

Captura i anàlisi acústica de sales: revisió teòrica i dos casos d'ús

Marc Franco Meca

TESI DOCTORAL UPF / ANY 2020

Director de la tesi
Andrés Pérez López
Departament Departament: Obligatori



Agraïments

Aquest any 2020 hem viscut una situació completament excepcional. L'emergència sanitària declarada per al COVID-19 ha afectat el transcurs d'aquest treball i es que l'impacte emocional que ha provocat aquesta pandèmia ha estat inimaginable. La sensació de por davant la incertesa de com transcorria el treball i l'haver d'adaptar aquest a les circumstàncies d'estat d'alarma declarat han jugat un pes molt gran. Per tant, aquestes breus línies d'agraïment es dirigeixen a aquelles persones que m'han donat suport durant tot el desenvolupament del treball.

En primer lloc, m'agradaria agrair el treball al meu tutor, Andrés Pérez López, per haver tutoritzat i enfocat el projecte com es degut. Tot i la difícil situació, ha sapigut guiar-me en tot moment i ensenyar-me noves referències que han estat de gran ajuda per al desenvolupament del projecte. Reconeixo i agraeixo tot el temps que ha invertit en resoldre les meves consultes de manera precisa i detallada, sempre amb una amabilitat exemplar.

Vull donar les gràcies a la meva família i amics que han estat en tot moment un suport moral molt important. En especial als meus pares, al meu germà i a la meva parella per ajudar-me a superar els obstacles a nivell psicològic que comporta un projecte d'aquesta envergadura.

Per últim, un cop donades les gràcies a les persones que m'han donat suport durant el període de desenvolupament del projecte, m'agradaria agrair també a tots els investigadors que han fet del seu esforç, dedicació i treball, possible la investigació sobre la temàtica tractada en aquest treball. Sense ells i les seves investigacions no hagués estat possible ni tan sols plantejar-me aquesta temàtica.

Abstract

This final degree project carries out a theoretical review of indoors acoustics and shows its application in two use cases. The project is mainly based on the impulse response measurements of the enclosures to be analyzed.

First, the acoustic conditions of a room intended for mixing music are studied and analyzed in verse on the principal magnitudes of acoustic quality. By obtaining acoustic parameters, it is possible to quantify whether the acoustics of the room are suitable for its main activity.

Subsequently, the DirAC method is used to study the behavior of sound propagation in an enclosed space intended for educational communication, the Center Hall of New York University. This study makes it possible to determine the origin of the first reflections and, in this way, to facilitate a possible necessary acoustic treatment.

Resum

Aquest treball de fi de grau realitza una revisió teòrica de l'acústica en recintes tancats i mostra la seva aplicació en dos casos d'ús. El projecte es basa principalment amb les mesures de les respostes impulsional dels recintes a analitzar.

Primerament, s'estudien les condicions acústiques d'una sala destinada a la mescla de música i s'analitza en vers a les principals magnituds de qualitat acústica. Mitjançant l'obtenció d'uns paràmetres acústics es permet quantificar si l'acústica de la sala es adient per a la seva principal activitat.

Posteriorment, s'utilitza el mètode de DirAC per estudiar el comportament de la propagació del so en un recinte tancat destinat a la comunicació educativa, el Centre Hall de la Universitat de Nova York. Aquest estudi permet determinar la provenença de les primeres reflexions i, d'aquesta manera, facilitar un possible tractament acústic necessari.

Prefaci

Sumari

Índex de figures	xvi
Índex de taules	xvii
Introducció	1
Objectius	3
1 PRINCIPIS DE L'ACÚSTICA	7
1.1 Física del so	7
1.1.1 Propagació del so	7
1.1.2 Nivell de pressió sonora (SPL)	11
1.1.3 Energia i Intensitat del so	12
1.1.4 Camp lliure i camp reverberant	14
1.1.5 Fenòmens acústics	16
1.2 Acústica Arquitectònica	23
1.2.1 Teoria geomètrica	24
1.2.2 Teoria ondulatòria	27
1.2.3 Teoria estadística	28
1.3 Criteris d'avaluació: paràmetres acústics	29
1.3.1 Soroll de fons	30
1.3.2 Temps de reverberació (RT)	32
1.3.3 Calidesa acústica (BR)	42

1.3.4	Brillantor (Br)	42
1.3.5	Índex de Claredat de la veu (C50)	43
1.3.6	Índex de Claredat Musical (C80)	44
1.3.7	Definició de la veu (D50)	45
1.3.8	Sonoritat o Speech Sound Level (S_{mid})	46
1.3.9	Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%AL- Cons)	48
2	MEDICIÓ ACÚSTICA	51
2.1	Processament del senyal	51
2.1.1	Delta de Dirac	51
2.1.2	Sistemes Lineals Invariants en el Temps (LTI) . . .	52
2.1.3	Convolució	54
2.1.4	Transformada de Fourier	55
2.1.5	Transformada de Fourier amb finestra (STFT) . . .	55
2.2	Resposta a l'impuls	57
2.2.1	L'impuls ideal	58
2.2.2	Aproximació de l'impuls ideal	59
2.2.3	Soroll rosa i soroll blanc	60
2.2.4	El senyal MLS	61
2.2.5	Escombrat logarítmic	62
2.3	Deconvolució	63
2.4	El Filtre Invers	64
2.5	No Linealitat dels Sistemes Acústics	66
2.6	Directional Audio Coding (DirAC)	67
2.6.1	B-Format	68
2.6.2	Anàlisi DirAC	69
3	MÈTODE DE MEDICIÓ	75
3.1	Implementació	75
3.2	Validació	83
3.3	Càlcul del RT60 a partir de la resposta impulsional	87

4	CAS PRÀCTIC: HOME STUDIO	93
4.1	Simulació teòrica	93
4.2	Procediment de les medicions	96
4.2.1	Equipament tècnic	97
4.2.2	Metodologia	99
4.3	Anàlisi dels resultats	101
4.4	Valoració i propostes de millora	112
5	CAS PRÀCTIC: CENTRAL HALL, UNIVERSITAT DE NO- VA YORK	115
5.1	Metodologia	115
5.2	Resultats	117
	Conclusions	117

Índex de figures

1.1	Representació de la propagació d'una ona sonora a través d'un medi, identificant les zones de compressió i descompressió [1].	9
1.2	Gràfic que mostra el camp lliure i el camp reverberant, identificant la distància crítica que delimita la zona a partir de la qual predomina un dels dos camps [2]	15
1.3	La imatge de l'esquerra mostra dos ones idèntiques interferint constructivament, mentre que la imatge de la dreta fa referència a una interferència destructiva [3]	23
1.4	Representació gràfica del so directe i les primeres reflexions que arriben a un oient [4]	25
1.5	Superposició de sons amb diferents retards de temps associats a la percepció subjectiva que provoquen [4]	26
1.6	Corbes Noise Criteria NC [5]	31
1.7	Representació del principi bàsic del temps de reverberació RT60 [6]	33
1.8	Taula dels coeficients d'absorció de certs materials expressats en bandes d'octaves d'entre 125Hz i 4kHz [7]	37

1.9	Valors de l'atenuació total del coeficient de l'aire m en funció de la humitat relativa de l'aire a 20°C i una pressió atmosfèrica normal per a freqüències entre 2kHz i 12.5kHz expressat en unitats del sistema internacional i en unitats del sistema americà. [7]	40
1.10	Valors típics dels temps de reverberació segons la funció principal de la sala [7]	41
2.1	Representació gràfica de la funció delta de Dirac	52
2.2	Representació gràfica de la propietat de linealitat d'un sistema LTI	53
2.3	Representació gràfica de la propietat d'invariància en el temps d'un sistema LTI	54
2.4	Diagrama de blocs del procés de la deconvolució d'un senyal	63
2.5	Representació 3D dels patrons de directivitat polar d'un micròfon omnidireccional a la part superior i tres figures de vuit a la part inferior direccionats cap a cada un dels eixos. [8]	69
2.6	Sistema de coordenades esfèriques utilitzat en astronomia, equivalent al sistema utilitzat en el nostre cas. La coordenada N es correspon amb l'eix positiu X i l'altitud és equivalent a l'elevació[9]	72
3.1	Gràfic del senyal d'excitació en domini temporal	76
3.2	Espectograma del senyal d'excitació	76
3.3	Espectre freqüencial del senyal d'excitació expressat en dBFS	76
3.4	Gràfic del filtre invers en domini temporal	77
3.5	Espectograma del filtre invers	77
3.6	Espectre freqüencial del filtre invers expressat en dBFS	78
3.7	Gràfic del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers en domini temporal	78

3.8	Espectograma del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers	79
3.9	Espectre freqüencial del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers expressat en dBFS . . .	79
3.10	Espectre freqüencial del senyal d'excitació, el filtre invers i el resultat de la convolució entre ells expressat en dBFS .	80
3.11	Gràfic de la resposta a l'impuls en domini temporal	80
3.12	Espectograma de la resposta a l'impuls	81
3.13	Gràfic del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i la resposta a l'impuls en domini temporal	81
3.14	Espectograma del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i la resposta a l'impuls	82
3.15	Gràfic de l'estimació de la resposta a l'impuls utilitzant el mètode en domini temporal	82
3.16	Espectograma de l'estimació de la resposta a l'impuls utilitzant el mètode	83
3.17	Gràfics corresponents a l'escombrat logarítmic i el filtre invers proporcionats per la base de dades de Farina en domini temporal i espectral	84
3.18	Gràfic en domini temporal i espectograma corresponent al resultat de la convolució l'escombrat logarítmic i el filtre invers proporcionats per la base de dades de Farina i la convolució ja proporcionada per la base de dades	85
3.19	Gràfic del resultat de la convolució entre la resposta impulsional i el senyal d'excitació en domini temporal	86
3.20	Espectograma del resultat de la convolució entre la resposta impulsional i el senyal d'excitació	86
3.21	Gràfic en domini temporal i espectograma corresponent a la resposta a l'impuls i la seva estimació utilitzant el mètode	87
3.22	Representació gràfica de la resposta impulsional filtrada i l'envolvent	89

4.1	Adam F5, monitor actiu de camp proper	97
4.2	Micròfon de condensador RODE NT1-A	98
4.3	Interfície d'àudio Scarlett 2i4	98
4.4	Ordinador portàtil Acer Travelmate B117-M	99
4.5	Representació del temps de reverberació RT60 per ambdu- es situacions en bandes de terços d'octava	103
4.6	Gràfic de l'índex de claredat de la veu C50 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava	105
4.7	Representació de l'índex de claredat musical C80 per amb- dues situacions en bandes de terços d'octava	106
4.8	Gràfic de la definició de la veu D50 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava	108
4.9	Representació de la pèrdua de l'articulació de les conso- nants per ambdues situacions en bandes de terços d'octava	109

Índex de taules

1.1	Quantificació de la intel·ligibilitat segons la pèrdua d'articulació de les consonants.	49
4.1	Coeficients d'absorció acústica dels materials que componen la sala expressats en terços d'octava [10]	95
4.2	Valor del temps de reverberació RT60 i el coeficient d'absorció mig en terços d'octava	95
4.3	Valor dels paràmetres acústics en terços d'octava diferenciats entre la sala sense mobiliari (color blau) i la sala amoblada (color taronja)	102
4.4	Dummy figure	111

Introducció

Quan es pensa en acústica, la gran majoria de vegades els pensaments es referencien a recintes com auditoris, esglésies o sales de concerts. En la nostra vida diària és un aspecte de valiosa importància essent un element a tenir en compte tant en l'àmbit educatiu com en el musical. Raons per les quals aquest projecte tracta sobre l'estudi acústic, tant de captació com anàlisi acústic en matèria musical i educativa.

En aquesta investigació s'estudien detalladament les necessitats acústiques d'una sala en funció de la seva activitat principal, amb la finalitat de determinar la seva qualitat acústica. Com s'explica en el marc teòric posterior, existeixen uns determinats paràmetres acústics que proporcionen una certa informació sobre el comportament acústic del recinte. Per obtenir una bona impressió subjectiva de l'acústica de la sala cal ajustar aquests paràmetres a uns determinats valors. Aquests valors, tot i ser un indicador objectiu del comportament de la sala, es basen en una estimació proposada per diversos autors i experts en la matèria.

Referent al primer àmbit dels dos en què es centra aquest estudi, els paràmetres acústics s'han utilitzat per a donar una valoració de l'acústica d'una sala destinada a la mescla musical, també coneguda com a Home Studio si aquesta està ubicada en un habitatge. Normalment, quan un comença a muntar el seu estudi es fixa únicament en l'equipament tècnic

necessari sense tenir en compte l'aspecte acústic de la sala. L'equipament és un element de gran rellevància, però no deixa de ser una variable més de la equació per a obtenir un bona mescla d'una peça musical. Una acústica adequada del recinte fa que aquest equipament funcioni en condicions òptimes i, per tant, la peça musical tingui una qualitat sonora major.

Cal destacar que una bona acústica s'aconsegueix principalment gràcies al disseny i construcció de la sala. No obstant això, aquest projecte es centra en una sala ja construïda amb una certa distribució arquitectònica concreta i inalterable. A més, al ser una habitació d'un habitatge cal adaptar-se tant a les seves dimensions com al seu mobiliari.

El segon àmbit en què s'enmarca aquest treball és l'educatiu. Per a sales on la principal activitat és la comunicació oral es pot estudiar l'acústica de la mateixa manera, ajustant els rangs dels paràmetres acústics a un valor idònic. Ara bé, en aquest projecte s'ha decidit realitzar un anàlisi complementari per a proporcionar dues eines per estudiar l'acústica de les sales.

Com bé s'explicarà en apartats posteriors, quan es percep un so es rep tant el so directe com les reflexions d'aquest so en el recinte, essent les primeres reflexions un element important a tenir en compte. Existeix un mètode per a detectar la localització espacial d'una font sonora mitjançant un so Ambisonics, conegut com Directional Audio Coding. En aquest projecte es fa ús d'unes gravacions en format Ambisonics de la resposta impulsional del Central Hall de la Universitat de Nova York, a les quals s'aplica aquest algoritme per a localitzar les reflexions.

Per tant, aquest treball fa una revisió teòrica dels conceptes necessaris per a analitzar acústicament un recinte i avalua els dos casos explicats anteriorment. Per una banda, s'utilitzen els valors dels paràmetres acústics per a donar una valoració acústica d'una sala destinada a la mescla musical, i

per altra banda, el mètode de DirAC per a localitzar les primeres reflexions del Central Hall de la Universitat de Nova York.

Aquest projecte s'estructura en AAAAAABAAR!!

Objectius

El propòsit d'aquest Treball Final de Grau és plasmar certs coneixements, tant teòrics com pràctics, adquirits durant l'etapa estudiantil en el grau d'Enginyeria en Sistemes Audiovisuais.

El principal objectiu d'aquest projecte és l'estudi acústic de sales per a detectar possibles mancances en la propagació del so. L'execució d'un estudi acústic d'un recinte tancat requereix una preparació prèvia per a comprendre els complexos conceptes teòrics i procediments que s'utilitzen. En aquest projecte es planteja una revisió teòrica d'aquests conceptes per aprendre una aplicació real mitjançant dos casos d'ús. Per tant, és una excel·lent ocasió per a aprofundir i consolidar coneixements que durant el grau no ha estat possible profunditzar.

La primera aplicació que es proposa en aquest projecte consisteix en estudiar el comportament acústic d'un Home Studio on la seva principal activitat és la mescla de música, i per tant, s'analitza el seu comportament segons el seu cas d'ús. L'objectiu fonamental d'aquest estudi és valorar objectivament el comportament acústic de la sala en vers a la reproducció de música. Aquesta finalitat comporta una sèrie d'objectius delegats que es basen en l'obtenció dels paràmetres acústics mitjançant el mètode de la resposta impulsiva de la sala, la implementació d'aquest amb el llenguatge de programació de Python, i la comparació d'aquest paràmetres amb els

valors recomanats. Cal destacar el fet de no confondre l'objectiu del treball amb el de fer un anàlisi exhaustiu d'un tractament acústic determinat, més propi d'un treball de recerca i desenvolupament.

D'altra banda, el segon cas pràctic es focalitza en la localització espacial de les primeres reflexions del so en un recinte tancat destinat a la comunicació educativa. El principal objectiu d'aquest cas d'ús és la detecció de la direcció de les primeres reflexions, la qual comporta la implementació en llenguatge de programació Python del mètode de DirAC explicat posteriorment, i el seva deguda valoració.

Per últim i no per això menys important, no s'ha d'oblidar l'objectiu de satisfacció personal de realitzar un projecte d'aquestes característiques en un àmbit que suposa un gran interès per a mi.

Capítol 1

PRINCIPIS DE L'ACÚSTICA

En aquest capítol s'explica la física bàsica que hi ha darrera del fenomen físic del so. Es fa èmfasi en els aspectes més rellevants per a una posterior anàlisi acústica d'una sala. Primerament es defineix el concepte físic del so, explicant com es produeix i es propaga a través del medi. Després, es presenten els conceptes d'energia, intensitat i camp sonor. Posteriorment s'exposen tant fenòmens acústics relacionats amb els aspectes físics així com la noció d'interferència. A continuació s'exposen les diverses teories que es proposen en l'acústica arquitectònica. Per últim es presenten els diferents paràmetres acústics amb els quals s'avalua la condició acústica d'una sala o recinte.

1.1 Física del so

1.1.1 Propagació del so

La música i el so són dos experiències auditives que s'experimenten a diari, i per a entendre els seus fonaments es necessari comprendre els conceptes físics de les ones.

El so és una ona creada a partir d'una pertorbació de la pressió del medi resultat d'una vibració. Per a que es generi aquesta ona de pressió sonora cal una pertorbació vibratòria i un medi elàstic, mitjançant el qual es propaga l'ona. La pertorbació que genera la vibració prové d'una font sonora d'origen, un objecte capaç de produir una vibració de la primera partícula del medi. El medi es pot entendre com una sèrie de partícules interconnectades que interactuen entre elles. Simplement, fa referència al material a través del qual la pertorbació és desplaça.

Un cop es genera la vibració es propaga a través del medi, transportant-la d'un lloc a un altre mitjançant la interacció entre partícules. Típicament, el medi més comú és l'aire, tot i que pot ser qualsevol material com l'aigua o l'acer. En el nostre cas, com l'ona de pressió sonora es propaga a través de l'aire, cada partícula d'aire es desplaça de la seva posició d'equilibri, exercint un moviment sobre les partícules adjacents, ocasionant que aquestes també es desplacin de la seva posició d'equilibri. Aquesta interacció de partícules es dona al llarg de tot el medi, on cada partícula interactua i causa una pertorbació a les veïnes. Donat que aquesta és una pertorbació que es propaga a través d'un medi amb el mètode de la interacció entre partícules, es diu que l'ona sonora es caracteritza com una ona mecànica.

Una ona mecànica és una ona que oscil·la la matèria, i per tant, transfereix energia a través del medi que es propaga en la mateixa direcció de l'ona. Existeixen dos tipus bàsics d'ones mecàniques en funció de la l'orientació de la vibració. Les primeres són les ones transversals que són aquelles en què el desplaçament de les partícules és perpendicular a la direcció de propagació de l'ona. D'altra banda, les partícules en les ones longitudinals mostren un desplaçament paral·lel a la direcció de propagació de l'ona. Les ones sonores són ones de tipus longitudinal ja que les partícules es desplacen paral·lelament amb la direcció de propagació de l'ona.

Aquesta propagació longitudinal d'energia a través del medi proporci-

ona la creació de zones on les partícules d'aire es comprimeixen i altres on es dispersen. Aquestes dues zones s'anomenen zona de compressió i descompressió, essent la primera una regió amb una altra pressió de l'aire, i la segona amb una baixa pressió de l'aire. El fet que una ona sonora segueix un patró repetitiu de regions d'alta i baixa pressió desplaçant-se a través d'un medi, es refereix a aquestes com ones de pressió.

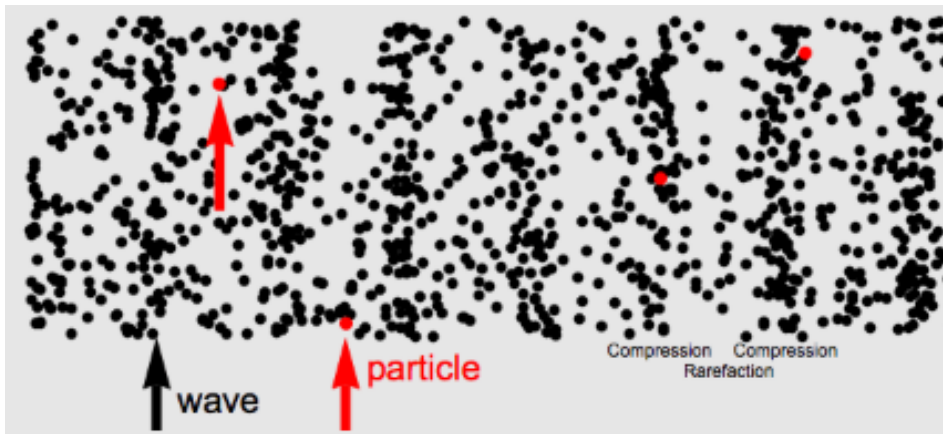


Figura 1.1: Representació de la propagació d'una ona sonora a través d'un medi, identificant les zones de compressió i descompressió [1].

La propagació de l'ona de pressió acústica a través d'un medi es defineix matemàticament mitjançant l'equació d'ona acústica. L'equació d'ona acústica per a la pressió sonora en una dimensió es defineix com [11],

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

on p fa referència a la pressió sonora en Pa, x és el desplaçament de la partícula en metres, c és la velocitat del so expressada en m/s i t és el temps en segons.

Les ones mecàniques només es poden propagar en medis que continuïn una certa inèrcia i elasticitat. Aquestes dues propietats del medi tenen una repercussió en la velocitat del so c , i anàlogament en la propagació del so. Un medi sòlid proporciona una major velocitat de propagació donada la proximitat de les molècules. Anàlogament, en un medi gasós les ones viatgen més lentament degut a la dispersió de les molècules entre elles. A més de l'estat del medi, altres factors com la densitat o la temperatura del medi afecten a la velocitat a la qual les ones acústiques es propaguen. L'equació general per a determinar la velocitat acústica de propagació c en qualsevol medi es descriu com [11],

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (1.2)$$

on p es correspon amb la pressió sonora i ρ la densitat del medi.

També es pot expressar la velocitat mitjançant l'equació Newton-Laplace obtenint així [12],

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (1.3)$$

on C és el coeficient de rigidesa i ρ és la densitat del medi expressada en kg/m^3

En el cas de l'aire que és el medi en què nosaltres realitzem el nostre estudi, de l'equació anterior proporcionada per Newton-Laplace podem definir la velocitat del so a l'aire expressada en m/s com [11],

$$c_{aire} = 331,3 + 0,606T \quad (1.4)$$

on T és la temperatura en graus Celsius $^{\circ}C$.

1.1.2 Nivell de pressió sonora (SPL)

La pressió sonora p és el resultat de les variacions a l'aire produïdes per la propagació de l'ona sonora. Es defineix aquesta com la diferència entre la pressió instantània i la pressió atmosfèrica estàtica. Aquesta darrera es correspon amb la força per unitat de superfície que exerceix l'aire sobre la superfície terrestre quan es produeix una pertorbació. Dit d'una altra manera, la pressió sonora és la pressió mesurada entre l'ona sonora i la pressió de l'aire que l'envolta. Per tant, és la força del so que actua sobre la superfície perpendicular a la direcció en la qual es propaga el so. Un so sorollós produeix una ona sonora amb una pressió sonora relativament elevada, mentre que un so fluix produeix una ona sonora amb una pressió sonora baixa. Aquesta magnitud s'expressa en Pascals (Pa).

El rang audible de pressió sonora en éssers humans és molt ampli, anant des de la mínima pressió sonora audible de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa [13] fins la màxima pressió sonora sense causar danys al sistema auditiu que es correspon amb 20Pa. No obstant, el sistema auditiu no respon de manera lineal als estímuls acústics i l'ampli rang de valors faciliten l'ús d'una escala decibèlica logarítmica. La pressió sonora expressada en aquesta escala s'anomena nivell de pressió sonora SPL i es correlaciona bé amb la percepció humana de la sonoritat.

Com l'energia de l'ona sonora és proporcional al quadrat de la pressió, el nivell de pressió sonora L_p i mesurat en dB es defineix matemàticament com [14],

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (1.5)$$

on L_p és el nivell de pressió en dB, p és la pressió sonora en Pa i p_{ref} és la pressió de referència mínima audible.

1.1.3 Energia i Intensitat del so

L'energia sonora es defineix com el moviment d'energia a través d'un medi en forma d'ona produït per una vibració. Com bé s'ha dit anteriorment, el so és una ona mecànica que per consegüent conté zones de compressió i descompressió oscil·latòries. Per tant, el medi emmagatzema tant energia cinètica com energia potencial degut a aquestes regions.

L'energia cinètica és l'energia que té un objecte degut al moviment [15]. Aquesta es defineix com el treball necessari per accelerar un cos del seu estat de repòs a una certa velocitat. A l'aplicar un treball, una certa energia es transfereix al objecte durant el temps d'acceleració fins a obtenir una velocitat constant. Aquesta transferència d'energia es coneix com energia cinètica, i es proporcional al quadrat de la magnitud de la velocitat de la partícula. L'energia cinètica per unitat de volum V s'expressa matemàticament com [16],

$$E_c = \int_V \frac{\rho v^2}{2} dV \quad (1.6)$$

on V és el volum d'interés, ρ és la densitat local del medi, i v és la velocitat de la partícula.

