inicial do tempo de reverberação do espaço medido, uma vez que a duração do sinal deve sempre ser superior ao tempo de reverberação. [30] Sendo assim dada pela Equação 2.15, em que T_r é a estimativa do tempo de reverberação. No qual o valor de N é o número inteiro seguinte ao resultado que satisfaça a relação. Desta forma, a correta geração do sinal de excitação é de elevada atenção, caso contrário poderá ser uma fonte preponderante

de erro. [31] Esta definição do sinal faz com que a autocorrelação da sequência, quando esta é repetida periodicamente, se aproxime de um pulso de Dirac.

$$N \geq \frac{\log(T_r f_c + 1)}{\log(2)} \quad (2.15)$$

A resposta impulsional pode ser obtida fazendo a correlação cruzada entre o sinal de excitação e o sinal captado na sala. Para o caso de um sinal *MLS* este processo pode ser feito de forma eficiente recorrendo à transformada de Walsh-Hadamard (*WHT*). [32] O diagrama da Figura 2.8 apresenta o funcionamento do método *MLS*.

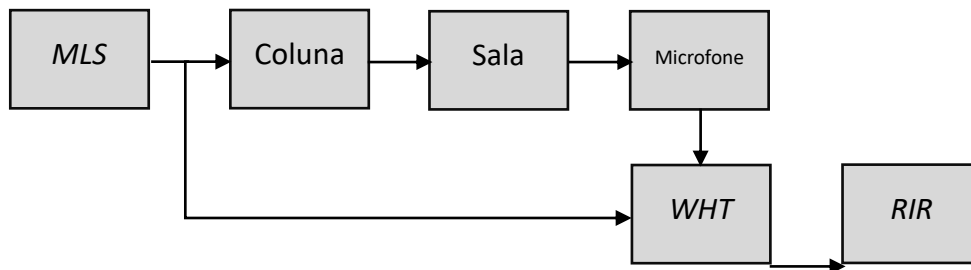


Figura 2.5: Medição de RIR com o método de MLS.

2.3.2 Método de *Sine-Sweep*

Um dos métodos amplamente utilizado é o proposto por Farina [31]. Este método baseia-se na utilização de um sinal de excitação de varrimento exponencial de frequência (*ESS – Exponential Sine-Sweep*), descrito pela Equação 2.16, em que f_0 é a frequência inicial do *chirp*, f_1 a frequência final e T é a duração do sinal, representado na Figura 2.10.

$$x(t) = \sin\left[\frac{2\pi f_0 T}{\ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln\left(\frac{f_1}{f_0}\right)} - 1\right)\right] \quad (2.16)$$

O diagrama que descreve o método de Farina é apresentado então na Figura 2.9.

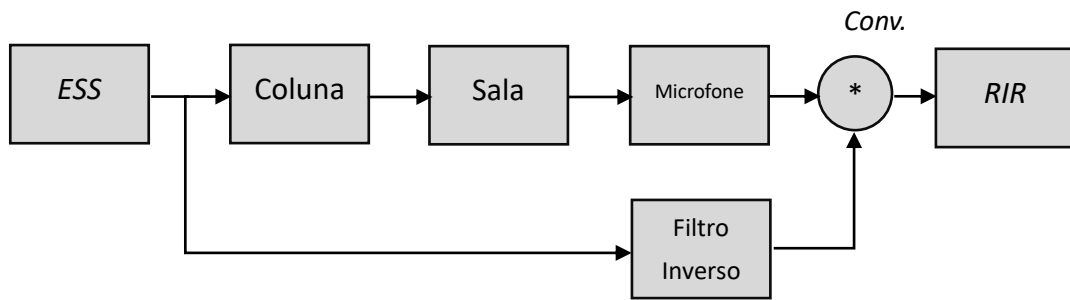


Figura 2.6: Medição de RIR segundo o método de Sine-Sweep.

Este método inclui a utilização de um filtro inverso, que inverte o sinal ao longo do tempo, ajustando a amplitude do mesmo de forma logarítmica, compensando assim a diferença de energia entre as altas e baixas frequências do sinal original. A compensação de amplitude é feita de forma que esta varie entre 0 até um máximo de $-6 \log_2 (f_1/f_0) \text{ dB}$, tal como apresentado na Figura 2.11.

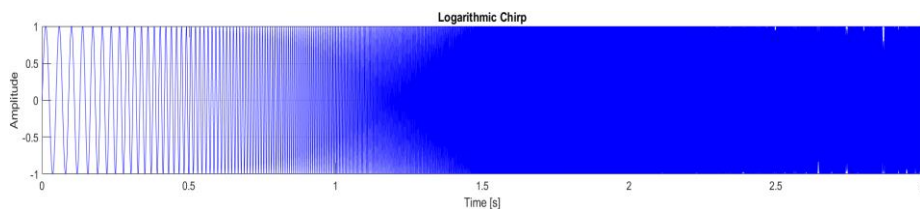


Figura 2.7: Chirp Logarítmico.

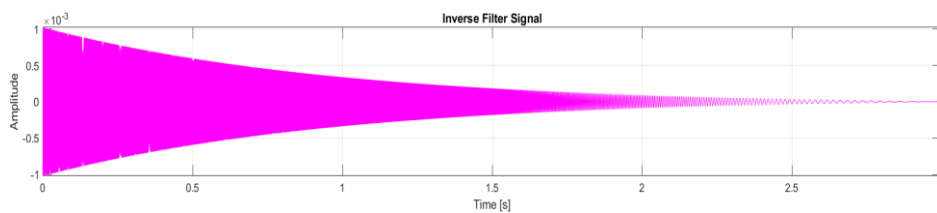


Figura 2.8: Sinal proveniente do filtro inverso.

A configuração deste filtro inverso é tal que, quando realizada a convolução entre o sinal de entrada e o sinal proveniente do filtro, Equação 2.17, é obtido, aproximadamente, um pulso de Dirac, δ , apresentado na Figura 2.12.

$$x(t) * f_{inv}(t) = \delta(t) \quad (2.17)$$

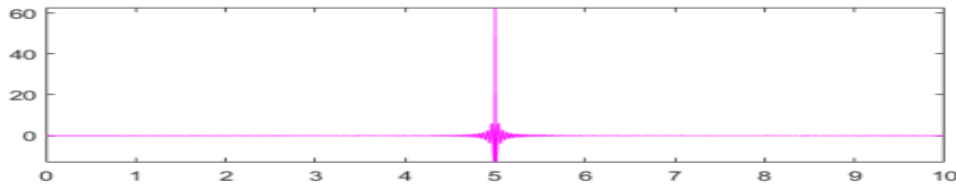


Figura 2.9: Resultado da convolução entre o sinal de entrada e o sinal proveniente do filtro aproxima um Dirac.

A resposta da sala, pode então ser obtida realizando a convolução entre o sinal captado pelo microfone, y , com o sinal proveniente do filtro inverso, f_{inv} , Equação 2.18.

$$IR(t) = y(t) * f_{inv}(t) \quad (2.18)$$

2.3.3 Comparação dos métodos apresentados

A utilização do método de *Sine-Sweep* tem três grandes vantagens. A primeira prende-se pelo facto de o sinal ser mais energético para baixas frequências, em detrimento das altas, aumentando assim a precisão da medição nesta gama, onde também se concentra a energia do ruído.

A segunda vantagem passa por ser possível isolar as componentes não causais da resposta impulsional, introduzidas por não-linearidades. A forma como este método lida com estas não-linearidades com aparente facilidade, deve-se ao facto de que, se o sinal de saída $y(t)$ contiver uma distorção harmónica de ordem n do sinal de excitação, essa frequência só será atingida no sinal de excitação $x(t)$ um instante Δt no futuro. Assim, na resposta impulsional, os efeitos desta distorção harmónica de ordem n , são apresentados em $-\Delta t$, logo, na parte negativa do eixo temporal, destacadas da resposta linear. As componentes não causais podem assim ser descartadas por truncagem da resposta impulsional obtida. [30]

Por fim, a última grande vantagem deste método deve-se à possibilidade em obter a resposta impulsional completa e precisa com apenas uma repetição do sinal de excitação.

Já o método de *MLS* apresenta um bom comportamento na identificação de atrasos temporais, distorção e na identificação de características da resposta impulsional em ambientes reverberantes. [31] [33]

Desta forma, apesar de o método de *MLS* ser uma solução robusta, o método de *Sine-Sweep* apresenta vantagens mais transversais na sua utilização, além de uma maior simplicidade de implementação.

Capítulo 3

Coluna omnidirecional dodecaédrica

3 Coluna omnidirecional dodecaédrica

3.1 Fontes sonoras omnidirecionais

Numa situação ideal, a fonte sonora utilizada para excitar uniformemente uma sala seria uma fonte pontual, radiando intensidade sonora constante em todas as direções, isto é, uma fonte omnidirecional perfeita. [34] Em contexto real, qualquer fonte sonora apresenta um afastamento da omnidirecionalidade, sendo esse efeito agravado com o aumento da frequência a que é excitada.

De forma a avaliar o afastamento da omnidirecionalidade é utilizado o fator de direcionalidade, definido pela razão entre a intensidade máxima, num determinado eixo, a uma distância definida, e a intensidade que seria produzida por uma fonte sonora pontual a uma mesma potência acústica. [5]

As normas internacionais sobre medições de tempo de reverberação [23] [35] definem os requisitos para uma fonte poder ser considerada aproximadamente omnidirecional. A fonte deve ser excitada em bandas de oitava que cubram as frequências desejadas e medido o nível de pressão sonora para as diferentes bandas de frequência. Uma média móvel ao longo de um arco de 30° é aplicada aos valores medidos, sendo estes em seguida relacionados com média energética relativa aos 360°. O desvio entre a média de 0° a 360°, L_{360} , e a média num arco de 30°, $L_{30,i}$, denominada de índice de direcionalidade (DI – *Directivity Index*), é calculado para cada posição das medições realizadas, correspondente ao índice $i = [0,360]$, e dado pela Equação 3.2. O desvio máximo ao valor de referência, dado pelo valor médio para os 360°, está presente na Tabela 3.1 para cada frequência em estudo.

$$DI = L_{360} - L_{30,i} \quad (3.2)$$

Tabela 3.1: Índice de Direcionalidade máximo indicado pela norma ISO 3382-1.

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
DI máximo [dB]	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

A utilização de uma fonte sonora constituída por um só altifalante não é, assim, uma solução conveniente. Colunas com forma de sólidos platónicos com altifalantes montados de forma concêntrica às faces apresentam vantagens na aproximação à radiação sonora de uma fonte pontual. Para baixas frequências as colunas poliédricas regulares apresentam um comportamento aproximadamente omnidirecional. O afastamento deste comportamento é encontrado normalmente acima de uma frequência de 1 kHz. [36] Este valor é variável para colunas baseadas em diferentes poliedros.

Uma abordagem analítica do padrão de radiação de uma coluna é proposta por Williams [12] através da Equação 3.1, assumindo cada altifalante como um êmbolo montado numa superfície esférica. Em que \dot{W} é a velocidade do atuador, ρ_o é a densidade do ar, a é o raio da superfície esférica, r e θ são a distância radial e o ângulo esférico relativos ao ponto de receção externo, α é o ângulo de abertura do êmbolo (relacionado numa coluna poliédrica com a área ocupada pelo altifalante relativamente à área da face da coluna), P_n é a função angular de Legendre, h_n é a função de Hankel de ordem n e k é o número de onda. Aplicando a Equação 3.1 encontra-se um aumento de omnidirecionalidade com o aumento da dimensão dos altifalantes mantendo a dimensão das faces. [37]

$$p(r, \theta) = \frac{i\rho_o\dot{W}}{2} \sum_{n=0}^{\infty} [P_{n-1}(\cos\alpha) - P_{n+1}(\cos\alpha)] \frac{h_n(kr)}{h'_n(ka)} P_n(\cos\theta) \quad (3.1)$$

As colunas dodecaédricas são as mais utilizadas neste tipo de aplicação. A sua escolha passa pela frequência alta a que se afastam da omnidirecionalidade, relativamente às outras configurações, mantendo um afastamento reduzido da omnidirecionalidade acima desta frequência. [38] A Figura 3.1 permite comprovar a vantagem das colunas dodecaédricas face a outros sólidos platónicos.








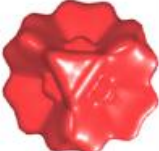


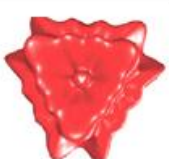









	Tetraedro	Cubo	Octaedro	Dodecaedro	Icosaedro
1013 Hz					
2026 Hz					
2975 Hz					
3988 Hz					

Figura 3.1: Padrão de radiação sonora para diversos sólidos platônicos e frequências de excitação (adaptado de [37]).

3.2 Modelação e construção da coluna

Desta forma, estando identificada a vantagem na utilização de uma coluna dodecaédrica, foi modelada e construída uma coluna dodecaédrica. Para tal, este trabalho contou com a importante colaboração da *Design Factory*, parte integrante do *PCI – Creative Science Park*, com especial intervenção de Alexandre Kumagai e César Rodrigues na identificação das melhores técnicas de construção e idealização estrutural da coluna.

Em cada uma das faces da coluna são montados de forma regular 12 altifalantes idênticos, para tal, e face à disponibilidade de equipamento, foram utilizados altifalantes de 3 polegadas da marca *MONACOR*, modelo *SP-45/8*, com uma potência de 20W (RMS) e impedância de 8 ohms. [39]

Estando identificados os altifalantes a utilizar, foi necessário modelar, recorrendo ao software de modelação 3D *Solidworks*, os vários componentes da coluna, tendo em conta a necessidade de esta ser robusta, leve, com dimensão suficiente para albergar os 12 altifalantes, maximizando a área ocupada por estes na face sem ocorrer interferência interna, e com uma configuração que permita o acesso fácil ao seu interior de forma a ser possível efetuar as ligações elétricas necessárias.

Uma vez que a coluna necessita de estar montada num tripé foi desenvolvida uma peça de suporte que permite servir de meio de ligação entre os dois, representada na Figura 3.2. Para facilitar a ligação, dois vértices opostos da coluna são truncados, resultando assim em duas faces triangulares, seis pentágonos regulares e seis polígonos irregulares de seis lados, ilustrados na Figura 3.3. Os desenhos técnicos dos vários componentes podem ser encontrados no Anexo 2.

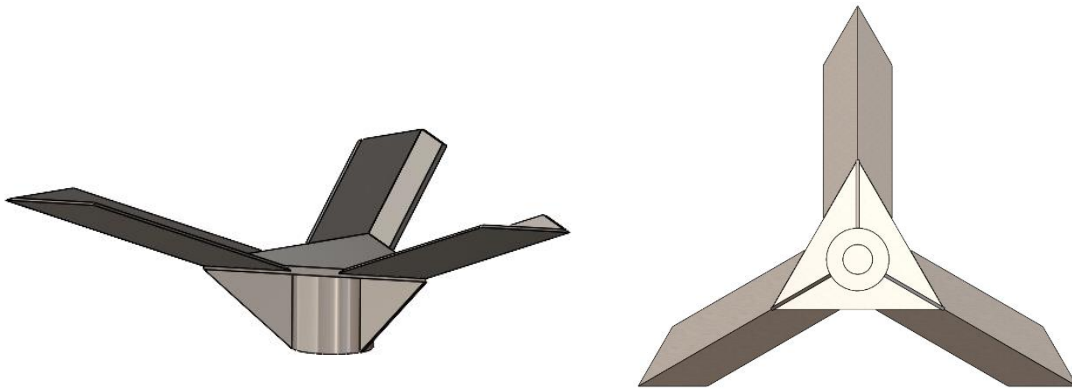


Figura 3.2: Peça de união da coluna ao tripé de suporte vista de duas perspetivas.



Figura 3.3: Modelo dos diferentes tipos de faces da coluna.

Uma destas faces assenta no suporte e o tripé é apertado numa rosca na outra extremidade da peça, dimensionada para o tipo de parafuso encontrado na grande maioria dos tripés utilizados em aplicações de áudio (3/8"-16). Para garantir um encaixe seguro, a peça foi desenhada de forma a reforçar as três arestas adjacentes à face triangular. O peso da coluna ficará, na sua maioria, assente nas faces triangulares, assim, foi necessário idealizar uma haste interna que reforce a integridade estrutural da mesma. O modelo completo da coluna por então ser observado na Figura 3.4.

