

Estudi i condicionament acústic d'un local de restauració i un espai polivalent

Autor: Elm Oliver Torres

Tutor: Pere Artís i Gabarró

Professor: David García Solórzano

Grau en tecnologies de telecomunicació, menció en sistemes audiovisuals

Aplicacions multimèdia basades en processament del senyal

13/06/2018



Aquesta obra està subjecta a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada
[3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Estudi i condicionament acústic d'un local de restauració i un espai polivalent</i>
Nom de l'autor:	<i>Elm Oliver Torres</i>
Nom del col·laborador/a docent:	<i>Pere Artís i Gabarró</i>
Nom del PRA:	<i>David García Solórzano</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>06/2018</i>
Titulació o programa:	<i>Grau de Tecnologies de Telecomunicació, Menció en Sistemes Audiovisuals</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Aplicacions multimèdia basades en processament del senyal</i>
Idioma del treball:	<i>Català</i>
Paraules clau	<i>Condicionament acústic, Acústica arquitectònica</i>
Abstract:	
<p>This project is based on the practical case of a studio and acoustic conditioning of a multiuse venue and a restaurant business, from the point of view of an acoustic engineer satisfying client's necessities.</p> <p>Starting with the state of the art and a theoretical introduction, the reader will be introduced to the Acoustics world, with the aim of understanding the necessary main concepts about the practical case of the project, both the researched phenomenon and the calculus done.</p> <p>The practical case will be developed from the description of the researched facilities features and their current situation. Using the interrupted noise method, reverberation time measurements from both facilities will be conducted, placing a noise source emitting pink noise and a sound level meter in different positions. Once the data is acquired, an explanation on how to interpret and connect them with the client's objectives will be provided.</p> <p>Characterization of the reverberation time via T_{30}, together with the recommended maximum and minimum values for the multiuse venue and the restaurant business, will set the objectives. A simulation spreadsheet will be used and, applying Sabine's and Eyring-Norris' formulas, the materials will be chosen to condition acoustically the venues, depending on their absorption coefficient and their frequency distribution.</p> <p>The acoustic design efficacy will be proved numerically and graphically, comparing it to the initial state of the project, and the final proposal will be offered to the client.</p>	

Resum:

Aquest projecte es basa en el cas pràctic de l'estudi i condicionament acústic d'una sala polivalent i un local de restauració, des del punt de vista de la feina d'un enginyer acústic responnent a les necessitats del client.

A partir de l'estat de l'art i una introducció teòrica es situarà al lector en el marc de l'acústica, per conèixer els conceptes principals necessaris per a comprendre el cas pràctic del projecte, ja siguin els fenòmens que s'hi estudien com els càlculs que es realitzen.

Es desenvoluparà el cas pràctic a partir de la descripció de les característiques dels recintes a estudi i de la seva situació actual. Seguint el mètode del soroll interromput, es realitzaran les mesures del temps de reverberació dels dos recintes a estudi situant una font de soroll excitada amb soroll rosa i un sonòmetre en diferents posicions. Un cop s'hagin adquirit aquestes dades, s'explicarà com interpretar-les i com relacionar-les amb els resultats que el client vol obtenir.

La caracterització del temps de reverberació a partir del T_{30} , juntament amb les recomanacions de valors màxims i mínims que els recintes polivalents i de restauració han de tenir, marcaran els objectius a aconseguir. Es realitzarà una simulació amb fulls de càlcul i, utilitzant les fórmules de Sabine i Eyring-Norris, es decidiran quins materials s'utilitzaran per condicionar acústicament els recintes, segons el seu coeficient d'absorció i la seva distribució per freqüències.

Es demostrarà numèrica i gràficament l'efectivitat del disseny acústic escollit, comparant-lo amb l'estat inicial del projecte, i es farà la proposta final per al client.

Resumen:

Este proyecto se basa en el caso práctico del estudio y acondicionamiento acústico de una sala polivalente y un local de restauración, desde el punto de vista del trabajo de un ingeniero acústico respondiendo a las necesidades del cliente.

A partir del estado del arte y una introducción teórica se situará al lector en el marco de la acústica, para conocer los conceptos principales necesarios para comprender el caso práctico del proyecto, ya sean los fenómenos que se estudian como los cálculos que se realizan.

Se desarrollará el caso práctico a partir de la descripción de las características de los recintos a estudio y de su situación actual. Siguiendo el método del ruido interrumpido, se realizarán las medidas del tiempo de reverberación de los dos recintos estudiados situando una fuente de ruido excitada con ruido rosa y un sonómetro en diferentes posiciones. Una vez se hayan adquirido estos datos, se explicará cómo interpretarlos y cómo relacionarlos con los resultados que el cliente quiere obtener.

La caracterización del tiempo de reverberación a partir del T_{30} , junto con las recomendaciones de valores máximos y mínimos que los recintos polivalentes y de restauración tienen que tener, marcarán los objetivos a conseguir. Se realizará una simulación con hojas de cálculo y, utilizando las fórmulas de Sabine y Eyring-Norris, se decidirán qué materiales se utilizarán para acondicionar acústicamente los recintos, según su coeficiente de absorción y su distribución por frecuencias.

Se demostrará numérica y gráficamente la efectividad del diseño acústico escogido comparándolo con el estado inicial del proyecto, y se hará la propuesta final para el cliente.

Índex

Índex.....	6
Figures	10
Taules.....	12
Equacions.....	13
1. Introducció	14
1.1. Introducció	14
1.2. Objectius	15
1.2.1. Objectiu de l'enginyer.....	15
1.2.2. Objectiu pedagògic.....	15
1.2.3. Objectiu del client	16
1.3. Beneficis.....	16
1.4. Motivació	17
1.5. Lliurables.....	18
1.5.1. Memòria	18
1.5.2. Presentació.....	18
2. Estat de l'art	20
2.1. Metodologia	20
2.1.1. Motiu de la mesura.....	20
2.1.2. Equip necessari segons la llei.....	21
2.1.3. Definir el tipus de soroll.....	22
2.1.4. Camp sonor, posició de la font i condicions meteorològiques.....	23
2.1.5. Escollir el sonòmetre adequat.....	24
2.1.6. Funcionament i calibratge de l'equip	25
2.1.7. Col·locació del sonòmetre	26
2.1.8. Mesurar el soroll de fons	27
2.1.9. Escollir l'escala de ponderació freqüencial	27

2.1.10.	Seleccionar la resposta del detector	28
2.1.11.	Procedir a les mesures.....	29
2.1.12.	Comprovació dels elements ambientals	29
2.1.13.	Informe final	30
2.2.	Legislació	30
2.2.1.	Temps de reverberació	30
2.2.2.	Aïllament acústic.....	31
2.2.3.	Calibratge	32
2.3.	Aproximacions del comportament del camp acústic.....	32
2.3.1.	Acústica ondulatoria	32
2.3.2.	Acústica geomètrica	33
2.3.3.	Acústica estadística.....	33
2.4.	Simulacions	33
2.4.1.	Modelat 3D i configuració	34
2.4.2.	Auralització	35
2.4.3.	Raytracing.....	35
3.	Introducció teòrica	36
3.1.	Condicionament acústic.....	36
3.2.	Camp sonor	36
3.2.1.	Camp directe	37
3.2.2.	Camp difús.....	37
3.2.3.	Tipus de sala	38
3.3.	Nivell de soroll equivalent.....	39
3.4.	El so en recintes tancats.....	40
3.4.1.	Primeres reflexions.....	41
3.4.2.	Cua reverberant.....	41
3.4.3.	Early Decay Time	41
3.4.4.	Temps de reverberació. T_{60} , T_{20} i T_{30}	42
3.5.	Efecte <i>cocktail party</i>	43
3.6.	Fórmula de Sabine	44
3.7.	Fórmula Eyring-Norris	45
3.8.	Mètode de soroll interromput.....	46

3.9.	Materials de condicionament acústic	47
3.9.1.	Absorbents porosos	47
3.9.2.	Ressonadors	48
3.9.3.	Reflectors.....	49
3.9.4.	Difusors	49
3.10.	Corbes Noise Criteria	50
4.	Cas pràctic.....	52
4.1.	El recinte	52
4.2.	Detall dels espais a treballar	53
4.2.1.	Espai polivalent.....	54
4.2.2.	Local de restauració	56
4.3.	Descripció problema.....	57
4.4.	Pla de mesures	58
4.4.1.	Protocol de mesures del local de restauració	58
4.4.2.	Protocol de mesures de la sala polivalent.....	60
5.	Mesuraments	63
5.1.	L'equip.....	63
5.1.1.	El sonòmetre	63
5.1.2.	L'altaveu.....	64
5.2.	Mesures realitzades	65
5.2.1.	Plànols mesures	65
5.2.2.	Legislació.....	71
6.	Anàlisi de les dades	73
6.1.	Mesures soroll de fons.....	73
6.1.1.	Nivell de soroll equivalent.....	73
6.2.	Mesures temps de reverberació	75
6.2.1.	Detall del temps de reverberació de l'espai polivalent	75
6.2.2.	Detall del temps de reverberació del local de restauració	80
6.2.3.	Resultats.....	84
6.3.	Incidències durant les mesures	89
7.	Propostes de disseny	91

7.1.	Temps de reverberació objectius dels recintes	91
7.2.	Simulació de les mesures de l'espai polivalent	92
7.3.	Condicionament acústic de l'espai polivalent	93
7.3.1.	Absorció de l'aire	94
7.3.2.	Parets	94
7.3.3.	Sostre, terra i públic	96
7.4.	Simulació de les mesures del local de restauració	98
7.5.	Condicionament acústic del local de restauració	99
7.5.1.	Parets	99
7.5.2.	Sostre i terra	101
7.5.3.	Públic.....	102
7.6.	Simulació resultats.....	102
7.6.1.	Espai polivalent.....	102
7.6.2.	Local de restauració	103
7.6.3.	Comparativa Sabine/Eyring-Norris.....	104
7.6.4.	Comparativa entre resultats i situació inicial.....	105
8.	Conclusions i línies de futur.....	107
8.1.	Conclusions	107
8.1.1.	Lliçons	107
8.1.2.	Assoliment d'objectius.....	108
8.1.3.	Reflexió crítica.....	109
8.2.	Línies de futur.....	109
8.2.1.	Seguiment del projecte	109
8.2.2.	Anàlisi més profund dels resultats.....	110
8.2.3.	Simulació	111
8.2.4.	Estudi més profund dels recintes	111
8.2.5.	Ampliació a diferents àmbits de l'acústica.....	112
	Bibliografia.....	113
	Annexos	115
	Annex A: Simulacions	115
	Annex B: Fitxes tècniques.....	119

Figures

Il·lustració 1: Camp sonor, relació entre camp directe i difús.....	37
Il·lustració 2: Tipus de sales segons la relació entre camp directe i difús	38
Il·lustració 3: Ecograma representant les diferents parts de la recepció del so	40
Il·lustració 4: Relació entre T_{60} i una caiguda de 60 dB.....	42
Il·lustració 5: Relació entre T_{20} i T_{30} i una caiguda de 20 i 30 dB.....	42
Il·lustració 6: Exemple de material absorbent	47
Il·lustració 7: Exemple de material ressonador	48
Il·lustració 8: Exemple de material reflector	49
Il·lustració 9: Exemple de material difusor	50
Il·lustració 10: Distribució per freqüències de les corbes NC segons els seus dB.....	51
Il·lustració 11: Disseny del recinte per part de l'estudi d'arquitectura.....	52
Il·lustració 12: Fotografia exterior del recinte	53
Il·lustració 13: Plànol espai polivalent.....	54
Il·lustració 14: Fotografia interior de l'espai polivalent	55
Il·lustració 15: Fotografia interior del sostre de l'espai polivalent.....	55
Il·lustració 16: Plànol del local de restauració	56
Il·lustració 17: Fotografia interior del local de restauració.....	57
Il·lustració 18: Distribució prevista de mesures 1, local de restauració	59
Il·lustració 19: Distribució prevista de mesures 2, local de restauració	60
Il·lustració 20: Distribució prevista de mesures 1, sala polivalent	61
Il·lustració 21: Distribució prevista de mesures 2, sala polivalent	62
Il·lustració 22: Sonòmetre model CESVA SC240.....	64
Il·lustració 23: Altaveu model Mark M15 ALWC	64
Il·lustració 24: Distribució real de mesures de soroll de fons, sala polivalent	66
Il·lustració 25: Distribució real de mesures de soroll de fons, local de restauració	67
Il·lustració 26: Distribució real de mesures 1, sala polivalent.....	68
Il·lustració 27: Distribució real de mesures 2, sala polivalent.....	69
Il·lustració 28: Distribució real de mesures 1, local de restauració.....	70
Il·lustració 29: Distribució real de mesures 2, local de restauració.....	71
Il·lustració 30: Exemple d'altaveu omnidireccional	72
Il·lustració 31: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüències de terç d'octava, sala polivalent	74
Il·lustració 32: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüències de terç d'octava, local de restauració	74
Il·lustració 33: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüències de terç d'octava, local de restauració	75
Il·lustració 34: RT banda de 63 Hz, espai polivalent F_1 P_1 M_2	77
Il·lustració 35: RT banda de 125 Hz, espai polivalent F_1 P_1 M_2	77
Il·lustració 36: RT banda de 250 Hz, espai polivalent F_1 P_1 M_2	78