En quant a l'energia potencial aquesta es defineix com l'energia emmagatzemada per un objecte deguda la seva posició respecte altres objectes. Aquesta energia es relaciona amb les forces que actuen en un objecte de tal manera que el treball total d'aquest objecte depèn únicament de la seva posició inicial i final. L'energia potencial és proporcional al quadrat de la pressió sonora i es defineix per unitat de volum com [16],

$$E_p = \int_V \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} dV \quad (1.7)$$

on V és el volum d'interés, ρ_0 és la densitat del medi sense la presència de

so, p és la pressió sonora en Pa i c la velocitat del so.

Finalment, l'energia sonora en un volum es defineix com la suma de densitats d'energia de l'energia potencial i l'energia cinètica integrada en el volum d'interés [16],

$$E_T = E_p + E_c \quad (1.8)$$

D'altra banda, la intensitat sonora I , o també coneguda com intensitat acústica, es defineix com la quantitat d'energia sonora per unitat de temps en una unitat d'àrea perpendicular a la direcció de propagació de l'ona sonora. Aquesta magnitud s'expressa en unitats del sistema internacional com watts per metre quadrat (W/m^2) i es defineix matemàticament com [17],

$$I = p \cdot v \quad (1.9)$$

on p és la pressió sonora i v la velocitat de la partícula.

De la mateixa manera que la pressió sonora, el nivell d'intensitat sonora s'utilitza en una escala logarítmica per ajustar-se més acuradament a la percepció humana. El nivell d'intensitat sonora β en decibels SIL d'un so amb una intensitat sonora I en watts per metre quadrat es defineix com [17],

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1.10)$$

on $I_0 = 10^{-12}$ és el valor de referència d'intensitat sonora que es correspon amb el mínim lllindar d'intensitat sonora que una persona en condicions normals pot percebre a la freqüència de 1kHz.

1.1.4 Camp lliure i camp reverberant

Quan una font sonora emet un so, el receptor pot rebre el so directe que viatja en línia recta, o el so indirecte provinent de les reflexions produïdes per l'ambient que envolta aquesta font sonora. Normalment, es percep el so de les dues maneres, tant el so directe de la font sonora com les reflexions. Sota unes certes condicions es poden experimentar ambdues idees recreant els extrems. Primerament, es pot crear un camp acústic on no hi hagi presència de reflexions i només es propaga el so directe. A l'altre extrem existeix el cas oposat on es crea un camp acústic que només té present el so reflectit i no s'observa el so directe. Aquestes dues circumstàncies extremes reben el nom de camp lliure i camp reverberant o difús.

El camp lliure es defineix com una situació acústica on tot el so que rep un oient és a través del so directe de la font sonora sense cap influència de les reflexions. Aquesta situació es dona a la natura en espais a l'aire lliure suficientment elevats que eviten l'efecte de les reflexions del terra. També, es pot crear un espai artificial utilitzant material absorbent en les parets, sostre i sòl, el qual es coneix com una cambra anecoica. En diversos camps de la medicació acústica aquesta situació és molt usada degut a que els resultats només son influenciats pel so de la font sonora emissora, i no per les reflexions de la sala que poden provocar distorsions en les mesures.

En canvi, el camp reverberant o camp difús es considera un camp acústic on l'energia acústica és uniforme en l'espai, és a dir, el camp sonor es considera homogeni. En qualsevol punt d'aquest espai es percep el so provinent de totes les direccions amb la mateixa magnitud i probabilitat. Aquesta situació es pot aproximar amb una cambra de reverberació que consisteix en un espai tancat dissenyat amb parets obliqües reflectants. Aquesta obliqüïtat provoca que les ones sonores es reflecteixin el màxim nombre de vegades i d'aquesta manera es crea el camp difús. El camp reverberant és un concepte molt útil que permet fer simplificacions en certes

mesures acústiques i fer prediccions en l'aïllament de sales.

Aquests dos camps acústics introdueixen el concepte de distància crítica dc. Aquest paràmetre mesura la distància de la font sonora on l'energia del camp lliure i el camp reverberant són iguals. Com més reverberant sigui el recinte o sala, més propera és la distància crítica de la font emisora. Anàlogament, com més absorbent sigui la sala, la distància crítica s'allunya de la font sonora. Aquesta distància depèn tant de la geometria com l'absorció de la sala on es propaga l'ona sonora, així com de la dimensió i la forma de la font sonora emisora. En l'apartat de paràmetres acústics s'expliquen els conceptes matemàtics.

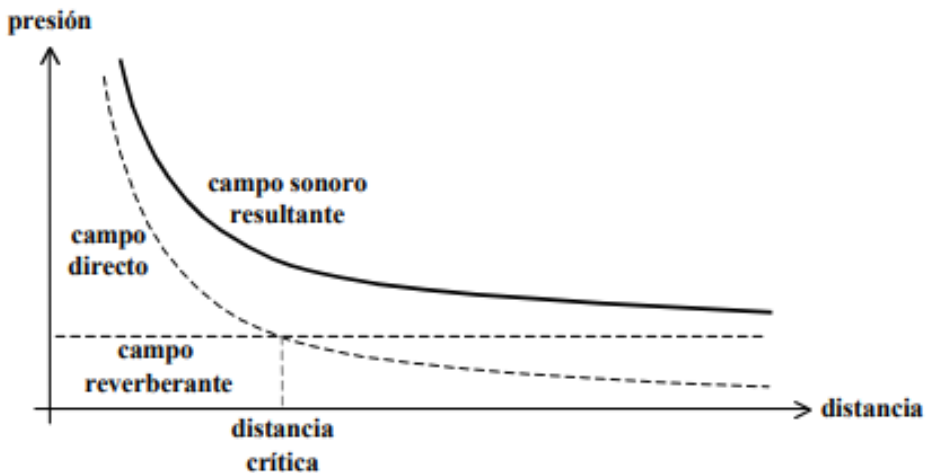


Figura 1.2: Gràfic que mostra el camp lliure i el camp reverberant, identificant la distància crítica que delimita la zona a partir de la qual predomina un dels dos camps [2]

1.1.5 Fenòmens acústics

Reflexió

La reflexió és un fenomen físic que fa referència al canvi de la direcció de propagació de l'ona quan aquesta entra en contacte amb una superfície de separació llisa (o de rugositats de dimensions molt menor a la longitud d'ona) entre dos medis, tornant al medi del qual prové. Per tant, es poden definir tres elements essencials que són l'ona incident, la normal o perpendicular a la superfície i l'ona reflexada. Es defineix l'angle d'incidència a l'angle que forma la normal amb l'ona incident i l'angle de reflexió a l'angle format per la normal i l'ona reflexada.

Aquest fenomen es regeix per dues lleis que enuncien que, per una reflexió especular, l'angle d'incidència α_i equival a l'angle de reflexió α_r i que tant l'ona incident, com la reflexada i la normal estan en el mateix pla.

Quan una ona sonora interactua amb una superfície plana, l'ona sonora es reflectada degut a que la superfície és suficientment gran en comparació a la longitud d'ona. Ara bé, el rang sonor audible per un humà conté un rang de freqüències molt ampli (de 20Hz a 20kHz). Per tant, la reflexió no actua de la mateixa manera en baixes que en altes freqüències. Les longituds d'ones a baixes freqüències són molt grans i són capaces d'envoltar els objectes, en canvi, les longituds d'ones d'altres freqüències no envolten els objectes i produeixen ombres acústiques a la part posterior i rebots a la part frontal.

En acústica aquesta propietat física de les ones sonores s'utilitza àmpliament tant per aïllar acústicament una sala, així com per dirigir el so cap a una certa direcció.

Refracció

La refracció consisteix en un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora quan aquesta passa d'un medi a un altre. Aquesta fenomen acústic només es produeix quan l'ona sonora incideix de manera obliqua sobre la superfície que separa els dos medis, tenint aquests índexs de refracció diferents. Es defineix aquest índex de refracció n com un nombre adimensional que expressa la relació entre la velocitat de l'ona en un medi de referència i la velocitat en el propi medi. Aquest valor es pot expressar matemàticament amb la següent expressió [11],

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.11)$$

on c és la velocitat de la llum en el buit i v és la velocitat de la llum en el medi.

A diferència del fenomen físic de la reflexió, en la refracció, la relació d'igualtat entre l'angle de refracció i l'angle d'incidència no es manté.

La refracció es deu a què al canviar de medi, la velocitat de propagació de l'ona sonora canvia. Ara bé, aquest fenomen pot produir-se dins d'un mateix medi quan les característiques dins d'aquest no son homogènees, per exemple, quan dins un mateix medi hi ha diverses zones amb diferent temperatura.

De forma similar a la reflexió, la refracció es regeix per dues lleis. La primera enuncia que tant l'ona incident com l'ona refractada i la normal a la superfície estan al mateix pla. La segona consisteix en una fórmula matemàtica que s'utilitza per a calcular l'angle de refracció. Aquesta expressió afirma que el producte entre l'índex de refracció i el sinus de l'angle d'incidència és constant per a qualsevol raig o ona que incideix en una superfície entre dos medis. Considerem dos medis amb els seus corresponents índexs de refracció n_1 i n_2 separats per una superfície S . Per una ona de pressió sonora amb un angle d'incidència θ_1 sobre el primer

medi, tindrem que el raig es propaga al segon medi amb un angle de refracció θ_2 , el valor del qual s'obté per mitjà de la llei de Snell, proposada pel matemàtic holandès Willebrord Snel van Royen [18]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.12)$$

Difracció

La difracció és similar a la reflexió i la refracció en el fet que totes tres afecten a la propagació del so, comportant un canvi de direcció en l'ona acústica quan aquesta experimenta un canvi de medi. La difracció descriu tant un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora com una dispersió del so quan es troba amb un obstacle que no li és transparent per a la longitud d'ona. Per tant, per a què es doni el fenomen de la difracció, la longitud d'ona del front sonor ha de ser com a mínim del mateix tamany o superior al de l'objecte.

L'explicació d'aquest fenomen sonor ve descrit pel principi de Huygens-Fresnel. Aquest és un mètode proposat pels físics Christiaan Huygens i Augustin-Jean Fresnel el qual enuncia que [19]

"Tot punt d'un front d'ona inicial es pot considerar com una font d'ones esfèriques secundàries que s'estenen en totes les direccions amb la mateixa velocitat, freqüència i longitud d'ona que el front d'ona que el procedeix."

D'acord amb aquest principi, quan una ona sonora incideix sobre un obstacle o obertura que impedeix la seva propagació, tots els punts del pla es converteixen en fonts d'ones secundàries que emeten noves ones, les quals es denominen ones difractades.

Com en la reflexió, les freqüències baixes tenen una major capacitat per envoltar l'obstacle que no pas freqüències altes, degut al tamany de

les seves longitud d'ones. Per tant, la quantitat de difracció es directament proporcional a la longitud d'ona, augmentant aquesta quan la longitud d'ona augmenta, i disminuint quan la longitud d'ona es redueix. En quant a l'obertura, la quantitat de difracció varia en funció del tamany de la pròpia obertura i de la longitud d'ona, essent aquesta inversament proporcional entre el tamany de l'obertura i la quantitat de difracció. Com major és l'obertura en comparació amb la longitud d'ona, l'efecte de difracció disminueix, mentre que a menor tamany d'obertura en comparació amb la longitud d'ona, la quantitat de difracció és major.

Absorció

La propagació de les ones sonores en recintes tancats es veu influenciada tant per la delimitació física de superfícies així com la interacció amb objectes dins la sala. Quan una ona de pressió sonora interactua amb una superfície, part de l'energia del so es reflexa cap a l'interior de la sala i una altra incideix en la superfície. Aquesta energia incident o bé es refractada i transmesida, o bé es absorbida pel material, la qual ens presenta el fenomen de l'absorció.

Es defineix l'absorció com un fenomen físic que consisteix en la transformació de l'energia sonora en altres formes d'energia. Per tant, aquesta és un tipus de pèrdua que experimenta el so en la seva transmissió i es produeix quan una ona sonora incideix sobre una superfície amb un medi diferent del qual prové. La principal causa d'absorció de les ones sonores és la dissipació en forma d'energia calorífica degut al fregament d'aquestes ones mecàniques. La quantitat d'energia calorífica varia en funció de les propietats absorbents del material del qual està composta la superfície.

Es refereix a l'absorció acústica com la capacitat que posseeixen certs materials per absorbir una quantitat d'energia de les ones sonores que incideixen sobre ells. En un cas on els materials que formen les superfícies

amb les quals l'ona sonora interactua són totalment absorbents, no es produeix cap mena de reflexió ja que l'absorció seria total, i la propagació seria similar a la presentada en camp lliure o en una sala anecoica. En canvi, si les superfícies són reflectants, les ones sonores no pateixen absorció i el fenomen de la reflexió està més present, simulant un camp més reverberant.

Difusió

La difusió és l'efecte de disseminar l'energia acústica que incideix sobre una superfície en l'espai i en el temps [20]. Aquest fenomen es produeix quan l'ona sonora interactua amb una superfície que presenta alguna mena de rugositat, produint-se així una ona reflexada en totes les direccions.

La difusió sonora contribueix a la creació d'un so envoltant i, per tant, incrementa la sensació d'espacialitat de la sala, degut a que la dispersió d'energia arriba a l'oient des de totes les direccions. Aquest fenomen físic no succeeix només en el domini freqüencial, sino també en el domini temporal.

Per al tractament de sales, la difusió és un fenomen acústic que influeix directament sobre la qualitat del so que percep l'oient. Quan el so directe emès per una font sonora interactua amb les reflexions especulars es produeixen una sèrie d'interferències, que s'expliquen en l'apartat posterior, les quals generen unes diferències de temps entre regions de màxima i mínima pressió sonora causant irregularitats en el so. Ara bé, quan aquest so directe i les reflexions especulars es combinen amb les reflexions difuses es redueix la variació entre aquests nivells extrems. La disseminació de l'energia acústica en el temps corregeix tant aquesta absència de reflexions en alguns instants de temps com l'excés de reflexions, contribuint a l'homogeneïtzació o distribució uniforme de l'energia dins la sala o recinte.

Interferències

Quan dues o varies ones sonores es propaguen en un mateix espai o medi ocasionen una interacció entre elles. Quan aquestes ones viatgen en un medi lineal, homogeni i isòtrop, és a dir, les seves propietats no depenen de la direcció, s'aplica el principi de superposició d'ones. El principi de superposició d'ones enuncia que quan dues o més ones del mateix tipus es propaguen i incideixen en un mateix punt de l'espai, l'amplitud resultant en aquest punt és igual al vector suma de les amplituds de cada ona individual [21]. Si es superposen dues ones harmòniques d'igual freqüència però amb diferents amplituds i fases, obtindrem una altra ona harmònica amb la mateixa freqüència, però amb una amplitud i fase diferent, la qual s'anomena ona resultant. Per tant, siguin ψ_1 i ψ_2 dues ones sonores la seva suma ens proporciona l'ona resultant $\psi = \psi_1 + \psi_2$.

La superposició de dues o més ones de freqüència igual o propera proporcionen un patró d'intensitat observable que es denomina interferència. Es defineix aquest fenomen com la interacció de dues ones sonores que resulten en una altra ona amb una major, menor o igual amplitud.

Recordem que les ones sonores contenen patrons de regions on la pressió sonora es comprimeix i altres on es descomprimeix. Si dues ones de la mateixa freqüència interactuen i estan en fase, aleshores l'amplitud resultant és la suma de les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de major amplitud que les inicials. Dit d'una altra manera, quan dues ones estan en fase les zones de compressió i descompressió coincideixen, i per tant es reformen entre elles. El màxim valor d'amplitud de l'ona resultant és el doble de l'amplitud quan ambdues ones tenen la mateixa amplitud, degut a que la intensitat es proporcional al quadrat de l'amplitud. Aquesta interacció es denomina interferència constructiva i es pot expressar matemàticament com [22],

$$kr_2 - kr_1 = 2n\pi \quad (1.13)$$

Tenint en compte que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ aquesta expressió es pot visualitzar com [22]

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad (1.14)$$

Per altra banda si es troben dues ones amb la mateixa freqüència però amb una diferència de fase de π , aleshores l'amplitud de l'ona resultant és igual a la diferència entre les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de menor amplitud que les inicials. Quan aquestes estan desfasades, una regió de compressió coincideix amb una regió de descompressió de l'altra ona o viceversa, produint-se una atenuació o cancel·lació entre elles. Aquesta interacció es denomina interferència destructiva i el mínim valor que pot obtenir l'ona resultant és nul. Matemàticament es pot expressar la interferència destructiva com [22],

$$kr_2 - kr_1 = (2n + 1)\pi \quad (1.15)$$

D'igual manera que la interferència constructiva, coneixent que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ aquesta expressió es pot visualitzar com [22],

$$kr_2 - kr_1 = (n + \frac{1}{2})\pi \quad (1.16)$$

Si les dues ones que interfereixen tenen una fase diferent a aquest dos extrems, la amplitud resultant serà un valor que oscil·la entre el mínim i el màxim expressat anteriorment.

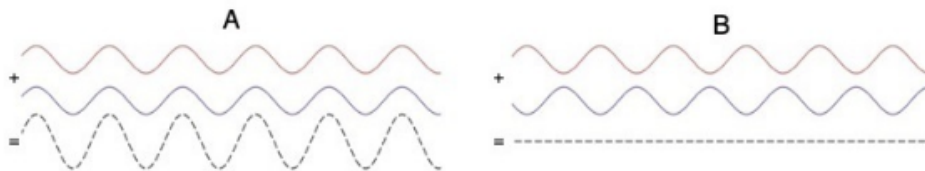


Figura 1.3: La imatge de l'esquerra mostra dos ones idèntiques interferint constructivament, mentre que la imatge de la dreta fa referència a una interferència destructiva [3]

1.2 Acústica Arquitectònica

El camp relacionat amb l'acústica és un terreny força ampli que inclou varies àrees, com per exemple l'acústica musical, la acústica ambiental o l'acústica arquitectònica entre d'altres. La darrera és l'àmbit que ens interessa en el nostre cas ja que l'acústica arquitectònica estudia els fenòmens relacionats amb una propagació adequada i adient segons la funció del recinte o sala.

Aquest camp tracta dos temes diferents que es corresponen amb l'aïllament acústic i l'acondicionament acústic. Cal diferenciar aquests dos, essent l'objectiu del primer l'eliminació o atenuació tant de sons indesitjables produïts dins del recinte com la intrusió de sorolls aliens al local. En canvi, l'acondicionament acústic consisteix en distribuir el so de tal manera que es garanteix la qualitat i la intel·ligibilitat de la paraula evitant problemes acústics. Les sales o recintes que tenen una aplicació determinada han d'assegurar unes certes qualitats acústiques per a desenvolupar la seva funció principal.

Existeixen tres teories diferents que ens permeten estudiar l'acústica arquitectònica, que són la teoria estadística, la teoria geomètrica i la teoria

ondulatòria.

1.2.1 Teoria geomètrica

La teoria geomètrica es basa en la hipòtesi que si les dimensions del recinte o sala són molt grans en comparació amb la longitud d'ona de l'ona sonora, aleshores es pot tractar la qüestió d'igual manera amb què s'analitza la llum, és a dir, mitjançant raigs. Aquesta teoria utilitza el concepte de raig sonor, el qual es defineix com una porció d'una ona esfèrica amb un angle d'obertura infinitesimal que té com a origen el centre de l'esfera [23]. El raig sonor determina la trajectòria de l'ona des de la seva emissió de la font sonora fins a la recepció per part de l'oient, variant el seu recorregut en funció dels fenòmens físics que s'han explicat anteriorment. El fet d'assumir la propagació de l'ona com a un raig sonor, considera que les reflexions que aquests tenen sobre les diverses superfícies són especulars, i per tant, verifiquen la llei de reflexió explicada anteriorment.

Les primeres reflexions exhibeixen un nivell d'energia sonor major que les reflexions tardies, que es corresponen amb la cua reverberant. Es defineix una reflexió d'ordre n com la incidència n vegades del raig sonor sobre les diferents superfícies de l'espai abans d'arribar al receptor. Generalment, es consideren reflexions tardies aquelles que són superiors a l'ordre 3. Aquestes reflexions presenten una gran concentració en qualsevol punt d'un recinte tancat, essent les seves característiques similars independentment del punt de la sala. Això es degut a que la densitat temporal d'aquestes reflexions en qualsevol punt d'un recinte tancat augmenta quadràticament amb el temps. Aquesta és la raó per la qual la cua reverberant s'estudia amb la teoria estadística que s'explicarà posteriorment.

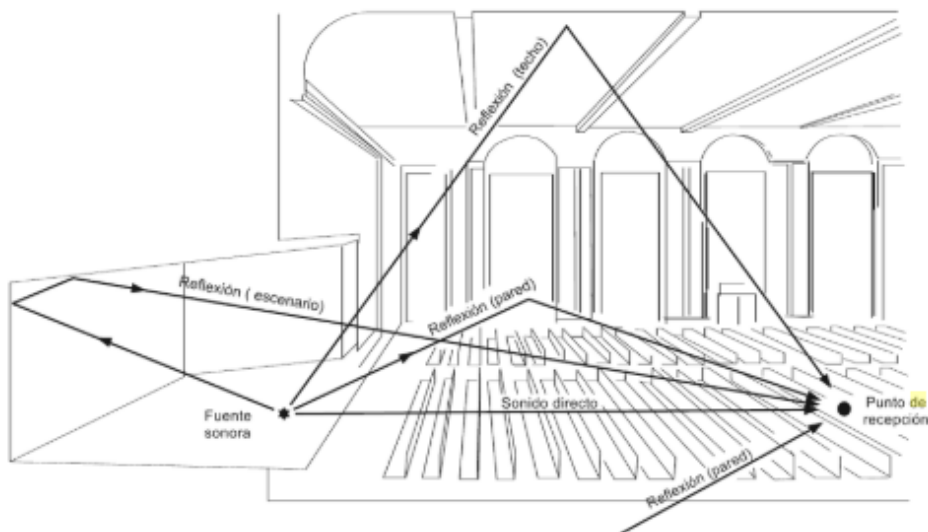


Figura 1.4: Representació gràfica del so directe i les primeres reflexions que arriben a un oient [4]

Ara bé, les primeres reflexions depenen directament de les formes geomètriques que presenta el recinte, essent aquestes específiques per a cada punt de la sala, i per tant, determinen tant les característiques acústiques com el so directe.

D'aquestes primeres reflexions cal tenir en compte aquelles que l'oient percep com a un únic so, que es corresponen amb les reflexions que arriben al receptor en els primers 50ms des de l'arribada del so directe. Quan el so emès és un missatge oral, aquestes primeres reflexions contribueixen tant a la intel·ligibilitat de la paraula com a la comprensió del missatge. Contràriament, l'arribada de reflexions amb un retard temporal superior a 50ms dificulta la comprensió, degut a que la percepció per part de l'oient és una repetició del so directe. Aquest efecte de diferenciació entre dos sons que arriben amb una diferència de temps Δt superior a 50ms s'anomena

eco. El retard de 50ms es correspon amb la diferència de camins entre el so directe i la primera reflexió d'aproximadament 17m, el qual es pot obtenir mitjançant la següent expressió [11],

$$\Delta x = c \cdot \Delta t = 340 \cdot 0,05 = 17m \quad (1.17)$$

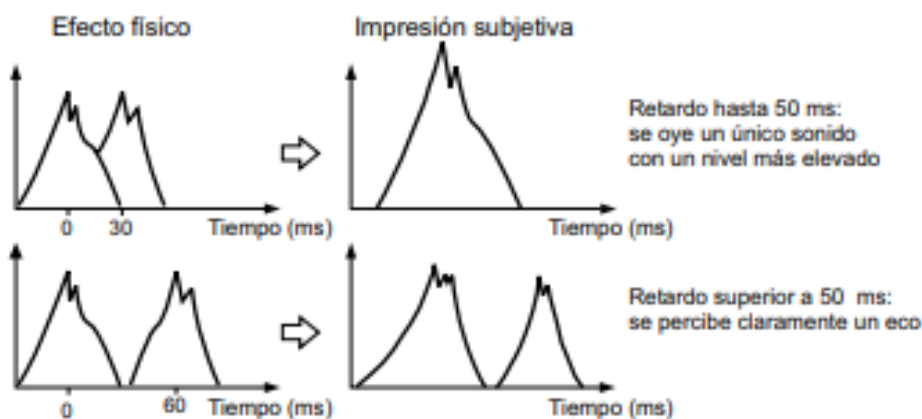


Figura 1.5: Superposició de sons amb diferents retards de temps associats a la percepció subjectiva que provoquen [4]

Per la pròpia definició, la teoria geomètrica es pot utilitzar per a estudiar i analitzar acústicament recintes a freqüències on la longitud d'ona és petita en comparació a les dimensions del local, mentre que per a longitud d'ones d'una magnitud semblant a les dimensions del local s'ha d'utilitzar el concepte de mode de ressonància, el qual ens porta a la definició de la següent teoria de l'acústica arquitectònica, que és la teoria ondulatoria.

1.2.2 Teoria ondulatòria

La teoria ondulatòria es basa en una sèrie de mètodes que permeten estudiar la naturalesa ondulatòria del so a partir de la resolució numèrica de l'equació d'ona general. Aquesta teoria es fonamenta en el fet que el volum d'aire a l'interior d'una sala s'estima com un sistema vibratori amb una certa complexitat, format per un conjunt de subsistemes de menor complexitat.