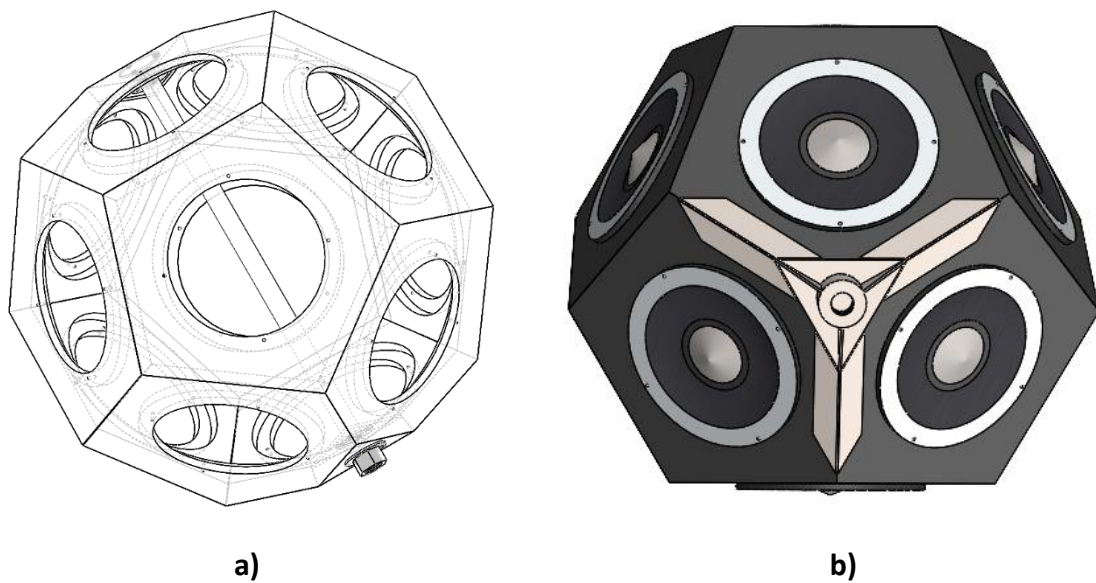


Figura 3.4: a) Modelo estrutural da coluna b) Modelo da coluna com peça de suporte.

A união entre os vários componentes foi feita através de cola de madeira, sendo a montagem dividida em dois hemisférios iguais, contendo 7 faces cada, unidos posteriormente. Para garantir a fixação das faces na posição correta foi criado um anel, em contraplacado, que encaixava externamente em cada hemisfério, como ilustrado na Figura 3.5. O material escolhido para o fabrico das peças foi contraplacado marítimo, pelas suas características de maquinação e reduzido custo e peso.

Após uma primeira maquete que permitiu validar o modelo elaborado, foram maquinadas as faces da coluna a partir de uma placa deste material, com recurso a equipamento *CNC*, que permitiu garantir elevada precisão nos ângulos de corte específicos a cada um dos tipos de face, podendo ser visto o resultado deste processo na Figura 3.6. A Figura 3.7 apresenta a montagem final da coluna, após pintura e envernizamento das faces, com a peça de encaixe em tripé e os altifalantes instalados.

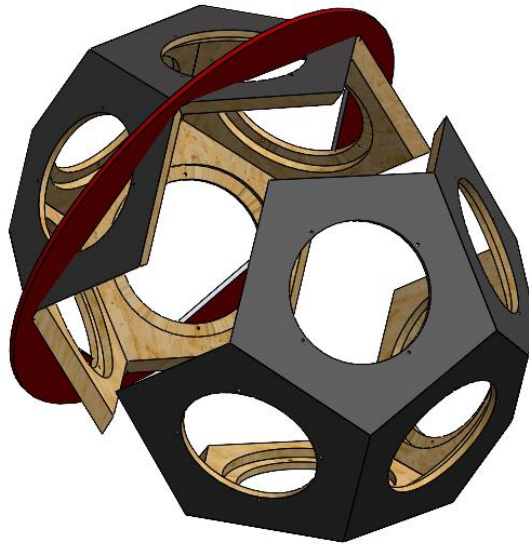


Figura 3.5: Processo de montagem dos dois hemisférios com anel de encaixe.

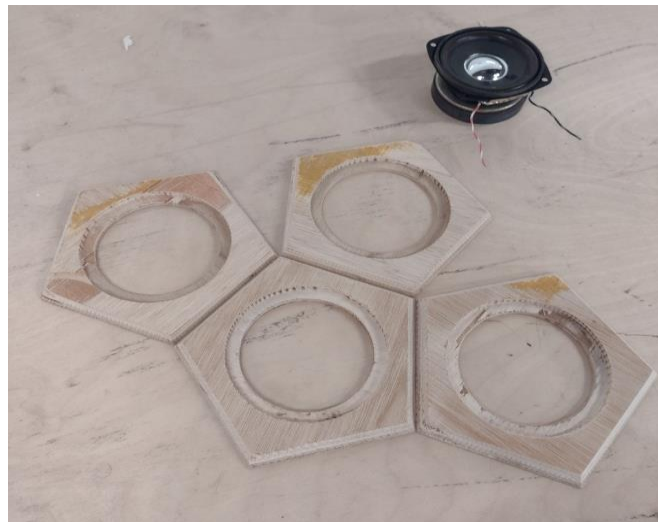


Figura 3.6: Faces pentagonais da coluna fabricadas em contraplacado marítimo e altifalante MONACOR SP-45/8.



Figura 3.7: Coluna omnidirecional dodecaédrica desenvolvida.

3.3 Esquema Elétrico

A ligação dos altifalantes deve ser feita numa configuração que facilite a sua excitação, garantido que é feita em simultâneo por todos, a impedância do conjunto deve ir ao encontro das características do amplificador utilizado e que este tenha a potência necessária para alimentar os 12 altifalantes de forma equilibrada.

Os amplificadores encontrados no mercado são na sua maioria *stereo*, isto é, possuem dois canais de saída sincronizados. Ao aplicar o mesmo sinal de saída em cada um dos canais é possível um melhor aproveitamento da potência fornecida à coluna.

Após uma análise das opções disponíveis no mercado, foi adquirido o amplificador de classe D da marca *Audiphonics*, modelo *TPA-S25* (Figura 3.8), com uma potência de 45 W por canal e 4 ohms de impedância mínima.



Figura 3.8: Vista traseira do amplificador de 2 canais Audiphonics TPA-S25.

As ligações do circuito foram feitas recorrendo a cabos *HI-FI Lexman™* com secção de $1,5 \text{ mm}^2$, para uniões entre cabos, foram utilizados ligadores de aperto mecânico e não uniões por solda, no sentido de facilitar a manutenção. Como os altifalantes selecionados apresentam uma impedância de 8 ohms, apenas três configurações de ligação elétrica permitem uma excitação equilibrada e simultânea dos 12 altifalantes, apresentadas na Figura 3.9, com uma impedância superior à impedância mínima de 4 ohms imposta pelo amplificador.

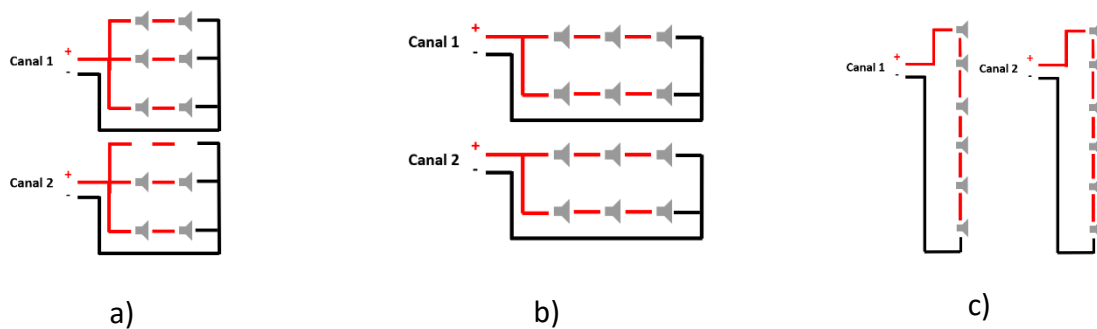


Figura 3.9: Alternativas de esquema elétrico das ligações internas da coluna, numa configuração equilibrada com impedância de a) $5,3 \Omega$ b) 12Ω c) 48Ω .

Quando menor for a impedância do circuito melhor será o aproveitamento da potência do amplificador na energia transmitida à sala. Desta forma a opção a) demonstra ser a mais vantajosa. No entanto, por uma questão de cautela devido à proximidade de impedância que este circuito tem comparativamente ao mínimo suportado pelo amplificador foi utilizada a configuração b) na montagem da coluna. Permitir a possibilidade de utilizar amplificadores de 8 ohms de impedância mínima para alimentar a coluna também pesou na escolha da configuração b). A opção c) não apresenta nenhuma vantagem comparativamente às outras alternativas.

3.4 Validação de omnidirecionalidade

A direcionalidade da coluna dodecaédrica foi medida na câmara anecoica do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações (DETI) da Universidade de Aveiro. A montagem experimental, apresentada na Figura 3.10, consiste na colocação da coluna dodecaédrica numa plataforma giratória com controlo mecânico, e o posicionamento de um microfone de medição omnidirecional, modelo *EMC8000* da marca *Behringer*, a 1,5 metros de distância da coluna.

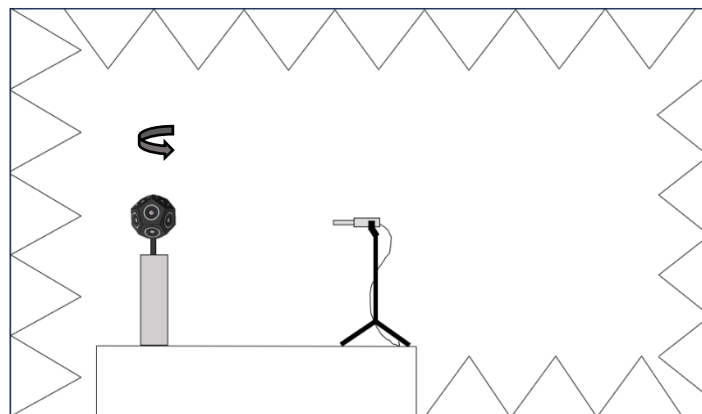


Figura 3.10: Diagrama da medição experimental realizada na câmara anecoica do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações (DETI) da Universidade de Aveiro.

As medições foram realizadas de acordo com a norma ISO 3382-1 [23], fazendo rodar a plataforma giratória e efetuando medições a cada 5° de rotação. Para cada resultado, relativo a cada posição, é então feita a média móvel para um arco de 30°, ou seja, para 6 posições vizinhas.

A Figura 3.11 apresenta o padrão de radiação da coluna para cada banda de frequências em análise, na forma de um gráfico polar normalizado em relação ao nível médio de pressão sonora. Tal como indicado anteriormente a resolução dos dados apresentados é de 5°.

O comportamento da coluna dodecaédrica mantém-se omnidirecional após os 1000 Hz, aparecendo os primeiros sinais de direcionalidade da coluna aos 2000 Hz, revelando-se estes com mais preponderância nos 4000 Hz. O aumento de direcionalidade acompanha o aumento da frequência. Os vales que se encontram no nível de pressão sonora correspondem aos ângulos de sombra gerados pelo afunilamento da direcionalidade de cada altifalante individual, manifestando-se estes nas imediações das arestas da coluna.

Os índices de direcionalidade máximo e mínimo para cada frequência central de banda de oitava são apresentados na Figura 3.12, estando também representados o valor médio do *DI*. A Figura 3.9 mostra como coluna construída apresenta um desempenho amplamente conforme à norma ISO.

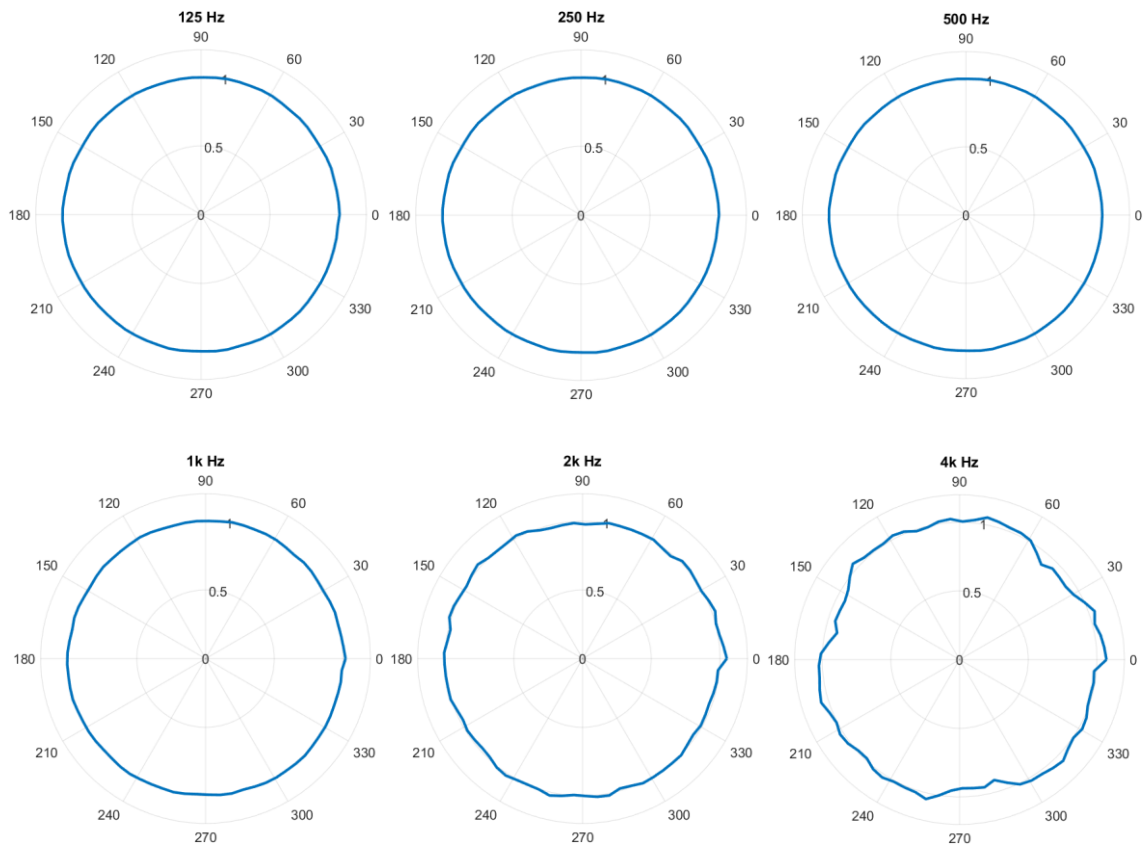


Figura 3.11: Padrão de radiação da coluna dodecaédrica para a frequências entre 125 Hz e 4000 Hz, normalizado relativamente ao nível médio de pressão sonora.

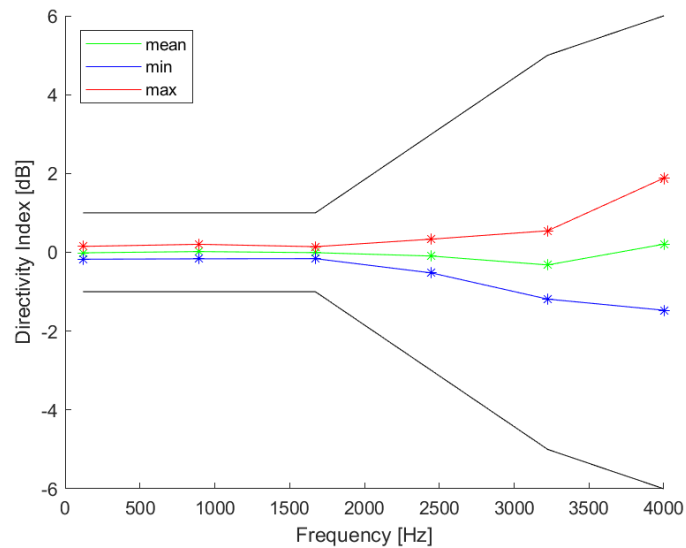


Figura 3.12: Índice de direcionalidade (DI) para a coluna dodecaédrica em comparação com os limites impostos pela norma ISO 3382 [23].