Il·lustració 37: RT banda de 500 Hz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	78
Il·lustració 38: RT banda de 1 kHz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	78
Il·lustració 39: RT banda de 2 kHz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	79
Il·lustració 40: RT banda de 4 kHz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	79
Il·lustració 41: RT banda de 8 kHz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	79
Il·lustració 42: RT banda de 63 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	81
Il·lustració 43: RT banda de 125 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	81
Il·lustració 44: RT banda de 250 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	81
Il·lustració 45: RT banda de 500 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	82
Il·lustració 46: RT banda de 1 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	82
Il·lustració 47: RT banda de 2 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	82
Il·lustració 48: RT banda de 4 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	83
Il·lustració 49: RT banda de 8 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	83
Il·lustració 50: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, sala polivalent.....	84
Il·lustració 51: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, sala polivalent.....	85
Il·lustració 52: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, local de restauració.....	86
Il·lustració 53: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, local de restauració.....	86
Il·lustració 54: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, sala polivalent.....	87
Il·lustració 55: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, sala polivalent.....	87
Il·lustració 56: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, local de restauració.....	88
Il·lustració 57: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, local de restauració.....	88
Il·lustració 58: Fotografia interior de l'espai polivalent	89
Il·lustració 59: Gràfica RT, comparativa entre simulació actual i mesures de la sala polivalent	93
Il·lustració 60: Coeficients d'absorció dels materials de les portes	94
Il·lustració 61: Coeficients d'absorció dels materials de les parets	95
Il·lustració 62: Coeficients d'absorció dels materials del sostre	97
Il·lustració 63: Coeficients d'absorció dels materials del terra i el públic	97
Il·lustració 64: Gràfica RT, comparativa entre simulació actual i mesures del local de restauració	99
Il·lustració 65: Coeficients d'absorció dels materials de les parets	100
Il·lustració 66: Coeficients d'absorció dels materials del terra i del sostre.....	101
Il·lustració 67: RT segons mètode de càlcul per a la sala polivalent	103
Il·lustració 68: RT segons mètode de càlcul per al local de restauració	104
Il·lustració 69: RT comparatiu abans i després de les mesures de condicionament, sala polivalent	105
Il·lustració 70: RT comparatiu abans i després de les mesures de condicionament, local de restauració	106

Taules

Taula 1: Classificació dels nivells de pressió sonora.....	39
Taula 2: Temps de reverberació per a diferents recintes.....	43
Taula 3: Valors de les corbes NC segons per a cada banda de freqüències	50
Taula 4: Corbes NC recomanades per a cada recinte.....	51
Taula 5: Estudi paràmetres RT, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$	76
Taula 6: Estudi paràmetres RT, local de restauració $F_2 P_1 M_1$	80
Taula 7: Relació mesures sales per posicions	84
Taula 8: RT mitjà dels valors mesurats per a la sala polivalent	92
Taula 9: Materials actuals de la sala polivalent, els seus coeficients i la superfície que ocupen.....	92
Taula 10: Mesures de l'espai polivalent	93
Taula 11: Materials utilitzats per a les parets, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà	96
Taula 12: Materials utilitzats per al sostre i el terra, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà	98
Taula 13: RT mitjà dels valors mesurats per a la sala polivalent	98
Taula 14: Materials actuals del local de restauració, els seus coeficients i la superfície que ocupen.....	98
Taula 15: Mesures del local de restauració.....	99
Taula 16: Materials utilitzats per a les parets, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà	100
Taula 17: Materials utilitzats per al sostre i el terra, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà	101
Taula 18: RT segons mètode de càlcul per banda de freqüències de la sala polivalent	102
Taula 19: RT segons mètode de càlcul per banda de freqüències del local de restauració	103
Taula 20: Diferències de RT entre Sabine i Eyring-Norris, sala polivalent	104
Taula 21: Diferències de RT entre Sabine i Eyring-Norris, local de restauració	104

Equacions

Equació 1: Temps de reverberació segons Sabine	44
Equació 2: Absorció total.....	44
Equació 3: Coeficient d'absorció	44
Equació 4: Coeficient d'absorció mitjà	44
Equació 5: Temps de reverberació segons Sabine amb absorció de l'aire	45
Equació 6: Coeficient d'absorció de l'aire	45
Equació 7: Temps de reverberació segons Eyring-Norris.....	45
Equació 8: Coeficient d'absorció energètic mitjà d'incidència aleatòria.....	45
Equació 9: Temps de reverberació segons Eyring-Norris amb absorció de l'aire.....	46

1. Introducció

En aquest apartat es tractarà la idea del projecte des d'un punt de vista general i personal, explicant el per què aquest projecte ha de ser realitzat, com s'estructura, i per què pot ser interessant.

1.1. Introducció

En aquest projecte es realitzarà l'activitat professional d'un tècnic acústic exercint la seva feina; un client contacta amb l'enginyer per solucionar els problemes acústics del seu local.

Es cobriran els processos d'estudi d'un projecte, començant amb la presa de mesures del local, seguint amb l'anàlisi dels resultats obtinguts i acabant amb el disseny de les solucions acústiques per aconseguir els objectius marcats.

Amb l'estudi del recinte, es veurà que l'objectiu a cobrir és el de tenir un bon condicionament acústic de dos recintes diferents, per a què puguin ser utilitzats per a l'ús per al qual han estat dissenyats, amb un resultat òptim. Aquest projecte simula com es resol en l'actualitat aquest tipus de necessitats, i es vol obtenir un resultat satisfactori per garantir la cobertura de les necessitats del client.

Aquest treball tracta un tema molt important i que ha anat guanyant pes les darreres dècades en l'edificació: el condicionament acústic. Un bon disseny acústic permet amb facilitat complir tots els valors desitjats i que els recintes siguin eficaços en les seves funcions. Per exemple, un bon disseny acústic permet tenir una sala de concerts amb una bona qualitat de so a tota la seva sala i evitar problemes per als receptors. D'altra banda, un bon disseny acústic permet als assistents a un local de restauració gaudir de l'activitat culinària i social tranquil·lament, amb uns nivells de soroll i reverberació controlats.

Encara que sembli contradictori, hi ha molts locals que no compleixen aquests objectius i això suposa un perjudici per a ells ja que, o no poden exercir la seva activitat amb èxit, o es veuen obligats a realitzar canvis i/o adaptacions. Si es fa un bon disseny acústic des d'un principi, com en aquest projecte, s'eviten futurs problemes majors que impliquin tornar a condicionar el local, provocant una despesa econòmica molt major que si s'afronta correctament des d'un bon principi.

1.2. Objectius

L'elaboració d'aquest treball final de grau té diversos objectius relacionats amb àmbits diferents.

1.2.1. Objectiu de l'enginyer

El principal objectiu, òbviament, serà la solució del problema del client. A efectes pràctics, el client ha sol·licitat els serveis d'un tècnic acústic per adequar els seus locals als temps de reverberació adequats per al desenvolupament de les activitats. Per tant, el projecte ha de satisfer aquesta necessitat a partir de l'anàlisi de la situació i aportant solucions concretes per donar resposta a la petició del client.

1.2.2. Objectiu pedagògic

Al llarg de tot el treball, un altre dels objectius és el de demostrar la importància de la utilització d'un cas pràctic per explicar i aprofundir en els conceptes teòrics. Des de fa anys, tots els sistemes educatius han anat incorporant pràctiques a les matèries impartides, resultant així més efectiu l'aprenentatge per part dels estudiants. Per tant, l'elecció del cas pràctic al projecte no pretén altra cosa que la consolidació de part dels continguts de les assignatures d'Acústica i d'Electroacústica juntament amb altres conceptes afegits en aquest treball, simulant el dia a dia d'un enginyer acústic.

I, precisament, aquest és un altre dels objectius del treball final. Ja que l'elaboració del projecte és el pas previ a introduir-se en el món laboral, resulta molt interessant tenir una mostra de què pot esperar l'estudiant quan aquest hi entri. Així doncs, el projecte també pretén demostrar a grans trets com és la rutina d'un enginyer acústic que treballa en una consultoria tècnica; a partir d'un dels casos que es poden trobar, fer un repàs de quins són els passos necessaris per a proporcionar una solució, veient quines seran les responsabilitats de l'enginyer i els principals problemes i imprevistos que poden sorgir.

També es planteja l'aprofundiment en l'estudi de conceptes físics relacionats amb diferents aspectes de l'acústica, com la propagació del so, les tècniques d'absorció del soroll, etc. Tot això es farà a partir d'explicacions resumides, senzilles i ràpides, on s'explicaran, en els punts pertinents, els principals conceptes sense aprofundir en complexos raonaments matemàtics ni llargs processos de càlcul.

1.2.3. Objectiu del client

Per part del client, el principal objectiu és el d'aconseguir satisfer les necessitats del seu negoci en aquest aspecte. Més concretament, el seu objectiu és el de reduir el temps de reverberació als seus locals, seguint les pautes de condicionament acústic proporcionades pel projecte, adaptant el disseny acústic a les seves instal·lacions.

No es profunditzarà en el disseny del local per obtenir els beneficis que una bona planificació estructural poden proporcionar en quant a nivells sonors adequats i reducció del soroll. Es treballarà a partir de l'estructura existent del local i a partir d'aquí s'oferiran solucions referents a aquesta estructura, sense contemplar la possibilitat d'efectuar reformes, sinó amb l'ús del material adequat per als resultats que es volen obtenir.

1.3. Beneficis

El principal benefici que es podria extreure d'aquest treball final de grau seria pel client que encarrega el projecte. Malgrat que el projecte es basa en un cas real d'un edifici en construcció on encara queden moltes obres a realitzar, pot ser útil per al client perquè pot veure solucions a adoptar per als seus problemes específics. Per tant, mentre es planteja el disseny de les obres a l'estructura, l'elecció de materials a utilitzar i les solucions acústiques a emprar, aquest projecte pretén ser el seu document de referència pel que fa al condicionament interior.

Aquest projecte està orientat a proveir al client dels coneixements dels fenòmens acústics que es produeixen en l'interior de les sales, la seva problemàtica, i una proposta del disseny acústic de l'interior dels recintes per aconseguir un resultat òptim pel que fa al seu temps de reverberació.

El benefici es deurà a que s'hauran assolit els objectius marcats i els recintes estudiats aconseguiran tenir uns nivells acústics òptims. D'aquesta manera es disposarà d'un temps de reverberació adequat a la tasca que es vol desenvolupar a cada sala, evitant dificultats a l'hora de rebre el missatge, i evitant també problemes que passen desapercebuts però que afecten als assistents, com l'efecte *cocktail party*, que és molt habitual.

Al ser un projecte basat en un cas pràctic que es basa en la metodologia de treball estandarditzada d'un enginyer acústic, no hi ha més beneficis clars com podrien ser els relacionats amb la invenció o la creació de cap producte nou; ni tampoc un resultat directament aplicable que representi un benefici econòmic per a cap de les parts, almenys a curt termini, degut a les limitacions del client.

1.4. Motivació

Una de les nombroses sortides professionals del Grau en Tecnologies de Telecomunicació, en la seva menció de Sistemes Audiovisuais, és treballar d'enginyer acústic; amb la possibilitat d'haver cursat prèviament un màster centrat en aquesta especialitat, ja que durant el grau només es realitzen dues assignatures d'acústica.

Aquest treball final de grau permet tenir un primer contacte de l'experiència professional que un enginyer acústic té en el seu dia a dia laboral. El projecte cobreix la forma de treballar dels enginyers, des dels processos de captació de dades, càlculs i presa de decisions amb les solucions que s'adopten; en paral·lel amb un treball d'investigació i recerca dels conceptes de la ciència, tant teòrics com pràctics.

Havent considerat aquests factors, conjuntament amb l'interès que va despertar-me l'assignatura d'Acústica del grau; plantejo "L'estudi i condicionament acústic d'un local de restauració i un espai polivalent", com una aproximació a l'experiència de treball que puc tenir si em dedico a aquest sector i, per tant, poder aprofundir i ampliar part dels conceptes de l'assignatura i comprovar com de còmode i interessat em sento de cara a considerar-la una professió a la que dedicar-me.

Esmentada prèviament, l'experiència a l'assignatura d'Acústica del grau va resultar-me tant enriquidora i interessant com insuficient. Al ser una branca específica de la física, aplega sota el seu nom una quantitat increïble de conceptes, àmbits i aplicacions; tant a gran escala com a petita; tant a efectes de percepció del so en el món de l'oci com a als problemes de salut que pot provocar en el dia a dia de les persones; etc.

Per satisfer aquest interès personal en tot aquest món, el projecte resulta una activitat voluntària (en relació a l'elecció del tema) de continuïtat respecte el primer contacte amb el món de l'acústica.

Un altre element important és la motivació per aconseguir el millor treball possible. No tan sols referint-se a obtenir les més altes qualificacions com a reconeixement a la feina feta, si no que el fet de ser el primer treball final de grau relacionat amb l'Acústica que s'accepta a la UOC implica que pot ser un referent de cara a futurs estudiants que realitzin el seu treball en aquest àmbit.