En l'anàlisi del camp sonor d'un recinte, existeixen diversos processos associats al seu caràcter ondulatori, com l'establiment d'ones estacionàries, que no poden ser analitzats ni amb l'acústica estadística ni amb la geomètrica. La teoria ondulatoria és adient per a estudiar aquest procés ja que estudia l'acústica de la sala en quant al fenomen de propagació d'ones acústiques, descrivint les baixes freqüències com a models d'ona.

Qualsevol sistema vibratori, separat de la seva posició d'equilibri, vibra d'una determinada manera que es correspon amb els modes naturals de vibració. Així, un volum d'aire a l'interior d'un recinte tancat, si s'excita, constitueix un sistema vibratori, ja que cada molècula d'aire transmet, degut a les variacions de pressió, la vibració a les que es troben al seu voltant. Aquesta vibració es propaga en forma d'ona sonora portant uns modes de vibració propis de la vibració que depenen, entre d'altres, tant de la geometria com de les dimensions de la sala i les condicions de l'entorn. [24].

Quan una font emissora emet una ona sonora dins un recinte tancat, si la distància entre dos superfícies paral·leles és igual a la longitud d'ona d'una determinada freqüència es crea una ona estacionària. Es defineix el concepte d'ona estacionària com una ona formada pel fenomen d'interferència de dues ones amb la mateixa amplitud i longitud d'ona o freqüència que es propaguen en oposadament a través d'un medi. Aquesta ona, també

coneguda com a mode propi, roman estacionària reflexant-se entre los dos superfícies paral·leles, disminuint lentament la seva energia acústica a cada interacció amb la superfície.

El nombre de nodes propis és il·limitat i per a cada un d'aquest s'associa una determinada freqüència pròpia que es caracteritza per un nivell de pressió sonora. La presència de tots provoca en cada punt de la sala una concentració d'energia al voltant de la freqüència pròpia, la qual proporciona un so característic a la sala anomenat coloració. Si l'oient es situa en un punt de màxima pressió sonora percep aquesta determinada freqüència amb una intensitat sonora major de la que s'hauria de percebre. Anàlogament, si l'oient s'ubica en un mínim de pressió sonora percep la freqüència pròpia amb una menor intensitat sonora.

Aquestes freqüències pròpies associades als modes propis depenen de la geometria i de les dimensions del recinte, i generalment, el seu càlcul resulta complex. Ara bé, quan es tracta de sales o recintes paral·lelepípedes es poden calcular mitjançant la fórmula de Rayleigh expressada com [25],

$$f_{k,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (1.18)$$

on L_x, L_y, L_z fan referència a les dimensions de la sala en metres, k, m, n poden prendre qualsevol valor enter i c és la velocitat del so en el medi.

1.2.3 Teoria estadística

La última teoria de l'acústica arquitectònica es correspon amb la teoria estadística. Aquesta teoria estudia el comportament de l'energia acústica en un recinte o sala, proporcionant mesures qualitatives per a detectar problemes acústics que aquesta ocasioni. La teoria estadística fa ús de models matemàtics que plantegen l'extinció del so en un recinte des d'un punt de

vista estadístic, els quals per a que aquests tinguin validesa han de garantir uns determinats criteris i assumpcions.

El primer criteri que requereix la teoria estadística és disposar d'un camp acústic uniforme en la sala. D'aquesta manera l'arribada de les ones sonores a cada punt és equiprobable, i per tant, es pot assumir un camp difús sonor com s'ha explicat en apartats anteriors. L'assumpció d'un camp sonor difús converteix aquesta teoria com una aproximació, ja que aquesta situació es dona en poques ocasions. També enuncia que les dimensions de la sala han de ser superiors a la longitud d'ona, fent-la una teoria adient per a freqüències mitjanes i altes. Un altra premisa és el fet que els coeficients d'absorció de les superfícies i objectes que conformen el recinte han de tenir valors semblants. Per últim, es destaca que els resultats obtinguts han de ser considerats una aproximació de valors promig, i no instantanis, del comportament acústic de la sala en punts situats suficientment allunyats de les parets que delimiten l'espai.

Tot i que la teoria estadística no té en compte ni la geometria de la sala, i per consegüent els modes propis i ressonàncies d'aquestes, aquesta proporciona la predicció de certs paràmetres acústics amb els quals s'obté una simulació acústica de l'espai.

1.3 Criteris d'avaluació: paràmetres acústics

Qualsevol recinte disposa d'una funció principal, i cal adequar l'acústica de la sala en funció d'aquesta activitat. Un recinte destinat a la transmissió d'un missatge requereix unes determinades condicions acústiques per a que aquesta comunicació sigui adequada. D'igual manera, una sala destinada a un àmbit musical ha de garantir que l'escolta sigui adient per a la seva funció, ja sigui un estudi de gravació o de mescla.

Per a dur a terme una avaluació objectiva de les condicions acústiques, a continuació es descriuen els paràmetres acústics que s'empren. Segons l'activitat a la qual està destinada la sala, els paràmetres s'han d'ajustar per a obtenir una bona valoració subjectiva d'aquesta. Per a cada paràmetre acústic proposat es proporciona tant els valors òptims per a sales destinades a la comunicació de la paraula com per un estudi de mescla. Tot i que els valors provenen de dades objectives, estan basats en teories de diversos autors i experiments completament subjectius.

1.3.1 Soroll de fons

Definim el soroll de fons com tot aquell so que es percep en un recinte o sala quan en aquesta no es dur a terme cap activitat. La comunicació oral dins la sala es pot veure afectada per el soroll ambient produït que certa informació es vegi enmascarada, o també, pot ocasionar una pèrdua de la intel·ligibilitat de la paraula en una sala o recinte si aquest està bastant present. Tanmateix, la presència de soroll dins un estudi musical pot ocasionar tan la gravació d'aquest com la interferència en un resultat de la mescla d'una peça musical. Per tant, es podria dir que aquest és un paràmetre a minimitzar per a permetre obtenir una millor acústica de la sala.

Per a determinar el grau de malestar que provoca un determinat soroll de fons sobre un oïent de la sala es dur a terme una comparació dels nivells de soroll per a cada banda entre els 63Hz i els 8kHz tenint en compte un conjunt de corbes anomenades Noise Criteria (NC).

Aquest model de corbes va ser definit inicialment per Beranek[26] amb l'objectiu d'avaluar problemes de soroll en l'interior de sales. Les corbes originals proposades es basaven en dades les quals mostraven que l'acceptació del nivell de soroll ambient depèn tant del nivell d'interferència de la parla com el nivell. Posteriorment a la seva formulació, aquestes corbes varen ser modificades per Schultz [27] i revisades de nou per Beranek

[28, 29]. Anàlogament existeix un altre tipus de corba anomenada Noise Rating (NR) reconeguda per estàndards com l'ANSI o l'ASA, però el seu ús es més comú al Estats Units, per això, en el nostre cas emprarem les corbes NC.

A continuació es poden visualitzar diverses corbes NC corresponents a varis nivells en funció de la freqüència.

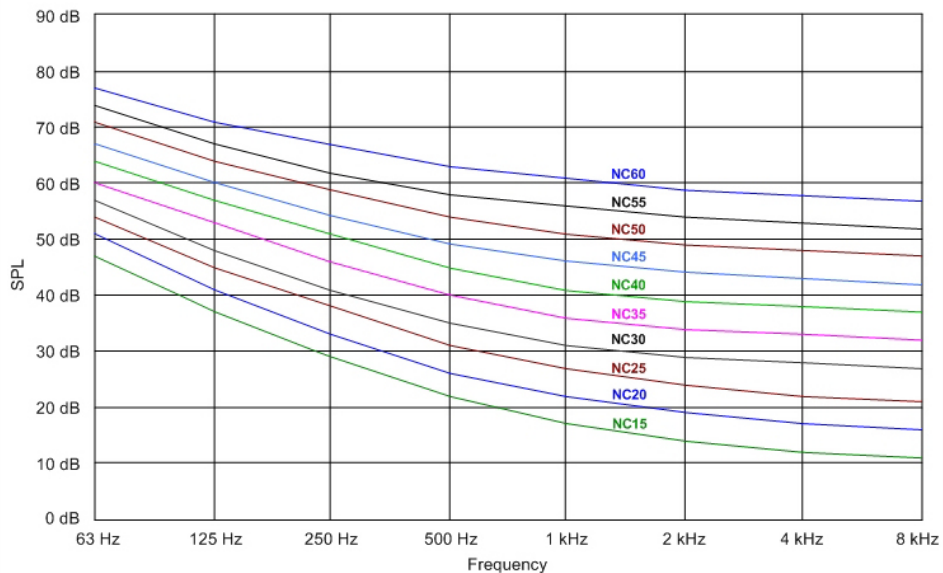


Figura 1.6: Corbes Noise Criteria NC [5]

Si ens fixem amb les corbes podem observar com aquestes segueixen la tendència de la sensibilitat de l'oïda humana en funció de la freqüència. De tal manera que per una mateixa corba NC, el nivell de pressió sonora SPL màxim permès a freqüències baixes són majors que a freqüències agudes degut al fet de ser més sensibles al augmentar la freqüència. Per a sales de conferències o aules educatives es considera un nivell recomanable de

corba NC, segons l'article S12.60 proporcionat per l'ANSI i l'ASA [30], un valor entorn els 35dBA, el qual equival aproximadament a un valor entre 20-30 dB. En quant a un estudi de música, el valor proposat oscil·la entre els 15-25dB, essent una mica inferior al proposat per a una bona transmissió de la paraula.

1.3.2 Temps de reverberació (RT)

El so es transmet des d'una font sonora emisora en totes direccions. En un recinte acústic tancat aquest so emès interactua repetidament amb les superfícies reflectants del recinte causant nombroses reflexions que decauen la seva energia a mesura que el so és absorbit per la superfície dels objectes de l'espai, obtenint així una ona resultant amb menys energia. Aquesta pèrdua d'energia ve donada per la composició del material en què l'ona ha reflectit. Com s'ha explicat anteriorment, part d'aquesta energia és absorbida pel material, d'altra és transmesa a través del material, mentre que l'energia restant es reflecteix.

Quan aquestes reflexions es barregen entre elles es produeix el fenomen de la reverberació, que es defineix com un efecte acústic que consisteix en la persistència del so després que aquest sigui produït. Per a quantificar aquest fenomen acústic s'introdueix el concepte de temps de reverberació (RT). Aquest és una mesura del temps que es requereix per un so reflectit a decaure una determinada quantitat d'energia sonora respecte un nivell inicial en un recinte després que la font emissora del so el deixa d'emetre.

El temps de reverberació depèn de la freqüència, tot i que comunament s'expressa com un sol valor si es mesura mitjançant un senyal de banda ampla de 20Hz a 20kHz, i acostuma a tenir un valor major a freqüències baixes. A més, aquest valor variarà en funció de la posició en la qual es pren la mesura en el recinte. D'aquesta manera, es sol prendre un valor promig de l'espai en què es mesura.

El valor del RT depèn tant del nivell del so com del tipus de material absorbent del qual es componen les superfícies de la sala. En una sala més reflectant, el so tarda més en disminuir el seu nivell degut a que es necessiten més reflexions per a extingir-lo, i, per tant, el temps de reverberació és gran. En canvi, el temps de reverberació es redueix quan les reflexions impacten amb superfícies absorbents, ja que en cada reflexió s'absorbeix una proporció alta del so i en poques reflexions aquest disminuirà notablement el seu nivell fent que el nivell de RT sigui petit.

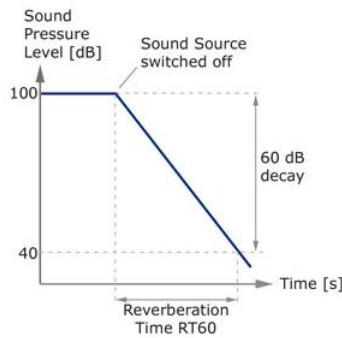


Figura 1.7: Representació del principi bàsic del temps de reverberació RT60 [6]

El físic americà Wallace Clement Sabine va desenvolupar una equació a finals dels 1890 per a calcular el temps de reverberació d'una sala que afirma l'existència d'una relació entre la qualitat de l'acústica, les dimensions de la sala i la quantitat de superfície absorbent present. Es defineix formalment el temps de reverberació com [31]

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S \cdot \alpha} \quad (1.19)$$

on V és el volum de la sala (en m^3), c és la velocitat de propagació del

so a l'aire (en $\frac{m}{s}$), S és la suma de superfícies de tota la sala (en m^2), α és el coeficient d'absorció mig.

Per a fer el càlcul del coeficient d'absorció mig α en Sabins es dur a terme mitjançant la següent equació:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (1.20)$$

On α_i és el coeficient d'absorció de cada superfície i S_i són les àrees de la superfície de la sala (m^2).

Anys després el físic acústic mexicà Carl Ferdinand Eyring afina l'equació proposada per Sabine per a casos on el valor del coeficient d'absorció és major a 0.2, obtenint la següent equació [32]

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S(-\ln(1 - \alpha))} \quad (1.21)$$

El temps de reverberació s'expressa com a un temps de decaïment i es mesura en segons. En el cas del RT60, com hem dit anteriorment, el temps es correspon amb què tarda el senyal en disminuir 60dB per sota el senyal original. Generalment és difícil generar un so suficient a la sala per a mesurar una caiguda de 60dB, especialment a baixes freqüències. Aleshores, si es té en compte l'assumpció que enuncia que el decaïment es produeix de manera exponencial, és a dir, que el nivell del so disminueix regularment amb un ratio de tants dB per segon, és suficient amb mesurar una caiguda de decibels menor i factoritzar per obtenir la caiguda corresponent a 60dB. Per exemple, es pot fer ús del RT20, que es correspon amb el temps que el so tardarà en decaure 20 dB, i aleshores multiplicar per 3, o bé utilitzar el RT30, que és el temps que el so tardarà en disminuir 30 dB, i multiplicar

per 2. També, existeix el EDT10 (early decay time), que representa l'interval de temps que es requereix per obtenir una caiguda de 10dB, i es pot extrapolar d'igual manera que els anteriors multiplicant per 6 el seu valor i obtenir el RT60 [33].

$$RT60 = RT30 \cdot 2 = RT20 \cdot 3 = EDT10 \cdot 6 \quad (1.22)$$

Si ens fixem en l'expressió proposada pel càlcul del RT60 podem observar com el temps de reverberació depèn del volum de la sala però, també, existeix una forta influència dels coeficients d'absorció de les superfícies.

Coefficient d'Absorció

Quan una ona sonora impacta amb una de les superfícies de la sala, una certa fracció d'ella es absorbida, mentre que una altra es transmesa a la superfície. Ambdues quantitats es caracteritzen per un coeficient i mantenen una relació entre elles.

El coeficient d'absorció α d'un material indica la proporció de so que es absorbit per la superfície en comparació amb el que es reflecteix a la sala. Aquest valor pren valors entre 0 i 1, essent 1 un material absorbent perfecte. Aquest coeficient s'expressa com el resultat de la relació entre l'energia absorbida E_{abs} i l'energia incident E_i , obtenint així la següent expressió [34]

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_i} \quad (1.23)$$

Aquesta expressió, tanmateix, no és la que s'utilitza en el disseny acústic ni en l'estudi de recintes. Per a aquests àmbits es té en compte la informació sobre els coeficients d'absorció proporcionats pels fabricants dels

propis materials. La gran importància del coeficient d'absorció α en l'acústica d'una sala ha ocasionat l'existència de taules i referències per a diversos materials comuns sense la necessitat d'haver de cercar el material específic per a cada un dels fabricants. Aquestes taules de coeficients d'absorció per als diferents materials es faciliten per bandes d'octava, generalment entre 125Hz fins a 4000Hz. Com a norma general, el coeficient d'absorció augmenta a mesura que s'incrementa la freqüència. Això es degut al fet que la petita dimensió de la longitud d'ona a freqüències altes provoqui una major interacció material, tant en funció del gruix o l'estructura. En certs casos l'absorció pot ser major a freqüències baixes degut a alguna mena de ressonància entre el material i la superfície. A continuació es mostra una taula d'exemple dels coeficients d'absorció d'alguns dels materials més utilitzats en l'acústica.

	Octave-Band Center Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Brick, unglazed	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick, unglazed, painted	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Carpet on foam rubber	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
Carpet on concrete	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
Concrete block, coarse	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Floors, concrete or terrazzo	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Floors, resilient flooring on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Floors, hardwood	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Glass, heavy plate	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass, standard window	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Gypsum, board 0.5 in.	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Panels, fiberglass, 1.5 in. thick	0.86	0.91	0.80	0.89	0.62	0.47
Panels, perforated metal, 4 in. thick	0.70	0.99	0.99	0.99	0.94	0.83
Panels, perforated metal with fiberglass insulation, 2 in. thick	0.21	0.87	1.52	1.37	1.34	1.22
Panels, perforated metal with mineral fiber insulation, 4 in. thick	0.89	1.20	1.16	1.09	1.01	1.03
Panels, plywood, 3/8 in.	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Plaster, gypsum or lime, rough finish on lath	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Plaster, gypsum or lime, smooth finish on lath	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03
Polyurethane foam, 1 in. thick	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87
Tile, ceiling, mineral fiber	0.18	0.45	0.81	0.97	0.93	0.82
Tile, marble or glazed	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Wood, solid, 2 in. thick	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Water surface	nil	nil	nil	0.003	0.007	0.02
One person	0.18	0.4	0.46	0.46	0.51	0.46
Air	nil	nil	nil	0.003	0.007	0.03

Figura 1.8: Taula dels coeficients d'absorció de certs materials expressats en bandes d'octaves d'entre 125Hz i 4kHz [7]

Coefficient de Reflexió

El coeficient de reflexió ρ indica la proporció del so que es reflexa quan l'ona sonora impacta amb la superfície del material de la sala. De la mateixa manera que el coeficient d'absorció, el seu valor oscila entre 0 i 1, essent 1 una reflexió perfecte. Aquest coeficient es mesura mitjançant la relació entre l'energia reflexada del so E_{ref} i l'energia incident E_i , obtenint de manera similar a l'anterior la següent expressió [34]

$$\rho = \frac{E_{ref}}{E_i} \quad (1.24)$$

Tal i com s'ha mencionat anteriorment, existeix una relació lineal entre ambdós coeficients degut a que l'energia del so es proporcional al quadrat de l'amplitud. [34]

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1.25)$$

Coefficient de l'Aire

Les propietats termodinàmiques de l'aire tenen una influència en la fracció de l'energia del so que es absorbida per l'aire. Aquesta absorció és sensible tant a la temperatura de l'aire com a la seva composició, especialment a la concentració de vapor d'aigua, així com a la freqüència del propi so. Una quantitat significativa d'energia acústica pot ser absorbida pel volum de l'aire de recintes de grans dimensions. Si la sala és de dimensions petites, el nombre de reflexions és gran i la quantitat de temps que el so està present a la sala es corresponentment petit. En aquest cas l'absorció d'energia acústica no és de gran importància. Ara bé, per a recintes grans el temps corresponent a l'ona sonora de les reflexions és major produint que l'absorció de l'aire no sigui negligible. Es considera que aquest coeficient d'absorció s'ha de tenir en compte per a volums d'una dimensió major a

500 m^3 . Aquest s'expressa amb el símbol m que fa referència a la constant d'atenuació del so en l'aire i es defineix mitjançant la següent formulació [34]

$$m = 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{50}{h} \left(\frac{f}{1000} \right)^{1.7} \quad (1.26)$$

on h és la humitat relativa de l'aire (en %) i f és la freqüència (en Hz).

La constant m s'expressa amb unitats de m^{-1} . A mesura que la freqüència augmenta el valor de m també incrementa essent més significant a freqüències altes (superiors a 1kHz) que a freqüències baixes. A continuació es pot visualitzar un gràfic que mostra els valors de la constant m en funció de la humitat a diferents freqüències en una sala amb una temperatura de 20°C. En aquest gràfic es pot apreciar com l'efecte de la humitat té la seva màxima afectació en les freqüències proporcionades entre el 5-25% d'humitat i posteriorment disminueix per a humitats majors.

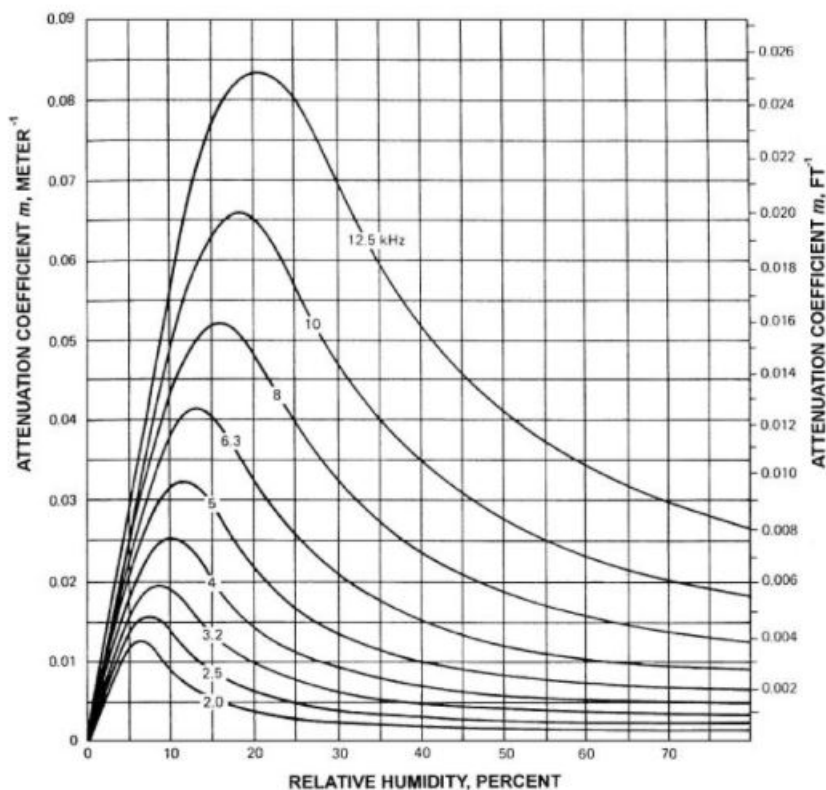


Figura 1.9: Valors de l'atenuació total del coeficient de l'aire m en funció de la humitat relativa de l'aire a 20°C i una pressió atmosfèrica normal per a freqüències entre 2kHz i 12.5kHz expressat en unitats del sistema internacional i en unitats del sistema americà. [7]

Anteriorment, al fer el plantejament del temps de reverberació no hem considerat l'efecte d'absorció de l'aire ni de la humitat que produeix al so. Aleshores, es lògic introduir l'efecte de l'absorció de l'aire a les equacions tant de Sabine com d'Eyring, obtenint així les següents expressions. [34]

$$RT_{60} = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot (S \cdot \alpha + 4mV)} \quad (1.27)$$

$$RT_{60} = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S(-\ln(1 - \alpha) + \frac{4mV}{S})} \quad (1.28)$$

El temps de reverberació és un paràmetre amb una gran importància per a definir la resposta acústica d'una sala. Un gran efecte de reverberació té un impacte negatiu sobre la intel·ligibilitat de la paraula. Per altra banda una sala amb poca reverberació reduirà la riquesa del so. A continuació a mostra un gràfic que representa la acumulació del temps de reverberació òptima en funció de l'ús que es vulgui donar al recinte.

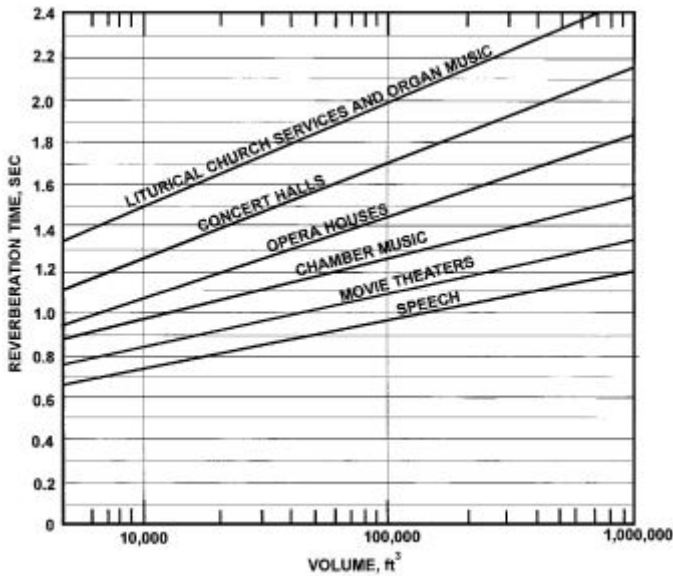


Figura 1.10: Valors típics dels temps de reverberació segons la funció principal de la sala [7]

Existeixen dos paràmetres acústics que es poden definir a partir del temps de reverberació que es corresponen amb la calidesa acústica i la brillantor.

1.3.3 Calidesa acústica (BR)

La calidesa acústica (BR) representa tant la riquesa a freqüències baixes com la sensació subjectiva de calidesa i suavitat del so d'una sala. Aquesta s'expressa com la relació entre els temps de reverberació a baixes freqüències (125-250Hz) i els temps de reverberació a freqüències mitjanes (500-1000Hz), obtenint així la següent formulació matemàtica [35]

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} \quad (1.29)$$

Un valor adequat de calidesa acústica per a sales on la principal activitat és la parla oscila entre 0,9 i 1, i per a sales musicals entre 1 i 1,3 [36]. Per incrementar la calidesa en una sala s'ha d'incrementar el temps de reverberació a freqüències baixes mentre que el temps de les freqüències mitjanes i altes es mantinguin. Això es pot aconseguir afegint material en la sala per tal que aquest absorbeixi l'energia a altes freqüències. Però, hem de tenir en compte que una absorció massa elevada a freqüències altes pot ocasionar que la sala tingui una manca de resposta a freqüències altes, la qual ens introdueix un nou paràmetre acústic que és la brillantor.