Capítulo 4

Software de medição e processamento

4 *Software* de medição e processamento

4.1 Aplicação *MATLAB*

Após uma revisão de literatura referente quer ao processo de obtenção de *RIR*, quer aos métodos de análise para extração dos parâmetros acústicos, tendo em consideração os mais recentes desenvolvimentos neste domínio, foi desenvolvida uma aplicação em *MATLAB*, contemplando todos os passos deste processo. O manual de utilização da aplicação pode ser encontrado no Anexo 1.

A aplicação permite ao utilizador efetuar a medição de *RIR* numa sala, com possibilidade de usar até quatro canais de entrada em simultâneo, correspondendo a posições diferentes dentro do espaço em estudo. As respostas obtidas podem então ser guardadas em formato *wav*. Assim que uma nova *RIR* é adquirida pela aplicação, é possível calcular os parâmetros objetivos de tempo de reverberação (*RT*), tempo de decaimento inicial (*EDT*), definição (*D*) e clareza (*C₅₀* e *C₈₀*). Caso não seja pretendido fazer uma nova medição de *RIR*, é possível carregar para a aplicação, também em formato *wav*, ficheiros contendo *RIR* previamente obtidas, de forma a serem calculados os parâmetros acima referidos para esta resposta.

Como detalhado no Capítulo 2, a resposta impulsional de uma sala pode ser obtida recorrendo a diferentes métodos. Face às vantagens apresentadas pelo método de *exponential sine sweep*, proposto por Farina [31], foi este o implementado neste trabalho.

Em novas medições, o primeiro passo é a criação do sinal de excitação. A aplicação permite gerar um *chirp* logarítmico com duração, frequência inicial, frequência final e frequência de amostragem definidas pelo utilizador. O local onde estas variáveis são introduzidas na aplicação, pelo utilizador, podem ser observadas na Figura 4.1. Com base neste *chirp* é também obtido o filtro inverso, com recurso ao método de inversão temporal do sinal de excitação e correção de amplitude. O sinal é então injetado na sala através da coluna. A resposta é captada pelos vários canais ativados, sendo registava uma *RIR* para cada. A resposta em frequência pode também ser encontrada, calculando a transformada de Fourier da resposta impulsional. Os registos de resposta impulsional e resposta em frequência são apresentados na aplicação para cada um dos canais como pode ser observado na Figura 4.2.

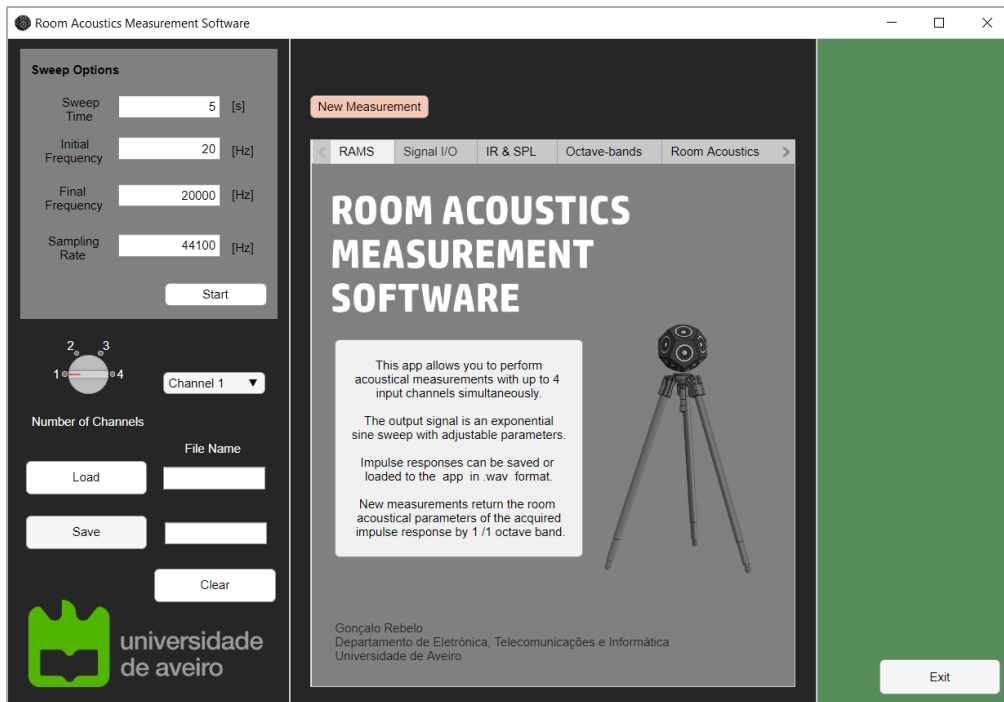


Figura 4.1: Janela inicial da aplicação desenvolvida em MATLAB.



Figura 4.2: Resposta Impulsional e Resposta em Frequência da sala.

4.2 Resposta Impulsional por Bandas de Frequência

Embora a resposta impulsional seja relevante por si só, é normalmente desejada uma análise mais detalhada em frequências mais restritas. Neste sentido é necessário filtrar a *RIR* medida em bandas de frequência.

Segundo a norma ISO 3382-1:2009 [23], a resposta impulsional deve ser filtrada em pelo menos seis bandas de uma oitava, com frequências centrais em 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. Existem também normas internacionais para esta filtragem, nomeadamente ANSI S1.1-1986 [40] e IEC 61260 [41].

O desenho adequado do filtro utilizado tem influência no valor dos parâmetros acústicos extraídos da medição de *RIR*. Venturi em [42] comprara os valores de *EDT*, T_{20} e T_{30} quando utilizados diferentes valores de declive na seletividade do banco de filtros. Tendo concluído que o parâmetro T_{20} é mais sensível à seletividade do filtro, em comparação com *EDT* e T_{30} . Sendo boa prática a utilização de filtros com menor declive para a extração de parâmetros como *EDT*, que avaliam intervalos mais curtos de tempo, e filtros com declive mais ingreme no cálculo de parâmetros que se foquem em intervalos mais longos de tempo, como T_{20} e T_{30} , de forma a rejeitar a energia da banda adjacente do final da *RIR*. [42].

Desta forma o filtro desenhado é um filtro Butterworth de ordem 3, com frequências de fronteira da banda de aplicação do filtro, no caso de este ser de uma oitava, dadas pela Equação 4.1, para o limite inferior e pela Equação 4.2 para o limite inferior.

$$W_1 = \frac{F_c}{F_s/2} \frac{\sqrt{1/2}}{\frac{(1+\sqrt{1+8\beta^2})}{4/\beta}} \quad (4.1)$$

$$W_2 = \frac{F_c}{F_s/2} \frac{(1+\sqrt{1+8\beta^2})}{4/\beta} \sqrt{2} \quad (4.2)$$

Em que F_c é a frequência central da banda de uma oitava, F_s é a frequência de amostragem e β é dado pela Equação 4.3, em que N é a ordem do filtro.

$$\beta = \frac{\frac{\pi/2}{N}}{\sin\left(\frac{\pi/2}{N}\right)} \quad (4.3)$$

Na Figura 4.3 pode ser observada a conformidade do filtro segundo a norma ANSI S1.1-1986 [40], para uma banda de oitava centrada em 1 kHz.

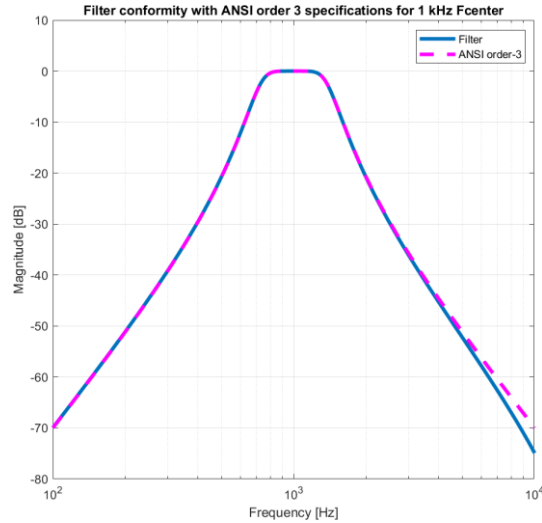


Figura 4.3: Comportamento do filtro implementado, para uma frequência central de banda de oitava de 1 kHz comparado às especificações da norma ANSI S1.1-1986 [40] para um filtro digital de terceira ordem.

4.3 Integração de Schröder

A técnica proposta por Schröder [43], é uma técnica comum e amplamente aceita para obter a curva de decaimento da energia sonora (EDC – *Energy Decay Curve*). Esta técnica permite encontrar uma curva suavizada a partir da qual é possível extrair e avaliar os parâmetros acústicos.

A curva de Schröder é calculada a partir da integração do quadrado da resposta impulsional em ordem inversa ao tempo, entre o instante t e infinito, ou seja, a integração começa em infinito e prossegue até ao início do quadrado da *RIR*.

$$E(t) = \int_t^\infty h^2(t)dt = \int_0^\infty h^2(t)dt - \int_0^t h^2(t)dt \quad (4.4)$$

Como nenhuma resposta impulsional medida é imune à influência de ruído, mesmo recorrendo a equipamento de elevada precisão, a aplicação do integral definido na Equação 4.4 inclui uma elevada componente devida ao ruído. Esta presença de ruído aumenta sistematicamente o valor da *EDC* provocando modificações na forma da curva obtida e, conseqüentemente, nos parâmetros acústicos a partir dela extraídos. A secção inicial da curva de decaimento é menos afetada pela presença de ruído. A sua influência torna-se progressivamente mais dominante até que forma uma “cauda” na *EDC*, onde se sobrepõe totalmente à energia presente na sala devida à excitação inicial.

A forma de lidar com a presença desta cauda foi alvo de estudo de vários autores [44]. O método mais consensual passa por truncar a curva no instante t_t (tempo de truncagem) em que a *EDC* intersecta o nível de ruído. A consequência desta técnica é reduzir o limite superior de integração tornando-o finito. Esta modificação ao integral de Schröder provoca uma perda de característica na cauda da curva de integração, tendendo esta assim para um valor negativo de infinito em t_t . Se a truncagem for próxima demais do início da *EDC*, a curva obtida é influenciada por esta tendência negativa, decaindo antecipadamente ao seu declive real. A Figura 4.4 apresenta uma *EDC* para a qual foi calculado o integral de Schröder, representado por c). A curva a) representa um truncagem efetuada demasiado cedo comparativamente com uma truncagem efetuada no correto tempo de truncagem, representada pela curva b).

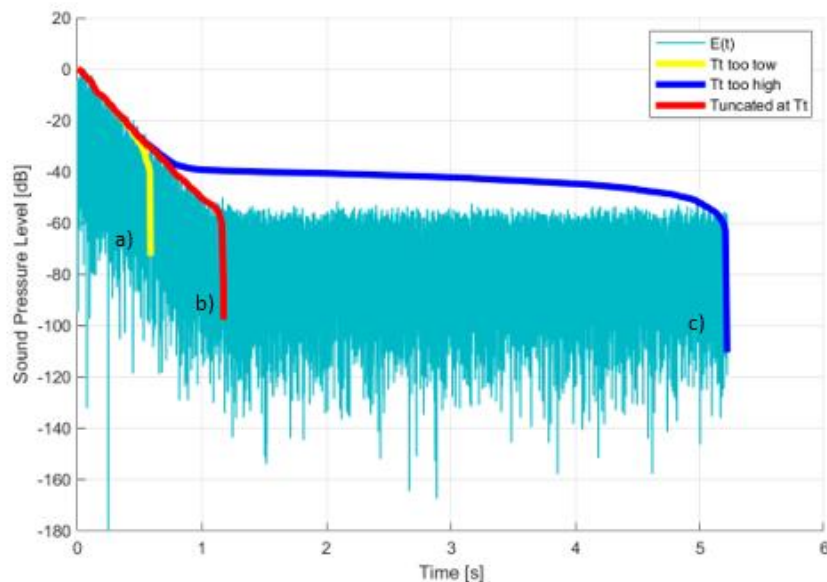


Figura 4.4: EDC com ruído sobreposta por: a) e b) EDC truncada em diferentes de tempos de truncagem c) curva de Schröder.

4.4 Compensação de Ruído

Estando identificadas as limitações da integração de Schroeder devido à presença de ruído, é necessário implementar métodos que permitam reduzir o impacto no erro associado à obtenção do tempo de reverberação e outros parâmetros acústicos.

4.4.1 Método de Chu

Um dos métodos que permite reduzir o efeito do ruído é proposto por Chu [45] e parte do princípio de que o nível de ruído pode ser retirado da *RIR* antes da integração. Ou seja, é feita uma estimativa no nível do ruído (N_{est} - *Noise Estimation*) correspondente ao quadrado do valor de médio dos últimos 10% do sinal, uma vez que esta região contém predominantemente a influência do ruído de fundo, sendo este valor subtraído ao quadrado da *RIR* antes de aplicada a integração inversa. O novo termo introduzido na integral da Equação 4.5 relativamente à apresentada na Equação 4.4 torna o decaimento da *EDC* não monotónico, o que se torna numa das desvantagens introduzidas por este método, no entanto, caso a estimativa do nível de ruído seja adequada, permite gerar uma *EDC* com melhor aproximação à curva ideal (sem presença de ruído).

$$E(t) = \int_t^{\infty} (h^2(t) - N_{est}^2) dt \quad (4.5)$$

Como pode ser observado pela análise da Figura 4.5, a curva b) correspondente à *EDC* sem aplicação de compensação com o método de Chu, apresenta um decaimento inicial com elevada aproximação ao decaimento da curva a) na qual a *EDC* foi compensada através do método de Chu. Chegando a um ponto de inflexão da curva b) dá-se uma separação relativa à curva a), este comportamento deve-se à influência introduzida na *EDC* pelo nível de ruído de fundo.

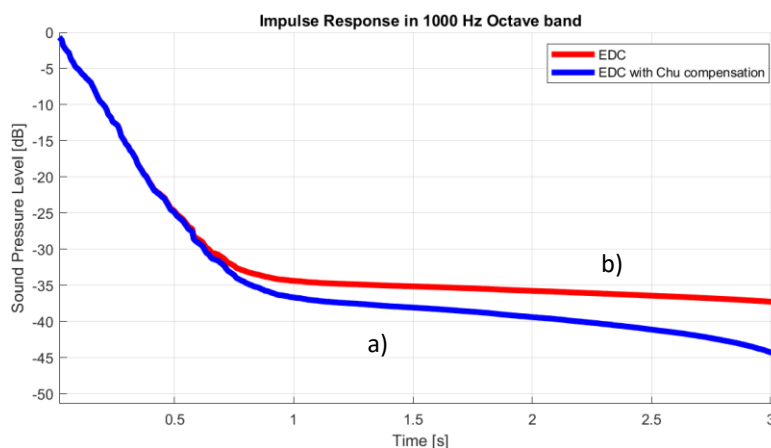


Figura 4.5: Comparação entre a EDC obtida com (a) e sem (b) o método de compensação de ruído proposto por Chu.

Uma vez que os principais parâmetros acústicos extraídos necessitam de um decaimento com uma largura de banda suficientemente larga, como é o caso do T_{30} , verificamos que o método de Chu permite obter uma menor limitação, logo melhor adequação, no cálculo dos parâmetros acústicos através da curva de decaimento. [42]

4.4.2 Método de Lundeby

Tal como abordado na secção 4.1.3, a truncagem adequada da curva de decaimento da resposta impulsional consegue lidar com a separação da componente ruidosa permitindo melhorar os resultados do cálculo dos parâmetros acústicos de espaços.

Neste contexto, o método proposto por Lundeby, apresenta um método iterativo que encontra o melhor intervalo temporal para a aplicação da integração, ou seja, encontra o tempo de truncagem t_t no qual deve ser truncada a EDC ruidosa.