Aconseguir un treball de qualitat també permet ampliar el meu currículum, ja que a l'hora de buscar feina en aquest sector a part del títol universitari podré presentar una mostra de la meua feina, la manera de treballar i la vàlua que puc tenir per a l'empresa.

1.5. Lliurables

Els elements que es lliuraran a l'entrega del treball final de grau seran la memòria i la presentació.

1.5.1. Memòria

La memòria és el document escrit que conté tota la informació relacionada amb el TFG. Aquesta aplegarà un ampli ventall de continguts: començant pels elements propis del treball (índex, taula de continguts, etc.), seguint amb explicacions dels passos inicials del projecte (objectius, motivació, beneficis, etc.). També comptarà amb parts essencials de tots els treballs finals de grau, com són l'*abstract* i l'estat de l'art.

Llavors es seguirà amb un recull teòric de l'àmbit de l'acústica, a mode d'introducció, per a possibilitar i facilitar la comprensió de la següent i principal part del treball: el plantejament, on s'explicarà la situació inicial dels elements del projecte; el desenvolupament, on s'explicarà el procés d'adquisició de dades, el seu anàlisi i la proposta de solució per al client; i, finalment, les conclusions del cas pràctic.

També s'adjuntarà com a annexos tota la informació relacionada amb el material proveït pel client respecte a l'edifici de l'estudi del condicionament acústic, així com les dades adquirides durant el procés de realització de mesures acústiques, i també documentació tècnica referida a tots els productes seleccionats per a fer la proposta de solució del cas pràctic, ja siguin fitxes tècniques de material o procediments relacionats amb la seva implementació.

Finalment, s'adjuntarà una bibliografia amb les referències de tots els llibres, webs, treballs, etc. consultats i utilitzats per a l'elaboració del projecte.

1.5.2. Presentació

La presentació constarà de dues parts. La primera i més bàsica és un recull de diapositives que esquematitzaran el contingut de la memòria. Amb un estil visual i fàcil de captar, aquestes diapositives seran la base sobre la qual es recolzarà la segona part de la presentació, que serà un vídeo amb l'explicació per part de l'estudiant del treball.

En aquesta presentació, l'alumne exposarà totes les parts del procés d'elaboració del treball de final de grau. Amb una limitació temporal, aquest ha de ser capaç d'interessar al tribunal i fer entendre el funcionament de tot el projecte.

En el cas del projecte de l'Estudi i condicionament acústic d'un local de restauració i un espai polivalent, la presentació haurà de fer un repàs molt breu dels conceptes teòrics, ja que es suposarà que el tribunal pot no haver-se pogut llegir i preparar amb anterioritat la memòria del projecte, fent petites definicions d'aquests conceptes sense entrar en càlculs ni fórmules.

A continuació es passarà ràpidament a explicar el cas pràctic, que és la base del projecte. S'han d'explicar de manera resumida però clara les decisions preses per a la solució d'aquest cas i la proposta i anàlisi final que se'n deriva.

Aquesta explicació anirà acompanyada de detalls tècnics, com per exemple especificacions de materials, simulacions, plans del local, etc. degudament resumits per evitar que la presentació es converteixi en una successió tediosa de xifres; però que s'han d'incloure ja que aporten informació essencial per a l'explicació i comprensió del projecte.

2. Estat de l'art

En aquest apartat ens farà un repàs a les tècniques actuals de mesura, anàlisi i tractament acústic, tant exterior com interior, de diferents tipus d'edificis i recintes.

2.1. Metodologia

A l'hora de realitzar mesures de soroll acústic i/o de temps de reverberació s'han de tenir molts factors en compte. Els resultats d'aquestes mesures es poden veure influenciats per un gran ventall d'elements que en poden invalidar els valors: l'equip que s'ha utilitzat, com per exemple el sonòmetre i el seu calibratge; les condicions ambientals, com ara el vent, la humitat, la temperatura, la pressió ambiental, les vibracions; o les emissions de sons/sorolls per part de fonts inesperades i/o no volgudes. Per tant, la metodologia emprada quan es procedeix a la mesura és molt important per evitar resultats distorsionats.

Aquest estat de l'art es centra en els procediments adequats quan es volen fer mesures acústiques. S'enumeraran els passos a seguir durant aquest procés de mesura.

2.1.1. Motiu de la mesura

El primer pas previ és saber quin és el motiu de les mesures. Un dels més habituals a l'hora de realitzar mesures acústiques de soroll és per denúncies dels ciutadans. Un exemple molt típic, en l'àmbit de l'acústica ambiental, és un veí que denuncia un local d'oci per excés de soroll a la nit, provocant problemes a l'hora de descansar.

El dret al descans està regulat per la llei 37/2003 i el reial decret 1367/2007, juntament amb les normatives local i autonòmica, que poden diferir de la general. En els casos que les lleis no coincideixin, sempre s'aplicarà la que tingui un caire més restrictiu.

Seguint amb l'exemple anterior, depenent del municipi el denunciant podria exigir que el local generés uns nivells de soroll menors als 25 dB(A) en recepció al dormitori de l'habitatge i de 30 dB(A) en recepció al menjador, durant la franja d'horari nocturn, és a dir, de les 23h de la nit a les 7h del matí.

Llavors s'iniciaria tot aquest procés de mesura de nivells sonors per comprovar si aquests límits s'excedeixen.

Un altre dels motius per realitzar les mesures acústiques és, a l'hora d'avaluar l'aïllament acústic, per saber si aquest és suficient per complir amb la normativa de l'acústica arquitectònica. Per exemple, els responsables de la construcció d'un local industrial poden realitzar les mesures per acabar de condicionar-lo adequadament, i complir així amb la normativa certificadora en quant a emissions i estalviar-se futurs problemes.

Pel que fa al condicionament acústic, el principal motiu per a fer-ne mesures acústiques és comprovar els nivells sonors en recintes interiors. Aquestes mesures avaluen els temps de reverberació de les ones sonores. Aquest temps fa referència a la caiguda de nivell en 60 dB en relació al temps, un cop s'ha aturat la font emissora del so.

L'efecte principal que té aquesta reverberació és un problema en la intel·ligibilitat de la paraula que dificulta la comunicació. Això és degut a un increment del nivell de soroll de fons, creant ecos, que en dificulten la recepció de missatges entre interlocutors, fent que aquests hagin de cridar més i que costi entendre's. Aquest efecte és el conegut com a efecte *cocktail party*, explicat en aquest projecte.

Per tant, un cop se sàpiguen els motius pels quals es realitzen les mesures, se sabrà quines lleis i/o recomanacions s'han de complir i quins són els elements a utilitzar i els paràmetres a analitzar.

2.1.2. Equip necessari segons la llei

Depenent de l'objectiu pel qual es realitzen les mesures acústiques s'haurà de seleccionar la instrumentació acústica a utilitzar. Les diverses normatives regulen quins són els equips i configuracions necessàries per a validar les mesures obtingudes.

Per exemple, la normativa UNE-EN ISO 3382 determina els equips necessaris per a la mesura de temps de reverberació en un recinte. Alguns d'aquests són: una font acústica omnidireccional i que sigui capaç d'emetre una pressió acústica suficient per a l'exercici que es vol realitzar; juntament amb un sonòmetre classificat com a classe 1 segons la norma CEI 60651, amb uns filtres d'octava i de terç d'octava que compleixin la norma CEI 61260.

2.1.3. Definir el tipus de soroll

El tipus de soroll a mesurar pot tenir diferents orígens: pot ser un soroll de banda ampla, provocat per trànsit rodat; un soroll de banda estreta, degut a un ventilador; amb tons purs, com un motor elèctric. Per tant, un dels objectius serà descobrir quin tipus de soroll és el que serà mesurat.

La diferència entre aquests tipus de soroll es deurà a diferents factors: el seu valor global, l'evolució que té el soroll amb el temps, i les freqüències que el formen. Els tons purs estan compostos d'una sola freqüència, mentre que els sorolls de banda ampla estan format per una àmplia barreja de diferents freqüències.

En el cas de l'acústica ambiental, també podem classificar-los segons el seu comportament:

- Continus, com en processos industrials que funcionen de manera ininterrompuda durant llargs períodes de temps sense gaires variacions de nivell.
- Fluctuant no periòdic, com en treballs d'obres, que només produiran soroll durant unes hores determinades i sense cap patró repetit, ja que dependrà dels diferents treballs que s'hi estiguin realitzant.
- Fluctuant periòdic, que manté uns nivells de soroll que es repeteixen al llarg del temps de manera periòdica. Un exemple d'aquest tipus en pot ser el funcionament d'un ventilador, perquè tindrà una repetició constant del mateix moviment mentre estigui funcionant.
- Intermitents, un exemple n'és el soroll recollit a les vies del tren, ja que només es generen sorolls intensos durant curts períodes de temps, quan un tren hi circula, interrompent els períodes de "silenci".
- Impulsional amb repetició, que tenen un valor molt elevat i una duració molt breu i es repeteixen en el temps, com per exemple un martell pneumàtic.
- Impulsional aïllat, que també tenen un valor molt elevat i duració molt breu, però a diferència dels altres, no tenen cap repetició. Es pot predir o no la seva emissió, i un exemple n'és els tret d'una arma.

Conèixer el detall quin tipus de soroll és el causant de les molèsties és un dels punts claus de l'aïllament acústic, per saber quina naturalesa té aquest so i quin tipus de solucions s'hauran de dissenyar.

Pel que fa al condicionament acústic, la seva influència es limita, bàsicament, a l'efecte que pot tenir en el soroll de fons que té influència a l'hora de calcular el marge necessari per al càlcul del temps de reverberació en l'interior d'un recinte.

2.1.4. Camp sonor, posició de la font i condicions meteorològiques

Quan s'estudia el nivell sonor d'una font, s'haurà de considerar si el camp sonor en el qual es realitzaran les mesures serà un camp sonor lliure o difús. És camp sonor lliure quan una font emet una pressió sonora determinada i els seus raigs sonors no es troben amb cap obstacle; perdent intensitat només a conseqüència de la distància. Ja que aquestes condicions són molt difícils de complir-se, s'acceptarà també com a camp lliure un terreny sense obstacles i on el terra tingui un component reflectiu baix.

A diferència el camp lliure, les condicions de camp difús seran els casos en què es produiran ones reflectides provinents de tots els obstacles que les emissions sonores es troben durant la seva propagació. Aquesta aparició d'ones reflectides provinents de totes direccions generen una densitat d'energia igual en tots els punts.

Una altra classificació que es pot establir pel que fa al camp sonor és la relativa a la distància respecte la font. El camp proper es correspon a la zona pròxima a la font sonora, i degut a les seves característiques no ens serà útil a l'hora de prendre mesures. Sí que serà més útil realitzar aquestes mesures en condicions de camp llunyà, que es troba a partir d'una distància determinada de la font.

El tipus de camp en el què es realitzin les mesures determinarà el tipus de micròfon a utilitzar. També determinarà els resultats que es podran obtenir, ja que una mateixa font de soroll obtindrà uns nivells diferents en un tipus o altre de camp.

En els casos de condicionament acústic, ja que es mesura el temps de reverberació en interiors, es treballarà en condicions de camp difús.

Pel que fa a les condicions meteorològiques, s'analitzen diferents aspectes, com poden ser temperatura, vent i humitat, entre d'altres.

Els raigs acústics es veuen deformats pels gradients de temperatura. Això fa que els raigs sonors no viatgin en línia recta, si no que es corbin. Variaran segons si és de dia o de nit, ja que les zones de temperatures són diferents: durant el dia les temperatures més altes estan situades a prop del terra, però durant a la nit les temperatures són més fredes a menys alçada. Els raigs sonors es poden veure dirigits cap al terra o cap amunt, cap a les zones d'aire fred. D'aquesta manera, durant el dia es crearan zones d'ombra a ras de terra, que consisteixen en zones de gran atenuació acústica.

Pel que fa al vent, els raigs acústics es veuran afavorits o atenuats segons la direcció d'aquest. Els raigs que es propaguen en la mateixa direcció del vent, es veuran impulsats pel vent, ja que

n'augmentarà la velocitat, i es corbaran en direcció cap al terra; mentre que els que es propaguen en la direcció contrària al vent es veuran "frenats" i desviats, allunyant-se del terra. Per tant, en els casos en què els raigs i el vent tenen sentits oposats, la seva desviació crearà zones d'ombra.

La humitat és un altre dels elements a tenir en compte ja que afectarà l'absorció del so. Aquesta serà més gran per a freqüències altes i percentatges d'humitat relativa baixos.

En exteriors, tots aquests factors s'han de tenir en compte a l'hora de fer mesures. Els efectes del vent i la temperatura poden arribar a provocar atenuacions de fins a 5 dB. Degut a això, s'ha de tenir en compte quines condicions meteorològiques es tindran a l'hora de fer les mesures, ja que s'han de fer aquestes amb el vent favorable, per què és quan s'obtidran valors més grans. Les condicions de temperatura s'han de tenir compte però, a diferència de amb el vent, no es poden buscar condicions favorables ja que els nivells de soroll acceptats canvien de dia respecte a de nit.