1.3.4 Brillantor (Br)

El paràmetre de la brillantor (Br) fa referència al comportament de les freqüències agudes d'una sala. De la mateixa manera que la calidesa acústica (BR), aquest paràmetre acústic s'obté a partir del temps de reverberació i serveix com un indicatiu en base a que el so dins la sala és clar i ric amb harmònics. La brillantor (Br) d'una sala es defineix com la relació entre la

suma dels temps de reverberació corresponents a freqüències altes (2kHz-4kHz) i el temps de reverberació a freqüències mitjanes (500Hz-1kHz), obtenint la següent expressió matemàtica [35]

$$BR = \frac{RT(2kHz) + RT(4kHz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} \quad (1.30)$$

Existeixen diverses opinions sobre els valors òptims de la brillantor (Br). L.L. Beranek considera una sala amb valor de brillantor adequat si aquest és superior a 0,88 [35]. En canvi, H.Arau menciona que un valor considera un valor correcte si aquest és major a 0,80 [37]. Destacar que ambdós valors es referencien amb mesures realitzades amb la sala totalment ocupada.

El temps de reverberació és un descriptor intuïtiu per a determinar les condicions acústiques d'un recinte o d'una sala. Aquest treball es centra tant en un recinte destinat a la comunicació educativa d'una universitat com en una sala per a la mescla de música. Típicament, les sales concentren la major part de l'absorció al sostre de la sala, causant un decaïment no lineal del temps de reverberació, i per això, la resposta acústica no es descriu complementament amb el temps de reverberació. Per aquesta raó emprarem també altres índexs de qualificació acústica que són rellevants per a l'estudi i l'anàlisi del comportament acústic d'un espai.

1.3.5 Índex de Claredat de la veu (C50)

L'índex de claredat (C50) és un paràmetre acústic relacionat amb la claredat de la intel·ligibilitat de la paraula. Com bé s'ha esmentat anteriorment, un dels marcs en què s'ubica aquest treball és l'estudi d'un recinte destinat a l'educació, i per tant, és imprescindible la comprensió correcte dels missatges orals i d'aquí la importància d'aquest indicador.

El principi en el que es basa l'índex de claredat C50 és el fet que a partir d'un cert límit de temps les reflexions contribueixen negativament a la comprensió de la parla. Això es degut a que causen una interacció amb la parla fent que aquesta no sigui clara per al receptor. Malgrat això, si les reflexions no excedeixen aquest límit, aquestes produeixen una contribució positiva a la intel·ligibilitat. Aquest límit de temps que separa les reflexions que contribueixen de manera positiva de les negatives és aproximadament 50ms.

Aquest paràmetre es deriva de la resposta impulsional de la sala quan es fan les medicions acústiques. El C50 es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. Es considera que un valor adequat per a garantir una bona intel·ligibilitat de la paraula ha de ser major a 2dB [4]. Per a dur a terme la quantificació de l'índex de claredat es mesura la relació de l'energia del so que arriba abans del límit de temps i l'energia del so que arriba posterior a aquest, obtenint matemàticament la següent expressió [38]

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.31)$$

1.3.6 Índex de Claredat Musical (C80)

La claredat musical (C80) és un paràmetre rellevant per a mantenir una certa intel·ligibilitat de la música, especialment quan aquesta mostra pasatges musicals ràpids. Un dels objectius d'aquest treball consisteix en l'estudi d'un recinte on la principal activitat és la mescla musical, per tant, és essencial la comprensió correcte dels diversos sons que componen la peça musical.

Aquest paràmetre de la claredat musical C80 s'utilitza per a valorar el

grau de separació entre els sons individuals que integren una composició musical. D'una manera similar al paràmetre explicat anteriorment, aquest paràmetre es deriva de la resposta impulsional, es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. L'índex de claredat musical C80 es defineix com 10 vegades el logaritme del quocient entre l'energia sonora que rep l'oient dins la sala durant els primers 80ms des de l'arribada del so directe i l'energia que arriba posteriorment. Matemàticament es pot expressar l'índex de claredat musical C80 com [39]

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.32)$$

Existeixen diversos valors recomanats per a aquest paràmetre a partir dels quals es considera un bon indicador de l'acústica musical d'una sala. L. L. Beranek [35] proposa un valor entre -4 i 0, mentre que M. Barron [40] proposa un valor entre -2 i 2, i H. Arau [37] especifica un valor entre el rang de -2 o superior a 6 en funció de l'activitat del recinte. L. Gerald Marshall [41], en funció del tipus de música, recomana diferents valors en l'índex de claredat musical, essent d'un valor de -8 a -2 per a música amb òrgans, de -2 a 2 per a música sinfònica, de 2 a 6 en quant a opera, i major a 6 per a instruments electrònics, la qual es correspon amb l'activitat majoritària que es desenvolupa en el nostre cas.

1.3.7 Definició de la veu (D50)

La definició de la veu (D50) és una mesura semblant a l'índex de claredat C50 que indica la intel·ligibilitat i la sonoritat de la paraula. Aquesta s'expressa amb % i es mesura per cada banda de freqüències entre 125Hz i 4kHz. Es defineix la definició de la veu D50 com la relació entre l'energia dels primers 50ms i el total d'energia de la resposta a l'impuls, i d'aquest manera s'obté la següent expressió [38]

$$D50 = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.33)$$

on $p(t)$ és la pressió sonora respecte al temps.

Un valor que es considera adequat per a la definició de la veu D50 en una sala, la qual la seva principal activitat és la comunicació oral, ha de ser superior a 0.5 [36]. Ara bé, H. Arau [37], per a sales ocupades, proposa un valor de 0,5 per a una sala de concerts, de 0,65 per a teatres i entre aquests dos per a operas.

A més, existeix una relació entre el paràmetre acústic de l'índex de claredat C50 i la definició de la veu D50 que facilita el càlcul d'un dels paràmetres si es coneix la informació de l'altre. Aquesta relació és fàcil d'establir i es descriu com [42]

$$D50 = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-C_{50}}{10}}} \quad (1.34)$$

1.3.8 Sonoritat o Speech Sound Level (S_{mid})

La sonoritat és un altre paràmetre acústic de gran importància per a determinar la qualitat acústica d'una sala. Aquest paràmetre de sonoritat reb dos noms diferents en funció de l'activitat de la sala. Per a recintes musicals s'anomena Força i es denota amb la lletra G, mentre que per a sales on la principal activitat és la comunicació de la paraula es denomina Speech Sound Level (S) i defineix el grau d'amplificació produït per la sala. Aquest paràmetre permet determinar tant la distribució del so com la manca d'energia en alguna banda freqüencial i s'expressa en dB. La força G o Speech Sound Level S es defineixen com la relació entre el nivell total de pressió sonora produït per una font sonora omnidireccional en una posició r d'una sala i el nivell de pressió sonora de la mateixa font omnidireccional

situada en camp lliure a una distància de 10m, el qual s'anomena nivell de referència. Per tant, podem expressar aquest paràmetre S_{mid} com [43],

$$S_{mid} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t) dt} \quad (1.35)$$

Per a dur a terme el càlcul d'aquest paràmetre acústic els valors que s'utilitzen s'obtenen fent el promig dels valors corresponent a les bandes de freqüències centrades de 500Hz a 2kHz. També, cal tenir present que l'Speech Sound Level S_{mid} depèn principalment tant de la distància de la posició del receptor com de l'energia associada a les primeres reflexions i la superfície ocupada pel públic, així com les condicions acústiques del camp sonor llunyà. Aquestes últimes depenen, fonamentalment, del coeficient d'absorció de les superfícies de la sala i de les dimensions i l'estructura del recinte.

Segons Barron [40], es defineixen uns intervals per a aquest paràmetre acústic dins dels quals es consideren adients,

$$\begin{aligned} 4 &\leq S_{mid}(0^\circ) \leq 8 \\ 2 &\leq S_{mid}(90^\circ) \leq 6 \end{aligned} \quad (1.36)$$

A més, es recomana que els valors de l'Speech Sound Level S_{mid} en tots els punts de la sala sigui superior a 0dB [36], i d'aquesta manera, assegurar que en cap punt de la sala el nivell de pressió sonora no serà inferior a l'obtingut a una distància de 10m.

1.3.9 Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%AL-Cons)

Un dels factors més importants per a la intel·ligibilitat de la paraula és l'energia acústica que rep el receptor. Generalment, les consonants tenen menor energia que les vocals, fent que les consonants exerceixin un paper més important en la intel·ligibilitat d'un missatge que no pas els símbols vocal.

Existeix un paràmetre acústic que mesura el percentatge de consonants que no són enteses pels oients d'una sala anomenat Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%ALCons). Aquest paràmetre es basa en l'estudi de la pèrdua de les consonants per part d'un grup de persones realitzades en diferents tipus de sales i, relacionant aquesta pèrdua amb les característiques de la sala.

La Pèrdua de l'Articulació de les Consonants %ALCons està directament relacionat amb el temps de reverberació RT i de la diferència entre els nivells de pressió sonora del camp directe i del camp reverberant. Aquest paràmetre s'expressa en % i, normalment, es calcula a la banda dels 2kHz al ser la més important per a la intel·ligibilitat. El %ALCons es defineix matemàticament com [44]

$$\begin{aligned}\%ALCons &= \frac{200r^2RT^2}{VQ}, \text{ per a } r \leq 3.16D_c \\ \%ALCons &= 9RT \text{ per a } r > 3.16D_c\end{aligned}\tag{1.37}$$

on r és la distància entre l'emissor i el receptor (en m), RT és el temps de reverberació de la sala (en s), V fa referència al volum de la sala (en m^3), Q és el factor de directivitat de la font emisora i D_c és la distància crítica.

Aquesta distància crítica fa referència al punt respecte la font sonora

on en què el nivell de pressió sonora del camp directe s'iguali amb el nivell de pressió del camp reverberant, la qual s'ha esmentat en l'apartat de fenòmens acústics . Aquesta distància es pot calcular mitjançant la següent expressió [34]

$$D_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}} \quad (1.38)$$

on Q és el factor de directivitat i $R = \frac{S_{tot} \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$ és la constant de la sala (en m^2)

A continuació es mostren els valors del paràmetre %ALCons per a valorar la intel·ligibilitat de la paraula en una sala [45],

%ALCons	100-33%	33-15%	15-7%	7-3%	3-0%
Intel·ligibilitat	Incomprensible	Pobre	Mediocre	Bona	Excel·lent

Taula 1.1: Quantificació de la intel·ligibilitat segons la pèrdua d'articulació de les consonants.

Aquest paràmetre al ser indicatiu de pèrdua, a major valor pitjor serà la intel·ligibilitat, i viceversa. A més, hem vist que està relacionat amb el temps de reverberació RT i amb la distància entre l'emissor i el receptor. Aquesta darrera dependència es comporta de tal manera que a menor distància entre ells, menor serà el valor %ALCons, i per tant, major serà la intel·ligibilitat. En quant al temps de reverberació RT , a menor RT , menor serà la Pèrdua de l'Articulació de les Consonants %ALCons, és a dir, es tindrà una major intel·ligibilitat.

Capítol 2

MEDICIÓ ACÚSTICA

2.1 Processament del senyal

2.1.1 Delta de Dirac

La funció delta de Dirac $\delta(x)$ és una construcció matemàtica introduïda pel físic britànic Paul Dirac. Abans de definir la funció delta de Dirac $\delta(x)$ cal destacar que aquesta no és estrictament una funció, tot i que amb molts propòsits es pot manipular com a tal. Formalment es pot definir com una funció generalitzada o com una distribució amb valor zero a tot arreu excepte a $x=0$, on el seu valor és infinitament gran, i és tal que la seva integral total és 1. Matemàticament es pot expressar de la següent manera [46]

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

i que també es limita a satisfer la identitat [47]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (2.2)$$

A continuació es pot visualitzar una representació gràfica de la funció delta de Dirac,

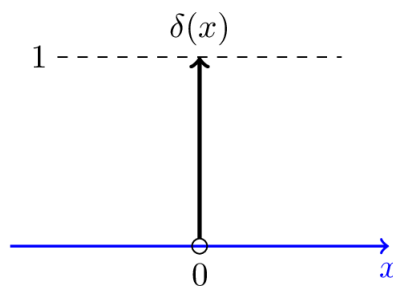


Figura 2.1: Representació gràfica de la funció delta de Dirac

2.1.2 Sistemes Lineals Invariants en el Temps (LTI)

Un sistema lineal invariant en el temps (LTI) és un tipus de sistema que com el seu propi nom indica és lineal i invariant en el temps. El fet que aquests sistemes disposin de les propietats de linealitat i invariància en el temps simplifiquen el seu estudi i faciliten la seva representació gràfica per a entendre'ls.

Linealitat

La propietat de linealitat enuncia l'existència d'una relació lineal entre la sortida i l'entrada del sistema, provocant que un canvi lineal a l'entrada impliqui un canvi lineal a la sortida. Aquesta propietat aconsegueix el principi de superposició la qual comprèn la propietat de proporcionalitat i additivitat. La primera fórmula que si l'entrada d'un sistema és escalada per un

factor, la sortida d'aquest també serà escalada per el mateix factor. D'altra banda, la propietat de additivitat promulga el fet que si l'entrada és la suma de dos senyals, al passar per un sistema lineal provoca una sortida que resulta ser la suma de cada una de les entrades individuals. Per tant, per un sistema lineal T i un temps t amb dos senyals d'entrada $x_1(t)$ i $x_2(t)$ que produeixen les sortides $y_1(t)$ i $y_2(t)$,

$$T[\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)] = \alpha T[x_1(t)] + \beta T[x_2(t)] = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t) \quad (2.3)$$

on α i β són constants.

Aquesta propietat es pot visualitzar de forma gràfica com

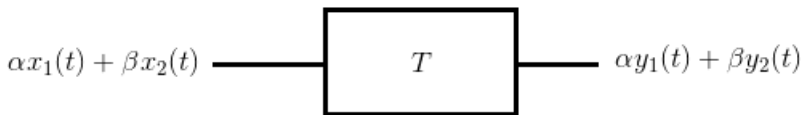


Figura 2.2: Representació gràfica de la propietat de linealitat d'un sistema LTI

Invariància en el temps

La propietat d'invariància en el temps declara que el sistema té una funció que no depèn directament del temps i tant el seu comportament com característiques són fixes. Aquesta propietat fa que la sortida del sistema donada una entrada no canviï depenent de quan s'ha aplicat l'entrada. La propietat d'invariància en el temps d'un sistema es pot expressar matemàticament com [48]

Donat un sistema amb una funció de sortida depenent del temps $y(t)$, i una funció d'entrada depenent del temps $x(t)$, el sistema T es considera

invariant en el temps si quan s'introdueix un retard en el temps en l'entrada $x(t + \delta)$, equival directament a un retard en el temps de la funció de sortida $y(t + \delta)$. Per exemple, si el temps t és el “temps transcorregut”, aleshores la “invariància de temps” implica que la relació entre la funció d'entrada $x(t)$ i la funció de sortida $y(t)$ és constant respecte al temps t :

$$y(t) = f(x(t), t) = f(x(t)) \quad (2.4)$$

Gràficament es pot interpretar la propietat d'invariància en el temps com

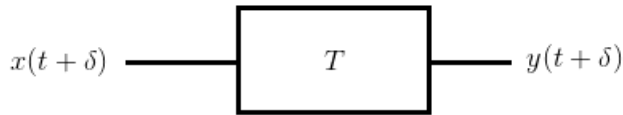


Figura 2.3: Representació gràfica de la propietat d'invariància en el temps d'un sistema LTI

2.1.3 Convolució

La convolució és una operació matemàtica que a partir de dues funcions d'entrada produeixen una funció de sortida que expressa com una de les funcions d'entrada es modifica per l'altra entrada. Donades dues funcions d'entrada f i g la convolució, denotada com $f * g$, es defineix com la integral del producte de dos funcions després que una d'elles sigui revertida i desplaçada una distància τ .

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (2.5)$$

2.1.4 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier FT és una eina matemàtica que enuncia que qualsevol senyal o funció continua $f(x)$ pot representar-se com la suma de funcions sinusoidals. D'aquesta manera la FT descompon la funció en les freqüències que la constitueixen i ens permet calcular la contribució de cada valor de freqüència a la formació del senyal. D'altra banda proporciona una representació de la funció diferent caracteritzada per les funcions periòdiques cosinus i sinus. D'aquesta manera la FT fa referència tant a la representació de la funció en el domini freqüencial com a l'operació matemàtica que associa la funció del temps a la seva representació en freqüència.

Definim la transformada de Fourier FT d'una funció f com [49]

$$F(k) = F_x[f(x)](k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi i k x} dx \quad (2.6)$$

De manera anàloga es defineix la transformada inversa de Fourier com

$$f(x) = F_k^{-1}[F(k)](x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k)e^{2\pi i k x} dk \quad (2.7)$$

2.1.5 Transformada de Fourier amb finestra (STFT)

Com bé s'ha dit anteriorment, mitjançant la transformada de Fourier FT es pot obtenir informació sobre la distribució d'energia d'un senyal $x(t)$ a través de les seves components freqüencials. Per això, aquesta eina matemàtica és molt útil per l'anàlisi de senyals estacionaries ja que proporciona una bona resolució freqüencial. Ara bé, si l'objectiu és determinar de forma precisa quan o on estan presents les diferents components en freqüència, aquesta proporciona una mala resolució temporal, fent-la inadequada per a senyals no estacionaries on el contingut espectral varia amb el temps.

Per a resoldre aquest problema de resolució temporal s'introdueix l'eina de la transformada de Fourier amb finestra (Short-Time Fourier Transform, STFT) que aporta una variació a la transformada de Fourier fent ús de l'enfinestrament. El procediment per a calcular la STFT consisteix en dividir el senyal $x(t)$ de temps en segments més curts d'igual longitud. D'aquesta manera es pot assumir que en cada un d'aquests segments el senyal és estacionari i es pot procedir a calcular la transformada de Fourier.

En temps continu, el senyal $x(t)$ o funció a ser transformada es multiplica per una funció de finestra la qual és diferent de zero per un instant de temps molt petit. Aleshores, la transformada de Fourier del senyal resultant es desplaça per l'eix temporal fent una representació de dos dimensions del senyal. Aquest procés es pot expressar matemàticament com [50],

$$STFT [x(t)] (\tau, w) \equiv X(\tau, w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-i\omega t}dt \quad (2.8)$$

on $w(t)$ és la funció de finestra, comunament una finestra de Hann o una Gaussiana centrada en zero, $x(t)$ és la senyal a la qual es vol aplicar la transformada, $X(\tau, w)$ és la transformada de Fourier de $x(t)w(t - \tau)$, una funció complexa que representa la fase i la magnitud del senyal sobre el temps i la freqüència.

En temps discret, el senyal $x(t)$ o funció a ser transformada es pot dividir en fragments que normalment es solapen entre ells per a reduir les possibles irregularitats en els límits. A cada una d'aquestes divisions s'aplica la transformada de Fourier i el resultat s'emmagatzema en una matriu de valors complexos que conté la magnitud i la fase per a cada punt en temps i en freqüència. Matemàticament aquest procediment s'expressa mitjançant la següent expressió,

$$STFT [x[n]] (m, w) \equiv X(m, w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n - m]e^{-jwn} \quad (2.9)$$

on $x[n]$ és el senyal i $w[n]$ la finestra, m és de temps discret i w és continu, tot i que normalment ambdues es quantitzen i són de temps discret,

De la mateixa manera que la transformada de Fourier, la STFT és invertible. Per tant, el senyal original es pot recuperar de la transformada mitjançant la transformada inversa STFT, la qual ve donada per la següent expressió [51],

$$x(t)w(t - \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau, w)e^{jw\tau}dw \quad (2.10)$$

2.2 Resposta a l'impuls

Assumint la immobilitat de l'emissor i el receptor, el recinte acústic o sala en el qual estan immersos es pot considerar com un sistema lineal i invariant en el temps caracteritzat per la seva resposta a l'impuls $h(t)$. Com el seu propi nom indica es defineix la resposta a l'impuls com el senyal de sortida d'un sistema quan s'ha excitat amb un senyal d'entrada corresponent a un impuls. El fet d'utilitzar com a senyal d'entrada un impuls fa que totes les propietats d'un sistema LTI estiguin presents en la seva resposta. D'aquesta manera es pot emprar la resposta a l'impuls per a descriure el sistema LTI i predir la sortida per a qualsevol senyal d'entrada. Això es degut a què l'impuls conté totes les freqüències i, llavors, defineix la resposta d'un sistema LTI per a totes les freqüències, fent possible observar el comportament del sistema en funció del temps.

Centrant-nos en acústica, aquest sistema es correspon a una sala o un recinte acústic. Quan un so és emès cap al receptor, el so que es rep en la

posició del receptor $y(t)$ és la convolució del senyal emès $x(t)$ i la resposta impulsional del sistema $h(t)$ com s'expressa a continuació,

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2.11)$$

La relació entre el senyal d'excitació i el senyal mesurat es pot representar en el domini freqüencial fent ús de la transformada de Fourier com

$$Y(w) = X(w) \cdot H(w) \quad (2.12)$$

on $H(w)$ és la funció de transferència del sistema.

En l'àmbit de l'acústica, la mesura de la resposta a l'impuls és un afer important ja que a partir d'aquesta es poden descriure paràmetres acústics que són de gran rellevància. Un mètode habitual per a mesurar-la consisteix en aplicar un senyal conegut a l'entrada del sistema i mesurar la sortida d'aquest. El fet que es conegui el senyal d'excitació facilita la mesura de la resposta a l'impuls a partir de la deconvolució entre senyal mesurat i el senyal d'excitació. Per tant, l'elecció del senyal d'excitació del sistema acústic i de la tècnica de deconvolució per obtenir la resposta impulsional són dos elements de gran importància. Cal destacar que el senyal emissor ha de ser reproduïble perfectament. A més, tant el senyal d'excitació com la tècnica de deconvolució han de maximitzar la relació senyal soroll de la resposta a l'impuls així com eliminar possibles aparicions d'artefactes no lineals.

2.2.1 L'impuls ideal

L'impuls acústic ideal es defineix com a un senyal impulsional de duració infinitament petita, amb molta intensitat i d'energia unitària. Dit d'una altra manera ha de tenir un espectre pla, és a dir, que la seva energia sigui igual per a totes les freqüències, que no tingui discontinuïtats i tingui un factor de cresta baix, que fa referència a un valor baix per la relació entre el pic

d'amplitud i el valors RMS del senyal. A més, s'ha d'utilitzar un senyal d'excitació que permeti la seva repetició i, com s'ha dit anteriorment, amb un nivell suficientment alt per obtenir una bona relació senyal soroll (SNR).

Teòricament, qualsevol senyal d'entrada $x(t)$ que disposi d'un cert ample de banda pot ser utilitzat per estimar la resposta impulsional $h(t)$ d'un sistema, tot i que el senyal més simple per fer-ho és la funció delta de Dirac δ explicada amb anterioritat. Fent ús d'aquesta funció, l'impuls a l'entrada produeix un impuls idèntic a la sortida. D'aquesta manera tots els senyals que passen a través del sistema no experimenten cap canvi. Aleshores, coneixent el senyal d'entrada $x(t)$ i el senyal mesurat a la sortida $y(t)$ del sistema T es pot expressar aquesta idea de deconvolució matemàticament com

$$y * x^{-1} = h * x * x^{-1} = h * \delta = h \quad (2.13)$$

Recordem que la funció delta de Dirac conté totes les freqüències amb la mateixa intensitat i ens permet obtenir la resposta del sistema per a totes les freqüències. A nivell teòric aquesta formulació es simple, però a la pràctica ocasiona certes dificultats per a dur-la a terme.

2.2.2 Aproximació de l'impuls ideal

Principalment es pot pensar en reproduir un impuls mitjançant un dispar d'una pistola, explosionar un globo o aplaudir. La principal avantatge d'aquest mètode és el seu cost baix. Tot i que aquests són capaços de generar un senyal impulsional d'alta intensitat sobre un gran rang freqüencial, ens proporcionen un baix control de la directivitat i d'una duració més llarga que no pas una mostra, com seria el cas ideal de la funció delta de Dirac. Això ocasiona que no es pugui assegurar la correcta distribució d'energia per a sobrepassar el soroll de fons en tot l'espectre d'interès. A més, aquest mètodes no són repetitius i un senyal d'excitació difereix d'un altre.

D'aquesta manera es perd fiabilitat en la mesura de la resposta impulsional perquè no es pot assegurar les mateixes característiques per a tots els senyals d'excitació.

També, es pot pensar en sintetitzar digitalment l'impuls i reproduir-lo a través d'un altaveu ja que aquests tenen bones propietats de reproductibilitat i directivitat. Tot i això és gairebé impossible reproduir-lo a alt nivell i per un temps molt curt sense ocasionar distorsions de fase i freqüència que impossibilitin un càlcul correcte de la resposta impulsional.

2.2.3 Soroll rosa i soroll blanc

La següent tècnica aprofita el fet que la resposta a l'impuls es pot calcular amb un altre senyal sempre hi quan aquesta estigui ben definida i tingui l'energia suficient a cada freqüència.