O método de Lundeby encontra-se dividido em dez etapas iterativas apresentadas abaixo [46].

1. Média quadrática da resposta impulsional em intervalos locais de tempo de entre 10 e 50 milissegundos.

2. Estimativa do nível de ruído de fundo calculado nos últimos 10% do sinal, correspondentes à cauda de ruído da *EDC*.
3. Cálculo do declive da linha de decaimento, dada pela regressão linear entre 0 dB e 5 a 10 dB acima do nível de ruído.
4. Encontrar o ponto de cruzamento entre a linha de regressão e o nível de ruído.
5. Encontrar novos intervalos temporais locais, considerando 3 a 10 intervalos por cada 10 dB de decaimento da linha de regressão até ao nível de ruído.
6. Calcular a média quadrática da resposta impulsional nos novos intervalos de tempo locais.
7. Estimar novo nível de ruído de fundo, começando no instante de tempo a que a curva de decaimento apresenta uma queda de 5 a 10 dB após o ponto de cruzamento, até ao final do sinal. Sendo que este intervalo de tempo tem de ser sempre superior a 10% do sinal.
8. Estimar o declive da linha de regressão, numa gama de 10 a 20 dB, da curva de decaimento acima do nível de ruído, com uma margem de 5 a 10 dB acima deste valor.
9. Encontrar o novo ponto de cruzamento.
10. Repetir os pontos 7, 8 e 9 até existir uma convergência no valor temporal do ponto de cruzamento.

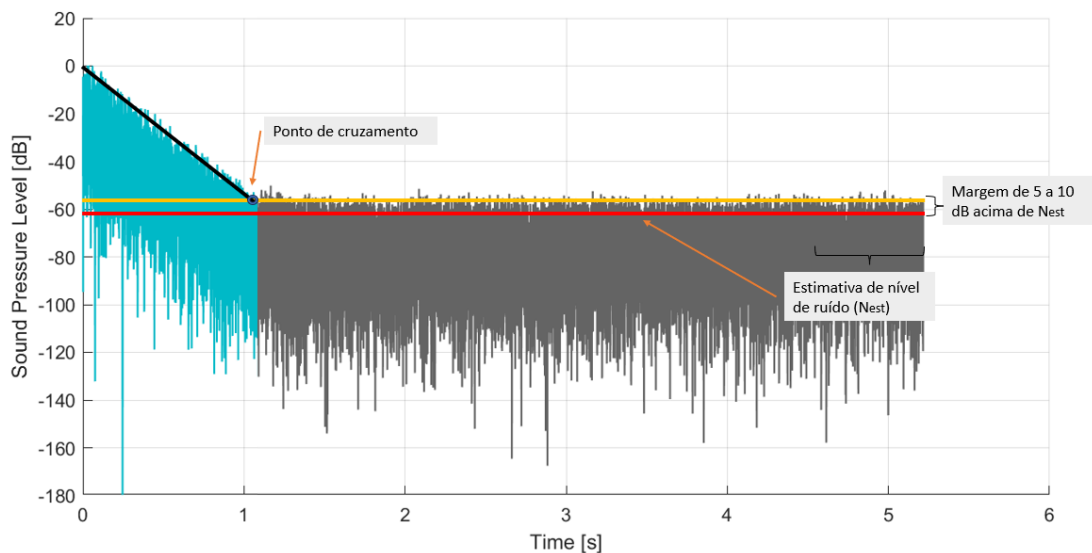


Figura 4.6: Representação da obtenção do ponto de cruzamento, correspondente ao tempo de truncagem, através do método de Lundeby.

O processo termina quando encontrada a convergência do ponto de cruzamento, sendo este valor o tempo de truncagem que será dado como limite máximo de integração da Equação 4.6, partindo esta da expressão da integração de Schroeder dada na Equação 4.4.

$$E(t) = \int_t^{t_t} h^2(t) dt \quad (4.6)$$

A alteração do limite de máximo de integração pode, igualmente, ser aplicada na Equação 3, combinando o método de Chu com o método de Lundebj. Obtendo assim uma nova expressão, dada na Equação 4.7, que lida com os dois problemas identificados na secção 4.1.3 como principais formas de reduzir a componente ruidosa da resposta impulsional obtida.

$$E(t) = \int_t^{t_t} (h^2(t) - N_{est}^2) dt \quad (4.7)$$

4.4.3 Compensação à truncagem

Um dos problemas que surgem quando a *EDC* é truncada, é a possibilidade da curva obtida apresentar um decaimento, acima do nível de ruído, demasiado curto para a extração dos parâmetros acústicos desejados, uma vez que o processo de truncagem descarta grande parte da energia da *EDC*.

A compensação da truncagem foi inicialmente proposta por Xiang [47] e mais tarde sintetizada por Karjalainen et al [48]. O processo de compensação passa por assumir um decaimento exponencial da resposta impulsional após o tempo de truncagem.

Assumindo o modelo de decaimento exponencial entre o tempo de truncagem (t_t) e infinito temos que o termo de compensação é dado pela Equação 4.8.

$$C_{comp} = \int_{t_t}^{\infty} e^{-2\rho t} dt = \frac{1}{2\rho} e^{-2\rho t_t} \quad (4.8)$$

Na Equação 4.8, ρ é um termo que descreve o grau de decaimento e relaciona-se com o tempo de reverberação (RT) através da Equação 4.9.

$$\rho = \frac{3}{RT \cdot \log_{10}(e)} \approx \frac{6,91}{RT} \quad (4.9)$$

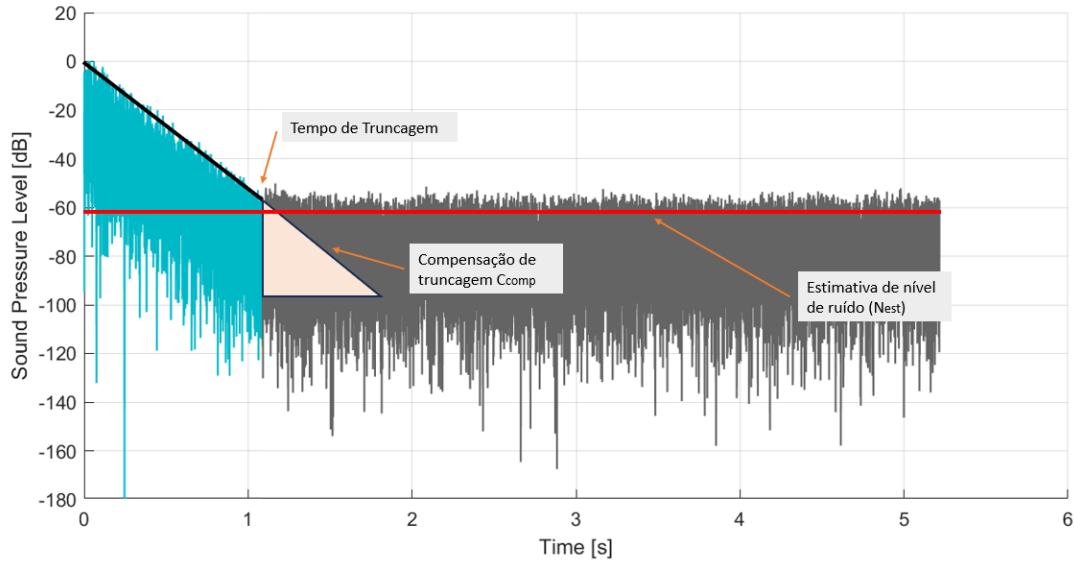


Figura 4.7: Aplicação de uma compensação à energia descartada pela truncagem através de um modelo de decaimento exponencial da RIR após t_t .

O termo de compensação por truncagem é acrescentado à Equação 4.5 dando origem à Equação 4.9. Neste método, ao quadrado da resposta impulsional é subtraído o quadrado da estimativa do nível de ruído (N_{est}), a integração até ao tempo de truncagem (t_t) é então aplicada e o termo de compensação de truncagem é adicionado.

$$E(t) = \int_t^{t_t} (h^2(t) - N_{est}^2) dt + C_{comp} \quad (4.10)$$

A junção destes três métodos apresenta-se como uma solução robusta de remoção da componente introduzida na *EDC* devido ao ruído, tal como já foi provado em trabalhos de outros autores. [42] [49] [44] A aplicação dos diversos métodos e a sua influência na transformação da *EDC* pode ser observada na Figura 4.8.

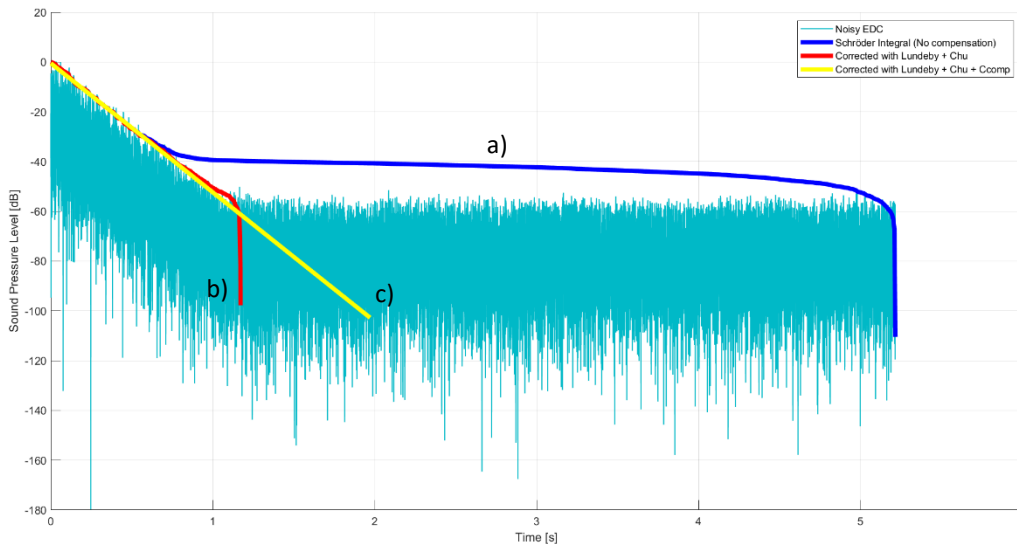


Figura 4.8: Comparação entre as EDC provenientes de a) Integral de Schroeder sem correção de ruído, b) resposta com correção de ruído com os métodos de Lundebay e Chu e c) resposta com correção de ruído com os métodos de Lundebay, Chu e compensação por truncagem.

4.5 Cálculo de parâmetros objetivos

A norma ISO 3382-1:2009 [23] prevê a forma como devem ser calculados os principais parâmetros acústicos objetivos. O tempo de reverberação (*RT*), calculado pelo dobro de T_{30} , o tempo de decaimento inicial (*EDT*), definição (*D*) e clareza (C_{50} e C_{80}) são calculados a partir da *EDC*, com devida compensação de ruído.

O tempo de reverberação corresponde a um decaimento de 60 *dB*. A dificuldade em obter uma *EDC* com essa magnitude de decaimento levou ao cálculo de T_{20} e T_{30} , correspondendo estes ao tempo de decaimento em 20 *dB* e 30 *dB* respetivamente.

O primeiro passo passa por encontrar a regressão linear mais adequada para os valores da *EDC* entre -5 *dB* e -25 *dB* ou -35 *dB* respetivamente. A diferença entre os instantes de tempo em que são atingidos estes níveis de decaimento corresponde aos valores de

T_{20} e T_{30} . O tempo de reverberação é então igual ao triplo de T_{20} ou ao dobro de T_{30} . Neste trabalho o cálculo de RT utiliza o valor de T_{30} .

O cálculo do EDT inicial é feito de forma análoga ao cálculo do RT . A regressão linear que melhor descreve o decaimento entre 0 dB e -10 dB é utilizada para encontrar o intervalo de tempo entre estes dois níveis de decaimento, chamado de T_{10} . O EDT é então seis vezes superior a este valor, correspondendo a um decaimento de 60 dB .

A definição (D) é a razão entre a energia das primeiras reflexões e a energia total da resposta, dada pela Equação 4.11. O valor de 50 ms é indicado pela norma como o instante de tempo até ao qual se considera o efeito das primeiras reflexões para o cálculo de D .

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4.11)$$

Os parâmetros de C_{50} e C_{80} são calculados pela razão, em escala logarítmica, entre a energia das primeiras reflexões e a energia da cauda reverberante. Em C_{50} o limite de tempo para as primeiras reflexões é de 50 ms e em C_{80} é de 80 ms . Correspondendo aos limites de integração observados nas Equações 4.12 e 4.13 respetivamente.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4.12)$$

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4.13)$$

O processo de medição de RIR e análise dos parâmetros acústicos é implementado na totalidade pelo software desenvolvido, ilustrado pelo diagrama da Figura 4.9. Inicia pela síntese do sinal de excitação da sala, seguido da medição da RIR por bandas de frequência. É aplicada a combinação das três técnicas de compensação de ruído, descritas neste capítulo, de forma a reduzir o erro da curva de decaimento energético e assim melhorar o cálculo dos parâmetros desejados.

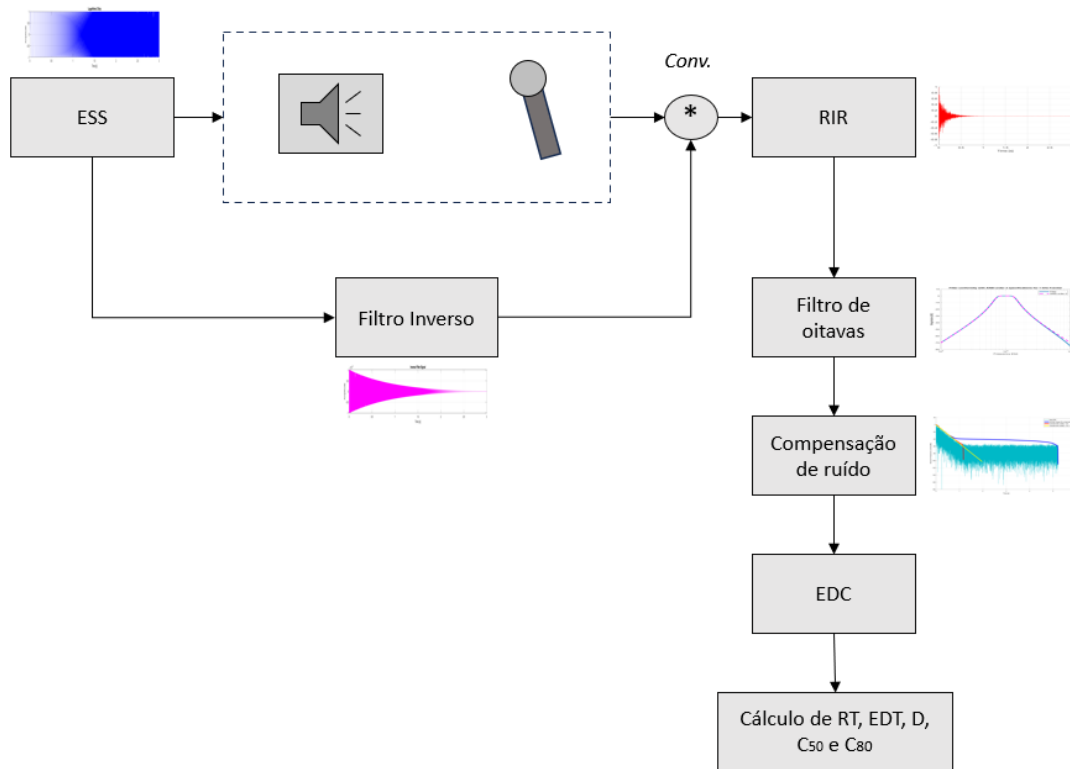


Figura 4.9: Diagrama do processo de medição e processamento de *RIR* para encontrar a *EDC* que melhor se ajusta ao cálculo dos parâmetros acústicos.