En interiors, els fenòmens meteorològics que s'han de tenir en compte són la temperatura, la humitat i la pressió atmosfèrica. La influència d'aquests factors es dona al calcular l'absorció de l'aire. Quan s'estudia el condicionament acústic d'una sala, si aquesta té un volum major de 350 m³, s'ha de tenir en compte que es produirà una atenuació deguda a l'aire. Aquesta absorció serà més gran, per exemple, com menys humitat hi hagi.

2.1.5. Escollir el sonòmetre adequat

El sonòmetre és un instrument electrònic dissenyat per mesurar sons sota unes condicions determinades. Aquestes condicions estan configurades per simular l'oïda humana, així doncs el sonòmetre farà una interpretació dels resultats similar a la que faria una persona.

Està format per un micròfon, amb una resposta plana per a tot l'espectre de freqüències a analitzar (20 Hz – 20 kHz) que converteix la pressió sonora en un senyal elèctric, que serà amplificat i filtrat. Després de calcular-ne el nivell i passar-ne el resultat a escala logarítmica, el sonòmetre mostrarà el nivell resultant en dB. Les dades que processa el sonòmetre poden ser globals o per bandes de freqüències i s'hi apliquen les ponderacions freqüencials i temporals establertes a la normativa CEI 61672, que defineix tots els paràmetres del sonòmetre.

Per evitar problemes entre diferents models i marques de sonòmetres, hi ha un conjunt de normes internacionals per a estandarditzar-ne l'ús.

Originàriament, els sonòmetres podien ser de diferents tipus: 0, 1, 2 i 3. Aquesta diferenciació es produïa per la precisió que tenia el sonòmetre: de menys precisos (tipus 3) als més precisos (tipus 0). Per tant, els de tipus 3, amb un marge d'error d' $\pm 1,5$ dB(A), s'utilitzaven per obtenir mesures orientatives, mentre que els de tipus 2, amb un marge d'error d' ± 1 dB(A), per mesures de soroll més precises, com per exemple soroll industrial o ambiental, tot i que no ho eren prou segons algunes regulacions. Sí que eren adequats per la legislació els de tipus 1, amb un marge d'error de $\pm 0,7$ dB(A), que eren més precisos i s'utilitzaven per fer mesures oficials. Finalment, els de tipus 0, amb un marge d'error de $\pm 0,4$ dB(A), eren els utilitzats als laboratoris per fer proves i recerca, ja que oferien la major qualitat i precisió¹.

En l'actualitat, segons la norma CEI 61672 la diferenciació inicial s'ha reduït als sonòmetres de classe 1, que agrupa els antics tipus 0 i 1, i de classe 2, que agrupa els antics tipus 2 i 3.

2.1.6. Funcionament i calibratge de l'equip

S'ha de comprovar l'estat de les bateries de l'equip a utilitzar, per evitar que durant el procés de captació de dades es produeixi un mal funcionament d'algun element de l'equip o que algun deixi de funcionar, i que per tant no es pugui completar el procés de mesures acústiques.

També s'ha de comprovar que el sonòmetre avalua els nivells de pressió de forma adequada. S'utilitzarà un calibrador acústic o pistòfon, directament sobre el micròfon del sonòmetre.

El calibrador emetrà una senyal de freqüència i pressió conegudes directament al micròfon, i es podrà comprovar així que el sonòmetre la capta correctament si el valor mesurat coincideix amb l'emès que s'ha configurat. El to emès pel calibrador és d'1 KHz amb un nivell de 94 dB. Per tant, la mesura del sonòmetre ha d'indicar aquests 94 dB amb un marge d'error molt petit, de $\pm 0,5$ dB. En sonòmetres digitals, si el resultat obtingut està dins del marge d'error, s'adapta la sensibilitat d'aquest ajustant-ne el nivell. Si el resultat es troba fora del marge d'error, quedarà invalidat i s'haurà de realitzar un nou calibratge.

Aquest pas és obligatori per realitzar mesures d'acord a la legislació. Paral·lelament, també és necessari que els sonòmetres hagin passat controls periòdics que en certifiquin l'estat òptim; si no, els resultats obtinguts no seran acceptats a nivell legal.

¹ [http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(2\)%20Analisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(2)%20Analisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm)

2.1.7. Col·locació del sonòmetre

S'hauran de seguir les indicacions corresponents sobre com orientar el sonòmetre respecte la font emissora del soroll a mesurar. Aquest haurà d'estar situat a un mínim de 1'20 m del terra i pot ser que l'operador de l'equip s'hagi de situar a distància d'aquest per evitar interferències o, com a mínim, si es requereix que manipuli el sonòmetre durant la mesura, es situarà amb el braç estirat per intentar influenciar el mínim possible.

La presència de superfícies properes a prop del lloc de mesura també és molt important, sobretot si es tracta de superfícies reflectants, i el sonòmetre s'haurà de situar a un mínim d'1'5 m de qualsevol superfície reflectant.

El fenomen de la reflexió es produeix quan una ona sonora incideix en una superfície sense que se n'absorbeixi tota l'energia. Quan això succeeix, s'està generant una "nova" ona sonora reflectida que es transmet de manera diferent a la original, fent que els raigs sonors canviïn de direcció.

L'efecte que provoca la reflexió en el receptor és que aquest rep el so per diferents camins: la radiació directa des de la font, i tots els raigs provinents d'una o més reflexions. Aquesta recepció del so, al venir per diferents camins, pot provocar un desfasament poc perceptible de les ones sonores, però en dificulta la seva comprensió. Altres fenòmens provocats per les interferències de les ones sonores són una emfatització del nivell sonor o una cancel·lació d'aquest. Aquests efectes, lògicament variaran segons la posició del receptor, causant diferències en la recepció del so, segons la zona on estigui aquest.

Depenent de la superfície, aquesta pot absorbir una quantitat variable de l'energia sonora. Algunes superfícies tindran un coeficient d'absorció associat per expressar el grau d'absorció que tenen, i aquest coeficient pot variar segons la freqüència, és a dir, poden ser més absorbents per a sons greus que per a aguts o viceversa. Alguns exemples són: el vidre i les rajoles, que són materials molt poc absorbents i, per tant, que generen moltes reflexions; en canvi, la moqueta és un material molt absorbent, és a dir, genera reflexions molt debilitades respecte l'energia de l'ona incident.

Quan el receptor és el sonòmetre realitzat per la mesura, s'haurà de vigilar amb els efectes provocats per la reflexió per no obtenir mesures invàlides, ja que poden focalitzar zones puntuals amb un nivell de soroll elevat o al contrari, que no siguin representatives de la situació en què es produeix la mesura. Aquestes reflexions, a la pràctica, poden ser produïda tant pel mateix terra, que són inevitables; com per les parets dels edificis, que són les superfícies a intentar evitar en el cas que sigui possible.

2.1.8. Mesurar el soroll de fons

S'entén per soroll de fons el nivell que s'obté al realitzar la mesura al punt d'anàlisi sense que la font generadora de soroll que s'ha d'avaluar estigui funcionant. Tot i això, no sempre es pot controlar l'emissió o no per part de la font generadora de soroll, per tant, pot ser difícil discernir quina aportació als resultats mesurats prové d'elements aliens a la font de soroll.

Per considerar aquesta influència del soroll de fons, no solament s'analitzarà el nivell global equivalent de les mesures, sinó que també es farà un anàlisi per bandes de freqüències, ja siguin d'octaves o de terç d'octava.

Per garantir que el soroll de fons no estarà afectant la font a analitzar, ha de ser un mínim de 10 dB menor que la de la font en totes les seves freqüències. Es considerarà aquest mínim de 10 dB perquè quan es fa la suma del nivell de so d'una font amb el nivell del soroll de fons, el nivell no canvia. Si el marge fos menor, al fer aquesta suma es veuria que el nivell resultant és major que el de la font i, per tant, l'estaria influenciant.

2.1.9. Escollir l'escala de ponderació freqüencial

Les escales de ponderació són filtres elèctrics que simulen la resposta del sistema auditiu humà, per fer que els nivells de sonoritat mesurats s'adaptin al que les persones senten, i poder avaluar així la seva molèstia.

N'hi ha de quatre tipus: A, B, C i D. Aquestes escales aplicaran certa atenuació o accentuació de les diferents freqüències, i aquestes modificacions són les que diferencien cada tipus d'escala. S'aplicaran sumes o restes de dB (amb excepció de la freqüència de 1 kHz) a les bandes d'octaves o de terç d'octava, i els resultats seran expressats en dB(), on entre parèntesi s'escriurà la lletra de la ponderació.

L'escala A simula la resposta centrant-se en els nivells de pressió baixos (<55 dB), l'escala B en els nivells mitjos (55-85 dB) i la C en els nivells alts (>85 dB). A diferència d'aquestes, l'escala D es fa servir exclusivament a l'hora de mesurar el soroll produït pels avions, ja que seran nivells molt alts de pressió sonora.

La més utilitzada, i d'ús obligatori segons la legislació espanyola, és la xarxa de ponderació A: Aquesta ponderació atenua l'afectació de les freqüències més baixes i n'accentua les altes. Està configurada amb aquests paràmetres per simular la resposta que presenta l'oïda humana, ja que és més sensible als sons aguts, de freqüències altes, que als sons greus, de freqüències baixes.

També existeix l'escala U, que s'utilitza per mesurar ultrasons. Com que aquests no són audibles pel sistema auditiu humà, no es tenen en compte a l'hora de realitzar mesures acústiques sobre el terreny.

2.1.10. Selecció de la resposta del detector

La resposta del detector pot ser de quatre tipus: *fast* (F), *slow* (S), *impulse* (I) i *peak* (P). La diferència entre aquests modes recau en les respostes temporals del tipus de soroll que s'està analitzant i les seves variacions. Adquirir i processar totes les variacions de soroll seria molt complicat, ja que els sorolls fluctuen constantment i de manera molt ràpida i, per tant, cada tipus realitzarà mesures a diferents intervals determinats, essent útils en diferents casos.

S'utilitzarà la resposta F per a mesures de soroll fluctuant. Aquesta resposta processa mesures amb una constant de temps de 125 ms, ja que es preveuen variacions ràpides del nivell de soroll. Un exemple pot ser la mesura del soroll d'un motor, que pot tenir variacions ràpides segons el seu ús.

La resposta S s'utilitza per a mesurar sorolls que no fluctuen tant ràpidament, és a dir, que es mantenen relativament estables en el temps. La constant de temps amb la que es processaran les mesures en aquest mode és de 1s, ja que no es preveu que el soroll variï com en el cas de la resposta F. Utilitzarem aquest mode, per exemple, per l'anàlisi de maquinària en funcionament durant llargs períodes de temps.

Per a sorolls impulsius, s'utilitza la resposta I. Quan es parla de soroll impulsiu, s'entén el soroll que té una duració inferior a 1s, amb un nivell elevat respecte a les mesures prèvia i posterior, i amb unes pujades i baixades abruptes. La constant de temps és de 35 ms, molt menor que la resposta S i la F, ja que si no, el receptor no recolliria l'efecte d'aquest soroll. Alguns dels casos en què s'utilitza aquesta resposta és quan s'analitzen els nivells d'explosions o trets, per exemple.

Una altra mesura per als sorolls impulsius, és la resposta P. Aquesta s'utilitza en sonòmetres de màxima precisió i funciona de forma diferent de les altres respostes. El mode P recull els pics de soroll que emet una font, resultant així molt més precís i evitant que el seu nivell quedi rebaixat per culpa de les finestres temporals. Això és útil, per exemple, per detectar valors que puguin causar lesions, ja que el mode I pot no detectar els pics correctament. Si aquest mode dona per vàlids nivells que provoquin lesions irreversibles, la mesura de soroll no haurà servit de res; el mode P ens avisarà de quin màxim hi ha hagut amb un marge d'error mínim i per tant sabrem quin nivell màxim ha emès una font de soroll².

² <https://www.noisemeters.com/help/faq/min-max-peak.asp>

https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_level_meter#LCpk:_peak_sound_pressure_level

<https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/sonometr.htm>

La mala utilització de les diferents respostes pot comportar problemes. En el cas d'utilitzar respostes amb constants de temps petites amb sorolls estables, es generarà una gran quantitat de dades de poca rellevància. Pel contrari, quan es mesuren sorolls amb una ràpida variabilitat amb una constant de temps molt gran, la pressió sonora resultant és menor de la real.

2.1.11. Procedir a les mesures

El temps durant el qual es prendran mesures dependrà del tipus de soroll que es pretén analitzar. Habitualment, per fonts de soroll estacionari es realitzen mesures de 30s, per sorolls al lloc de feina es realitzen mesures de la jornada laboral, és a dir 8h, i per a sorolls de trànsit rodat es poden realitzar mesures de fins a 24h.

Un cop s'han recollit les mesures, aquestes s'expressaran explicitant els nivells màxims i mínims recollits durant tot l'interval de les mesures, i si la diferència entre aquests no excedeix els 8 dB, es podrà calcular un nivell amitjanat.

En el cas que succeeixi alguna incidència durant les mesures, s'han d'informar. Els tipus d'incidències que poden sorgir poden ser molt diferents, i s'hauran de tenir en compte a l'hora de redactar l'informe oficial per evitar falses deduccions de les dades recollides.