Aquesta segona tècnica proposa fer ús dels senyals soroll rosa o soroll blanc. El soroll blanc o white noise és un senyal aleatori que proporciona el mateix nivell d'intensitat per a totes les freqüències, fent així que la seva densitat espectral sigui constant o plana si s'expressa de forma lineal. De manera similar, el soroll rosa o pink noise també proporciona el mateix nivell d'intensitat per a totes les freqüències, però té el mateix nivell d'energia per a cada octava. D'aquesta manera aquest senyal mostra un espectre pla si es visualitza mitjançant una escala logarítmica o exponencial.

El fet d'escollir un senyal que conté la difusió d'energia en funció del temps permet que una font sonora com l'altaveu sigui capaç de reproduir-la. Mitjançant una operació matemàtica entre el senyal d'excitació i el senyal mesurat es pot calcular la resposta impulsional.

La riquesa del contingut freqüencial que proporcionen aquestes dues senyals contraresten amb l'aleatorietat de les mostres generades. Aquest

fet provoca entre d'altres factors que l'espectre sigui discontinu, que no es determini correctament la fase, i que la resposta a l'impuls mostri soroll residual, fent aquesta tècnica inapropiada per obtenir uns resultats fiables.

2.2.4 El senyal MLS

Un altra tècnica que es proposa és utilitzar soroll pseudo-aleatori per a evitar el problema de les senyals aleatòries. Aquest soroll és un senyal determinista que procura simular un so aleatori que en realitat no ho és. Aquest tipus de senyal consisteix en una seqüència periòdica de soroll de llargada inversa a la freqüència a la que es repeteix. El senyal més utilitzat és el senyal denominat maximum length sequences (MLS) que és una seqüència periòdica binària d'enters generada per registres de torns digitals i una porta lògica XOR. D'aquesta manera s'obté un tren d'impulsos format per impulsos discrets que prenen normalment els valors enters +1 i -1, i s'ajusten a 0 i 1 respectivament per a que la seqüència sigui simètrica.

El senyal MLS proporciona diversos avantatges que el fan de gran utilitat per varies aplicacions d'àudio. Aquest té un espectre pla com el d'un impuls ideal i una fase erràtica que varia pseudo-aleatòriament si la freqüència té una densitat de probabilitat uniforme. D'aquesta manera el senyal MLS té el mínim factor de cresta, l'energia del senyal és màxima i la relació senyal soroll és òptima.

Ara bé, aquest senyal té un principal inconvenient i és que té una forta dependència amb la linealitat del sistema. Aquesta tècnica requereix d'un sistema lineal i invariant en el temps perfecte que no ocasioni problemes de fase que poden aparèixer amb petites no-linealitats. En el nostre cas es vol mesurar la resposta impulsional d'una sala i la mesura ha de ser precisa, per tant l'ús d'aquesta tècnica no és adequada degut a aquest problema.

2.2.5 Escombrat logarítmic

La darrera tècnica i la més efectiva i eficient per al càlcul de respostes a l'impuls és la que fa ús d'un escombrat freqüencial o sweep. Per a fer l'escombrat s'utilitza una funció sinusoidal o to pur que incrementa la seva freqüència amb el temps, anant aquesta de freqüències baixes a altes. Aquest escombrat es pot fer de manera lineal o logarítmica, tot i que la més utilitzada és la logarítmica perquè fa possible proporcionar més energia a la zona crítica, és a dir, a baixes freqüències i anar més ràpid a alta freqüència.

Formalment es defineix l'escombrat logarítmic com

$$x(t) = \sin \left[\frac{2\pi f_{inf} T}{\ln(\frac{2\pi f_{sup}}{2\pi f_{inf}})} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln(\frac{2\pi f_{sup}}{2\pi f_{inf}})} - 1 \right) \right] \quad (2.14)$$

on f_{inf} és la freqüència inicial, f_{sup} la freqüència final i T la duració.

Un dels avantatges que ens proporciona aquest senyal d'excitació és que el seu senyal invers es correspon amb el propi senyal d'excitació però invertit sobre l'eix temporal. Per tant, es pot calcular la resposta impulsionar mitjançant l'operació de deconvolució explicada anteriorment. Un altre punt a favor és el fet que aquest senyal permet excitar només una freqüència alhora, a diferència d'altres senyals d'excitació com el soroll o l'impuls on totes les freqüències són excitades simultàniament i l'energia es distribueix uniformement en tot l'ample de banda. El fet d'excitar només una freqüència permet concentrar tota l'energia del senyal en un ample de banda estret, i tanmateix aconseguir una millor relació senyal soroll millor amb la mateixa quantitat d'energia a canvi d'un alt cost computacional. L'eficiència computacional d'aquesta tècnica és inferior en vers a les tècniques descrites anteriorment. D'altra banda, amb aquest senyal d'excitació existeix la possibilitat d'analitzar una única finestra temporal i ignorar els efectes de les reflexions i modes normals analitzant només el so directe

com si fós una sala anecoica.

2.3 Deconvolució

Un cop determinats els diferents tipus de senyals d'excitació del sistema acústic, cal determinar un altre element indispensable com és la tècnica de deconvolució amb la qual obtindrem la resposta impulsional. La deconvolució és l'operació inversa a la convolució i ens permet revertir els efectes de la convolució de la sortida mesurada.

Recordem que generant un senyal d'excitació $x(t)$, reproduint-lo a través d'un sistema acústic $h(t)$, que es correspon amb el recinte acústic, i capturant-lo obtenim el senyal mesurat $y(t)$. Per obtenir la resposta impulsional del sistema acústic $h(t)$ s'ha d'aplicar una tècnica de deconvolució entre senyal mesurat i el senyal d'excitació. Aquesta operació de deconvolució consisteix en aplicar una convolució lineal del senyal de sortida $y(t)$ amb el filtre invers $f(t)$ pre-processat del senyal d'excitació, expressat matemàticament amb la següent formulació

$$h(t) = y(t) * f(t) \quad (2.15)$$

A continuació es mostra un diagrama de blocs per a visualitzar gràficament el procediment,

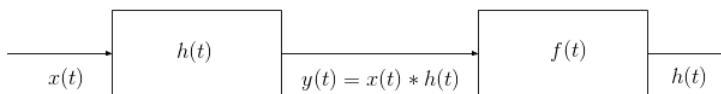


Figura 2.4: Diagrama de blocs del procés de la deconvolució d'un senyal

2.4 El Filtre Invers

Com hem vist, la deconvolució de la resposta d'impuls requereix la creació d'un filtre invers $f(t)$ amb la capacitat de convertir el senyal d'excitació inicial en la funció delta de Dirac δ retardada. Aquesta característica o propietat es pot expressar matemàticament com

$$x(t) * f(t) = \delta(t - K) \quad (2.16)$$

El filtre invers $f(t)$ es genera tenint en compte quin és el senyal d'excitació. En el nostre cas utilitzem el sweep logarítmic el qual és un senyal estable i causal, és a dir, depèn només dels valors presents i passats de l'entrada, no de futurs valors. Aquest filtre es dissenya mitjançant un sweep logarítmic invertit temporalment, retardat per obtenir un senyal causal i amb una modulació de l'amplitud per compensar la caiguda espectral.

Escrita d'una altra manera, si recordem que l'equació que defineix l'escombrat logarítmic és la següent,

$$s(t) = \sin[\theta(t)] = \sin[K \cdot (e^{\frac{t}{L}} - 1)] \quad (2.17)$$

on,

$$K = \frac{T \cdot \omega_1}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})}, L = \frac{T}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} \quad (2.18)$$

on ω_1 i ω_2 són els extrems del rang freqüencial i T es correspon amb el temps de duració en segons.

Es pot definir la freqüència instantània com

$$\omega(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{K}{L} \cdot e^{\frac{t}{L}} \quad (2.19)$$

L'energia en qualsevol freqüència d'un senyal que varia la seva freqüència és proporcional al temps que està excitant aquella freqüència en particular. D'aquesta manera es pot definir l'energia $E(t)$ d'un escombrat logarítmic en funció del temps com,

$$E(t) \propto \frac{1}{\omega'(t)} = \frac{L^2}{K} \cdot e^{-\frac{t}{L}}, \quad (2.20)$$

on $\omega'(t)$ és la taxa de canvi de freqüència expressada en temps.

Anàlogament es pot expressar l'energia $E(j\omega)$ en funció de la freqüència mitjançant la següent expressió

$$E(j\omega) = \frac{kL^2}{K} \cdot \frac{1}{L + j\omega} \quad (2.21)$$

on k és una constant de proporcionalitat.

Intuitivament es pot deduir que l'augment de la freqüència suposa una disminució de l'energia. Si observem l'equació veiem que hi ha un factor $\frac{1}{\omega}$ el qual al doblar la freqüència esdevé $\frac{1}{2\omega}$ i suposa una caiguda d'energia de 3dB, $10\log_{10}(\frac{1}{2})$. Dit d'una altra manera, l'espectre d'energia cau -3dB/oct tant en el senyal d'excitació original com l'invertit temporalment.

Per a compensar aquestes diferències d'energia i obtenir un espectre pla cal aplicar una modulació d'amplitud. Farina [52] enuncia que per generar el filtre invers només cal invertir temporalment el senyal d'excitació, i després aplicar-ne un factor per a reduir la amplitud amb un nivell de 6dB/oct, començant per 0dB i acabant amb $-6\log_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$. Aplicant aquesta correcció d'amplitud de 6dB/oct al senyal invertit fa que es compensi amb el senyal d'excitació.

El factor de correcció de l'amplitud es pot obtenir trobant el temps Δt en què la funció de l'escombrat logarítmic té una freqüència instantània

igual a N vegades la actual. Aquesta condició es pot expressar matemàticament com

$$N \cdot \frac{d}{dt} \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} - 1 \right) \right] = \frac{d}{dt} \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} \cdot \left(e^{\frac{t+\Delta t}{T} \cdot \ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} - 1 \right) \right] \quad (2.22)$$

i obtenint la següent expressió en funció del temps,

$$\Delta t = T \cdot \frac{\ln(N)}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} \quad (2.23)$$

i anàlogament es pot expressar en funció de la freqüència com,

$$N = e^{\frac{\Delta t \cdot \ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})}{T}} = e^{\frac{\Delta t}{L}} \quad (2.24)$$

2.5 No Linealitat dels Sistemes Acústics

Quan el senyal mesurat $y(t)$ es convoluciona amb el filtre invers $f(t)$ explicat anteriorment obtenim gairebé una resposta impulsional perfecte amb artefactes causats per les distorsions harmòniques del sistema de reproducció del senyal en uns certs instants de temps previs a la resposta impulsional.

Els altaveus o sistemes acústics que produeixen vibracions o emeten un so es comporten de manera diferent en funció de l'amplitud. Aquesta dependència de l'amplitud és un indicador de no linealitat en el sistema que acostuma a mostrar una distorsió del senyal, especialment a amplituds altes. Un altre tipus de distorsió o no linealitat que proporciona el sistema és la distorsió harmònica. Aquest efecte de distorsió consisteix en la generació de noves components espectrals que són inexistents en el senyal d'excitació. Aquestes components es generen normalment a freqüències

múltiples de la fonamental, d'aquí el seu nom distorsió harmònica. Els resultats d'aquesta distorsió depenen fortament amb les propietats de l'estímul o senyal d'excitació, com per exemple la freqüència, l'amplitud o la fase. Una altra distorsió que es produeix donada la no linealitat del sistema és la distorsió d'intermodulació, la qual genera components a freqüències que són sumes o diferències de la freqüència de senyal d'excitació i els seus múltiples. La darrera distorsió que produeixen els altaveus és de caire aleatori i no determinista i es manifesta en forma de soroll o de distorsió del so.

Quan el senyal d'excitació $x(t)$, el qual està format per una amplitud constant i seguit d'uns instants de silenci, es reproduïx per un altaveu i la resposta impulsional es capta a través d'un micròfon, el senyal resultant conté els efectes de la reverberació de la sala, el soroll i les distorsions no lineals explicades anteriorment.

El fet d'utilitzar l'escombrat freqüencial logarítmic possibilita fer la deconvolució de la resposta impulsional del sistema o sala i simultàniament separar la resposta impulsional de les distorsions ocasionades pel sistema acústic, ignorant les distorsions harmòniques que apareixen abans de la resposta impulsional principal. Arribat a aquest punt, és lògic pensar en aplicar un enfiestament per extreure només el segment que conté la resposta principal i descartar les distorsions, el qual es pot realitzar fàcilment situant la resposta impulsional a l'inici i eliminant tot el contingut anterior.

2.6 Directional Audio Coding (DirAC)

El Directional Audio Coding (DirAC) és un mètode paramètric de representació del so en l'espai que sosté que no és necessari reproduir perfectament el camp sonor, sinó que és suficient en reproduir-lo perfectament en el sentit en què els humans el percebem. El model de DirAC assumeix

que amb una representació temporal i freqüencial similar a la del sistema auditori humà, és adequat codificar i decodificar el camp sonor local amb un conjunt d'àudios i amb dos paràmetres que són el la direcció d'arribada (direction of arrival, DOA) de l'energia sonora incident i la difusió (diffuseness). El mètode de DirAC consta de diverses fases però en el nostre cas la fase que ens interessa és l'anàlisi. En aquesta fase es fa una estimació de la DOA i la difusió en una única localització depenent del temps i de la freqüència. La primera es relaciona amb la localització i la direcció, mentre que la difusió es relaciona amb la reverberació o l'extensió de la font sonora representada per la coherència interaural.

2.6.1 B-Format

La matriu de micròfons utilitzada en el mètode de DirAC ha de permetre l'anàlisi de la direcció i la difusió d'una àmplia regió de freqüència. Es per això que es fa ús de senyals B-format com a senyals d'entrada estàndard per a aquest mètode. Aquest format representa una matriu de micròfons situats en la mateixa localització espacial i produeix quatre canals de micròfons amb diferents característiques direccionals. Un primer micròfon omnidireccional el qual és proporcional a la pressió p , i els altres tres micròfons amb directivitat figura de vuit situats ortogonalment als eixos de les coordenades cartesianes x , y i z respectivament, que son proporcionals a les components de velocitat acústica v_x , v_y i v_z . Els senyals corresponents obtinguts per a cadascun d'aquest micròfon són $w(t)$, $x(t)$, $y(t)$ i $z(t)$ respectivament, on t és l'índex temporal.

Aquest senyal B-format pot ser creat sintèticament a partir d'una gravació mono o gravada utilitzant micròfons especials que disposen d'aquesta característica.

En cas de sintetitzar el camp sonor a partir d'un senyal mono $s(t)$, el senyal corresponent al micròfon omnidireccional $W(t)$ s'escala per un factor

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ mentre que els altres tres senyals que contenen la informació de la direcció s'expressen en funció de l'angle d'elevació i azimuth, representant-se així els senyals amb les següents expressions matemàtiques [53],

$$\begin{aligned} W(t) &= \frac{s(t)}{\sqrt{2}} \\ X(t) &= s(t) \cdot \cos\phi \cdot \cos\delta \\ Y(t) &= s(t) \cdot \sin\phi \cdot \cos\delta \\ Z(t) &= s(t) \cdot \sin\delta \end{aligned} \tag{2.25}$$

on $s(t)$ és un senyal mono, ϕ és l'azimut i δ l'angle d'elevació de la font sonora.

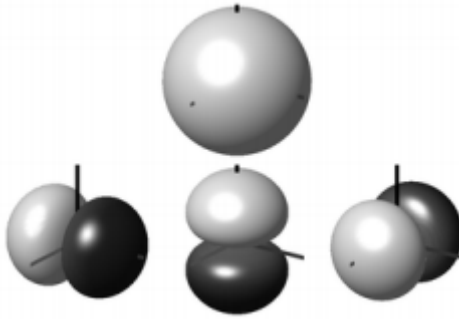


Figura 2.5: Representació 3D dels patrons de directivitat polar d'un micròfon omnidireccional a la part superior i tres figures de vuit a la part inferior direccionats cap a cada un dels eixos. [8]

2.6.2 Anàlisi DirAC

Els paràmetres de DirAC s'extreuen a partir de l'anàlisi de l'energia basada en la pressió sonora $p(t)$ i la velocitat acústica $u(t)$ en la posició de gravació.

El processat es dur a terme de manera separada per a bandes de freqüència les quals s'han d'obtenir del senyal original. Per tant, el primer pas per al càlcul dels paràmetres consisteix en passar a domini freqüencial el senyal. Per a fer-ho normalment s'utilitzen dos plantejaments que es corresponen amb fer ús de filtres de bandes o de la transformada de Fourier amb finestra STFT. El sistema auditori humà separa les freqüències audibles en bandes de diferent tamany. La STFT conté una resolució fixe, és a dir, les de freqüència que s'obtenen són del mateix tamany mentre que el filtres de bandes possibiliten crear una transformació similar a la proporcionada pel sistema auditori. Tot i aquesta possibilitat d'aproximar-nos a la recreació del sistema auditori humà i donat que un dels objectius del DirAC és la no necessitat de reproduir perfectament la percepció humana, en el nostre cas s'ha decidit emprar la STFT per la seva rapidesa i eficàcia en els resultats.

En el domini de la STFT, es denota la pressió sonora p com $P(k,n)$ i la velocitat acústica u com $U(k,n)$, on k i n són els índex de la transformada en freqüència i temps. Com s'ha dit anteriorment, el micròfon omnidireccional capta un senyal proporcional a la pressió sonora i el figura de vuit obté un senyal proporcional a la velocitat. Aquestes magnituds físiques es relacionen amb el senyal B-format per el següent conjunt de relacions [54],

$$\begin{aligned} P(k, n) &= W(k, n) \\ \vec{U}(k, n) &= -\frac{1}{\sqrt{2}Z_0} \vec{X}'(k, n) \end{aligned} \quad (2.26)$$

on $\vec{X}'(k, n) = [X(k, n)Y(k, n)Z(k, n)]^T$ és el vector dels senyals provinents del gradient de pressió en B-format, $Z_0 = c\rho_0$ és la impedància de l'aire i el factor $\sqrt{2}$ és degut a la convenció dels senyals B-format.

Assumint que per a cada frame de freqüència el camp sonor és estacionari, i està format per una ona plana i un camp difús perfecte, es pot fer

una estimació de la direcció de l'ona plana mitjançant el flux d'energia, expressat pel vector d'intensitat activa [55].

$$\vec{I}_a(k, n) = \frac{1}{2} \Re \left\{ P(k, n) \cdot \vec{U}(k, n)^* \right\} \quad (2.27)$$

Utilitzant les equacions anteriors, es pot expressar el vector \vec{I}_a en termes de senyal B-format com,

$$\vec{I}_a(k, n) = -\frac{1}{2\sqrt{2}Z_0} \Re \left\{ W(k, n) \cdot \vec{X}'(k, n)^* \right\} \quad (2.28)$$

La direcció d'arribada DOA de l'ona sonora s'estima com el vector oposat al vector d'intensitat activa, ja que volem la direcció en què l'objecte es troba respecte el micròfon, i s'expressa com,

$$\vec{u}_{DOA}(k, n) = -\frac{\vec{I}_a(k, n)}{\|\vec{I}_a(k, n)\|} \quad (2.29)$$

o en termes de senyal B-format com,

$$\vec{u}_{DOA}(k, n) = \frac{\Re \left\{ W(k, n) \cdot \vec{X}'(k, n)^* \right\}}{\left\| \Re \left\{ W(k, n) \cdot \vec{X}'(k, n)^* \right\} \right\|} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\delta \\ \sin\phi \cdot \cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

on $\phi(k, n), \delta(k, n)$ són les estimacions dels angles incidents d'azimut i d'elevació respectivament i $\|\cdot\|$ és la norma euclidiana.

Un cop obtingut el vector unitari que es correspon amb la direcció d'arribada de la font sonora es converteix a coordenades esfèriques. Existeixen diverses variacions del sistema de coordenades esfèriques en l'àmbit matemàtic i físic, però en el nostre cas s'ha utilitzat el sistema de coordenades més utilitzat en audio espacial. En aquest sistema, r és la distància al punt

des del centre de coordenades, $\phi \in [-\pi, \pi]$ és l'angle azimuth, que descriu la posició en l'eix horitzontal del pla, i $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$ és l'elevació o altitud, i descriu la posició en l'eix vertical del pla.

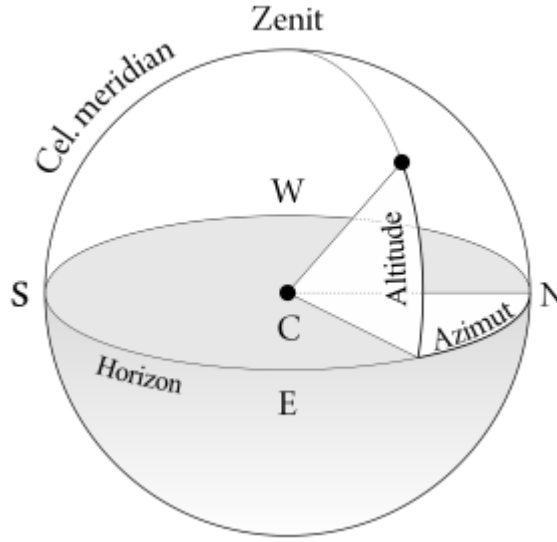


Figura 2.6: Sistema de coordenades esfèriques utilitzat en astronomia, equivalent al sistema utilitzat en el nostre cas. La coordenada N es correspon amb l'eix positiu X i l'altitud és equivalent a l'elevació[9]

Qualsevol punt de l'espai expressat en coordenades cartesianes (x, y, z) es pot referenciar a coordenades esfèriques (r, ϕ, δ) utilitzant les següents expressions matemàtiques [53],

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \phi &= \arctan \frac{y}{x} \\ \delta &= \arcsin \frac{z}{r} \end{aligned} \tag{2.31}$$

Un cop calculat el primer paràmetre DOA, l'altre paràmetre a estudiar es correspon amb la difusió, la qual es pot definir com una proporció d'energia sonora que oscil·la localment [56]. Aquest paràmetre de difusió mostra quant directiu és el camp sonor prenent valors entre 0 i 1. Una ona plana té un valor de difusió mínim quan el transport d'energia es correspon amb la densitat total d'energia, i màxim per a un camp sonor completament difús, quan el transport d'energia és nul. Es defineix la difusió del camp sonor com la relació entre la intensitat i la densitat d'energia, definint-se aquest vector d'energia del camp sonor com [55]

$$E(k, n) = \frac{\rho_0}{4} \left\| \vec{U}(k, n) \right\|^2 + \frac{1}{4\rho_0 c^2} |P(k, n)|^2 \quad (2.32)$$

i en termes de senyal B-format com,

$$E(k, n) = \frac{1}{4\rho_0 c^2} \left[\frac{\left\| \vec{X}'(k, n) \right\|^2}{2} + |W(k, n)|^2 \right] \quad (2.33)$$

i obtenint així la següent expressió per a calcular el paràmetre de difusió

$$\psi(k, n) = 1 - \frac{\left\| \langle \vec{I}_a(k, n) \rangle \right\|}{c \langle E(k, n) \rangle} \quad (2.34)$$

i expressat amb senyal B-format com,

$$\psi(k, n) = 1 - \frac{\sqrt{2} \left\| \langle \Re \left\{ W(k, n) \cdot \vec{X}'(k, n)^* \right\} \rangle \right\|}{\langle |W(k, n)|^2 + \left\| \vec{X}'(k, n) \right\|^2 / 2 \rangle} \quad (2.35)$$

on $\langle \cdot \rangle$ denota la mitjana en temps i $(*)$ el conjugat.

Capítol 3

MÈTODE DE MEDICIÓ

3.1 Implementació

Coneixent el procés de la deconvolució podem prosseguir amb la implementació d'un mètode que dugui a terme aquest procediment.

El primer pas consisteix en crear el nostre senyal d'excitació a partir del qual dissenyarem el filtre invers per a obtenir la resposta impulsional. Com bé s'ha dit anteriorment utilitzarem l'escombrat logarítmic tant per les seves característiques com per la facilitat que ens proporciona per idear el filtre invers. Per tal de realitzar unes mesures acústiques en tot el rang audible, el senyal d'excitació ha de cobrir tot l'espectre audible que va des de 20Hz fins a 20kHz. Per assegurar-nos que no interfereixin possibles problemes de transitoris a l'inici i al final del senyal, la freqüència inicial escollida és $f_{inf} = 10Hz$ i la freqüència final $f_{sup} = 22000Hz$.

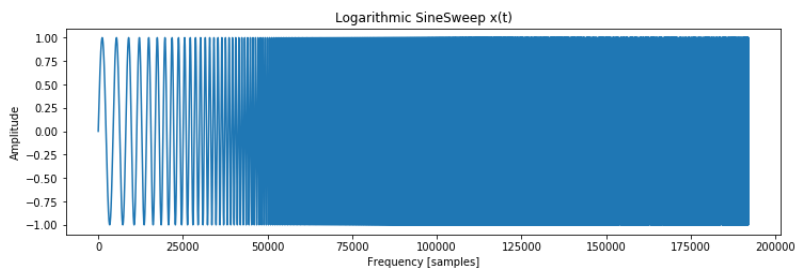


Figura 3.1: Gràfic del senyal d'excitació en domini temporal

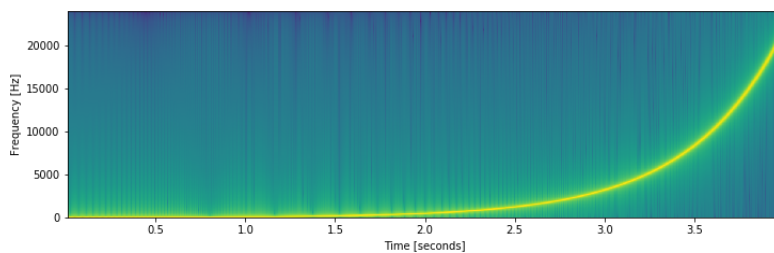


Figura 3.2: Espectrograma del senyal d'excitació

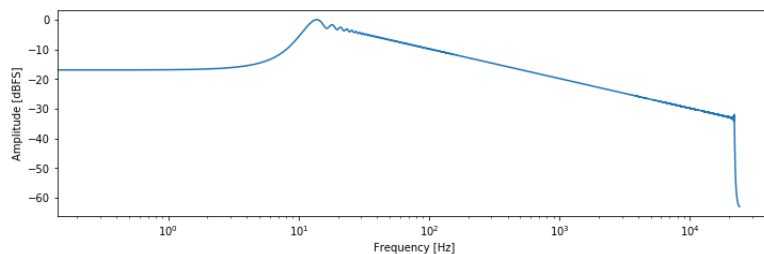


Figura 3.3: Espectre freqüencial del senyal d'excitació expressat en dBFS

Un cop hem creat el nostre senyal d'excitació continuem amb la implementació del filtre invers. Anteriorment hem determinat que el fet d'usar

aquest senyal d'excitació ens simplifica la creació del filtre invers, essent aquest un escombrat freqüencial revertit temporalment amb una certa modulació d'amplitud. Aleshores, utilitzant els mateixos paràmetres de freqüència inferior i superior, així com la mateixa durada obtenim el filtre invers.