Capítulo 5

Validação do *kit* em testes de campo

5 Validação do *kit* em testes de campo

5.1 Descrição do *kit*

O equipamento que constitui o *kit*, apresentado na Figura 5.1, é o seguinte: fonte sonora omnidirecional dodecaédrica desenvolvida neste trabalho, descrita no Capítulo 3; microfone omnidirecional de medição modelo *ECM8000* da marca *Behringer*; placa de som de dois canais modelo *Rubix22* da marca *Roland*; amplificador de dois canais classe D, modelo *TPA-S25*, da marca *Audiphonics*, com uma potência de 45 W por canal.



Figura 5.1: a) Placa de som Rubix22 da marca Roland, b) Amplificador TPA-S25 da marca Audiphonics, c) Microfone de medição EMC8000 da marca Behringer, d) Coluna omnidirecional dodecaédrica desenvolvida neste trabalho.

O microfone escolhido apresenta uma resposta em frequência aproximadamente plana para a gama de frequências audíveis, bem como um padrão polar omnidirecional, como pode ser visto na Figura 5.2. Estas características permitem reduzir a contaminação da medição de resposta impulsional com a resposta introduzida pelo microfone, não sendo, no entanto, a sua influência nula.

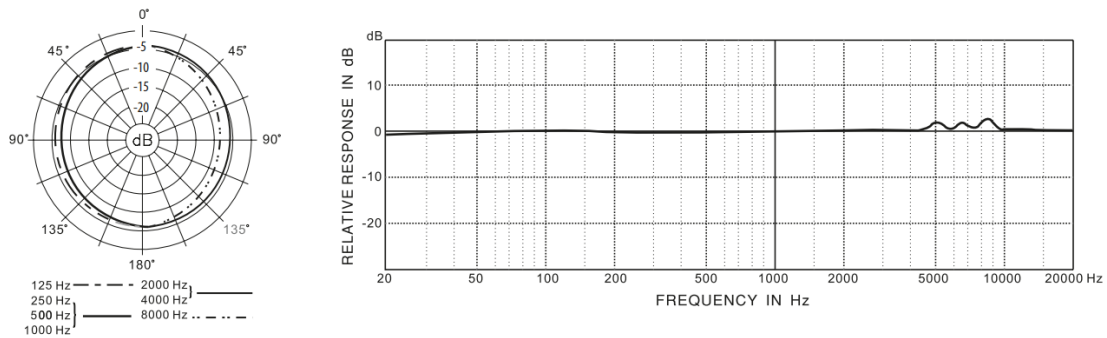


Figura 5.2: Padrão de polaridade do microfone EMC8000 (à esquerda) e respetiva resposta em frequência (à direita). (retirado de [50])

A placa de som utilizada permite frequências de amostragem de 44.1 kHz, 48 kHz, 96 kHz ou 192 kHz com uma resolução de 24 bits. A sua conectividade permite ligar até dois microfones em simultâneo e alimentá-los a 48 V, como saída permite utilizar um par *jack* de 6,35 mm *stereo*. A placa de som comunica por *USB* com o computador. A ligação do microfone *ECM8000* à placa de som é feita com cabo *XLR*. Cada canal de saída da placa de som liga, através de cabos *jack* para *RCA*, ao amplificador.

5.2 Descrição dos testes

A validação experimental do correto funcionamento do kit de medição de resposta impulsional acústica requer a realização de medições, seguindo as indicações fornecidas pela norma ISO 3382:2008 [35]. A validação é feita em duas vertentes. Na primeira é feita a comparação entre medições realizadas com o *software* desenvolvido e com *software* profissional mantendo a componente de *hardware* do *kit*. A segunda vertente passa por comparar medições feitas com o kit completo (*software* e *hardware*) com medições efetuadas num estudo de 2010 por Bastos L. [51] em auditórios da Universidade de Aveiro.

As medições em [51] foram realizadas em três auditórios, mais concretamente no Auditório José Grácio, Auditório Carlos Borrego e Auditório 23.1.6. Uma vez que o Auditório Carlos Borrego sofreu mudanças estruturais e de revestimento profundas, os dados recolhidos nesse espaço não são relevantes como forma de comparação. Já no Auditório José Grácio, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica e no Auditório 23.1.6, localizado no Complexo Pedagógico, que podem ser observados na Figura 5.3 e 5.4 respetivamente, não existiram mudanças até ao momento. Desta forma, estes últimos dois espaços foram escolhidos para realizar os testes de validação do *kit*.



Figura 5.3: Auditório José Grácio. (retirado de [52])

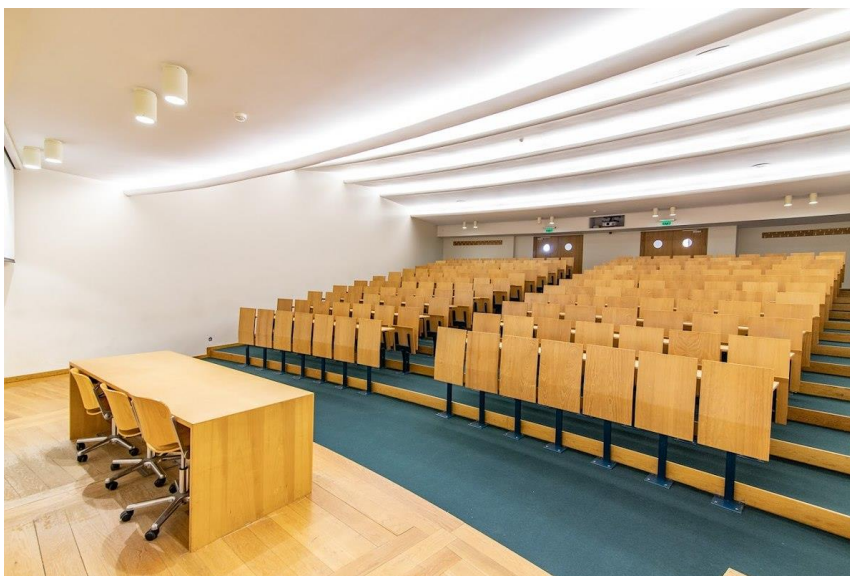


Figura 5.4: Auditório 23.1.6. (retirado de [53])

O equipamento utilizado em [51] foi uma fonte sonora omnidirecional dodecaédrica da marca *01dB*, modelo *DO12*; um analisador portátil da marca *01dB*, modelo *Symphonie*; um amplificador de 600 W de potência do modelo *M700*; microfone do modelo *40AF* com pré-amplificador do modelo *26AK* da marca *GRAS – Sound & Vibration*.

As novas medições foram efetuadas com recurso ao *software* desenvolvido e com o *software* de medição acústica *REW*, permitindo assim uma comparação dos resultados obtidos com *software* profissional. Para cada medição foram posicionados os microfones e coluna do *kit* e corridas as duas aplicações, garantindo assim, dentro dos possíveis, as mesmas condições de medição para os dois métodos.

Todas as medições seguiram as indicações da norma, ou seja, realizadas com os auditórios desocupados, a fonte foi colocada em posição representativa de uma utilização habitual, neste caso no centro do palco, a uma altura do chão de 1,5 metros. As posições dos microfones foram escolhidas em zonas representativa de ouvintes na plateia a uma altura de 1,2 metros do chão. As superfícies refletoras mais próximas da fonte sonora encontravam-se a uma distância desta superior a 1 metro em todas as direções. [35]

A norma recomenda também o número mínimo de posições de medição de acordo com o nível de detalhe pretendido na caracterização acústica do espaço. A Tabela 5.1 apresenta os três níveis consagrados na norma e o número mínimo de *RIR* a medir para cada um.

Tabela 5.1: Número mínimo de posições de medição e número de medições por posição de acordo com a norma ISO 3382:2008 [35]

	Levantamento	Engenharia	Precisão
Combinação de fonte-microfone	2	6	12
Posição da fonte	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posição do microfone	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Nº de medições em cada posição	1	2	3

A análise precisa dos espaços fica fora do espectro deste trabalho. A validação de *software* é enquadrada no nível de levantamento indicado pela norma. Foram então realizadas medições em 3 posições do recetor para uma posição da fonte, efetuando duas medições em cada posição.

As medições efetuadas permitem obter resultados relativos a bandas de oitava com frequências centrais entre 125 Hz a 4000 Hz, descrevendo assim o comportamento dos espaços de acordo com a frequência à qual estes são excitados. O sinal de excitação usado para as medições é um *sweep* logarítmico entre os 20 Hz e os 20000 Hz com a duração de 20 segundos.

5.3 Caracterização dos espaços

5.3.1 Auditório José Grácio (Departamento de Engenharia Mecânica)

O auditório José Grácio, com capacidade para 107 pessoas, é constituído por uma plateia com filas distanciadas em 90 cm entre si, com cadeiras estofadas. As paredes são feitas de betão rebocado, exceto a parede exterior em vidro, com cortinas lisas. O chão é revestido por tacos de madeira. O teto falso é contruído em gesso cartonado com uma caixa de ar de cerca de 20 cm. Na parte superior do auditório existe uma régie, com janela de vidro, para apoio audiovisual. Na Tabela 5.2 são apresentadas as principais dimensões do auditório. A Figura 5.5 mostra a coluna omnidirecional no palco do Auditório José Grácio, na posição em que se realizam as medições. Já a Figura 5.6 representa, de forma esquemática, o posicionamento dos microfones e coluna.

Tabela 5.2: Principais dimensões do auditório José Grácio.

Volume [m ³]	Área [m ²]	Comprimento máximo [m]	Largura máxima [m]	Pé direito médio [m]
570	150	15	9	5,2

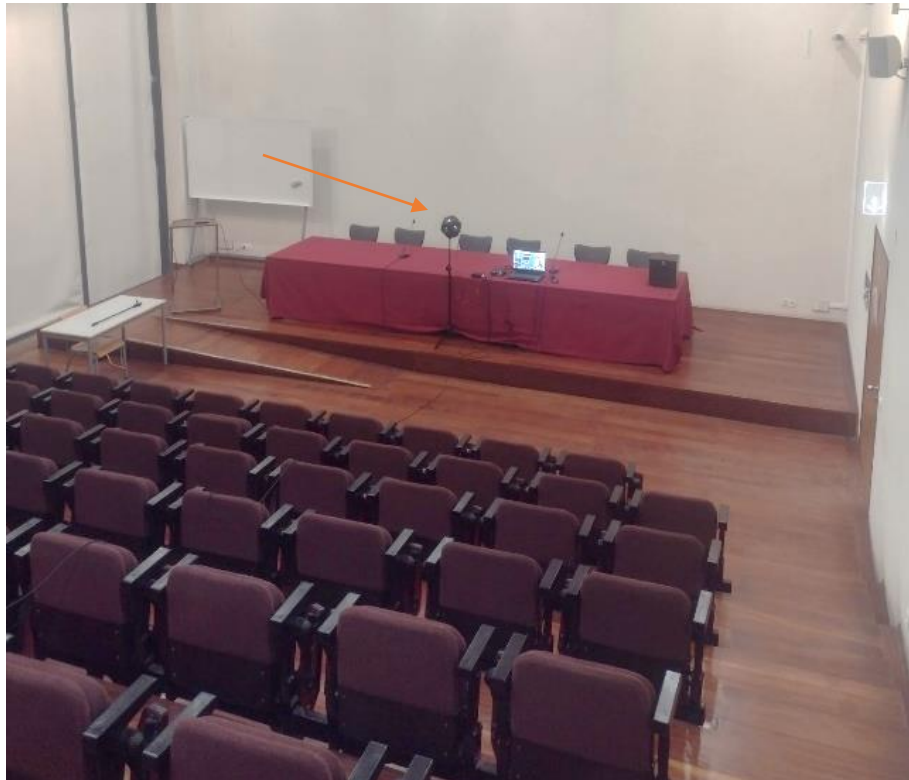


Figura 5.5: Vista do palco do auditório José Grácio do Departamento de Engenharia Mecânica com posição da fonte.

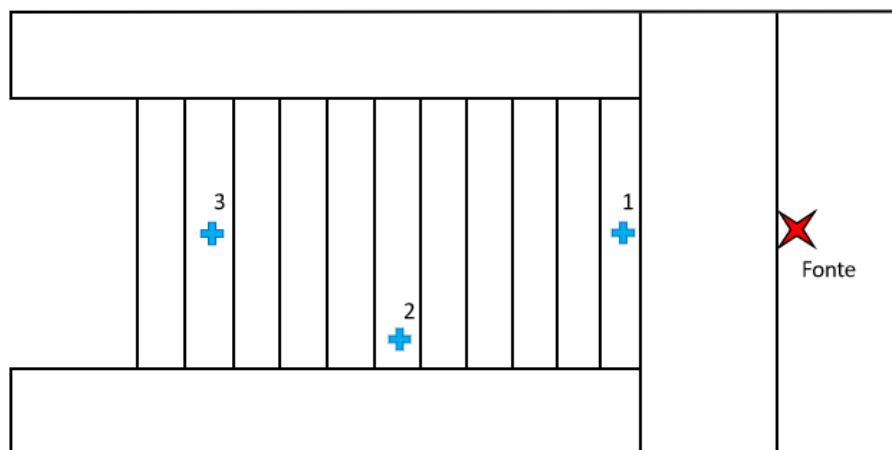


Figura 5.6: Planta simplificada do Auditório José Grácio com a posição da fonte sonora e as várias posições onde foram realizadas as medições.

5.3.2 Auditório 23.1.6 (Complexo Pedagógico)

O auditório 23.1.6 do Complexo Pedagógico, com capacidade para 102 pessoas, é constituído por uma plateia dividida em duas partes por um corredor central, com cadeiras em madeira. As paredes são feitas de betão rebocado, sendo que as paredes laterais não são paralelas. O chão é alcatifado exceto o palco feito em madeira. O teto falso é constituído por várias placas de gesso cartonado, sendo que estas placas possuem diferentes dimensões e inclinação. Na Tabela 5.3 são apresentadas as principais dimensões do auditório. A Figura 5.7 mostra a coluna omnidirecional no palco do Auditório 23.1.6. A Figura 5.8 representa, de forma esquemática, o posicionamento dos microfones e coluna.

Tabela 5.3: Principais dimensões do auditório do Complexo Pedagógico

Volume [m ³]	Área [m ²]	Comprimento máximo [m]	Largura máxima [m]	Pé direito médio [m]
580	156	17,5	15	3,3



Figura 5.7: Vista do palco do auditório do Complexo Pedagógico com posição da fonte.

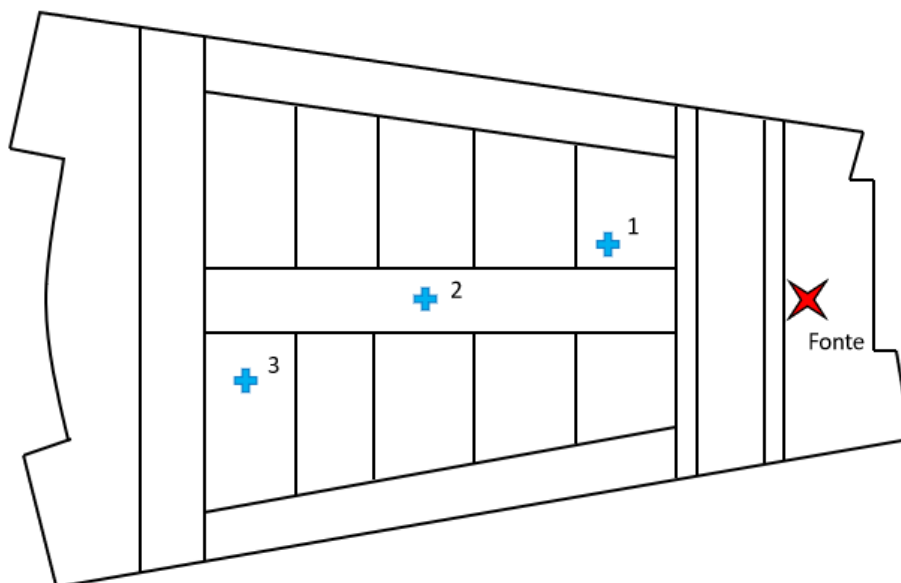


Figura 5.8: Planta simplificada do Auditório do Complexo Pedagógico com a posição da fonte sonora e as várias posições onde foram realizadas as medições.