2.1.12. Comprovació dels elements ambientals

Un cop realitzades les mesures, s'haurà de procedir a una segona comprovació dels elements externs que poden condicionar aquestes mesures i que en poden afectar els resultats.

Es torna a realitzar la mesura del soroll de fons per garantir que no hi ha hagut un gran canvi respecte la mesura inicial. Si es mesuressin nivells molt diferents (i més alts), s'hauria de tenir en compte que el soroll de fons pot haver contaminat les mesures i que aquestes poden ser no vàlides.

Amb el mateix procediment previ a realitzar les mesures, s'haurà de comprovar el calibrat del sonòmetre, per assegurar que el seu micròfon no ha patit cap alteració durant el procés de mesura. Si hi ha hagut alguna alteració de l'equip, s'haurà d'informar.

També s'han de comprovar les condicions meteorològiques. D'aquesta manera es podrà comprovar si les condicions han canviat, i si ho han fet, s'haurà de fer una posterior consideració de si aquest canvis han influït o no en les mesures.

2.1.13. Informe final

Un cop es tenen totes les dades recollides, s'ha de procedir al seu anàlisi en profunditat. S'haurà de fer els càlculs pertinents i comprovar si es compleixen els objectius de la mesura o si s'infringeix alguna limitació.

Totes aquestes dades i conclusions es recolliran en un document oficial. Aquest document haurà d'anar signat per un professional titulat, que fent això en verificarà la seva autenticitat.

Aquest document també inclourà els elements tècnics necessaris per a la seva comprensió, a part de les dades de les mesures, com ara plànols, certificacions de qualitat de l'equip utilitzat o fitxes tècniques d'equips, materials i/o instal·lacions. Un altre apartat que pot incloure és el corresponent al plantejament de solucions als problemes detectats.

2.2. Legislació

A continuació es veuran algunes de les normatives més importants a l'hora de realitzar treballs en el camp de l'acústica. Aquestes normatives estan descrites per l'AENOR, l'Associació Espanyola de Normalització y certificació.

2.2.1. Temps de reverberació

La normativa UNE-EN ISO 3382: *Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos* és molt important a l'hora de realitzar mesures acústiques del temps de reverberació. Aquesta normativa és internacional i especifica la metodologia de treball per realitzar-les, els aparells i quines condicions determinades s'han de complir. També entra en detall en com s'han d'avaluar i presentar en un informe les dades obtingudes. Aquesta normativa es pot aplicar a tot tipus de recintes, no només als destinats a música i a conferències, si no a tots els llocs on s'hagi d'establir una protecció contra el soroll.

Dins de l'equip a utilitzar per a la mesura, s'especifica quines característiques ha de tenir la font acústica, els micròfons i els equips de gravació i anàlisi, i on s'hauran de col·locar aquesta font i aquests receptors per a considerar els resultats com a vàlids; ja que s'han d'evitar proximitats a certes zones i entre elles.

Amb la definició dels procediments de mesura es presenten dues opcions: el mètode del soroll interromput i el mètode de la resposta impulsiva integrada. Es defineix com s'ha d'excitar el recinte i el

número de mesures a prendre. Pel mètode del soroll interromput seran necessàries com a mínim tres mesures per a cada posició del sonòmetre, per després fer-ne una mitjana.

Un cop realitzades les mesures, s'avaluen les corbes de caiguda. S'hauran de tenir en compte els marges obtinguts amb l'excitació del recinte respecte el soroll de fons, per determinar-ne la validesa i quins paràmetres s'avaluaran. En el cas del mètode del soroll interromput, s'utilitzaran els paràmetres T_{20} i T_{30} als intervals de caiguda d'entre 5 i 25 dB i d'entre 5 i 35 dB, respectivament.

Per obtenir un resultat final es farà una mitjana aritmètica dels temps de reverberació, o bé una mitjana del conjunt de les corbes de caiguda. Aquests resultats seran presentats tant en forma de gràfica com en forma de taula; juntament amb un informe on s'especifiquin les dades del recinte, els seus plànols, el volum i una descripció dels materials, la situació de l'equip i la col·locació de les fonts acústiques, la senyal utilitzada per excitar-la i la ubicació dels receptors a les mesures.

2.2.2. Aïllament acústic

La normativa UNE-EN ISO 16283: *Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción* defineix com ha de ser mesurat i analitzat l'aïllament acústic. Es divideix en tres parts: *Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo*, *Parte 2: Aislamiento a ruido de impacto* i *Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada*. En l'actualitat només la segona i la tercera part estan vigents.

La ja substituïda part 1 servia per indicar quins havien de ser els nivells d'aïllament acústic a soroll aeri entre dos recintes. Mitjançant dos mètodes, el mètode per defecte i el mètode de baixa freqüència, s'especificaven el número de posicions de la font i del micròfon, i en el cas de la baixa freqüència també en quina posició s'ubica, per obtenir un número determinat de mesures suficient per fer-ne un resultat mitjà de les bandes de freqüències i proporcionar-ne un valor únic.

La part 2 especifica quins procediments s'han de seguir per determinar l'aïllament acústic a soroll d'impactes, establint uns protocols que defineixen quin tipus de maquinària s'ha d'utilitzar per simular els impactes a l'estructura d'un edifici. Habitualment es mesura tant amb la màquina d'impactes com amb la pilota de cautxú l'impacte del dia a dia en habitatges connectats, per calcular-ne l'aïllament en recepció.

A la part 3, el que es mesura és l'aïllament de façana al soroll exterior, especialment el de trànsit rodar, ferroviari i/o aeri. Amb els diferents mètodes de mesura, mètode per elements amb soroll de tràfic o d'altaveu i mètode global amb soroll de tràfic o d'altaveu, es quantifica, s'avalua i es compara l'aïllament en recintes, ja estiguin moblats o no.

2.2.3. Calibratge

La normativa UNE-EN ISO 6926: *Requisitos de funcionamiento y calibración de fuentes acústicas de referencia empleadas para la determinación de los niveles de potencia acústica* defineix els mètodes per calibrar les fonts acústiques de referència.

Aquest calibratge es compon de les diferents parts que caracteritzen la font acústica: l'estabilitat temporal de la potència acústica emesa, les característiques espectrals i la directivitat. Es defineix en quins recintes es farà aquest calibratge, cambra anecoica, cambra reverberant, etc.

Amb aquest procediment s'aconseguiran les dades i la incertesa del calibratge dels nivells de la font acústica, especificats en bandes d'octava i de terç d'octava amb una ponderació A.

2.3. Aproximacions del comportament del camp acústic

Quan es parla d'acústica es pot classificar aquesta segons les seves característiques i l'objectiu d'estudi que es tingui, en aquest cas, estudiar com és el camp acústic en ambients interiors.

2.3.1. Acústica ondulatoria

L'acústica ondulatoria és la que té en compte el comportament físic de tipus ondulatori del so. Estudia l'equació de l'ona i es fa servir quan és necessari estudiar la pressió sonora en qualsevol punt del recinte.

S'estudiarà, a partir dels modes propis del recinte, en casos en què s'estudiïn recintes petits, com ara estudis de gravació, amb parets paral·leles i/o poc absorbents. Aquests modes propis es produeixen quan es tenen ones estacionàries, degut a la coincidència d'ones incidents i reflectides i, per culpa d'aquesta, a l'aparició d'interferències constructives (suma d'ones) o destructives (cancel·lació d'ones).

Els modes propis aniran relacionats a una freqüència determinada, i com més gran sigui aquesta més densitat hi haurà. La presència de tots aquests modes propis dona lloc a un so característic de la sala, i s'anomena coloració. Amb una bona distribució dels modes propis, es disminueix l'efecte de les ressonàncies i, consegüentment, es produeixen menys coloracions.

Quan es té una gran quantitat de modes propis, és a dir, quan la freqüència ha augmentat fins a un valor determinat, la densitat d'aquests modes equival, a efectes pràctics, a la seva desaparició. Per tant, les sales grans no tindran coloració.

2.3.2. Acústica geomètrica

L'acústica geomètrica es basa en el supòsit d'aplicar als raigs sonors les mateixes propietats dels raigs de llum. Això implica que la font sonora emet raigs i, a partir d'aquesta emissió, s'estudien tots els feixos i el seu viatge fins a arribar al receptor o fins que perd tota l'energia. A diferència de l'acústica ondulatoria, l'acústica geomètrica no té en compte ni la fase ni la longitud d'ona del so, només la direcció de propagació.

La importància de la direcció de propagació es deu a que, segons quina sigui aquesta, hi haurà unes reflexions determinades en el camí de la font al receptor. Es produirà pèrdua d'energia degut a l'absorció de l'aire i a l'efecte que té cada reflexió de l'ona sonora, tenint en compte les propietats absorbents de la superfície on es reflecteix, i com afecta aquesta a la seva energia.

Aquest tipus d'acústica servirà per estudiar l'efecte de la geometria del recinte i per a l'estudi de les primeres reflexions.

2.3.3. Acústica estadística

L'acústica estadística es fa servir com a mètode d'estudi general, la qual cosa implica que es deixa de dependre de la posició estudiada i s'extrapolen els resultats a totes les posicions possibles. S'utilitzarà en condicions de camp difús, ja que aquest implica que hi ha la mateixa densitat d'energia en qualsevol dels seus punts i que es té la mateixa probabilitat de rebre un raig des de qualsevol direcció.

Serà útil un cop l'emissor atura la seva activitat i es calcula com evoluciona la caiguda d'energia, és a dir, per calcular els temps de reverberació, ja que perden interès la trajectòria i el recorregut de cada raig individual i es passa a avaluar els nivells globals i la cua reverberant del senyal.

Aquesta aproximació estadística al comportament del camp acústic serà la base del condicionament acústic i, per tant, el mètode que s'utilitzarà en aquest projecte.

2.4. Simulacions

Les simulacions acústiques es corresponen al modelat informàtic d'un recinte i al càlcul d'acústica de sales. Afegint-li fonts sonores virtuals, aquests programes permeten realitzar un estudi acústic molt complet a partir de les dades introduïdes, desenvolupant-les i proporcionant una flexibilitat i fiabilitat essencial per dissenyar condicionament acústic, aïllament acústic, etc.

La utilització de simulacions té grans avantatges, ja que permet fer proves amb un període de temps molt menor, juntament amb uns costos menors. Aquesta facilitat d'ús redueix el marge d'error en gran mesura i permet decidir quins seran els passos a seguir en els diferents casos de disseny acústic.

En l'actualitat s'utilitzen diferents tipus de software per simular els fenòmens acústics amb ordinador com puguin ser Olive Tree Lab³, ODEON⁴, Raynoise⁵, EASE⁶, etc.

2.4.1. Modelat 3D i configuració

El primer pas per a realitzar aquestes simulacions acústiques és la creació virtual de l'entorn. El modelat 3D consisteix en definir en un espai tridimensional els plans que formaran el recinte: el terra, el sostre i les parets, juntament amb la resta d'objectes i superfícies que formen part del recinte. A partir de les mesures físiques d'aquest recinte, s'introduiran les dades al programa i es distribuiran les superfícies en l'espai. És essencial que aquest espai simulat sigui completament precís, ja que a partir d'aquestes delimitacions físiques es treballaran els casos.

Un cop està realitzat l'entorn, es configurarà l'escena. Depenent del seu propòsit hi haurà diversos àmbits d'acció. Un d'ells és partir d'aquest model i començar a estudiar el cas. Es poden situar fonts sonores en l'interior del recinte i mirar com interactuen en l'escenari. Per a fer això, s'ha d'establir una potència determinada, i quina és la directivitat de la font; els programes habitualment proveeixen configuracions estàndard de dispositius reals. També es pot determinar un receptor per veure quins nivells rep aquest.

Una altra línia d'actuació es correspon a l'estudi del cas a partir de dades obtingudes de mesures reals. Es poden ubicar emissors i receptors, i especificar quins són el nivells mesurat a la realitat en les condicions determinades. El programa extrapolarà aquestes dades per poder-ne fer un estudi.

A partir d'aquesta simulació, es pot experimentar amb els programes movent les fonts per veure el comportament dels raigs acústics, canviant les configuracions de les fonts i els receptors, estudiant diferents tipus de paràmetres, definint materials per a les superfícies del recinte i dels objectes del seu interior, per veure com aquests influeixen en el comportament de les ones sonores, etc.

En casos de condicionament acústic, aquestes simulacions serveixen de base per estudiar el temps de reverberació de la sala. Indiquen, per exemple, quin temps hi haurà en cada punt, si el receptor tindrà una comprensió fàcil del missatge, etc.; ja que s'estudiaran tots els factors relacionats amb el temps de

³ <https://www.mediterraneanacoustics.com/>

⁴ <http://www.odeon.dk/>

⁵ <https://www.plm.automation.siemens.com/es/products/lms/virtual-lab/legacy-applications/raynoise.shtml>

⁶ <http://ease.afmq.eu/>

reverberació. També permet analitzar l'espectre de la senyal sonora per veure a què es poden deure les alteracions del senyal.

Per a casos d'aïllament acústic permet indicar, per exemple, quin nivell de pressió sonora hi ha a cada punt del recinte, o qualsevol dels altres paràmetres que s'utilitzen per definir les seves propietats. Amb aquestes eines es poden comprovar si hi ha nivells excessius o insuficients, si hi ha focalitzacions, etc. I no només es pot estudiar l'aïllament acústic pel soroll per l'aire, si no també per impactes a l'estructura.