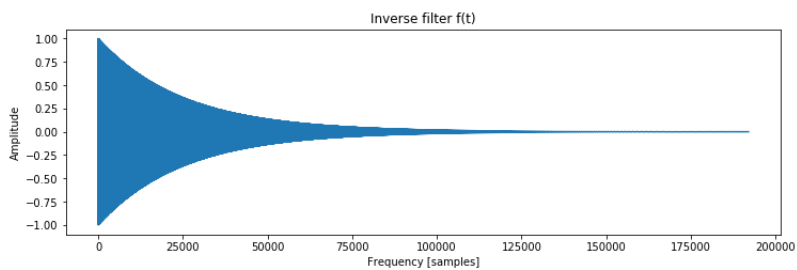


Figura 3.4: Gràfic del filtre invers en domini temporal

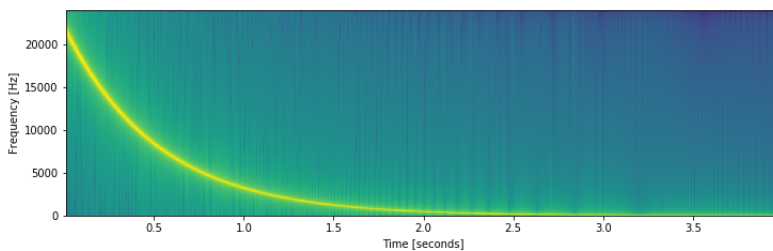


Figura 3.5: Espectograma del filtre invers

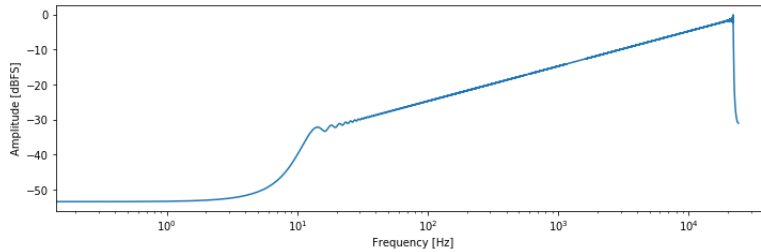


Figura 3.6: Espectre freqüencial del filtre invers expressat en dBFS

Recordem que un dels requeriments inicials del filtre invers és la capacitat de convertir el senyal d'excitació inicial en la funció delta de Dirac retardada. Aleshores, per a determinar si la creació del filtre invers és correcte, si aquest es convoluciona amb el senyal d'excitació obtindrem la funció delta degut a que és l'element d'identitat de la convolució.

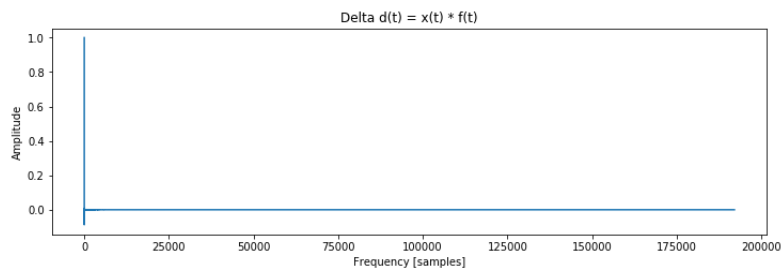


Figura 3.7: Gràfic del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers en domini temporal

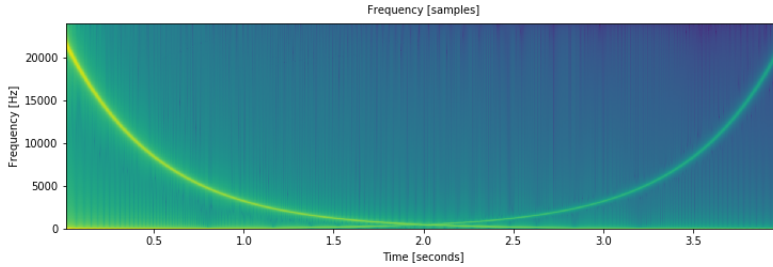


Figura 3.8: Espectrograma del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers

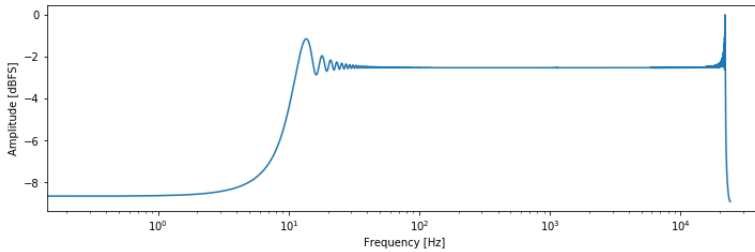


Figura 3.9: Espectre freqüencial del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers expressat en dBFS

Si ens fixem amb els espectres de cada un d'aquest senyals es pot observar com la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers creat a partir d'aquest senyal presenten un espectre pla. Això es dona gràcies a la correcció d'amplitud de 6dB/oct al senyal invertit que es compensa amb la caiguda d'energia de l'escombrat logarítmic.

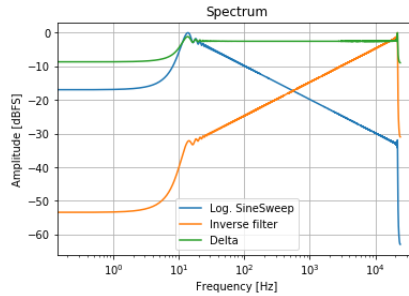


Figura 3.10: Espectre freqüencial del senyal d'excitació, el filtre invers i el resultat de la convolució entre ells expressat en dBFS

Un cop hem comprovat que el nostre filtre invers té les característiques requerides, el següent pas del procés consisteix en convolucionar el sweep logarítmic amb una resposta impulsional la qual coneixem. D'aquesta manera es simula el senyal obtingut per un micròfon després de l'excitació que proporciona la sala o el recinte acústic.

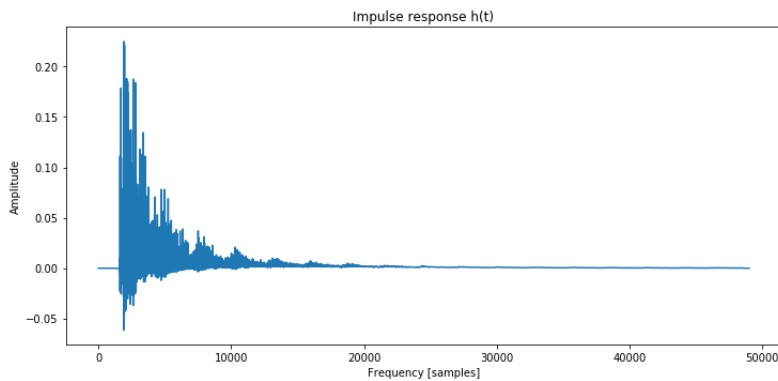


Figura 3.11: Gràfic de la resposta a l'impuls en domini temporal

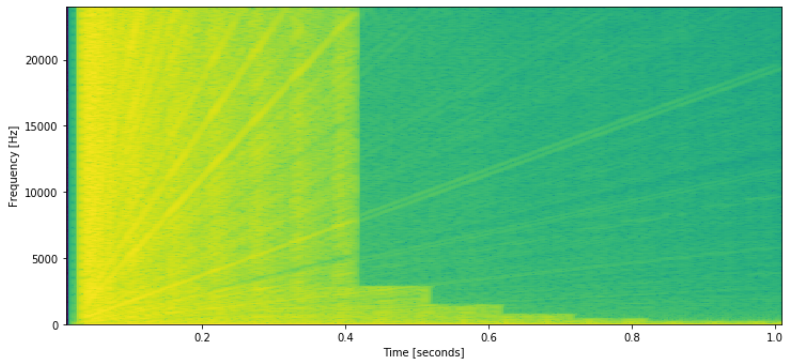


Figura 3.12: Espectrograma de la resposta a l'impuls

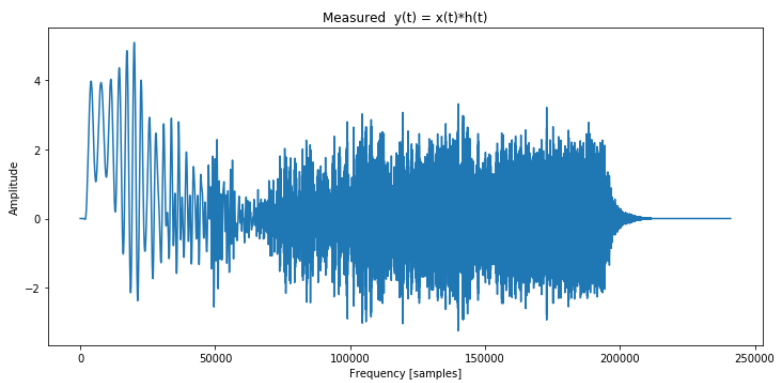


Figura 3.13: Gràfic del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i la resposta a l'impuls en domini temporal

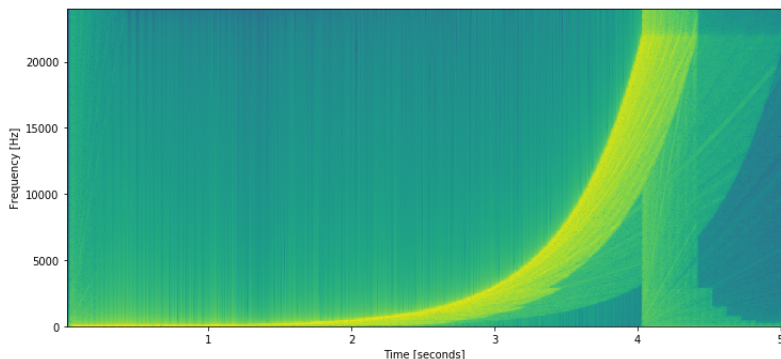


Figura 3.14: Espectrograma del resultat de la convolució entre el senyal d'excitació i la resposta a l'impuls

El darrer pas consisteix en l'obtenció d'una estimació de la resposta impulsional. Aquesta estimació s'obté mitjançant la convolució de la simulació del senyal mesurat amb el filtre invers dissenyat inicialment.

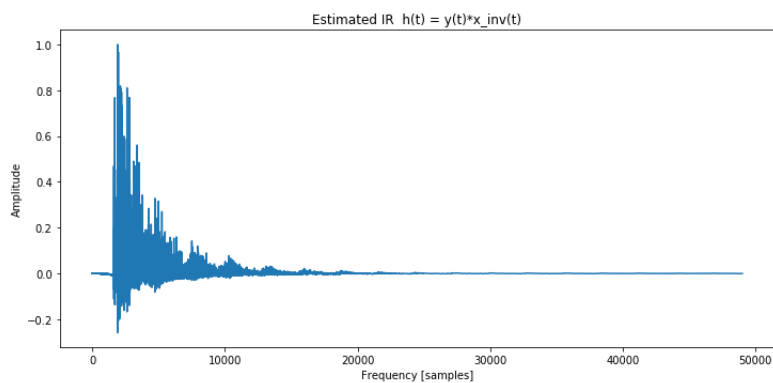


Figura 3.15: Gràfic de l'estimació de la resposta a l'impuls utilitzant el mètode en domini temporal

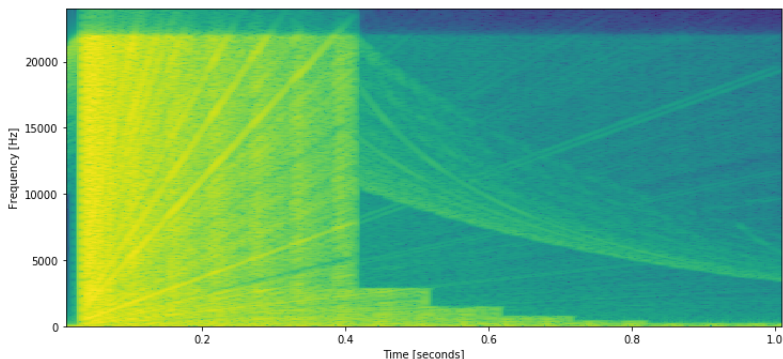


Figura 3.16: Espectrograma de l'estimació de la resposta a l'impuls utilitzant el mètode

3.2 Validació

El fet que coneguem la resposta impulsional ens permet fer una comparació amb l'estimació de la resposta impulsional obtinguda després de tot el procés. Per a quantificar la similitud entre les respostes a l'impuls s'ha utilitzat l'error quadràtic mig (EQM), conegut com Mean Squared Error (MSE) en anglès. Aquest quantificador mesura la mitjana dels errors al quadrat d'un estimador, és a dir, la diferència entre l'estimador i el que s'estima. Donat un vector d' n prediccions, i essent Y el vector de valors d'observació i \hat{Y} el vector dels valors predits, es pot determinar la mesura del MSE com,

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.1)$$

Per a interpretar el valor obtingut d'aquesta mesura cal saber que un valor de zero és l'ideal i es correspon amb una exactitud perfecta entre els valors predits i els de l'estimador.

En la simulació realitzada anteriorment el valor obtingut al fer el càlcul del MSE entre la resposta impulsional i la seva estimació ha estat de $4.75 \cdot 10^{-4}$, el qual és un valor que ens afirma que la implementació del mètode és correcte.

Tot i així, per a validar el mètode es pot emprar una base de dades amb gravacions d'escombrats logarítmics a partir de les quals es pot aplicar el procés de deconvolució per obtenir la resposta impulsional. Per a fer la validació del mètode, Angelo Farina [57] proporciona una gravació tant del sweep com del filtre invers, així com de la convolució entre ells dos. Aplicant el mètode i mitjançant el MSE podem determinar si el mètode funciona correctament.

Primerament s'observa com el sweep logarítmic proporcionat difereix tant en les freqüències inferior i superior, així com la durada. En aquest cas la freqüència inferior es correspon amb un valor de 20Hz, la freqüència superior a 1kHz i tenen una durada d'un segon.

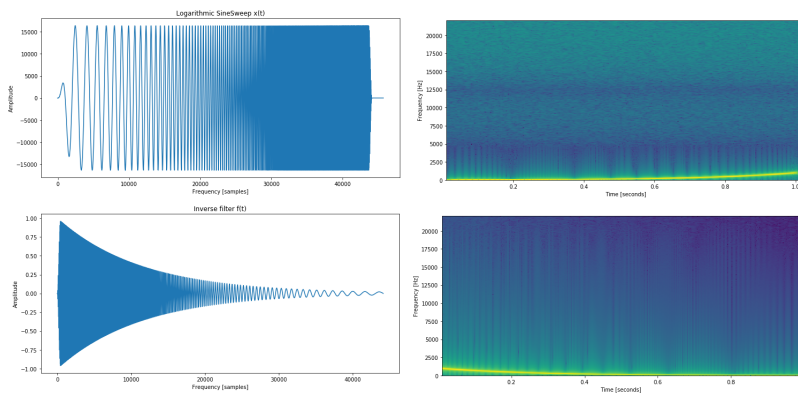


Figura 3.17: Gràfics corresponents a l'escombrat logarítmic i el filtre invers proporcionats per la base de dades de Farina en domini temporal i espectral

Com hem dit anteriorment, en aquesta base de dades es facilita la convolució entre el senyal d'excitació i el filtre invers, el qual ens ha de mostrar una funció delta de Dirac. Aleshores, amb el mètode es pot realitzar aquesta operació i mitjançant el MSE podem determinar la similitud entre la convolució proporcionada per Farina i l'obtinguda amb el mètode. La mesura de similitud ens mostra un valor $7.78 \cdot 10^{-13}$ amb el qual podem determinar que els primers passos del mètode funcionen correctament.

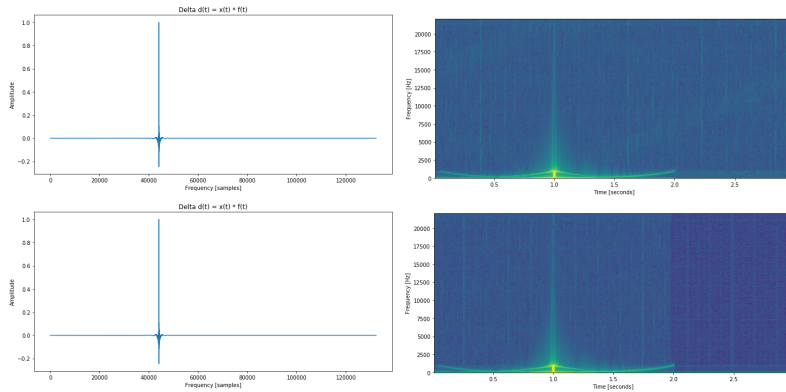


Figura 3.18: Gràfic en domini temporal i espectrograma corresponent al resultat de la convolució l'escombrat logarítmic i el filtre invers proporcionats per la base de dades de Farina i la convolució ja proporcionada per la base de dades

Per a continuar amb la validació del mètode cal convolucionar el senyal d'excitació subministrat per la base de dades i convolucionar-lo amb una resposta impulsional coneguda.

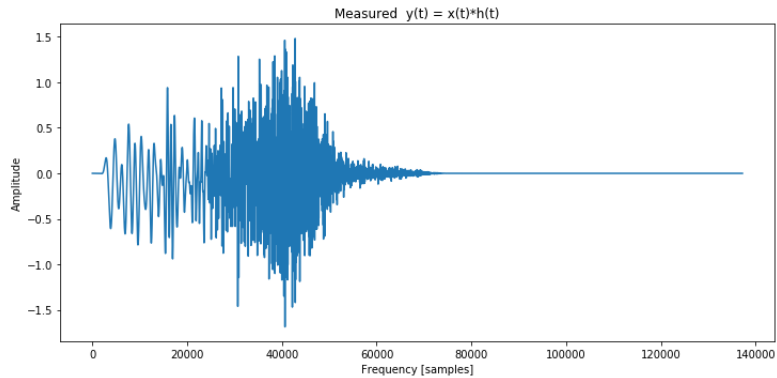


Figura 3.19: Gràfic del resultat de la convolució entre la resposta impulsional i el senyal d'excitació en domini temporal

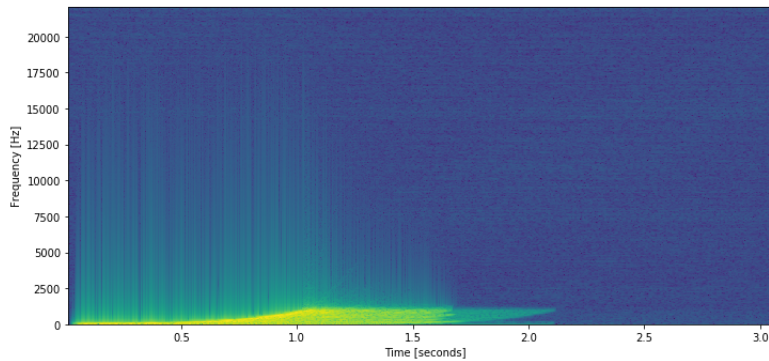


Figura 3.20: Espectograma del resultat de la convolució entre la resposta impulsional i el senyal d'excitació

Un cop obtingut aquest senyal cal fer l'operació de convolució amb el filtre invers, també proporcionat per Farina, i d'aquesta manera obtenir una estimació de la resposta impulsional. Aplicant de nou la mesura del MSE entre la resposta impulsional coneguda i l'estimada mitjançant el mètode

amb les gravacions proporcionades per la base de dades de Farina. En aquest cas el valor obtingut és de $8.85 \cdot 10^{-3}$, per tant, s'ha validat el mètode i es pot afirmar que el mètode implementat funciona correctament.

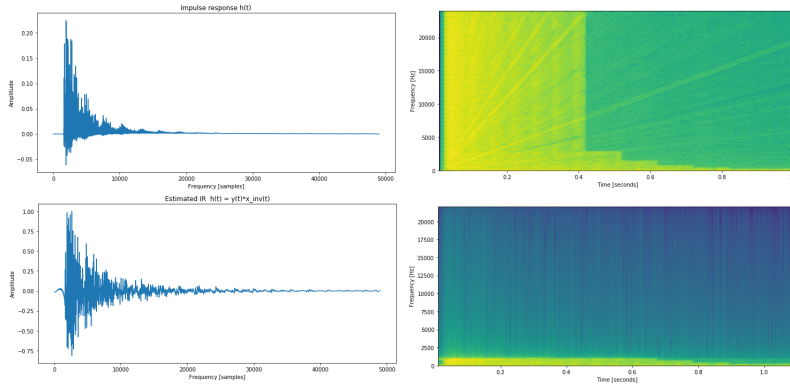


Figura 3.21: Gràfic en domini temporal i espectograma corresponent a la resposta a l'impuls i la seva estimació utilitzant el mètode

3.3 Càlcul del RT60 a partir de la resposta impulsional

Un cop hem obtingut la resposta impulsional $h(t)$ del nostre sistema o recinte acústic podem realitzar el càlcul dels paràmetres acústics especificats en apartats anteriors.

Per a extreure el paràmetre acústic del temps de reverberació el primer que cal fer és filtrar la resposta a l'impuls $h(t)$ en bandes de freqüència, obtenint així un senyal la resposta a l'impuls filtrada $h_f(t)$. Això es degut a que el temps de reverberació varia en funció de la freqüència a la qual es mesura i la posició en què es pren dins la sala. Tot i que s'assumeix el fet que el camp sonor és difús i que el decaïment del so és el mateix en cada

posició de la sala, s'ha de considerar la dependència respecte les bandes freqüencials. Per això, es pot filtrar la resposta impulsional utilitzant filtres d'octava o d'un terç d'octava. L'espectre audible d'àudio en éssers humans va desde 20Hz a 20kHz, per tant, si fem ús de filtres d'octava el podem dividir en 11 bandes d'octaves, o bé en 31 bandes si utilitzem filtres d'un terç d'octava. Aleshores, per a cada banda freqüencial, la meitat de l'octava inferior i superior vé donada per la següent fórmula $f_n^{low} = f_n/2^{\frac{1}{2}}$ i $f_n^{high} = f_n \cdot 2^{\frac{1}{2}}$ en el cas dels filtres d'octava i per $f_n^{low} = f_n/2^{\frac{1}{6}}$ i $f_n^{high} = f_n \cdot 2^{\frac{1}{6}}$ les corresponents als filtres d'un terç d'octava. En quant al tipus de filtre el més utilitzat és el filtre de Butterworth de tercer ordre, el qual otorga una resposta en freqüència plana i una caiguda de 18dB per octava.

Obtinguda la resposta impulsional filtrada $h_f(t)$ el següent pas és suavitzar aquest senyal el màxim possible abans de convertir-lo a l'escala logarítmica. Per a fer això s'utilitza la Transformada de Hilbert H , la qual és una eina matemàtica per descriure l'envolvent complexa d'un senyal modulat per una portadora real. La transformada H d'una funció real $s(t)$ es defineix com la convolució d'aquest senyal real $s(t)$ i la resposta a l'impuls $\frac{1}{\pi t}$. L'objectiu d'aplicar aquesta transformada és crear un senyal analític

$$h_A(t) = h(t) + j\tilde{h}(t) \quad (3.2)$$

on $\tilde{h}(t)$ és la Transformada de Hilbert de la resposta impulsional i j és un nombre complex.

Coneixent que el senyal analític és complexe, mitjançant la representació de fasors podem determinar que aquest ve expressat per l'amplitud i la fase.

$$h_A(t) = A(t) \cdot e^{j\psi(t)} \quad (3.3)$$

on $A(t)$ és l'envolvent del senyal i ψ la fase instantània.

En el nostre cas només estem interessats en l'envolvent del senyal, que es correspon amb la magnitud del senyal analític. A continuació es pot visualitzar la resposta impulsional filtrada i la seva envolvent calculada mitjançant la transformada H .