5.4 Resultados

Para cada posição dos microfones foram registadas duas *RIR*, a partir das quais são calculados os parâmetros acústicos contemplados na aplicação. Os resultados destes parâmetros são apresentados nas Tabelas 5.4 a 5.13 como a média aritmética das duas medições em cada posição.

A *RIR* obtida na primeira medição da posição 1 é ilustrada na Figura 5.9, para o auditório José Grácio, e na Figura 5.11, para o auditório do Complexo Pedagógico. As respostas em frequência, correspondentes às mesmas medições, são apresentadas na Figura 5.10 e Figura 5.12 respetivamente.

5.4.1 Auditório José Grácio

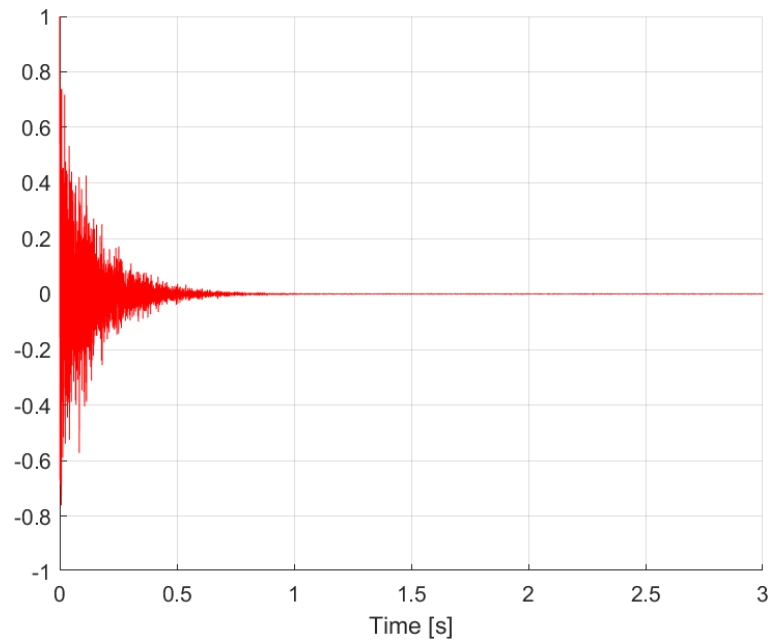


Figura 5.9: RIR medida na posição 1 no auditório José Grácio.

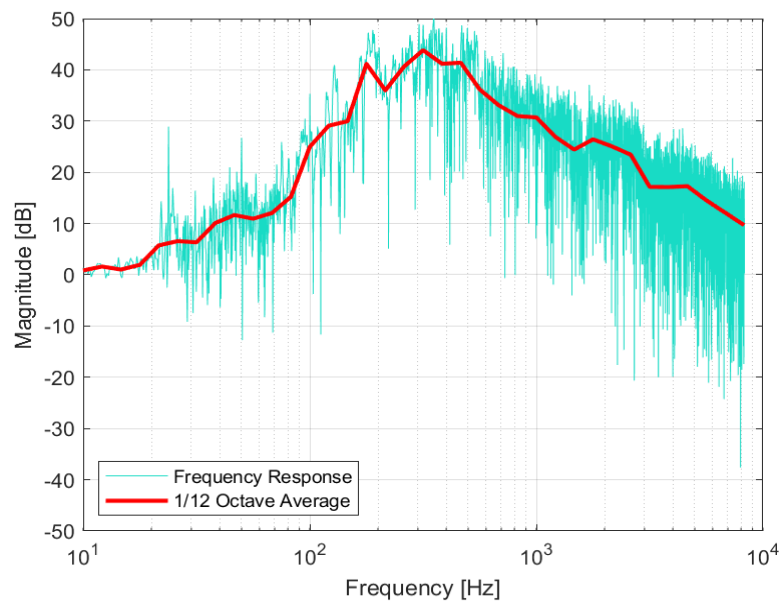


Figura 5.10: Resposta em frequência da posição 1 do auditório José Grácio.

Tabela 5.4: RT medido no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
RT [s]	Posição						
	1	1,56	1,15	1,04	1,17	1,23	1,17
	2	1,63	1,13	1,08	1,20	1,23	1,15
	3	1,48	1,18	1,16	1,24	1,21	1,18

Tabela 5.5: EDT medido no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
EDT [s]	Posição						
	1	1,29	0,99	0,91	1,1	1,16	1,13
	2	1,57	0,96	1,16	1,15	1,08	1,1
	3	1,15	1,05	1,01	1,24	1,03	0,99

Tabela 5.6: D medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
D [%]	Posição						
	1	38,63	47,03	50,5	51,85	45,98	41,77
	2	39,28	30,6	60,54	45,19	45,21	45,3
	3	39,38	51,28	59,91	47,87	50,96	48,36

Tabela 5.7: C_{50} medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
C_{50} [dB]	Posição						
	1	-3,55	-0,52	0,09	0,32	-0,7	-1,44
	2	-1,89	-3,56	-3,57	-1,19	-0,83	-1,17
	3	-3,6	0,22	-1,78	-0,37	0,17	-0,46

Tabela 5.8: C_{80} medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} [dB]	Posição						
	1	0,37	2,71	4,31	2,8	1,92	1,62
	2	0,87	1,57	-0,26	1,46	2,02	1,78
	3	-0,94	2,8	1,29	2,6	2,77	2,76

5.4.2 Auditório do Complexo Pedagógico

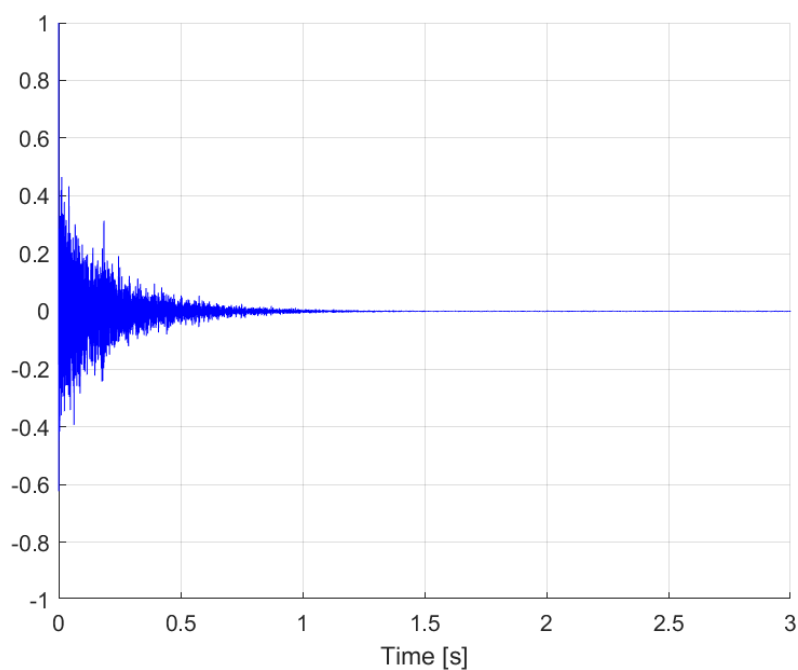


Figura 5.11: Resposta impulsional acústica medida no auditório do Complexo Pedagógico.

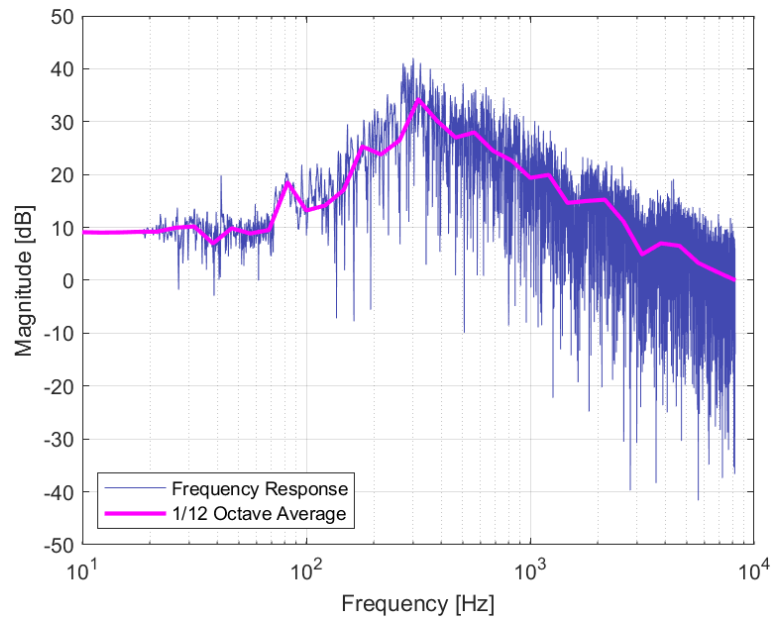


Figura 5.12: Resposta em frequência do auditório do Complexo Pedagógico.

Tabela 5.9: RT medido no Auditório 23.1.6.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
RT [s]	Posição						
	1	2,37	1,82	1,95	1,94	1,54	1,16
	2	2,32	1,79	1,93	1,92	1,57	1,19
	3	2,3	1,91	1,89	1,96	1,57	1,26

Tabela 5.10: EDT medido no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
EDT [s]	Posição						
	1	2,21	1,66	1,72	1,7	1,4	1,22
	2	2,05	1,73	2,05	1,95	1,54	1,28
	3	1,96	1,69	2,27	2,08	1,57	1,21

Tabela 5.11: D medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
D [%]	Posição	125	250	500	1000	2000	4000
	1	47,66	50,98	31,54	34,33	34	46,84
	2	30,28	22,84	21,67	36,65	42,76	46,6
	3	35,2	34,89	19,72	31,46	42,19	43,48

Tabela 5.12: C_{50} medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
C_{50} [dB]	Posição	125	250	500	1000	2000	4000
	1	1,34	0,17	-3,37	-2,82	-2,88	-0,55
	2	-3,62	-5,29	-5,08	-4,4	-3,12	-2,39
	3	-2,65	-2,71	-6,67	-3,38	-3,24	-1,14

Tabela 5.13: C_{80} medida no Auditório José Grácio.

		Frequência [Hz]					
C_{80} [dB]	Posição	125	250	500	1000	2000	4000
	1	2,47	2,17	-0,62	-0,42	0,07	2,08
	2	-1,74	-2,36	-2,98	-1,19	-0,13	1,21
	3	0,02	-0,34	-3,13	-0,7	-0,21	1,81

5.5 Análise dos Resultados

O tempo de reverberação adequado num auditório de um edifício com finalidade de aprendizagem é definido pelo artigo 7º do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios [54]. Este artigo estipula um valor máximo, para a dimensão e tipologia de cada um dos auditórios, da média dos tempos de reverberação, que é confrontado com os valores medidos nos espaços em análise na Tabela 5.14. A Figura 5.13 contempla a totalidade das diferentes bandas em estudo, nos dois auditórios, com o valor médio entre 500 Hz a 2000 Hz representado a tracejado.

Tabela 5.14: Comparação dos *RT* medidos com o limite máximo regulamentar.

Auditório	<i>RT</i> medido (500Hz-2000Hz) [s]	<i>RT</i> artigo 7º [s]
José Grácio	1,17	1,20
Complexo Pedagógico	1,81	1,30

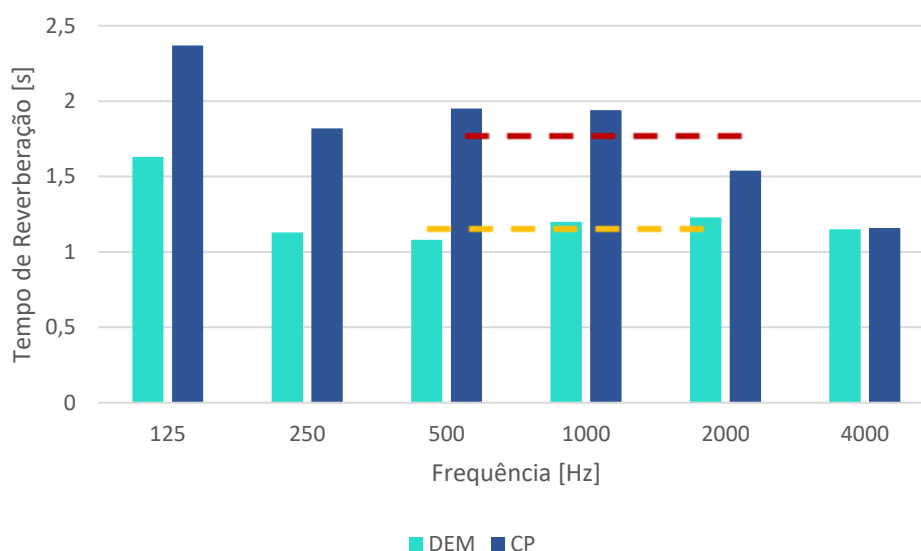


Figura 5.13: Tempo de reverberação medido no auditório José Grácio (DEM) e no auditório do Complexo Pedagógico (CP) para cada banda de frequência.

Como pode ser observado pela análise da Tabela 5.14, o auditório José Grácio encontra-se marginalmente dentro do limite imposto pelo artigo 7º, já o auditório do Complexo Pedagógico encontra-se acima do limite máximo legal.

No que toca à boa inteligibilidade do som dentro de auditórios, é indicado como referência um valor de definição acima de 50% [55] [56]. Este nível só se verifica do auditório José Grácio para algumas frequências, como indica a Tabela 5.6.

Para uma boa inteligibilidade da fala os valores de C_{50} e C_{80} devem encontrar-se no intervalo de -2 dB a 2 dB [55] [56]. É possível verificar nas Tabelas 5.7, 5.8, 5.12 e 5.13 que, em algumas frequências, este intervalo é ultrapassado de forma significativa. A inteligibilidade da palavra é fundamental em contexto de aprendizagem [57]. Desta forma, tendo em consideração a finalidade dos auditórios, nenhum apresenta características ideais para a sua função.

Tal como pode ser observado pela análise das Figuras 5.14 e 5.15, os valores encontrados para os parâmetros acústicos, medidos com equipamento e software profissional, são próximos aos encontrados com a utilização do kit desenvolvido.



Figura 5.14: Comparação dos parâmetros acústicos medidos com kit desenvolvido com as medições efetuadas com o software *REW* e, quando possível, com as medições efetuadas em [50], para o Auditório José Grácio. Os parâmetros comparados são *RT* (em cima à esquerda), *EDT* (em cima à direita), *D* (no meio à esquerda), *C₅₀* (no meio à direita) e *C₈₀* (em baixo).



Figura 5.15: Comparação dos parâmetros acústicos medidos com kit desenvolvido com as medições efetuadas com o software *REW* e, quando possível, com as medições efetuadas em [50], para o Auditório 23.1.6. Os parâmetros comparados são *RT* (em cima à esquerda), *EDT* (em cima à direita), *D* (no meio à esquerda), *C₅₀* (no meio à direita) e *C₈₀* (em baixo).

As Tabelas 5.15 a 5.19 detalham o erro entre as medições efetuadas com o kit em comparação com as outras duas fontes de resultados. O estudo realizado em [51] apenas continha dados relativos ao tempo de reverberação e definição. Nas Tabelas 5.15, 5.16 e 5.17 é apresentado o erro percentual entre medições, já nas Tabelas 5.18 e 5.19 é mais relevante apresentar uma análise do erro absoluto em *dB*.

Tabela 5.15: Erro na medição de *RT*.

		Frequência [Hz]							
Erro [%]	Medição	Auditório	125	250	500	1000	2000	4000	Média
		REW	JG	1,74	2,26	2,38	8,84	7,32	1,13
23.1.6			0,87	13,58	5,72	4,86	3,31	3,74	5,35
Bastos		JG	-8,43	-3,89	-0,61	0,28	1,94	16,67	5,30
		23.1.6	16,50	2,22	1,23	14,12	11,43	20,33	10,97

Tabela 5.16: Erro na medição de *EDT*.

		Frequência [Hz]							
Erro [%]	Medição	Auditório	125	250	500	1000	2000	4000	Média
		REW	JG	4,52	2,04	3,70	4,64	5,22	3,30
23.1.6			1,74	5,18	1,68	4,50	6,62	11,41	5,19

Tabela 5.17: Erro na medição de *D*.