2.4.2. Auralització

L'Auralització és el procés a través del qual es realitza l'escolta d'un missatge o de música, a qualsevol punt, de manera virtual i permet analitzar la qualitat acústica d'una sala.

Els programes de simulació acústica han evolucionat fins al nivell de que amb una senyal d'àudio d'entrada poden calcular com s'escoltarà aquesta senyal en tots els punts del recinte, tenint en compte totes les afectacions que rebrà l'ona sonora des de l'emissió fins a la recepció, com poden ser, atenuació, problemes d'intel·ligibilitat, aparició d'ecos, etc.

2.4.3. Raytracing

El Raytracing és la tècnica que té en compte el comportament de tots els raigs emesos per la font emissora d'una senyal acústica. Per a fer-ho, aplica totes les propietats físiques a cada un dels raigs, i en calcula la velocitat a la que es desplaçarà un senyal acústic, com actuarà aquest a l'impactar amb una superfície, és a dir, l'angle i velocitat de la seva reflexió i la seva pèrdua d'energia.

La magnitud de les dades a tenir en compte dependrà de la màquina en la que es realitzin els càlculs. Si es té en compte que de la gran quantitat de raigs que surten de l'emissor, cada cop que aquests impacten en superfícies difusores, per exemple, tenen múltiples reflexions. Això fa que a mesura que avanci el temps, la quantitat de dades a processar creix exponencialment.

3. Introducció teòrica

En aquest apartat es fa un repàs als diversos conceptes relatius a l'acústica que són necessaris per a la correcta comprensió del projecte. Aquests conceptes poden ser tan teòrics com pràctics.

3.1. Condicionament acústic

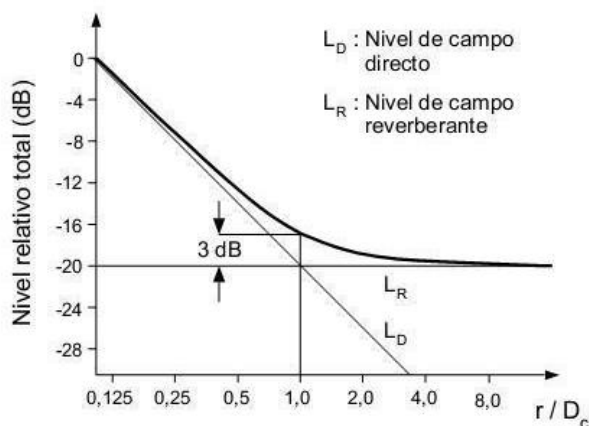
El condicionament acústic es basa en el disseny de formes i revestiments de les superfícies interiors d'un recinte per a aconseguir les condicions acústiques òptimes per al tipus d'activitat que s'hi realitzarà. Aquestes condicions òptimes fan referència, per exemple, a un temps de reverberació del recinte determinat o a la intel·ligibilitat de la paraula.

El condicionament acústic s'aconsegueix a partir de l'anàlisi detallat de les propietats del recinte i la seva geometria, juntament amb tècniques d'absorció, reflexió i difusió de materials constructius.

Es diferencia de l'aïllament acústic ja que el condicionament acústic tracta el comportament del so en interiors, mentre que l'aïllament tracta la transmissió del so entre diferents recintes.

3.2. Camp sonor

El camp sonor és un camp físic creat per l'oscil·lació d'un element generador de so. Quan s'excita una font sonora, aquesta no fa que les partícules es desplacin per l'espai des de l'emissor al receptor, sinó que el que fa és que aquestes partícules oscil·lin al voltant del seu punt de repòs. A l'oscil·lar, mouen les partícules adjacents, i així successivament. El camp sonor està format per totes les partícules que es veuen afectades per aquesta alteració, des del punt generador fins que la seva energia es dissipa.



Il·lustració 1: Camp sonor, relació entre camp directe i difús.

Font: Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

3.2.1. Camp directe

És la zona on predomina el so directe que prové de la font emissora, pròxima a aquesta. La pressió sonora en aquest camp es redueix a mesura que augmenta la distància. El camp directe presenta una caiguda de 6 dB cada vegada que la distància es dobla, simulant condicions d'espai lliure.

Es considera que el camp directe acaba en el punt en què el valor d'aquest és igual al valor del camp difús.

3.2.2. Camp difús

És la zona on predomina el so reflectit, provinent de les reverberacions, i és la zona més allunyada de la font sonora. En aquest camp, la pressió sonora té un valor constant provocat per totes les reflexions i aquest valor de la pressió és constant a tots els punts, sense importar la distància.

El camp difús comença a partir del punt en què aquest és igual al camp directe. La distància entre la font i aquest punt s'anomena distància crítica.

3.2.3. Tipus de sala

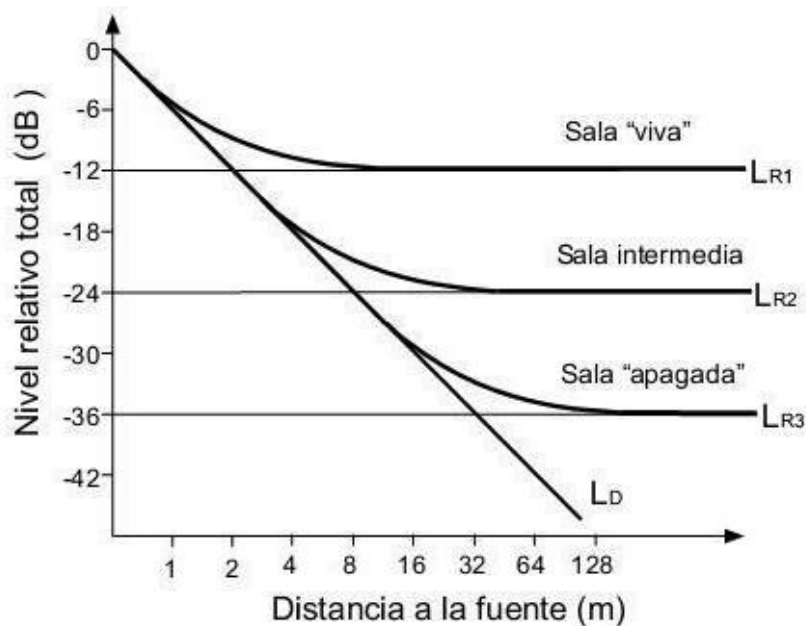
Quan s'analitza acústicament una sala, segons la relació entre el camp directe i el camp difús, en tindrem diferents tipus: viva, mitja i apagada.

Les sales vives tenen un nivell del camp difús molt alt, això implica que hi ha moltes reverberacions a la sala degut a materials molt reflectants. Per tant, el camp directe serà molt petit i a poca distància de la font ja s'entrarà en camp difús.

Les sales apagades tenen un nivell de camp difús molt petit, perquè hi ha poques reverberacions a la sala degut a materials molt absorbents. Com a conseqüència d'aquesta absorció, el camp directe serà el predominant i el nivell de camp difús serà molt baix.

Les sales mitges presenten un equilibri entre tots dos casos, els materials utilitzats seran absorbents però amb un coeficient baix.

Segons l'ús que s'hagi de donar a la sala, interessarà que sigui més aviat viva, com per exemple sales de concerts, o més aviat apagada, com per exemple sales de conferències.



II-lustració 2: Tipus de sales segons la relació entre camp directe i difús

Font: Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

3.3. Nivell de soroll equivalent

Per saber el nivell de soroll equivalent (L_{eq}), es calcula el nivell de pressió sonora segons la seva evolució temporal. És a dir, es mesura aquesta, s'integren els seus valors instantanis i es realitza una ponderació dels valors per tenir un valor únic de nivell de soroll. Aquest càlcul permet interpretar i treballar millor les dades obtingudes de les mesures, que no els valors instantanis que varien constantment.

La pressió sonora és la desviació respecte el nivell de pressió atmosfèrica causada per una ona sonora. És la manera com s'expressa la magnitud d'un camp sonor, i les seves unitats són els Newton/m² (N/m²) o Pascals (Pa). A efectes pràctics, no s'acostuma a treballar amb els valors de pressió sonora, ja que aquests poden variar de l'ordre de 10⁶ Pa.

Per tant, s'utilitza el nivell de pressió sonora L_p , que treballarà en decibels (dB). Una altra utilitat a l'hora de treballar en decibels és que aquests s'adapten millor al sistema auditiu humà, ja que aquest no respon de manera lineal als estímuls sonors, si no que ho fa de forma logarítmica. A la pràctica, això significa que quan un so té un nivell de pressió sonora que és el doble que l'anterior, aquest només incrementa el seu valor en 10 dB.

Els nivells de pressió sonora estan determinats en una escala de 0 a 135 dB, essent el 0 llindar d'audició i el 135 el llindar del dolor.

Tipus de so	dB	Percepció del soroll
Tret d'una arma/explosió	140	Dany immediat
Avió enlairant-se	130	
Martell pneumàtic	120	Intolerable
Edifici en construcció	110	
Crit	100	
Camió circulant	90	Elevat
Carrer	80	
Interior d'un cotxe	70	
Conversa normal	60	Moderat
Oficina/aula	50	
Sala d'estar	40	
Dormitori a la nit	30	Baix
Estudi de ràdio	20	
Fulles dels arbres	10	
Umbral d'audició	0	Quasi inaudible

Taula 1: Classificació dels nivells de pressió sonora

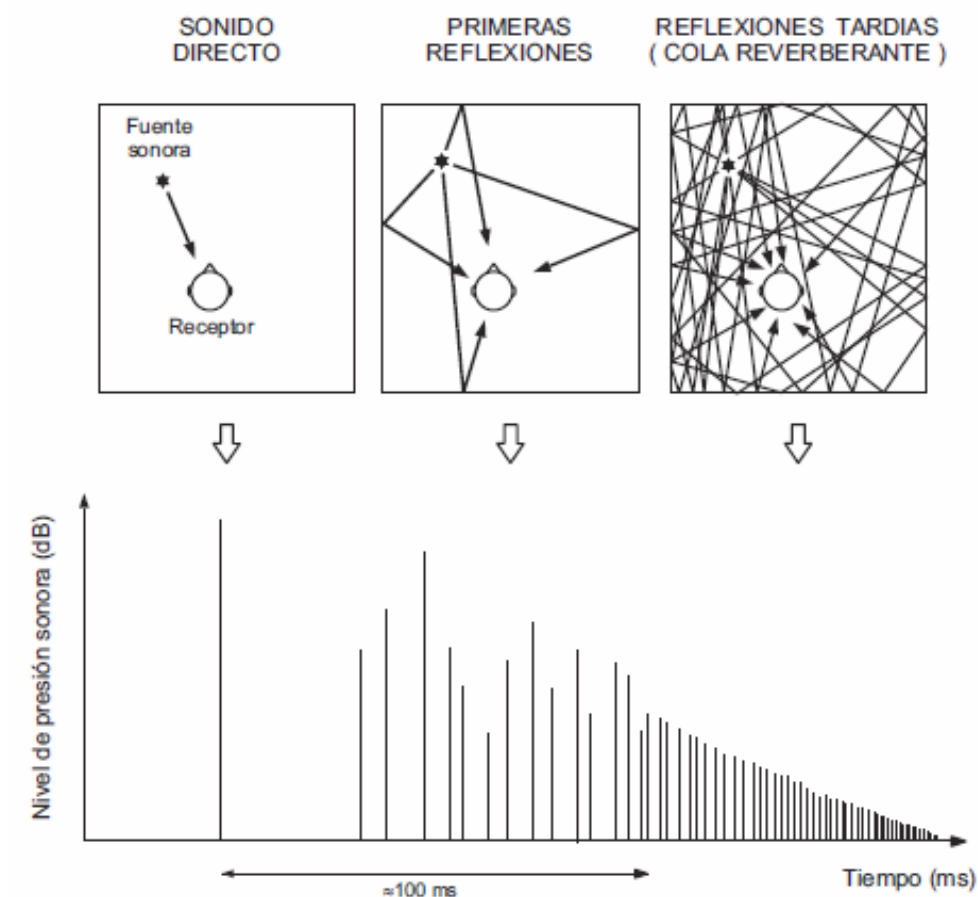
El fet d'omitjar els càlculs de nivell sonor equivalent, amb els quals s'obté L_{eq} , també permet sobreposar-se a qualsevol imprevist ocorregut durant la mesura. D'aquesta manera, si s'està mesurant el soroll ambient al carrer i passa un cotxe, enlloc d'agafar el valor instantani corresponent al pas del

vehicle, que donaria un valor molt alt, es seguirà mesurant i s'omitirà el valor. Com a resultat, el pas del cotxe tindrà una aportació molt petita al valor final obtingut.

Quan es proporciona el valor L_{eq} , també s'ha d'especificar el temps de la mesura, per saber en quin interval s'està treballant. El valor de nivell de soroll equivalent, pot estar ponderat segons la ponderació A, per la qual cosa s'haurà de definir com a L_{eqA} i les seves unitats seran dB(A)⁷.