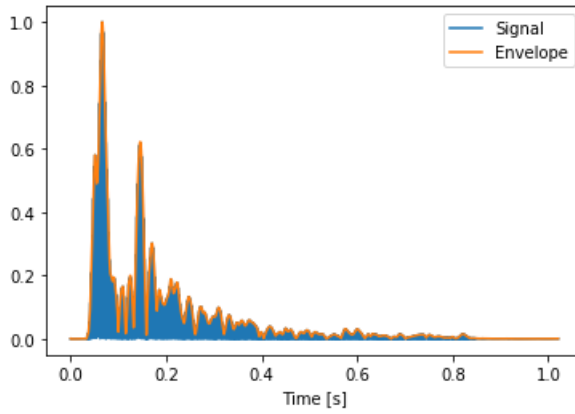


Figura 3.22: Representació gràfica de la resposta impulsional filtrada i l'envolvent

Tot i haver suavitzat la resposta impulsional cal una darrera suavització del senyal. En aquest cas es fa ús dels filtres de mitjana mòbil o moving average filters en anglès. Aquests són un filtre passa baix de resposta impulsional finita que agafen L mostres del senyal d'entrada, calculen la mitjana d'aquestes L mostres i produeixen una única mostra de sortida.

Es defineix l'equació discreta d'un filtre de mitjana mòbil de L mostres amb un vector d'entrada x i el vector de sortida y com,

$$y[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x[n - k] \quad (3.4)$$

Anàlogament la resposta en freqüència d'un filtre de mitjana mòbil s'expressa de la següent manera,

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f L)}{L \sin(\pi f)} \quad (3.5)$$

Un cop hem filtrat el senyal $h_f(t)$ amb el filtre de mitjana mòbil amb una finestra de L samples, es procedeix a passar a escala logarítmica el senyal $A(t)$ convertint-lo així en una corba d'energia $E(t)$ la qual és una versió suavitzada de l'envolvent de la Transformada de Hilbert en escala logarítmica.

La conversió a escala logarítmica es dona mitjançant l'expressió,

$$E(t) = 20 \log_{10} \frac{A(t)}{\max A(t)} \quad (3.6)$$

El següent pas consisteix en aplicar el mètode d'Integració de Schroeder a l'envolvent per a suavitzar i fer més senzills els càlculs. Aquest mètode proporciona una corba que s'obté mitjançant la integració endarrere del quadrat de la resposta impulsional. D'aquesta manera ens proporciona una corba de decaïment plana i fàcil d'implementar mitjançant la següent expressió matemàtica,

$$L(t) = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_t^\infty h^2(\tau) d\tau}{\int_0^\infty h^2(\tau) d\tau} \right] \quad (3.7)$$

Aleshores, per a fer el càlcul del paràmetre acústic del temps de reverberació es necessari realitzar una interpolació lineal entre la corba de decaïment obtinguda amb l'integració de Schroeder i la funció lineal $L = A \cdot t + B$ en el rang que es vulgui calcular segons el paràmetre. Com s'ha explicat en apartats anteriors no és possible tenir un rang dinàmic de 60dB, per tant, el rang en què es fa la interpolació és limitat i s'extrapola el resultat.

Un cop feta aquesta regressió lineal, es pot calcular el temps de reverberació fent ús del gradient d'aquesta línia i utilitzant la següent expressió matemàtica

$$RT = \frac{-60}{A} \quad (3.8)$$

on A és el coeficient de la corba treta de la línia de la interpolació en dB/s.

Capítol 4

CAS PRÀCTIC: HOME STUDIO

4.1 Simulació teòrica

Abans de realitzar les mesures dels diversos paràmetres acústics del recinte o sala, normalment, es dur a terme una simulació teòrica de l'espai per a predir quin serà el comportament d'aquesta en vers a la propagació del so. Mitjançant aquesta simulació s'obté una primera impressió de quina serà l'actuació acústica de la sala i d'aquesta manera es poden prendre mesures a priori. Com s'ha explicat en apartats anteriors, en funció de l'activitat de la sala cal ajustar l'acústica per a què aquesta es desenvolupi correctament. En el nostre cas, al tractar-se d'una sala destinada a la mescla de música la finalitat és correctiva, ja que l'objectiu desitjat és una sala que no afegeix coloració al so.

Per a fer la simulació teòrica s'ha de tenir en compte com és l'espai que es vol estudiar perquè aquest condiciona principalment l'acústica del recinte. Per a dur a terme una simulació teòrica cal determinar tant les

dimensions de les superfícies i objectes com el material del qual estan fets. En aquest estudi, la simulació teòrica té en compte el mínim mobiliari, que es correspon amb les primeres mesures que posteriorment es fan.

La sala en què es centra aquest estudi està formada per quatre parets de guix que conformen una habitació amb unes dimensions de 2.32m d'alçada, 2.63m de llarg i 2.28m d'ample. La paret trasera conté una porta de fusta de 2.10m d'alçada i 88.5cm d'ample. Una de les parets laterals inclou tant una finestra de dimensions 1.53m d'alçada i 1.31m d'amplada com un radiador de 47.7cm d'ample, 56.6cm d'alçada i 9.5cm de grossor ubicat sota la finestra. Per últim, hi ha quinze panells absorbents d'escuma acústica envoltats per quatre llistons de fusta situats en la paret frontal. Cada un d'aquests panells absorbents té unes dimensions de 30 cm d'amplada i alçada i 5 cm de profunditat. Els llistons tenen una alçada de 4.3cm i 5.4cm de grossor, mentre que hi ha dues llargades diferents, essent la primera de 89.5cm i l'altre de 159cm.

Un cop conegut l'espai a analitzar, cal conèixer els coeficients d'absorció de cada un dels materials que conformen el mobiliari de l'habitació,

Material	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Paret de maó amb guix	0,10	0,10	0,04	0,02	0,02	0,02
Fusta sòlida	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Vidre comú	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Alumini	0,15	0,10	0,06	0,08	0,10	0,05
Poliuretà	0,07	0,30	0,37	0,70	1,00	0,97
Fibra de fusta	0,10	0,19	0,40	0,79	0,55	0,77

Taula 4.1: Coeficients d'absorció acústica dels materials que componen la sala expressats en terços d'octava [10]

Tenint en compte la superfície formada per a cada un d'aquests materials en la sala, es pot realitzar la simulació tant del paràmetre del temps de reverberació com el coeficient d'absorció mig.

Freqüència	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Temps de Reverberació (RT60)	0,54	0,56	1,07	1,08	0,90	0,94
Coef.Absorció Mig	0,12	0,11	0,06	0,06	0,07	0,07

Taula 4.2: Valor del temps de reverberació RT60 i el coeficient d'absorció mig en terços d'octava

Per al càlcul del temps de reverberació s'ha utilitzat la fórmula de Sabine degut a que els coeficients de són inferiors a 0.2, tal i com s'ha explicat anteriorment en la descripció d'aquest paràmetre acústic. A més, s'ha estimat una velocitat del so a una temperatura de 20°C fent-lo el més aproximat a les condicions atmosfèriques en què es duen a terme les gravacions.

Observant els resultats obtinguts de la simulació, podem observar com, en el nostre cas, el temps de reverberació a freqüències baixes és menor que a freqüències mitjanes i altes. Aquests valors oscil·len entre un mínim de 0.53s a la freqüència de 125Hz i un màxim de 1.08s a 1kHz. En la descripció del temps de reverberació es fa referència a expressar-lo com a un únic valor que prové del promig dels obtinguts, essent aquest 0,84s. L'activitat principal de la sala és la mescla i producció de música electrònica. Es considera un valor òptim del temps de reverberació oscil·la entre 0.2s i 0.5s en funció del tipus de música que es mescla [58]. Reduir el temps de reverberació ens ocasiona una habitació més seca i, anàlogament, l'increment del temps de reverberació comporta una sala més viva.

Segons aquesta simulació teòrica, la sala requereix una sèrie de tractaments acústics per a millorar la propagació del so per a l'activitat desitjada. Cal recordar que la simulació ha estat realitzada tenint en compte el mínim mobiliari possible i, a l'afegir els mobles la interacció amb el so es veu afectada.

4.2 Procediment de les medicions

Aquest capítol explica detalladament el procés de medició per a l'estudi acústic de la sala, l'equip necessari per a fer-ho possible, tant de software com de hardware, i el procediment emprat.

La metodologia que s'ha utilitzat per a l'anàlisi de l'acústica de la sa-

la es basa en la captació de la resposta impulsional i, a partir d'aquesta, determinar els paràmetres acústics explicats anteriorment. Aquest identificadors acústics extrets de la resposta impulsional ens permeten avaluar el comportament del so en el recinte i prendre decisions de millora.

4.2.1 Equipament tècnic

Per a l'estudi de la sala es requereix un cert equipament per a la reproducció, captació, emmagatzemament i processament de les dades.

Si bé es cert que el sistema de reproducció ha de ser una font sonora omnidireccional, per a excitar la sala en totes direccions i per a totes les freqüències audibles, en aquest anàlisi s'ha utilitzat un altaveu amb una certa directivitat. Això es degut a la similitud del patró de directivitat en què s'utilitza habitualment el sistema de reproducció en aquesta sala. La font sonora utilitzada és un model F5 de la marca Adam. Aquest és un monitor d'estudi de 5" de camp proper amb un rang freqüencial de 52Hz a 50kHz que ens abasta l'interval que es vol estudiar.



Figura 4.1: Adam F5, monitor actiu de camp proper

El sistema de captació ens permet captar la resposta de la sala en vers al senyal d'excitació que es reproduïx a través del sistema de reproduc-

ció. Aquesta captació s'ha realitzat mitjançant el micròfon Rode NT1A, el qual és un micròfon de condensador de gran diafragma amb un patró de directivitat cardioide i un rang freqüencial de 20Hz a 20kHz.



Figura 4.2: Micròfon de condensador RODE NT1-A

Per a enviar el senyal al sistema de reproducció i captar-lo es requereix d'una interfície d'àudio amb unes certes característiques tècniques per a la reproducció i captura del senyal. La interfície d'àudio emprada en aquest estudi acústic és l'Scarlett 2i4. Aquests darrers nombre fan referència al nombre de preamplificadors microfonics que conté, tot i que amb un ja n'és suficient per al nostre estudi. Mitjançant aquesta targeta de so també tenim control sobre el nivell del sistema de reproducció a través del qual es reproduceix el senyal d'excitació.



Figura 4.3: Interfície d'àudio Scarlett 2i4

Per a l'emmagatzemament i processament s'empra un ordinador o computadora Acer Travelmate b117-M. Aquest ordinador compta amb l'Audacity, un software de reproducció i gravació, que ens permet crear el senyal d'excitació desitjat i rebre la captació del micròfon. La computadora conté també el programa Spyder a través del qual s'ha dut a terme la implementació, en llenguatge de programació Python, dels paràmetres acústics que determinen l'eficiència acústica de la sala.



Figura 4.4: Ordinador portàtil Acer Travelmate B117-M

4.2.2 Metodologia

Aquests quatre elements principals formen la cadena bàsica d'àudio per a aquest estudi. El circuit del senyal d'aquesta cadena s'inicia des del programa Audacity, a través del qual es genera un senyal d'excitació. Degut a les característiques i simplificacions que el senyal escombrat logarítmic aporta, explicades anteriorment en l'apartat teòric, s'ha utilitzat un sweep logarítmic de 7s de duració per excitar un temps adient cada una de les freqüències d'entre 10Hz i 22kHz. Les freqüències inicial i final són superiors a les percebudes per l'espectre humà per evitar les no-linealitats del sistema de reproducció.

Un cop generat el senyal d'excitació s'envia a la sortida de la interfície d'àudio per a ser reproduïda per dos autoamplificats. La situació del parell d'altaveus és l'estàndard proposat per la reproducció estèreo. En aquesta, l'oient experimenta la millor imatge estèreo si la distància entre els altaveus és la mateixa que la distància entre l'oient i cada un dels altaveus, formant un triangle equilàter entre els altaveus i el receptor amb angles de 60° . En aquest estudi els altaveus han estat situats a l'alçada habitual en què es troben sobre la taula, que es correspon amb m i separats una distància d'1m.

En quan el senyal d'excitació es reproduït pels dos altaveus, el micròfon capta el so i l'envia per un dels canals d'entrada de la interfície d'àudio, que s'enregistrarà al software Audacity. Per a aquest estudi només s'ha tingut en compte una posició d'emissió provinent de dues fonts sonores i un punt de recepció. Aquest es troba a una alçada de 1,20m que es correspon amb l'alçada mitjana d'una persona asseguda.

Un cop realitzades les diverses gravacions, tant amb tot el mobiliari de l'habitació com amb el mínim possible, aquestes es troben enregistrades a l'Audacity. Cal obtenir el filtre invers per a convolucionar-lo amb les gravacions i obtenir així la resposta a l'impuls, i poder estudiar els paràmetres acústics. Anteriorment s'ha explicat la simplicitat d'aquest filtre invers quan el senyal d'excitació és un escombrat logarítmic, essent aquest un sweep logarítmic invertit que es crea amb el propi software de l'Audacity.

Per últim, cal exportar tant el filtre invers com les gravacions captades pel micròfon com arxius d'àudio independents, amb format WAV, per a poder fer el càlcul dels paràmetres mitjançant el codi de Python implementat.

La finalitat del codi de Python és fer el càlcul dels paràmetres acústics a partir de la resposta impulsional de la sala. Aquesta resposta impulsional s'obté aplicant el procés de deconvolució explicat en l'apartat teòric del

treball. Aleshores, mitjançant la resposta impulsional s'aplica el còmput de cada un dels paràmetres especificats anteriorment per a valorar objectivament l'acústica del recinte.

4.3 Anàlisi dels resultats

En aquest apartat es presenten els resultats dels paràmetres acústics obtinguts mitjançant el procediment, la configuració i les condicions prèviament descrites.

Per a analitzar cada un dels paràmetres per separat, les dades obtingudes han estat recollides en un full de càlcul Excel. Els valors obtinguts es diferencien segons si aquests s'han obtingut amb el mínim mobiliari possible o amb la sala amoblada. Per a fer aquesta diferenciació notable els gràfics mostren els resultats de les dades obtingudes amb el mínim mobiliari amb color blau, mentre que les dades amb el mobiliari habitual estan representades amb el color taronja. Cada un dels paràmetres acústics a valorar es presenten en bandes d'octava de 125Hz a 4kHz, expressant-los així de la manera habitual en estudis acústics. Per a cada gràfic també es proporciona el valor recomanat per diversos autors amb línies discontinües.

Paràmetre Acústic		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Temps de Reverberació (RT60)	Sense Mobiliari	1,32	1,1	0,96	0,74	0,68	0,61
	Amb Mobiliari	0,57	0,59	0,49	0,48	0,47	0,46
Calidesa Acústica (BR)	Sense Mobiliari	1,42					
	Amb Mobiliari	1,18					
Brillantor (BR)	Sense Mobiliari	0,76					
	Amb Mobiliari	0,95					
Índex de Claredat de la veu (C50)	Sense Mobiliari	-3,44	1,25	1,82	3,89	0,6	2,94
	Amb Mobiliari	-3,52	4,53	8,1	8,47	6,35	3,2
Índex de Claredat Musical (C80)	Sense Mobiliari	1,68	6,02	5,53	5,83	5,42	7,45
	Amb Mobiliari	8,54	9,99	12,8	11,1	10,43	8,63
Definició (D50)	Sense Mobiliari	0,31	0,57	0,6	0,71	0,53	0,66
	Amb Mobiliari	0,31	0,74	0,87	0,88	0,81	0,68
Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%ALCons)	Sense Mobiliari	9,43	6,58	8,67	6,66	6,1	5,48
	Amb Mobiliari	1,74	1,89	4,47	4,36	4,19	4,18

Taula 4.3: Valor dels paràmetres acústics en terços d'octava diferenciats entre la sala sense mobiliari (color blau) i la sala amoblada (color taronja)

A continuació es mostra tant una comparació gràfica com una valoració entre els paràmetres acústics amb i sense mobiliari.

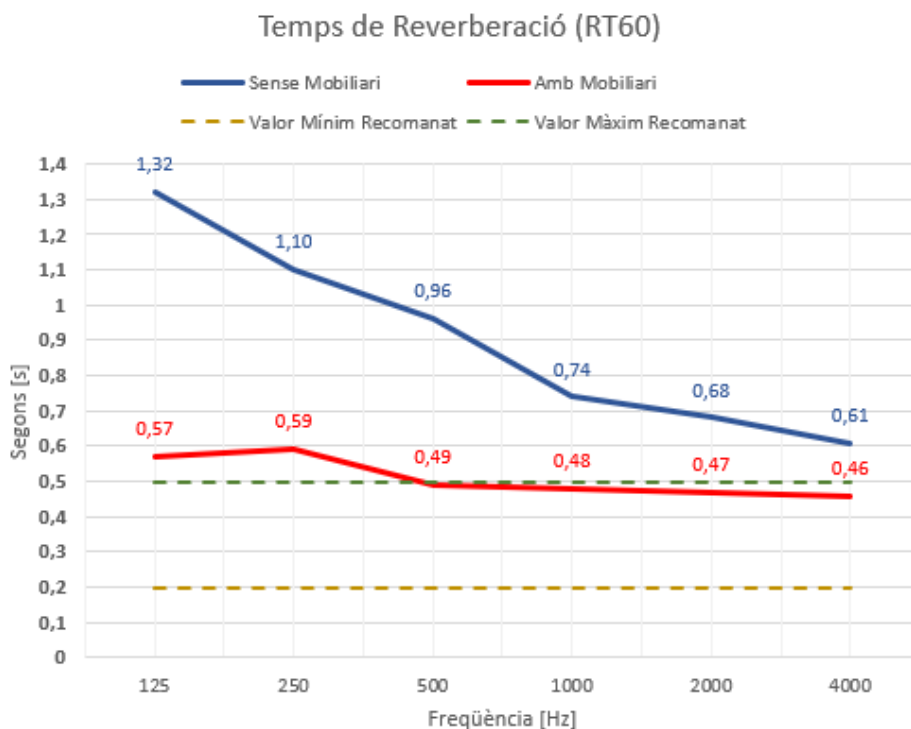


Figura 4.5: Representació del temps de reverberació RT60 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava

El primer paràmetre que s'analitza és el temps de reverberació, el qual és el més comú i representatiu per a estudiar l'acústica d'una sala. Observant el gràfic podem apreciar com el temps de reverberació a la sala sense mobiliari és superior a l'obtingut amb el mobiliari habitual. En ambdós casos el temps de reverberació a baixes freqüències (125Hz-250Hz) és major que a freqüències mitjanes i altes. Ara bé, quan la sala no disposa de mobiliari la diferència en el temps de reverberació a baixes i altes freqüències és més notable, essent gairebé el doble de temps entre les bandes de fre-

qüències de 4kHz i 125Hz. En canvi, per a la sala amoblada la diferència màxima esdevé de 0.13s entre les bandes freqüencials de 250Hz i 4kHz. Això és degut al fet que la presència de certs materials en el mobiliari, com la fusta dels mobles o el paper en dels llibres, actuen com a absorbents. Cal destacar que la sala sense mobiliari ja conté material absorbent a la paret frontal, resultat el qual es pot apreciar clarament com a una reducció a freqüències mitjanes i altes.

Recordem que la funció principal de la sala és la mescla i producció de música electrònica. Com s'ha dit anteriorment en la simulació, un valor òptim per al paràmetre del temps de reverberació oscil·la entre els 0.2s i 0.5s en funció de l'estil musical. Fixant-nos en els valors de temps de reverberació obtinguts es pot apreciar com la sala sense mobiliari no proporciona uns resultats dins d'aquest rang idoni. D'altra banda, quan la sala compta amb el mobiliari habitual les freqüències mitjanes i altes es situen dins el rang òptim, però les freqüències baixes es situen lleugerament per sobre.

Relacionat amb el temps de reverberació es poden analitzar els següents dos paràmetres que es corresponen amb la calidesa acústica i la brillantor. La calidesa acústica fa referència a la riquesa a baixes freqüències mentre que la brillantor indica el comportament a freqüències altes. Observant els resultats, la sala sense mobiliari proporciona una major calidesa que la sala amoblada, però, en canvi, una menor brillantor. Tot i aquesta superioritat envers a la calidesa acústica, el resultat obtingut per a la sala buida es situa lleugerament per sobre del rang òptim proposat en l'apartat teòric, que és d'entre 1 i 1.3. D'altra banda, aquest paràmetre acústic amb la sala amoblada s'estableix dins el rang òptim, essent d'aquest 1.18. En quant a la brillantor, tots dos valors obtinguts en les diferents situacions de la sala es situen correctament per sobre del valor adequat proposat per H.Arau, el qual enuncia que ha de ser superior a 0.80. Si es considera el valor òptim el proposat per L.L Beranek, on aquest valor ha de ser superior a 0.88,

la sala sense mobiliari no compleix amb el valor òptim establert, quedant lleugerament per sota. En canvi, la sala amoblada a compleix amb el valor proposat, superant-lo per 0.15.

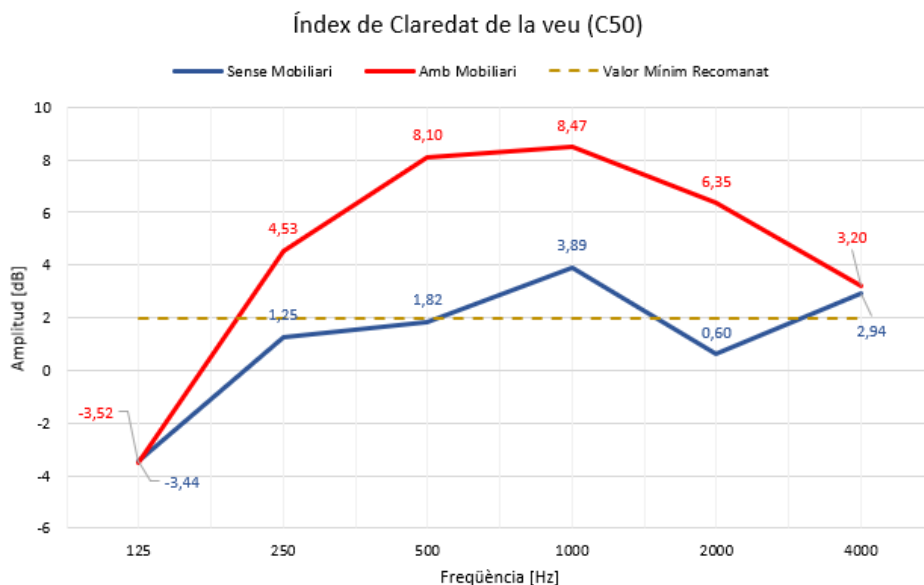


Figura 4.6: Gràfic de l'índex de claredat de la veu C50 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava

L'índex de Claredat de la veu és un indicador de la intel·ligibilitat de la paraula. Tot i no ser la parla la principal activitat de la sala aquest és un altre indicador per analitzar l'acústica de la sala. Es pot observar en el gràfic com hi ha una gran diferència de resultats entre ambdues situacions. La sala amoblada presenta un índex de claredat superior en gairebé tot el rang freqüencial estudiat, essent aquest més notable a les bandes d'octaves centrals, i força semblants en les octaves 125Hz i 4kHz. En relació a un valor òptim per l'índex de claredat de la veu es considera aquell que és superior a 2dB. Per tant, la resposta acústica d'aquest paràmetre amb la sala sense

mobiliari no supera aquesta condició excepte en les bandes freqüencials d'1kHz i 4kHz. En canvi, els resultats obtinguts amb la sala amoblada es troben per sobre del valor adequat proposat, excepte la banda freqüencial més baixa. Per tant, la sala amb el mobiliari habitual proporciona una bona intel·ligibilitat de la paraula, mentre que la sala sense el mobiliari indica una petita dificultat en la claredat de la comprensió del missatge.

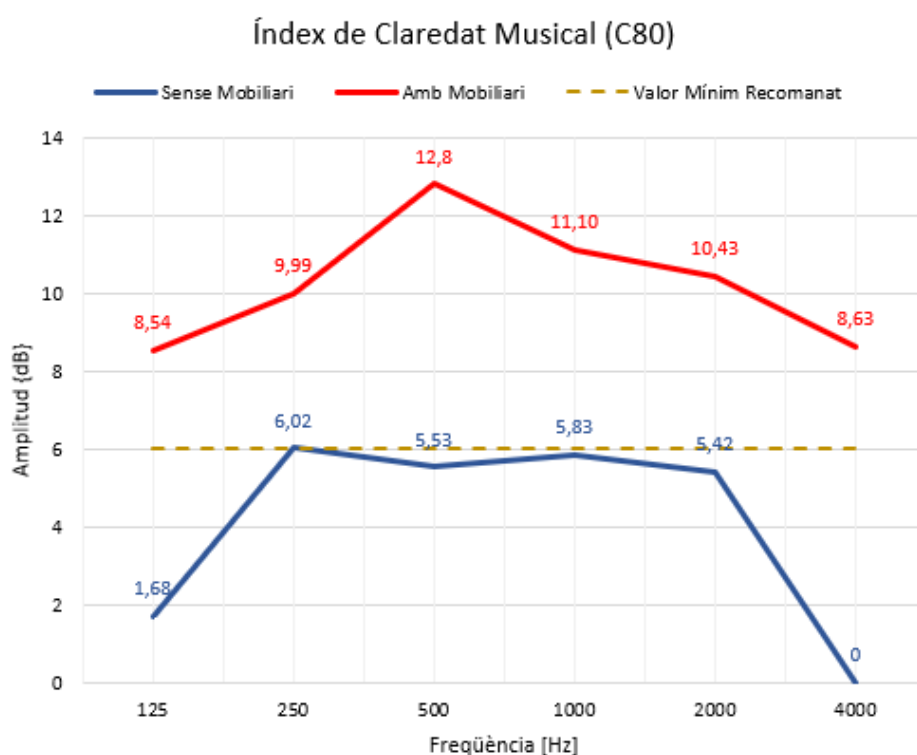


Figura 4.7: Representació de l'índex de claredat musical C80 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava

El següent paràmetre acústic es correspon amb l'índex de claredat mu-

sical que ens possibilita analitzar la intel·ligibilitat musical. Si ens fixem amb el gràfic obtingut existeix una gran diferència entre la sala amb i sense mobiliari, tot i que ambdues tenen una tendència d'obtenir un valor menor a les bandes freqüencials extremes. La sala amb el mínim mobiliari proporciona uns valors d'índex de claredat musical similars entre les bandes 250Hz i 2kHz. En canvi, la sala amoblada proporciona uns resultats majors en tot el rang freqüencial analitzat, essent el valor màxim de 12.8 a la octava de 500Hz i un mínim valor de 8.54 a 125Hz. Existeixen diversos autors que proposen varis valors òptims, però en el nostre cas emprarem el proposat per Gerald Marshall, el qual diferencia l'índex de claredat musical en funció dels diferents estils musicals. L'estil principal de música predominant en aquesta sala és música electrònica, estil el qual s'associa amb un valor d'índex de claredat musical superior a 6. Observant el gràfic podem apreciar com la sala sense mobles proporciona uns valors entorn al valor proposat, essent lleugerament inferior. D'altra banda, la sala amb el mobiliari habitual proveeix uns resultats òptims per a la intel·ligibilitat musical, fent possible la diferenciació entre els sons individuals que componen la peça musical.