		Frequência [Hz]							
Erro [%]	Medição	Auditório	125	250	500	1000	2000	4000	Média
		REW	JG	0,25	6,10	7,19	7,10	2,10	7,68
23.1.6			11,88	2,65	2,76	6,96	1,67	9,08	5,83
Bastos		JG	2,08	5,97	1,21	6,21	9,75	22,83	8,01
		23.1.6	10,27	8,03	18,97	8,40	10,75	2,69	9,85

Tabela 5.18: Erro na medição de C_{50} .

			Frequência [Hz]							
Erro [dB]	Medição	Auditório	125	250	500	1000	2000	4000	Média	
	REW	JG		0,28	0,39	0,26	0,44	0,18	0,32	0,31
		23.1.6		0,15	0,14	0,26	0,16	0,42	0,34	0,25

Tabela 5.19: Erro na medição de C_{80} .

			Frequência [Hz]							
Erro [dB]	Medição	Auditório	125	250	500	1000	2000	4000	Média	
	REW	JG		0,22	0,09	0,43	0,14	0,32	0,28	0,25
		23.1.6		0,13	0,45	0,43	0,19	0,65	0,93	0,46

O valor mais elevado de erro para as medições realizadas por Bastos [51] pode estar relacionado com mudanças no estado do auditório, tal como posicionamento de mobília ou outras alteração não conhecidas, que podem ter sido efetuadas. Um vez que as medições com o *software REW*™ foram realizadas nas mesmas condições daquelas presentes nas medições com o *kit* desenvolvido temos a garantia que a única variável alterada foi o software utilizado para a aquisição de *RIR* e cálculo dos parâmetros acústicos. No caso das medições realizadas por Bastos em [51] não temos garantia que estas condições sejam as mesmas daquelas encontradas atualmente, apesar de nenhum dos auditórios ter sofrido alterações em termos de arquitetura. A diferença no equipamento utilizado também contribui para a maior discrepância nos resultados.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

6 Conclusões e trabalho futuro

Com este trabalho, foi criado um *kit* de medição de respostas impulsivas capaz de estudar acusticamente, de forma eficaz, qualquer espaço desejado. O processo de desenvolvimento do *kit* envolveu componentes de *hardware* e de *software*. Mais concretamente, foi desenvolvida uma aplicação em *MATLAB* que implementa um método de medição de respostas impulsivas baseado na utilização de um *sweep* logarítmico como sinal de excitação. A resposta obtida é filtrada em bandas de frequência para uma análise mais detalhada. É implementado algoritmo de processamento da resposta impulsional de forma a lidar com a presença de ruído na medição. Por fim são calculados, para cada banda de frequência, os parâmetros acústicos mais pertinentes: tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, definição e clareza.

Na vertente de *hardware* foi projetada e construída uma coluna dodecaédrica. Quando avaliada a omnidirecionalidade da coluna, foram obtidos resultados que vão ao encontro do comportamento esperado de uma coluna desta geometria. A sua característica de omnidirecionalidade é mantida dentro dos limites estabelecidos pela norma ISO 3382 com o aumento da frequência. O equipamento completo do *kit* inclui ainda um amplificador, uma placa de som e um microfone de medição. Este equipamento em junção com o *software* de medição e processamento formam o *kit* de medição de respostas impulsivas, cujo desenvolvimento era o objetivo principal deste trabalho.

Foram realizadas medições em dois auditórios da Universidade de Aveiro, alvos de estudo acústico no passado, [51] permitindo a validação dos resultados obtidos com medições independentes, realizadas com equipamento profissional. Como segunda forma de validação, em simultâneo com as medições realizadas com o *kit*, foi utilizado o software REW para efetuar medições de *RIR*. A componente de *hardware* do *kit* foi utilizada nas medições com *software* profissional. Quando comparados os resultados do *kit* com os resultados obtidos através do *REW* o erro foi reduzido para todos os parâmetros acústicos calculados. Em comparação com os resultados em [51] o erro obtido foi superior, principalmente no Auditório 23.1.6. No entanto, os resultados obtidos pelo *kit* foram bastante satisfatórios.

O trabalho realizado até ao momento abriu caminho a possíveis desenvolvimentos futuros que permitam expandir as capacidades do *kit*. A vertente de *software* pode ser explorada de forma a permitir ao utilizador optar por diferentes métodos de medição de *RIR* (como por exemplo *MLS*) ou na melhoria da interface de utilizador tornando a aplicação mais interativa, por exemplo, ao fornecer ajuda à correta instalação e utilização do equipamento.

Ampliar o número de parâmetros acústicos calculados também seria de interesse. Parâmetros relacionados com o comportamento binaural, como o *IACC*, são de grande relevância para a compreensão da percepção acústica de uma sala. Para tal o *kit* poderia vir a incluir um modelo de cabeça humana com microfones.

Um ponto importante de melhoria seria a compensação da cadeia de medida. A resposta medida não incorpora exclusivamente a resposta da sala, mas também do restante equipamento do *kit* que deixa a sua presença na medição. A identificação da resposta dos equipamentos que formam a cadeia de medida permitiria isolar completamente a resposta da sala.

A utilização de um esquema elétrico com menor impedância, logo melhor aproveitamento da potência do amplificador, poderia ter sido vantajoso por permitir uma excitação mais energética dos espaços e assim ter uma melhor relação entre sinal e ruído. A alteração da ligação elétrica dos altifalantes é simples uma vez que não existe solda entre ligações, facilitando assim este tipo de intervenção. Após efetuada esta alteração, novas medições poderiam ser realizadas nos espaços estudados e comparados os resultados.

Outra vertente do trabalho futuro seria realizar um estudo de mercado em que fosse avaliada a produção industrial, em pequena escala, de colunas omnidirecionais, bem como a comercialização do *kit* completo.

7 Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick e W. Jearl, Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica., LTC, 2009.
- [2] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens e J. Sanders, Fundamental of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [3] D. Howard e J. Angus, Acoustics and Psychoacoustics, Focal Press, 1996.
- [4] H. Haas, "The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 20, 1972.
- [5] L. Beranek, Acoustics, McGraw-Hill, 1954.
- [6] W. Gardner, Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [7] W. Sabine, Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press, 1927.
- [8] S. Bistafa, Acústica Aplicada ao Controlo de Ruído, Edgard Blucher Ltda., 2006.
- [9] Murgel, Fundamentos de Acústica Ambiental, SENAC, 2007.
- [10] J. Cubal, Fortius IV - Posicionamento de Microfones, Universidade de Aveiro, 2010.
- [11] E. Ifeachor e B. Jervis, Digital Signal Processing A Pratical Approach, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [12] E. Williams, Fourier acoustics, Academic Press, 1999.
- [13] M. Crocker, Handbook of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [14] T. Fidecki, Room Acoustics and Sound Reinforcement Systems, Politechnika Warszawska, 2015.
- [15] R. Pereira, Caracterização Acústica de Salas, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [16] L. Beranek, Music, Acoustics and Architecture, John Wiley & Sons, Inc., 1962.
- [17] Y. Ando, Concert Halls Acoustics, Springer, 1985.
- [18] W. Cavanaugh e J. Wilkes, Architectural Acoustics, Principles and Practice, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [19] M. Mehta, J. Johnson e J. Rocafort, Architectural Acoustics, Principles and Design, Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [20] Everest e F. Alton, The master handbook of acoustics, McGraw-Hill, 2001.
- [21] M. Vorländer, "Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality," *J. Acoust. Soc. Am*, 2008.

- [22] D. Cheenne, M. Ardila e C. Lee, "A qualitative and quantitative analysis of impulse responses from balloon bursts," *J. Acoust. Soc. Am*, 2008.
- [23] *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces*, ISO 3382-1, 2009.
- [24] J. Pätynen, B. Katz e Lokki, "T. Investigations on the balloon as an impulse source," *J. Acoust. Soc. Am*, 2011.
- [25] D. Griesinger, "Beyond MLS-Occupied hall measurement with FFT techniques," *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention 101*, 1996.
- [26] *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, ISO 354, 2003.
- [27] M. R. Schröder, "Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1979.
- [28] D. D. Rife e J. Vanderkooy, "Transfer-function measurement with maximum length sequences," *J. Audio Eng. Soc.*, 1989.
- [29] G. Stan, J. J. Embrechts e D. Archambeau, "Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques," *J. Audio Eng. Soc.*, 2002.
- [30] M. Holters, T. Corbach e U. Zölzer, "Impulse Response Measurement Techniques and their Applicability in the Real World," *Proc. of the 12th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-09)*, 2009.
- [31] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept sine technique," *J. AES*, 2000.
- [32] J. Borish e J. B. Angell, "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise," *J. Aud. Eng. Soc.*, 1983.
- [33] J. O. Smith, "Applications of MLS signals," *Tutorial presented at the 122nd AES Convention*, 2007.
- [34] C. Morfey, *Dictionary of Acoustics*. 1st ed, Academic Press, 2000.
- [35] *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*, ISO 3382-2, 2008.
- [36] R. San Martin, M. Arana, J. Machin e A. Arregui, "Impulse source versus dodecahedral loudspeaker for measuring parameters derived from the impulse response in room acoustics," *J. Acoust. Soc. Am*, 2013.
- [37] C. Quested, A. Moorhouse, B. Piper e B. Hu, "An analytical model for a dodecahedron loudspeaker applied to the design of omni-directional loudspeaker arrays," *Applied Acoustics*, 2014.

- [38] T. R. S. Leishman e H. Smith, “An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound,” *J. Acoust. Soc. Am*, 2006.
- [39] MONACOR, *Catálogo do fabricante: SP-45/8*, Product Info, 2019.
- [40] *Acoustical Terminology*, ANSI S1.1, 1986.
- [41] *Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications*, IEC 61260-1, 2014.
- [42] A. Venturi, A. Farina e L. Tronchin, “On the effects of pre-processing of impulse responses in the evaluation of,” *ICA 2013 Montreal, Architectural Acoustics, Session 1aAAa: Advanced Analysis of Room Acoustics: Looking Beyond ISO 3382 I*, 2013.
- [43] M. R. Schröder, “New Method of Measuring Reverberation Time,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, 1965.
- [44] D. Ćirić e M. Janković, “Correction of room impulse response truncation based on a nonlinear decay,” *Applied Acoustics* 132 (2018) 210–222, 2018.
- [45] W. Chu, “Comparison of reverberation measurements using Schroeder’s impulse method and decay-curve averaging method.,” *J Acoust Soc Am*, 1978.
- [46] A. Lundeby, T. Vigran, H. Bietz e M. Vorländer, “Uncertainties of Measurements in Room Acoustics,” *Acustica*, 1995.
- [47] N. Xiang, “Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach,” *J Acoust Soc Am*, 1995.
- [48] M. Karjalainen, P. Antsaló, A. Mäkivirta, T. Peltonen e V. Välimäki, “Estimation of modal decay parameters from noisy response measurements,” *J Audio Eng Soc*, 2002.
- [49] P. Dietrich, M. Guski e J. Klein, “Measurements and Room Acoustic Analysis with the ITA-Toolbox for MATLAB,” *Conference: 40th Italian (AIA) Annual Conference on Acoustics and the 39th German Annual Conference on Acoustics (DAGA)*, 2013.
- [50] BEHRINGER, *Measurement Condenser Microphone ECM8000*, Technical Specifications, 2021.
- [51] L. Bastos, “Qualidade Acústica de Auditórios,” *Universidade de Aveiro*, 2010.
- [52] “Departamento de Engenharia Mecânica Edifício nº 22,” Universidade de Aveiro, [Online]. Available: <https://www.ua.pt/pt/scirp/page/26815>. [Acedido em 31 de outubro 2023].
- [53] “Anfiteatros do Complexo Pedagógico, Científico e Tecnológico - Edifício nº 23,” Universidade de Aveiro, [Online]. Available:

<https://www.ua.pt/pt/scirp/page/26813>. [Acedido em 30 de outubro 2023].

[54] *R.R.A.E.*, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, 2008.

[55] *Acoustical Performance criteria, design requirements and guidelines for schools*, ANSI:S12.60, 2002.

[56] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Taylor & Francis, 2009.

[57] F. Toole, *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*, Focal Press, 2008.

ANEXO 1

Manual de utilizador

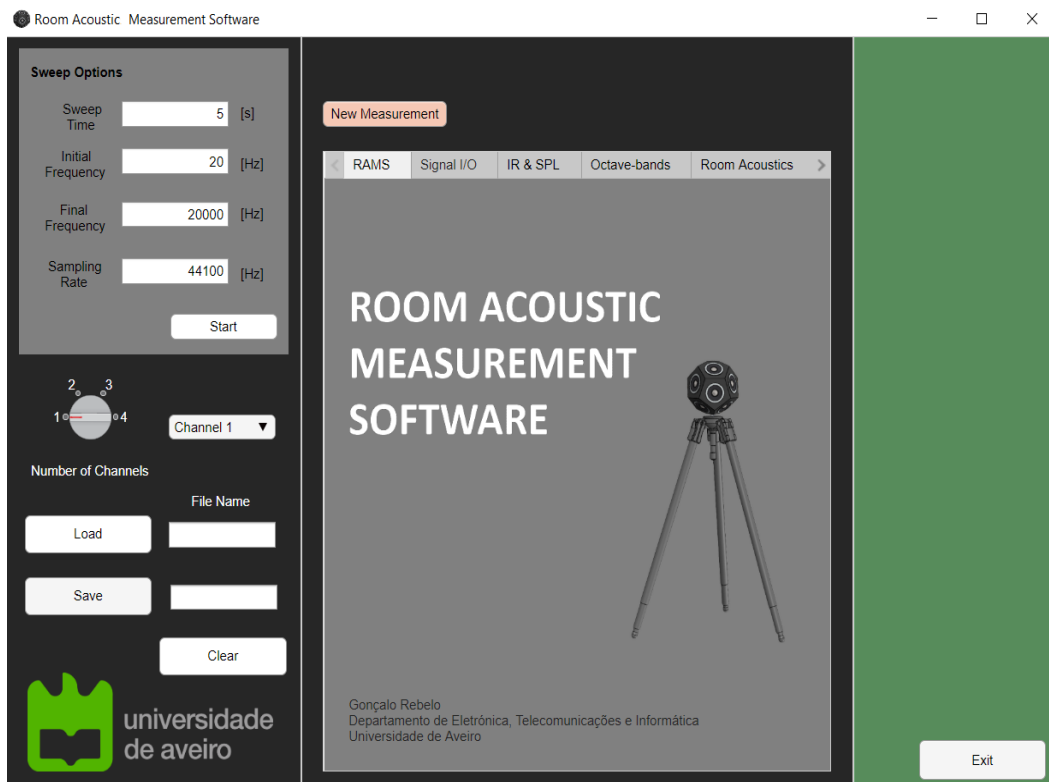
Manual de utilizador

1. Software de medição e processamento

O Room Acoustic Measurement Software permite ao utilizador realizar medições de respostas impulsivas em até 4 canais em simultâneo.

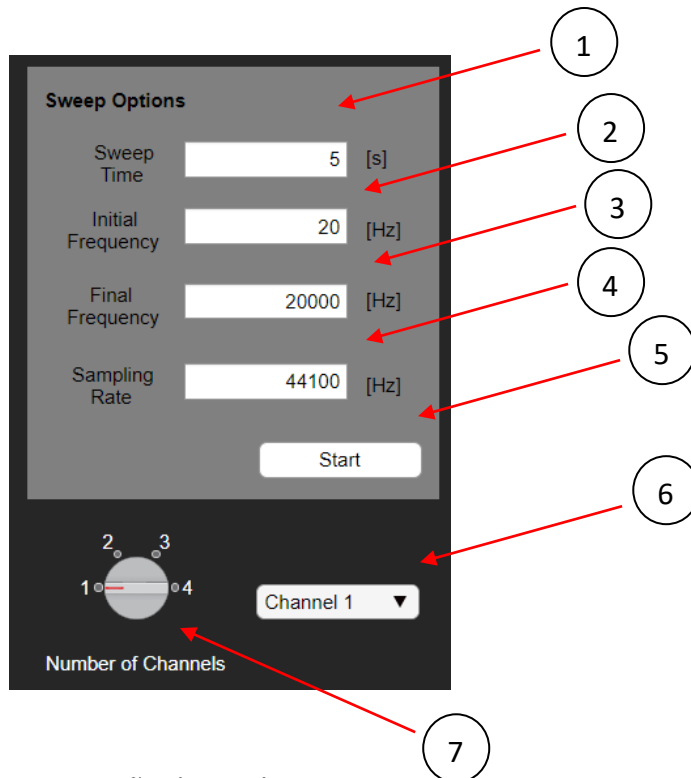
Em alternativa é possível carregar para a aplicação respostas impulsivas previamente adquiridas em formato *wav*. As novas medições podem ser guardadas para análise posterior também neste formato.