3.4. El so en recintes tancats

En recintes tancats, com s'ha comentat a l'apartat 3.2., el receptor rep les ones sonores per dues vies, de manera directa o de manera reflectida per les superfícies del recinte.



Il·lustració 3: Ecograma representant les diferents parts de la recepció del so

Font: Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*

⁷ <http://www.inercoacustica.com/acustipedia/item/236-%C2%BFqu%C3%A9-es-el-nivel-continuo-equivalente-leg>

3.4.1. Primeres reflexions

Són els raigs reflectits que arriben al receptor després del raig directe. Es consideren primeres reflexions les que tenen un ordre menor a 3, o sigui, els raigs que han estat reflectits per una superfície un màxim de tres vegades i un mínim d'una vegada, ja que si no seria raig directe.

Aquestes reflexions, a l'arribar en un interval de temps molt petit, són integrades pel sistema auditiu humà amb aquest i en millorarà la intel·ligibilitat i/o la sonoritat. Aquest marge de temps estarà entre els 50 ms, per a casos de discurs parlat, i els 100 ms, per a casos de música.

Com que les primeres reflexions depenen de la geometria de la sala, variaran per cada punt on es situï el receptor i en determinen les característiques acústiques juntament amb els raigs directes.

3.4.2. Cua reverberant

Després de les primeres reflexions, es troba la cua reverberant. Es consideraran part de la cua reverberant les reflexions a partir d'ordre 3, és a dir, els raigs que s'han reflectit un mínim de tres vegades.

En aquesta part la densitat de reflexions és molt elevada, degut a l'arribada de totes les reflexions des de les diverses superfícies de la sala. En aquesta part, la pressió sonora disminueix progressivament, degut a la pèrdua d'energia al reflectir amb les superfícies.

La cua reverberant, a l'estar influenciada per tota la sala, serà molt semblant en qualsevol punt de la sala on es situï el receptor.

3.4.3. Early Decay Time

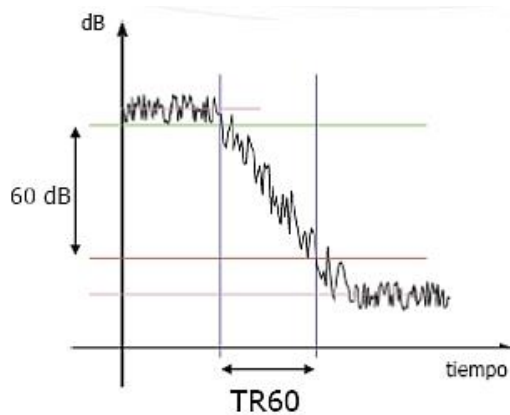
L'Early Decay Time (EDT) és un càlcul de reverberació que es basa en, quan una font deixa d'emetre, mesurar el temps que la pressió sonora triga en disminuir 10 dB, i multiplicar-lo per sis. El valor de l'EDT dependrà de la freqüència.

D'aquesta manera s'aconsegueix el temps de reverberació de la sala percebut pel receptor (no el real de la sala). Aquest temps serà habitualment menor que el temps de reverberació.

3.4.4. Temps de reverberació. T_{60} , T_{20} i T_{30}

Es defineix el temps de reverberació (RT) com el temps, mesurat en segons, que transcorre des de que la font de soroll deixa d'emetre fins que el nivell de pressió sonora disminueix 60 dB. Aquest temps dependrà de la freqüència que s'estigui analitzant.

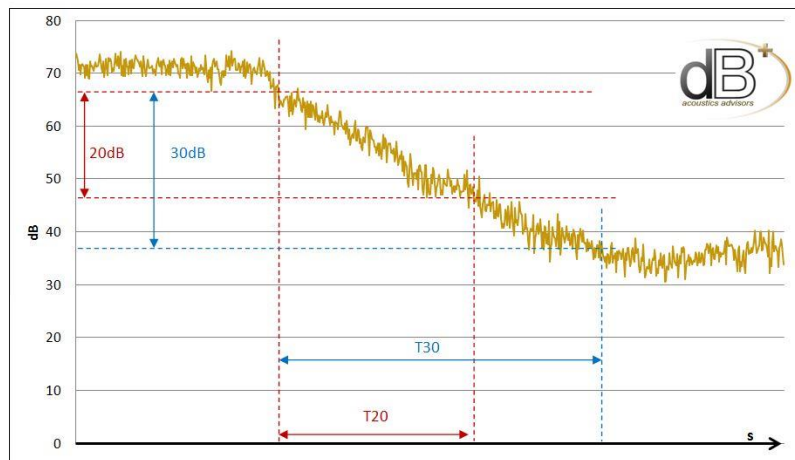
Al temps que triga a caure aquests 60 dB se l'anomena T_{60} . Tot i això, en molts casos no és possible obtenir aquest T_{60} ja que no hi ha prou marge dinàmic entre el so que s'emet i el soroll de fons. Per a aquests casos es tenen els valors T_{20} , que mesura el temps que triga a caure 20 dB, i T_{30} , que fa el pertinent amb 30 dB. Llavors, per tenir l'equivalent a T_{60} , s'ha de multiplicar el valor per 3 i per 2, respectivament.



Il·lustració 4: Relació entre T_{60} i una caiguda de 60 dB

Font: <https://www.acusticaweb.com/teoria-acustica/blog/teoracca/tiempo-de-reverberaci.html>

En aquest projecte, precisament, es treballarà amb les variables T_{20} i T_{30} , i amb el càlcul de la seva equivalència a T_{60} realitzat automàticament pel sonòmetre.



Il·lustració 5: Relació entre T_{20} i T_{30} i una caiguda de 20 i 30 dB

Font: <https://www.dbplusacoustics.com/petardos-ruído-impulsivo/>

Un dels elements principals que determinen si els elements constructius reverberaran més o menys és el seu coeficient d'absorció (α). Aquest coeficient indica la relació que hi ha entre l'energia absorbida per una superfície i l'energia que hi incidia. Els seus valors estan compresos entre 0 i 1, on 0 es correspon a una superfície totalment reflectant i on 1 es correspon a una superfície totalment absorbent. Tots dos valors són conceptes ideals, ja que cap superfície és completament reflectant o absorbent.

Com s'ha introduït a l'apartat 3.2.3. una sala que té un temps de reverberació gran s'anomenarà viva, mentre que una sala amb un temps de reverberació petit serà anomenada apagada. Segons els tipus de sala s'indiquen diferents temps de reverberació òptims, ja que en alguns casos pot interessar tenir un temps de reverberació alt, mentre que en altres és necessari que sigui baix o quasi nul. Aquest fet és el que fa tan difícil dissenyar una sala polivalent que s'adapti a usos amb diferents temps de reverberació òptims.

S'especifica quin ha de ser el temps de reverberació de sala a partir de la mitjana dels RT a 500 Hz i 1 kHz, i s'anomenarà RT_{mid} . També es considerarà que la sala està ocupada en aquesta classificació.

Tipus de recintes	RT_{mid} (s)
Locutori de ràdio	0'2 – 0'4
Sala de conferències	0'7 – 1'0
Cine	1'0 – 1'2
Sala polivalent	1'2 – 1'5
Teatre	1'2 – 1'5
Sala de concerts (música de cambra)	1'3 – 1'7
Sala de concerts (música simfònica)	1'8 – 2'0
Esglésies	2'0 – 3'0

Taula 2: Temps de reverberació per a diferents recintes

3.5. Efecte *cocktail party*

L'efecte *cocktail party* és un fenomen acústic que es produeix quan es concentra moltes persones en un recinte. Si aquest recinte no està acústicament adequat, l'aglomeració de fonts sonores, és a dir, gent parlant, fa que s'acumuli una gran quantitat de reflexions a la sala augmentant el nivell de camp reverberant.

Per compensar aquest augment, que dificulta la comunicació entre dos interlocutors, l'emissor puja el seu volum de veu per a aconseguir que hi hagi més camp directe amb el receptor. Al realitzar aquest augment de pressió sonora, el receptor comprendrà el missatge més fàcilment però, paral·lelament,

s'estarà augmentant el soroll a la sala i el camp reverberant. Si tots els emissors realitzen la mateixa acció, el camp reverberant torna a augmentar i la comunicació segueix essent difícil malgrat l'augment.

El resultat de tot aquest procés és que el volum interior al recinte acaba essent molt més elevat del que és estrictament necessari, provocant molèsties i malestar entre els assistents per estar-ne exposats. Amb un bon condicionament acústic, es pot evitar aquest efecte.

3.6. Fórmula de Sabine

La fórmula de Sabine aplicada a cada banda de freqüències és la que s'utilitza per calcular de manera teòrica el temps de reverberació. Per aplicar la fórmula es considera que el camp acústic és difús i homogeni, és a dir, que l'energia emesa és igual en totes direccions. En aquest cas, quan es calcula el RT dels recintes, es mesura per a diferents posicions del receptor i s'establirà un RT únic a partir de la mitjana d'aquestes mesures.

$$RT_S = 0'161 \frac{V}{A_{TOT}}$$

Equació 1: Temps de reverberació segons Sabine

El volum (V) es correspon al volum total del recinte que s'està analitzant. L'absorció total (A_{TOT}) és la suma de totes les absorcions de materials que componen un espai, i es mesura en sabins.

$$A_{TOT} = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i$$

Equació 2: Absorció total

Aquesta absorció total equival a la suma de tots els coeficients d'absorció (α) multiplicats per la seva superfície (S). Aquest procés es repeteix pel total (N) de les superfícies diferents que formen el recinte.

$$\alpha = \frac{E_{absorvida}}{E_{incident}}$$

Equació 3: Coeficient d'absorció

El coeficient d'absorció es correspon a la divisió entre l'energia absorbida i l'energia incident en un material concret, i els seus valors es comprendran entre 0 i 1, tal com s'ha especificat a l'apartat 3.4.4.

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{TOT}}{S_{TOT}}$$

Equació 4: Coeficient d'absorció mitjà

Si es divideix l'absorció total entre la superfície total del recinte (terra, parets i sostre), s'obté el coeficient d'absorció mitjà ($\bar{\alpha}$).

Si es té en compte l'absorció de l'aire, s'haurà d'afegir a la fórmula del RT un coeficient corresponent a aquesta.

$$RT_S = 0'161 \frac{V}{A_{TOT} + 4mV}$$

Equació 5: Temps de reverberació segons Sabine amb absorció de l'aire

Aquesta absorció de l'aire ($4mV$) dependrà del volum (V) i del seu coeficient (m) que tindrà el seu propi càlcul.

$$m = 5,5 \times 10^{-4} \left(\frac{50}{h}\right) \left(\frac{f}{1000}\right)^{1.7}$$

Equació 6: Coeficient d'absorció de l'aire

Aquest coeficient dependrà de la humitat (h) i de la freqüència (f).

3.7. Fórmula Eyring-Norris

La fórmula d'Eyring-Norris parteix de la fórmula de Sabine però amb una diferència, té en compte la pèrdua d'energia cada cop que hi ha una reflexió de l'ona acústica. Per tant, considera que aquestes ones van perdent energia progressivament en cada reflexió.

$$RT_{N-E} = \frac{0'161V}{-S_{TOT} \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Equació 7: Temps de reverberació segons Eyring-Norris

El volum (V) es correspon al volum total del recinte que s'està analitzant i la superfície (S_{TOT}) es correspon a la superfície total. El logaritme representa la pèrdua d'energia a cada reflexió, segons el coeficient d'absorció energètic mitjà d'incidència aleatòria ($\bar{\alpha}$).

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i}{S_{TOT}}$$

Equació 8: Coeficient d'absorció energètic mitjà d'incidència aleatòria

Aquest coeficient equival a la multiplicació de tots els coeficients d'absorció (α) multiplicats per la seva superfície (S) i dividits per la superfície total (S_{TOT}). Aquest procés es repeteix pel total (N) de les superfícies diferents que formen el recinte.

De la mateixa manera que amb la fórmula de Sabine, la fórmula de Eyring-Norris també es pot calcular tenint en compte l'absorció de l'aire, afegint el mateix coeficient.

$$RT_{N-E} = \frac{0'161V}{-S_{TOT}\ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV}$$

Equació 9: Temps de reverberació segons Eyring-Norris amb absorció de l'aire

On el càlcul del coeficient d'absorció de l'aire es correspon al mateix explicat a l'apartat 3.6.

3.8. Mètode de soroll interromput

El mètode de soroll interromput és un dels mètodes de mesura del temps de reverberació d'una sala. Consisteix en excitar una font en aquesta sala durant un període de temps (fins que el camp acústic assoleixi un estat estacionari) i aturar-la sobtadament. A partir del moment en què aquesta font s'atura, el sonòmetre calcula, segons la recepció de pressió sonora que mesura, quin és aquest temps. Aquest mètode està tipificat a la normativa UNE-EN ISO 3382.

Per a les mesures realitzades en aquest projecte, mitjançant un ordinador portàtil es va enviar una senyal de soroll rosa a l'altaveu. El soroll rosa és un tipus de senyal que té la mateixa energia per cada banda d'octava, i presenta una caiguda de 3 dB per octava un cop es filtra la senyal, degut a que els filtres doblen l'ample de banda per a cada octava.