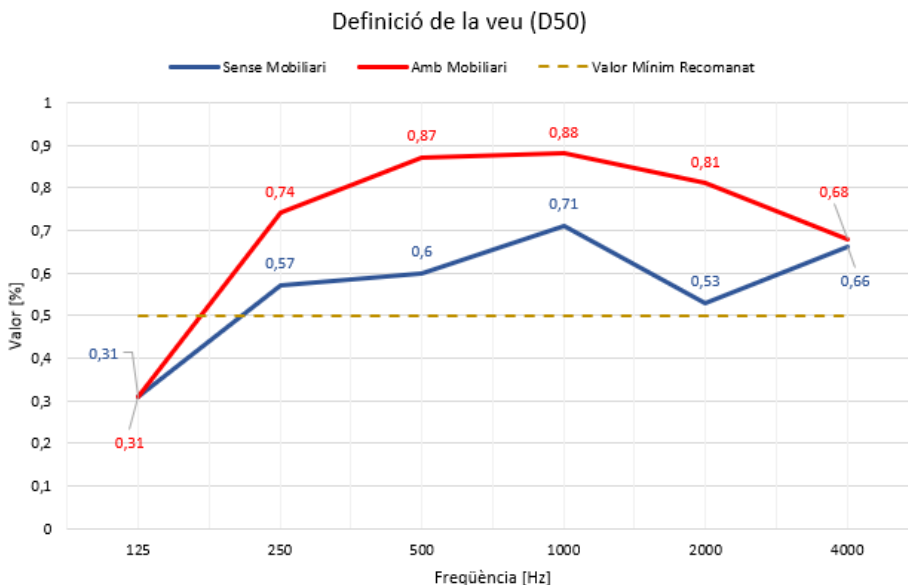


Figura 4.8: Gràfic de la definició de la veu D50 per ambdues situacions en bandes de terços d'octava

La definició de la veu és un paràmetre relacionat amb l'índex de claredat de la veu, i es pot apreciar aquesta similitud observant la tendència del gràfic. Els resultats obtinguts sense mobiliari són menors que els assolits amb la sala amoblada. Sense mobiliari, la sala subministra uns valor màxim de 0.71 a la banda d'octava d'1kHz i un mínim de 0.31 a la freqüència de 125Hz. Aquest valor mínim es correspon també amb el mínim valor obtingut per la sala amb el mobiliari. En canvi, el valor màxim obtingut per la sala amoblada és de 0.88 a la banda freqüencial d'1kHz. Les altres bandes freqüencials difereixen entre les dues situacions un valor de 0.20 aproximadament. En quant al valor òptim de referencia es proposa que la definició de la veu ha de ser superior a 0.5. En ambdós casos el valor és superior en totes les bandes d'octava, exceptuant la corresponent a 125Hz.

Tot i que els resultats obtinguts siguin adequats, de la mateixa manera que l'índex de claredat de la veu, la sala amb el mobiliari habitual proporciona una millor resposta en quant a la intel·ligibilitat de la paraula.

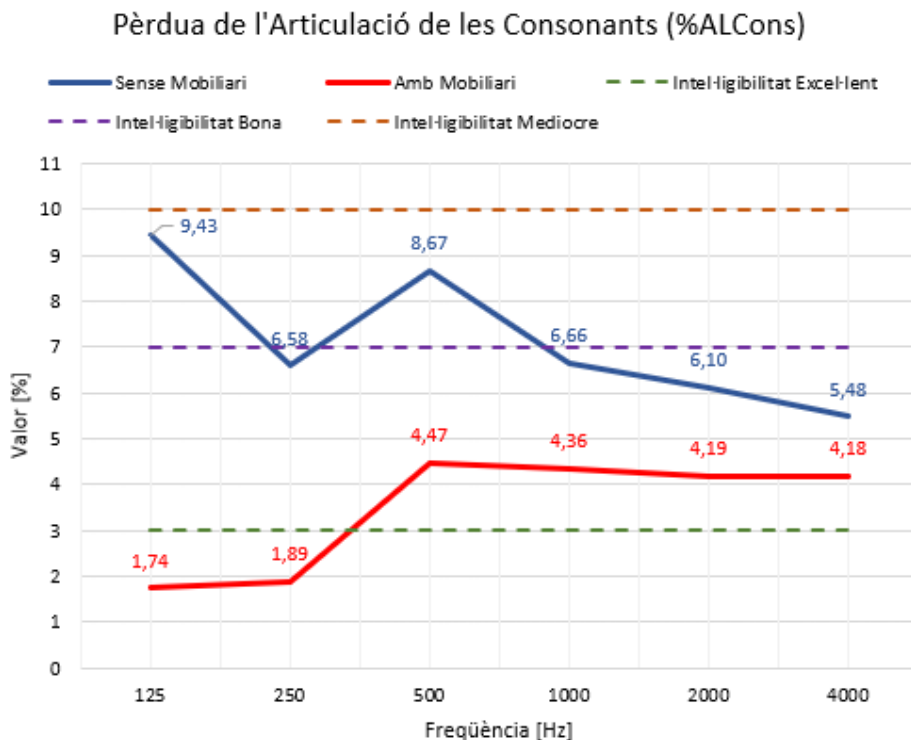


Figura 4.9: Representació de la pèrdua de l'articulació de les consonants per ambdues situacions en bandes de terços d'octava

El darrer paràmetre acústic estudiat ha estat la pèrdua de l'articulació de les consonants. A menor percentatge de pèrdua millor serà la intel·ligibilitat per part del receptor. Visualitzant el gràfic es pot apreciar com amb el mobiliari aquest paràmetre redueix el seu valor, proporcionant

una millor intel·ligibilitat del missatge oral. La sala sense mobiliari proporciona una tendència a disminuir el seu valor a mesura que la freqüència augmenta. En canvi, la sala amb el mobiliari habitual proporciona uns resultats amb uns valors petits a les bandes de freqüències baixes i a freqüències mitjanes i altes augmenta, i s'estabilitza en torn a un valor de 4%, essent aquest encara inferior al mínim proporcionat per la sala sense mobiliari. En relació al valor òptim recomanat, la sala sense mobiliari otorga una resposta acústica mediocre a les bandes d'octava de 125Hz i 500Hz i bona a les bandes d'octava restants. En quant a la sala amb el mobiliari habitual presenta uns resultats excel·lents a les bandes de freqüència baixes i bona a freqüències mitjanes i altes.

A banda dels paràmetres acústics s'han analitzat els modes propis de la sala explicats en l'apartat teòric de la teoria geomètrica. Aquests es diferencien entre tres tipus, que es corresponen amb els modes axials, tangencials i oblics. Els modes axials són aquells que provenen de la interacció entre dues superfícies, els tangencials els que interactuen amb quatre superfícies i els oblics amb les sis superfícies de la sala. Es consideren significatius aquells modes propis per a freqüències inferiors a 300 cicles per segons, és a dir, freqüències inferiors a 300Hz.

Principalment, els modes axials són els importants per a l'estudi ja que aquest són els que proporcionen més energia acústica, seguits dels modes tangencials que ocasionen -3dB d'energia sonora respecte els axials, i per últim, els oblics aporten -6dB d'energia acústica, essent els menys significatius.

Axials		
65.21 Hz	C2	1-0-0
73.92 Hz	D2	0-0-1
75.22 Hz	D2	0-1-0
130.42 Hz	C3	2-0-0
147.84 Hz	D3	0-0-2
150.44 Hz	D3	0-2-0
195.63 Hz	G3	3-0-0
221.77 Hz	A3	0-0-3
225.66 Hz	A3	0-3-0
260.84 Hz	C4	4-0-0
295.69 Hz	D4	0-0-4
300.88 Hz	D4	0-4-0

(a) Modes propis axials en freqüència, nota musical i ordre

Oblics		
123.99 Hz	B2	1-1-1
167.72 Hz	E3	2-1-1
178.24 Hz	F3	1-1-2
179.86 Hz	F3#	1-2-1
211.01 Hz	G3#	2-1-2
212.38 Hz	G3#	2-2-1
220.78 Hz	A3	1-2-2
222.24 Hz	A3	3-1-1
243.09 Hz	B3	1-1-3
246.25 Hz	B3	1-3-1
247.99 Hz	B3	2-2-2
256.49 Hz	C4	3-1-2
257.62 Hz	C4	3-2-1
268.04 Hz	C4	2-1-3
270.91 Hz	C4#	2-3-1
275.8 Hz	C4#	1-2-3
277.55 Hz	C4#	1-3-2
281.35 Hz	C4#	4-1-1
287.68 Hz	D4	3-2-2
298.03 Hz	D4	2-2-3
299.65 Hz	D4	2-3-2

(b) Modes propis oblics en freqüència, nota musical i ordre

Tangencials		
98.57 Hz	G2	1-0-1
99.55 Hz	G2	1-1-0
105.46 Hz	G2#	0-1-1
149.91 Hz	D3	2-0-1
150.56 Hz	D3	2-1-0
161.59 Hz	E3	1-0-2
163.96 Hz	E3	1-2-0
165.88 Hz	E3	0-1-2
167.62 Hz	E3	0-2-1
197.15 Hz	G3	2-0-2
199.1 Hz	G3	2-2-0
209.13 Hz	G3#	3-0-1
209.59 Hz	G3#	3-1-0
210.93 Hz	G3#	0-2-2
231.16 Hz	A3#	1-0-3
234.18 Hz	A3#	0-1-3
234.89 Hz	A3#	1-3-0
237.46 Hz	A3#	0-3-1
245.21 Hz	B3	3-0-2
246.78 Hz	B3	3-2-0
257.27 Hz	C4	2-0-3
260.63 Hz	C4	2-3-0
267.98 Hz	C4	0-2-3
269.78 Hz	C4#	0-3-2
271.11 Hz	C4#	4-0-1
271.47 Hz	C4#	4-1-0
295.72 Hz	D4	3-0-3
298.65 Hz	D4	3-3-0
299.82 Hz	D4	4-0-2

(c) Modes propis tangencials en freqüència, nota musical i ordre

Taula 4.4: Dummy figure

Observant els resultats obtinguts podem observar com hi ha 12 nodes axials, 29 tangencials i 21 oblics. Donat que la presència de modes propis és inevitable, l'objectiu per a preservar una bona intel·ligibilitat tant musical com oral és distribuir-los uniformement de manera que no ocasionin una deficiència en l'escolta. Per a això és necessari seleccionar una relació adient a les dimensions de la sala per evitar la concentració d'energia en bandes freqüencials que ocasionin una coloració del so.

4.4 Valoració i propostes de millora

Un cop hem analitzat els paràmetres acústics de la sala es pot fer una valoració de les condicions acústiques d'aquesta, referint-nos a aquesta quan la conforma tot el mobiliari habitual. L'avaluació de l'acústica de la sala, segons la informació de la qual es disposa sobre els valors recomanats, és satisfactòria. A grosso modo tots els paràmetres estudiats proporcionen uns resultats dins dels rangs proposats.

Si bé és cert, a freqüències baixes és on trobem els principals problemes de la sala. Per a freqüències d'entre 125Hz i 250Hz el temps de reverberació és lleugerament superior al recomanat i, tant l'índex de claredat com la definició de la veu, mostren un dèficit en la banda freqüencial més baixa. El temps de reverberació es veu afectat principalment per les dimensions de la sala i les superfícies que la conformen. Per a reduir aquest paràmetre només a freqüències baixes cal reduir l'excés d'energia en aquest rang freqüencial. D'altra banda, per a incrementar els paràmetres referents a la veu, s'ha d'augmentar la quantitat d'energia sonora de les primeres reflexions en vers a les tardes.

Tenint en compte aquestes observacions es proposen una sèrie de millores per a acabar d'ajustar aquests paràmetres acústics i obtenir un millorament acústic. L'objectiu de les propostes serà obtenir un punt d'escolta

neutre per a mesclar amb la mínima coloració del so possible. Per a fer-ho, es divideix la sala en dos zones, la zona frontal i la zona posterior. La zona frontal, on estan situats els altaveus i el punt d'escolta, seria la zona que concentraria més material absorbent, essent així una zona amb una alta absorció. La zona posterior seria la zona situada darrera el punt d'escolta i hauria de ser viva sense gaire tractament acústic.

La primera proposta de millora es centra en la distribució de la sala. Primerament caldria determinar quina serà la zona frontal i posterior. Donat que la zona posterior és preferiblement viva, s'hauria de situar la taula en la pared contrària a on està la finestra, quedant tant la finestra com la porta en la zona posterior de la sala. Aleshores, un cop determinada l'orientació de la paret frontal es colocaria la taula al centre d'aquesta paret, separant-la uns 20cm. El fet de situar la taula centrada a la mateixa distància entre les dues parets laterals fa que la imatge estèreo no es vegi alterada. La col·locació dels monitors i el punt d'escolta no variaria respecte a la distribució actual, formant aquesta un triangle equilàter entre ells. Aquesta nova distribució tindrà efectes en els paràmetres acústics, però segurament no siguin suficients per a complir amb els valors recomanats, per tant, fa falta un cert tractament acústic. Inicialment, s'hauria de tractar la paret frontal afegint material absorbent darrere dels altaveus, i trampes de greus a les cantonades. D'aquesta manera les freqüències baixes veurien reduïda la seva energia a l'afegir material absorbent específic per a elles. Aleshores, la distribució proposada proporciona que ambdues parets laterals siguin simètriques en la zona frontal. En aquestes, seria necessari colocar material absorbent a l'alçada de l'orella en aquells punts on estan presents les primeres reflexions de la sala.

Mitjançant aquest nou disseny només hem tingut en compte l'ajustament dels paràmetres acústics però, cal destacar que la presència de modes propis continuen essent existents. El fet que les parets siguin paral·leles provoquen la seva aparició, però la modificació de l'estructura no és facti-

ble. Per això, un mètode per a reduir l'afectació dels modes propis d'una sala és augmentar el factor d'amortiment mitjançant materials absorbents que siguin efectius a freqüències baixes. En les parets laterals, caldria desfasar el material absorbent fent que no quedi un davant de l'altre i, d'aquesta manera, s'evitaria la possible aparició d'ecos entre les parets laterals. En quant als modes propis originats entre el sòl de la sala i el sostre es podria afegir material absorbent al sostre, distribuint-lo com un tauler d'escacs, i al terra es colocaria una catifa sota el punt d'escolta. Per últim, els modes propis entre la paret frontal i la posterior ja es veurien tractats amb el material absorbent situat en la paret frontal, i només caldria afegir una cortina a la finestra per absorbir els modes.

Capítol 5

CAS PRÀCTIC: CENTRAL HALL, UNIVERSITAT DE NOVA YORK

5.1 Metodologia

En aquest apartat s'explica l'estudi de la localització i detecció de les primeres reflexions mitjançant el mètode de DirAC. Aquest estudi pretén identificar la localització provinent de les primeres reflexions en l'espai estudiat per a poder proposar una millora en l'acústica de la sala si s'escau. Per a fer-ho, es necessària la resposta impulsional en format ambisonic del recinte i, seguint el procediment de DirAC explicat en el capítol teòric, es possible determinar la localització de les reflexions.

El recinte en què es centra aquest estudi és el Central Hall de la Universitat de Nova York. La llibreria Creative Commons d'Open Air proporciona la resposta impulsional d'aquest espai i, per tant, possibilita focalitzar l'estudi en aquest recinte. Com l'activitat principal que es dur a terme en

aquesta sala és la realització de conferències i certes classes educatives, les medicions de les respostes impulsional proporcionades emulen aquest escenari. Es situa una font sonora emissora al centre de l'escenari i sis posicions receptores distribuïdes per la zona d'audiència. Aquestes sis posicions divideixen l'espai en quatre àrees d'audiència: posició central plana del recinte, la grada central (3C, 3L), la grada lateral esquerra (1C, 1L) i a l'entrada del recinte (posició 2L). L'alçada de la font emisora està situada a 1.5m del terra de l'escenari, mentre que les posicions de mesura o recepció están a una alçada de 1.2m simulant la audiència sentada.

En quant al material utilitzat, segons s'especifica, per a fer les mesures s'empra un altaveu Genelec i un micròfon Soundfield amb una orientació frontal al centre de la sala, essent aquesta ortogonal a la grada. Com a senyal d'excitació, de la mateixa manera que en l'estudi acústic del home studio, s'utilitza un escombrat logarímic. Les característiques del senyal són diferents a les anteriors, tenint un rang freqüencial de 20Hz a 20kHz amb una durada de 15 segons.

Aleshores, mitjançant la implementació del codi de Python del mètode de DirAC, es pot fer ús d'aquestes respostes impulsional per a determinar la localització d'aquestes primeres reflexions, i poder actuar en conseqüència per a millorar l'efecte d'aquestes.

Inicialment, les respostes impulsional proporcionades estan en format FUMA, és a dir, l'ordre dels canals d'ambisonics és W,X,Y,Z. Cada un d'aquests canals es converteix a domini freqüencial mitjançant la STFT amb una finestra de hanning, degut a que és la més adient per a veus, i amb un tamany de 256. Aleshores, s'obté tant el vector de pressió i velocitat que conformen el vector intensitat, i d'aquesta manera, es pot obtenir el DOA agafant la direcció oposada del senyal d'arribada. Posteriorment, es calcula la difusió mitjançant el vector d'energia utilitzant una mitjana temporal de les darreres mostres, essent aquesta de 10 mostres en el nostre

cas. Finalment, s'aplica una màscara a la difusió per obtenir els resultats més acurats possible i es mostren els resultats en dos gràfics diferents, un per a la difusió i l'altre per a la localització de la reflexió.

5.2 Resultats

Conclusions

Bibliografia

- [1] Daniel A. Russell. Acoustics and vibration animations. <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>. Accedido 15-05-2020.
- [2] Federico Miyara. *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- [3] University of Waikato Science Learning Hub – Pokapū Ako-ranga Pūtaiao. Constructive and destructive interference. www.sciencelearn.org.nz. Accedido 15-05-2020.
- [4] Antoni Carrión Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, volume 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.
- [5] Ecoacustika. Curva nc. <https://ecoacustika.com/criterios-objetivos-para-la-insonorizacion-de-un-recinto/curva-nc/>. Accedido 14-05-2020.
- [6] NTI Audio. Reverberation time rt60 measurement. <https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/reverberation-time-rt60-measurement>. Accedido 14-05-2020.
- [7] Daniel R Raichel. *The science and applications of acoustics*. Springer Science & Business Media, 2006.

- [8] Wikipedia contributors. Spherical harmonics. [Online; accessed 1-May-2020].
- [9] Wikipedia contributors. Horizontal coordinate system. [Online; accessed 1-May-2020].
- [10] Diseño y Urbanismo (Universidad de la República) Facultad de Arquitectura. Tablas de absorcion. <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf>. Accedido 29-05-2020.
- [11] Paul Allen Tipler and Gene Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología. II*, volume 2. Reverté, 2004.
- [12] T Jackets. The newton-laplace equation & speed of sound. *Thermaxx Jackets*.
- [13] Ross J Roeser, Michael Valente, and Holly Hosford-Dunn. Diagnostic procedures in audiology. *Audiology: diagnosis*, pages 1–16, 2007.
- [14] Engineering ToolBox. Sound pressure. <https://www.engineeringtoolbox.com>. Accedido 15-05-2020.
- [15] Mahesh C Jain. Textbook of engineering physics (part i). *PHI Learning Private Limited, New Delhi*, 2009.
- [16] Gerhard Müller and Michael Möser. *Handbook of engineering acoustics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] Frank J Fahy and Vincent Salmon. Sound intensity, 1990.
- [18] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson Education India, 2012.

- [19] Bevan B Baker and Edward Thomas Copson. *The mathematical theory of Huygens' principle*, volume 329. American Mathematical Soc., 2003.
- [20] Lic. Haroldo O. Da Riva. AcÚstica arquitectÓnica: Difusi3n y acondicionamiento acÚstico. <http://www.acustec.com.ar>. Accedido 15-05-2020.
- [21] Wymke Ockenga. Phase contrast. 2011.
- [22] Dick CH Poon. How good is the approximation path difference $d \sin \theta$? *The Physics Teacher*, 40(8):460–462, 2002.
- [23] Leo L Beranek and David T Blackstock. Acoustics, 1986 edition by leo l. beranek, 1988.
- [24] Daniel Tarraz3-Serrano, Sergio CastiÑeira-IbÁÑez, Antonio Uris, and Constanza Rubio Michavila. Modelizaci3n de los modos propios de un recinto paralelepipedico con superficies rÍgidas mediante el m3todo de elementos finitos. *Modelling in Science Education and Learning*, 11(2):29–38, 2018.
- [25] Oscar J Bonello. Acoustical evaluation and control of normal room modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 66(S1):S52–S52, 1979.
- [26] L.L. Beranek. Revised criteria for noise in buildings. *Noise Control*, 3(1), 1957.
- [27] T.J. Schultz. Noise-criterion curves for use with the usasi preferred frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 43(3), 1968.
- [28] L.L. Beranek. Building noise-criterion (ncb) curves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 1989.

- [29] L.L. Beranek. Application of ncb noise criterion curves. *Noise Control Engineering Journal*, 33(2), 1989.
- [30] Acoustical Society of America. Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, part 1: Permanent schools. *S12.60*, 2010.
- [31] Wallace Clement Sabine and M David Egan. Collected papers on acoustics, 1994.
- [32] Carl F Eyring. Reverberation time in “dead” rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1(2A):217–241, 1930.
- [33] Enric Guaus Termens. Teoria estadística. *Enginyeria Acústica*, page 3, 2018-11-27.
- [34] Enric Guaus Termens. Teoria estadística. *Enginyeria Acústica*, page 3, 2018-11-27.
- [35] Leo Beranek and Daniel W Martin. Concert & opera halls: how they sound, 1996.
- [36] Wolfgang Ahnert and Wolfgang Schmidt. Fundamentals to perform acoustical measurements. *Appendix to EASERA*, 2005.
- [37] Higini Arau. *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Ceac Barcelona, 1999.
- [38] Rolf Thiele. Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen. *Acta Acustica United with Acustica*, 3(4):291–302, 1953.
- [39] W Reichardt, O Abdel Alim, and W Schmidt. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances. *Acta Acustica united with Acustica*, 32(3):126–137, 1975.

- [40] Michael Barron. *Auditorium acoustics and architectural design*. Routledge, 2009.
- [41] L Gerald Marshall. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4):2251–2261, 1994.
- [42] Rubén Onieva Onieva. Diseño acústico de una sala multifunción mediante empleo de paneles móviles.
- [43] AC Gade. Objective measurements in danish concert halls. *Proc. Inst. Acoust.*, 7:96, 1985.
- [44] VMA Peutz and W Klein. Articulation loss of consonants influenced by noise, reverberation and echo. In *Proc. FASE Symposium on Speech intelligibility, Luik (B)*, 1973.
- [45] Juan Manuel Millán Esteller. *Instalaciones de megafonía y sonorización*. Editorial Paraninfo, 2012.
- [46] Paul Adrien Maurice Dirac. *The principles of quantum mechanics*. Number 27. Oxford university press, 1981.
- [47] IM Gel'fand and GE Shilov. Generalized functions vol 1 properties and operations (ny–london, 1968.
- [48] Alan V Oppenheim. Alan s. willsky with s hamid nawab,"signals and systems, 1997.
- [49] Jean Baptiste Joseph baron Fourier. *Théorie analytique de la chaleur*. F. Didot, 1822.
- [50] Daniel Griffin and Jae Lim. Signal estimation from modified short-time fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 32(2):236–243, 1984.

- [51] Wikipedia contributors. Short-time fourier transform. [Online; accessed 1-May-2020].
- [52] Angelo Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Audio Engineering Society Convention 108*. Audio Engineering Society, 2000.
- [53] Daniel Arteaga. Introduction to ambisonics, 2015.
- [54] Archontis Politis, Tapani Pihlajamäki, and Ville Pulkki. Parametric spatial audio effects. *York, UK, September, 2012*.
- [55] Taylor Frank J. Fahy, Sound intensity and Francis. Sound intensity. *London, 2nd edition, 1995*.
- [56] Juha Merimaa and Ville Pulkki. Spatial impulse response rendering i: Analysis and synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*, 53(12):1115–1127, 2005.
- [57] Angelo Farina. Public directory, 2010.
- [58] Powerestudio. Reverberation time in control room, rt60. <https://www.powerestudio.com/reverberation-time-in-control-room-rt60/>. Accedido 18-05-2020.