Após aquisição de uma resposta impulsional, por qualquer uma das vias, é possível efetuar o cálculo de parâmetros acústicos por bandas de frequências.



2. Configuração de uma nova medição

O sinal de excitação é um sweep logarítmico cuja frequência inicial, frequência final, frequência de amostragem e duração podem ser definidos pelo utilizador. O número de canais de aquisição deve ser também definido.

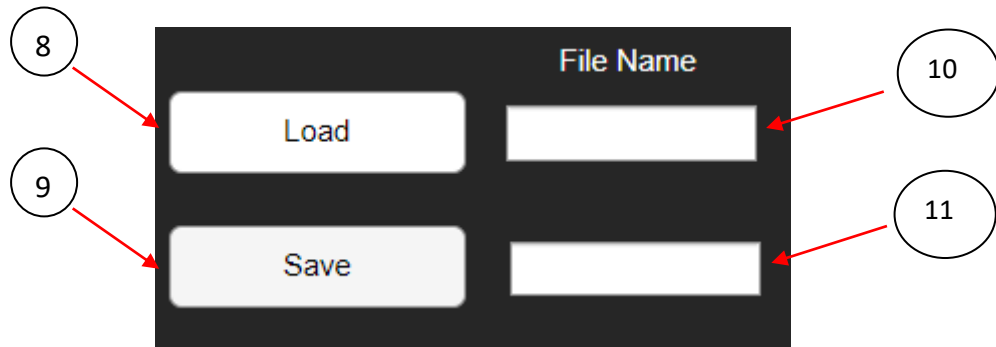


- 1- Duração do sinal
- 2- Frequência inicial
- 3- Frequência final
- 4- Frequência de Amostragem
- 5- Reprodução do sinal e início de uma nova medição
- 6- Seleção do canal apresentado
- 7- Escolha do número de canais de medição

3. Carregar e guardar respostas

Respostas impulsionalis em formato *wav* podem ser carregadas para a aplicação. O número de canais e frequência de amostragem são reconhecidos ao carregar a resposta. O nome do ficheiro a carregar deve ser escrito na forma “nomeficheiro.wav” na caixa de texto à direita do botão Load. Ao premir o botão Load é carregada a resposta para a aplicação.

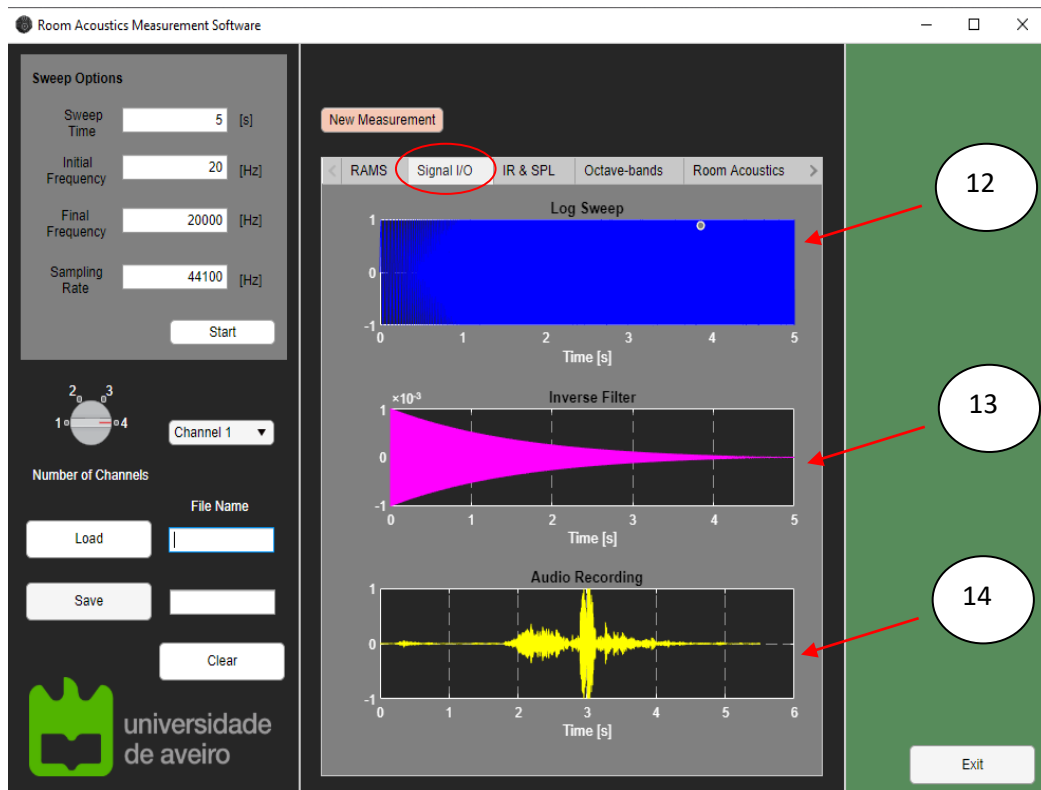
Para guardar medições realizadas basta escrever na caixa de texto à direita do botão Save, também no formato “nomeficheiro.wav”. A resposta é guardada no mesmo diretório que os ficheiros da aplicação ao premir o botão.



- 8- Carregar resposta impulsional
- 9- Guardar resposta impulsional
- 10- Definir nome do ficheiro a carregar
- 11- Definir nome do ficheiro a guardar

4. Visualizar sinais de entrada, saída e resposta por canal

No separador de Signal I/O é possível visualizar o sweep logarítmico gerado, o filtro inverso, baseado no sinal anterior, e o áudio captado por cada canal escolhido. A escolha do canal apresentado é feita em 6. Caso a resposta impulsional tenha sido carregada de um ficheiro externo este separador não apresenta informação de nenhum sinal.



12- Sinal de excitação gerado

13- Filtro inverso

14- Gravação de áudio (por canal)

No separador IR & SPL é possível visualizar a resposta impulsional e resposta em frequência para cada canal de aquisição. Caso a resposta tenha sido carregada de um ficheiro externo será também aqui apresentada.



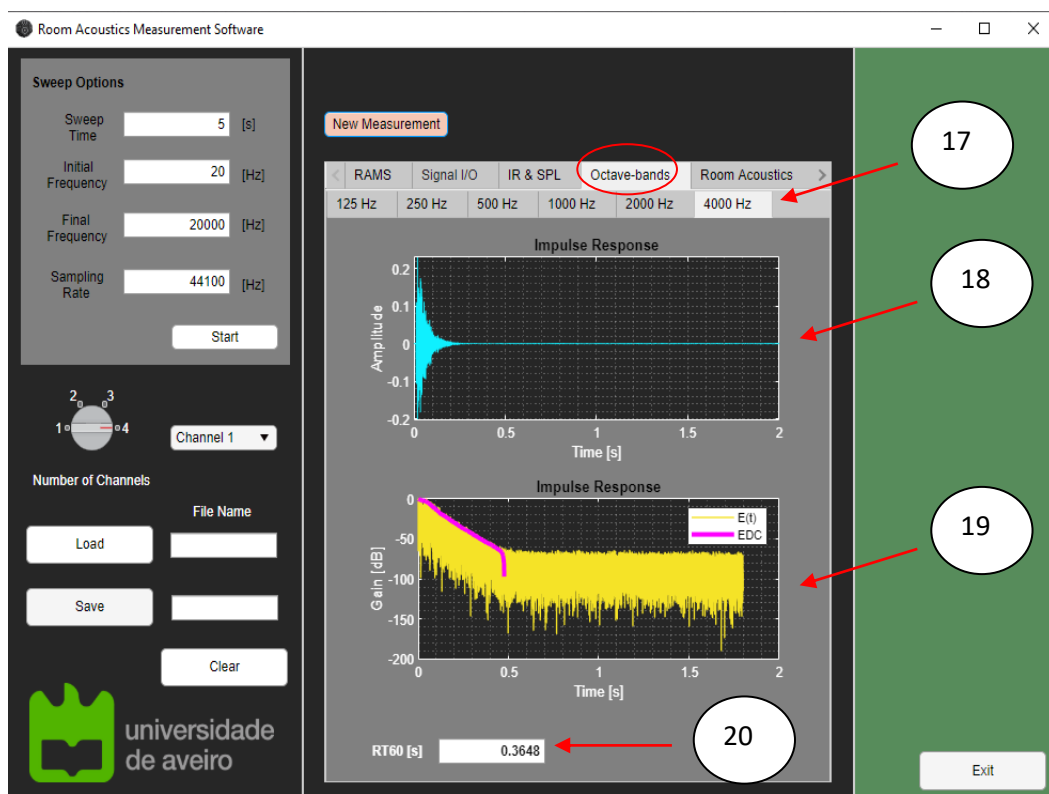
15- Resposta impulsional (por canal)

16- Resposta em frequência (por canal)

5. Cálculo de parâmetros acústicos por bandas de frequência

Ao premir o botão New Measurement é feita a filtragem da resposta impulsional em bandas de frequência de cada canal e calculados os parâmetros acústicos associados.

O separador Octave-bands apresenta a resposta impulsional após filtragem por bandas de oitava de frequência para cada canal de aquisição. É possível selecionar a frequência central de cada banda que se deseja visualizar através da barra de separadores. A resposta impulsional em escala logarítmica é também apresentada, bem como a curva de decaimento de energia calculada para esta resposta. O valor do tempo de reverberação calculado pode ser visto abaixo do segundo gráfico.



17- Seleção da banda de frequências

18- Resposta Impulsional filtrada

19- Resposta Impulsional em escala logarítmica e curva de decaimento

20- Tempo de reverberação para esta banda de frequências

O separador Room Acoustics apresenta os parâmetros acústicos calculados para cada canal de aquisição. É possível escolher os diversos parâmetros a visualizar graficamente selecionando as checkboxes à direita. A informação de todos os parâmetros calculados é igualmente apresentada na tabela na parte inferior.



- 21- Seleção dos parâmetros acústicos a visualizar
- 22- Parâmetros acústicos apresentados graficamente
- 23- Parâmetros acústicos completos

6. Procedimento de medição

O processo de medição com o kit deve começar por garantir que o espaço se encontra desocupado e, se possível, devem ser fechadas as portas, janelas ou outros acessos.

A coluna dodecaédrica deve ser montada no tripé a uma altura de 1,5 m garantindo um raio de 1 m livre de objetos ou superfícies que obstruam a radiação sonora.

Os microfones de medição devem ser distribuídos por locais relevantes, ao critério do utilizador. A altura a que é montado o microfone deve ser de pelo menos 1,2 m. É recomendado direcionar o microfone na vertical, apesar da sua omnidirecionalidade.

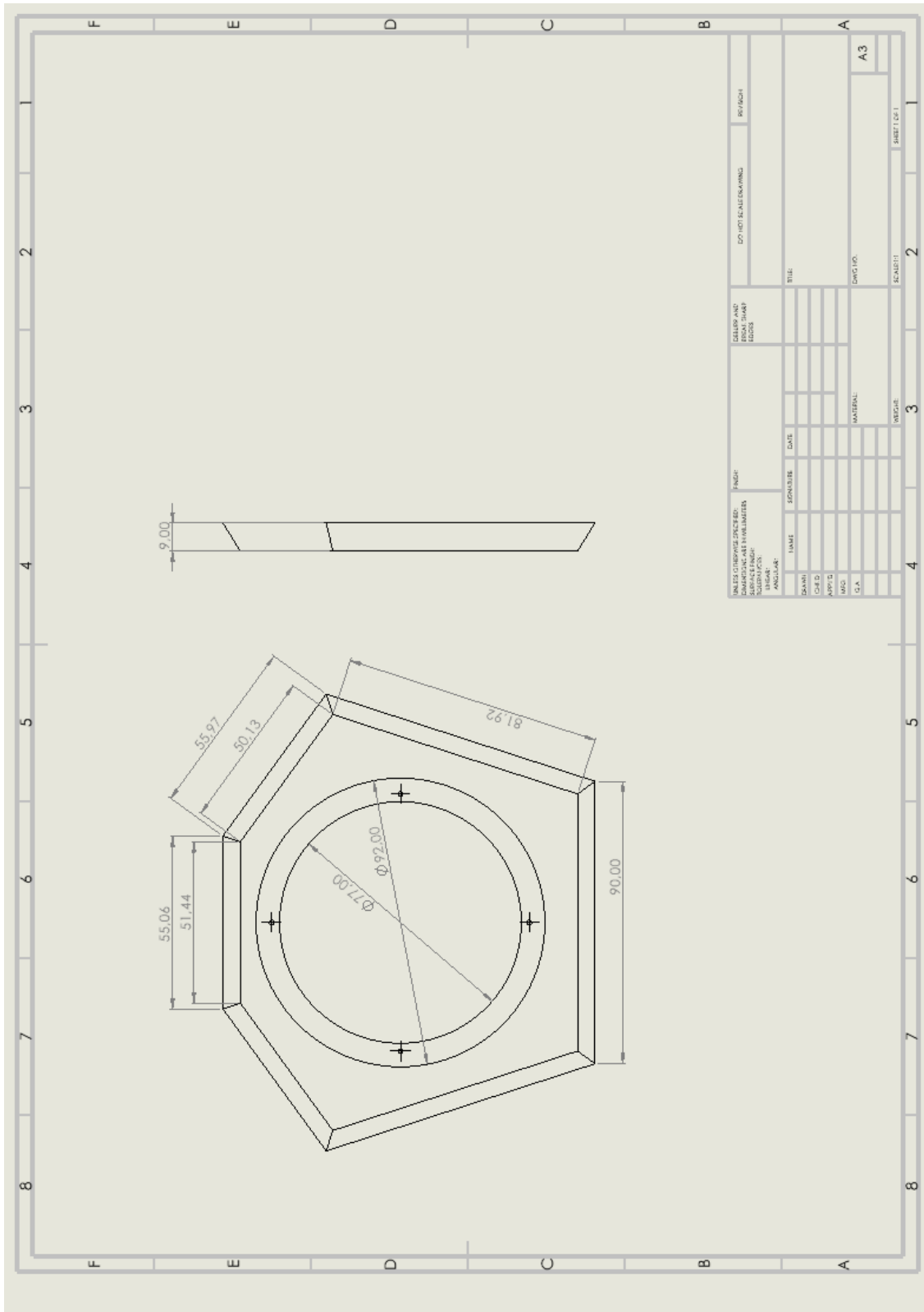
A placa de som deve ser ligada ao computador enviando o sinal gerado pela aplicação ao amplificador da coluna e recebe o áudio adquirido pelos microfones posicionados na sala.

Quando o equipamento estiver devidamente montado no espaço, o processo de medição na aplicação “Room Acoustic Measurement Software”, descrito anteriormente, pode ser iniciado.

ANEXO 2

Desenhos técnicos dos componentes da coluna dodecaédrica

Face truncada



UNITS OF MEASUREMENT		UNITS OF MEASUREMENT		UNITS OF MEASUREMENT		UNITS OF MEASUREMENT	
LENGTH	AREA	VOLUME	WEIGHT	TEMPERATURE	ANGLE	TIME	COST
mm	mm ²	mm ³	kg	°C	°	h	€
cm	cm ²	cm ³	g	°F	°	min	€
m	m ²	m ³	t	K	°	s	€
km	km ²	km ³	kg	°C	°	h	€
mm	mm ²	mm ³	kg	°C	°	h	€
cm	cm ²	cm ³	g	°F	°	min	€
m	m ²	m ³	t	K	°	s	€
km	km ²	km ³	kg	°C	°	h	€

Face triangular