Després de deixar que s'emetés el soroll durant uns segons i comprovar que el sonòmetre, en la majoria de freqüències, considerava el nivell de pressió sonora respecte al soroll de fons com a suficientment gran, s'aturava el senyal de soroll rosa. Aquest marge ha de ser de 35 dB per a poder mesurar T_{20} i 45 dB per a mesurar T_{30} .

Un cop aturat el soroll, es romanien en silenci mentre el sonòmetre analitzava la caiguda del senyal, ja que no es volia influenciar aquest anàlisi. El sonòmetre mostrava en pantalla els resultats i es guardaven aquests a la memòria per al seu posterior anàlisi.

Degut als alts valors de soroll de fons registrats (el motiu dels quals, com ja s'ha especificat, es trobava en l'obertura a la paret), a l'hora de fer l'excitació de la font sonora, no s'aconseguia arribar als mínims exigits pel sonòmetre per als seus càlculs i, conseqüentment, no van poder ser mesurades algunes de les freqüències en alguna de les mesures.

3.9. Materials de condicionament acústic

A l'hora de dissenyar el condicionament acústic d'un recinte, s'ha de tenir molt clar quins són els objectius que es volen aconseguir amb aquest condicionament. Depenent de si es volen reforçar certes freqüències o reduir la reverberació en general de l'espai, per exemple, s'utilitzaran diferents tipus de materials amb les seves pròpies propietats característiques.

3.9.1. Absorbents porosos

Els materials absorbents són aquells que, en incidir una ona sonora, se n'absorbeix una part i, per tant, es redueix el nivell. Aquesta energia en realitat s'estarà transformant en calor.

Aquesta absorció s'aconsegueix mitjançant materials porosos. La porositat d'aquests materials ve donada per la seva composició, ja que enlloc de ser llisos, tenen una porositat irregular. A l'incidir les ones sonores en aquets porus, es produeix la reducció del RT de disseny.

Com més porós sigui el material i més densitat tingui es produirà una major absorció. Aquests materials tindran una major eficàcia per a freqüències mitges i altes, especialment amb la coincidència de la longitud d'ona amb l'espessor del material. Per aquesta raó, l'espessor també serà un factor determinant a l'hora d'aconseguir una major absorció, sobretot per a freqüències baixes.



Il·lustració 6: Exemple de material absorbent

Font: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/absorbentes-acusticos-materiales-porosos/>

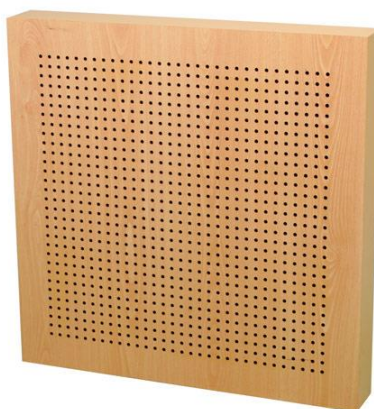
Aquests materials han estat estudiats en laboratoris per calcular-ne el coeficient d'absorció especificat en bandes de freqüències. Això permetrà que es pugui seleccionar el material adequat per a una absorció més eficient depenent de la distribució freqüencial que tingui el RT d'una sala.

3.9.2. Ressonadors

Els materials ressonadors són materials absorbents que presenten una absorció màxima en una freqüència específica, la freqüència de ressonància. Generalment es classifiquen entre els ressonadors de membrana i els ressonadors de Helmholtz.

Si es vol intentar reduir les freqüències amb materials vibrants, s'han d'utilitzar panells o membranes absorbents. Aquests materials es basen en el fet que un material pot absorbir parcialment una ona acústica si és capaç de vibrar a la seva freqüència. Amb aquesta vibració, es pot ajustar quina és la freqüència que es vol absorbir. La mida i la densitat del ressonador determinaran quina és aquesta freqüència.

Els ressonadors de Helmholtz s'utilitzen en panells perforats, rígids i no porosos, que, gràcies a aquestes perforacions, absorbiran unes freqüències determinades. El diàmetre del coll d'aquesta perforació cilíndrica serà el que determini quina és aquesta freqüència màxima d'absorció.



Il·lustració 7: Exemple de material ressonador

Font: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/fo6/public_html/Paginas/mat_absor.html

Aquests ressonadors poden ser simples o múltiples. Els ressonadors simples faran passar les ones per la seva perforació cilíndrica i el seu interior serà una cavitat al material, és dir, un volum tancat. Els múltiples, per la seva part, un cop passen les ones per les perforacions cilíndriques, es troben una separació entre el panell perforat i la paret i, per tant, totes les perforacions porten a la mateixa zona. Aquests espais buits es poden reforçar amb material absorbent, minimitzant-ne l'absorció màxima a una freqüència determinada, però augmentant-ne l'absorció a les altres; és a dir passa de tenir una absorció en forma de pic a una freqüència a presentar una resposta més uniforme.

3.9.3. Reflectors

Els materials reflectors són aquells que s'utilitzen per reforçar la presència de primeres reflexions a la sala. Són materials, generalment, llisos, plans i gens porosos. També són rígids i reflecteixen la majoria d'energia incident que reben.

Amb les primeres reflexions reforçades, que l'oïda integra amb les ones directes, s'eviten problemes d'aparició d'ecos i focalitzacions del so i es millora la intel·ligibilitat de la paraula. Segons el tipus d'ús que es faci d'un recinte, s'utilitzaran aquest tipus de materials o no. Seran útils a sales de música no amplificada, a teatres o a aules; per millorar-ne la sonoritat.

Segons el tipus de reforç que es vulgui aconseguir i a quines zones es vulgui dirigir aquest, hi haurà diferents tipus de reflectors. Els reflectors podran ser plans o amb curvatura, i aquesta corba podrà ser còncava, si es vol focalitzar el so, o convexa, si es vol dispersar.



Il·lustració 8: Exemple de material reflector

Font: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/06/public_html/Paginas/refle.html

3.9.4. Difusors

Els materials difusors són aquells que no reflecteixen simplement les ones sonores incidents, si no que fan que aquestes es reflecteixin en totes direccions, és a dir, la dispersen en totes direccions per aconseguir un camp difús. Amb l'assoliment del camp difús en un recinte, s'aconsegueix evitar-hi anomalies acústiques i es crea un so envoltant, per la qual cosa serà interessant per a sales de concerts, per exemple.

Aquesta difusió del so s'aconsegueix amb el disseny de superfícies amb relleus i irregularitats. Tot i això, les irregularitats no actuaran igual amb totes les freqüències i, per tant, el so tindrà una difusió diferent segons la banda de freqüències.



Il·lustració 9: Exemple de material difusor

Font: https://es.made-in-china.com/co_wywood/product_Wooden-Acoustical-Diffuser_hohregng.html

Un exemple de materials difusors són els difusors QRD (Quadratic-Residue Diffusor). Aquests poden ser unidimensionals o bidimensionals, i segons uns patrons matemàtics que formen estructures periòdiques proporcionen una difusió òptima en un rang de freqüències determinat.

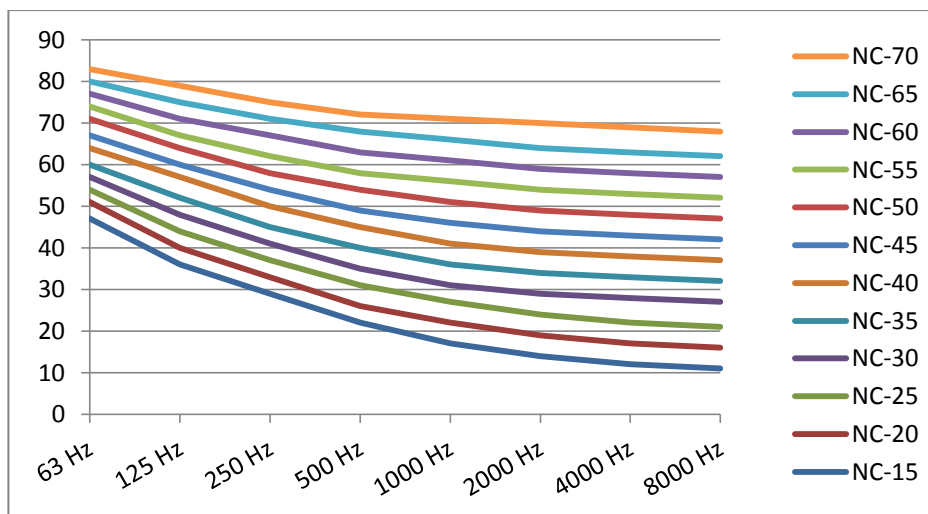
3.10. Corbes Noise Criteria

Les corbes NC (Noise Criteria) són un conjunt de corbes, especificades per bandes d'octava de 63 Hz a 8 kHz, que especifiquen els valors en dB de les molèsties del soroll ambiental. S'utilitzen per determinar pels recintes els nivells de soroll màxim recomanables.

	Freqüències en bandes d'octava (dB)							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
NC-15	47	36	29	22	17	14	12	11
NC-20	51	40	33	26	22	19	17	16
NC-25	54	44	37	31	27	24	22	21
NC-30	57	48	41	35	31	29	28	27
NC-35	60	52	45	40	36	34	33	32
NC-40	64	57	50	45	41	39	38	37
NC-45	67	60	54	49	46	44	43	42
NC-50	71	64	58	54	51	49	48	47
NC-55	74	67	62	58	56	54	53	52
NC-60	77	71	67	63	61	59	58	57
NC-65	80	75	71	68	66	64	63	62
NC-70	83	79	75	72	71	70	69	68

Taula 3: Valors de les corbes NC segons per a cada banda de freqüències

Les corbes NC segueixen el mateix patró que la oïda humana, és a dir, els nivells de pressió sonora seran més baixos com més agut sigui el soroll degut a la sensibilitat de l'oïda humana per a aquests.



Il·lustració 10: Distribució per freqüències de les corbes NC segons els seus dB

Per determinar les corbes NC, s'ha de mesurar el nivell de soroll de fons des de dins d'un recinte, per a totes les bandes d'octava. Per afirmar que un recinte compleix una NC determinada, tots els seus valors han d'estar per sota dels especificats per aquesta corba.

Tipus de recintes	Corba NC recomanada
Estudis de gravació	15
Sales i auditoris	15 - 25
Hotels (zones individuals)	20 - 30
Aules i sales de conferències	20 - 30
Hospitals	30
Oficines i biblioteques	30 - 35
Cinemes	35
Esglésies	35
Hotels (zones comunes)	35 - 40
Restaurants	35 - 40
Cafeteries	40 - 45
Poliesportius	40 - 50
Tallers (maquinària lleugera)	45 - 55
Tallers (maquinària pesant)	50 - 65

Taula 4: Corbes NC recomanades per a cada recinte

El número que identifica a la corba, per exemple si parlem de la NC-15, es correspon a la mitjana entre el nivell de pressió de les bandes d'1kHz i de 2kHz, que seria de 15 dB⁸.

⁸ <http://www.inercoacustica.com/acustipedia/item/240-curvas-de-confort-ac%C3%B1stico-curvas-nc>

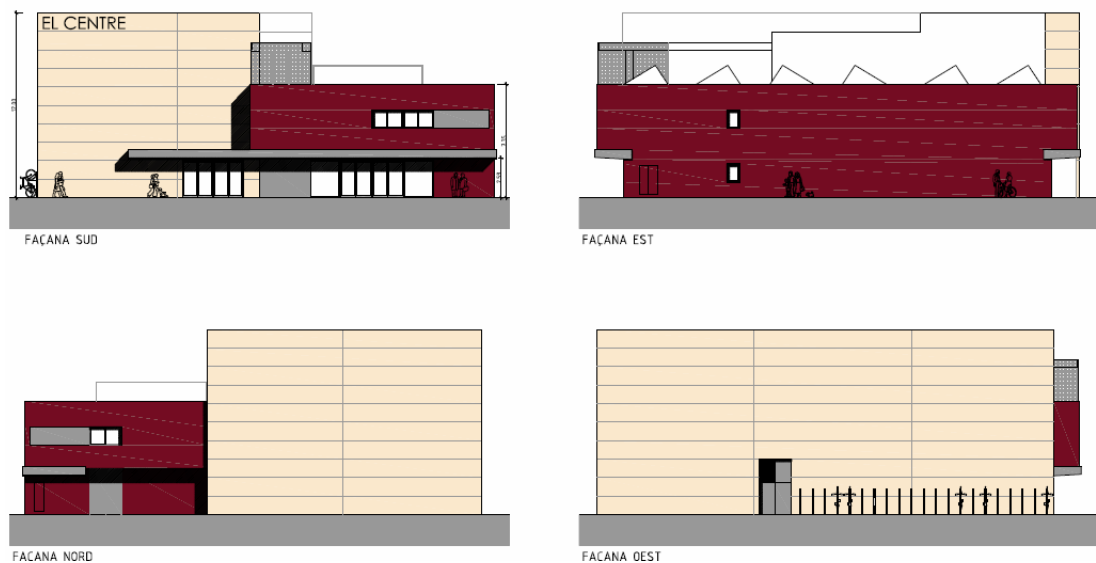
[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(2\)%20Análisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(2)%20Análisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm)

4. Cas pràctic

En aquest apartat s'explica la situació actual del recinte que s'examinarà, les seves característiques i com s'afronta el projecte.

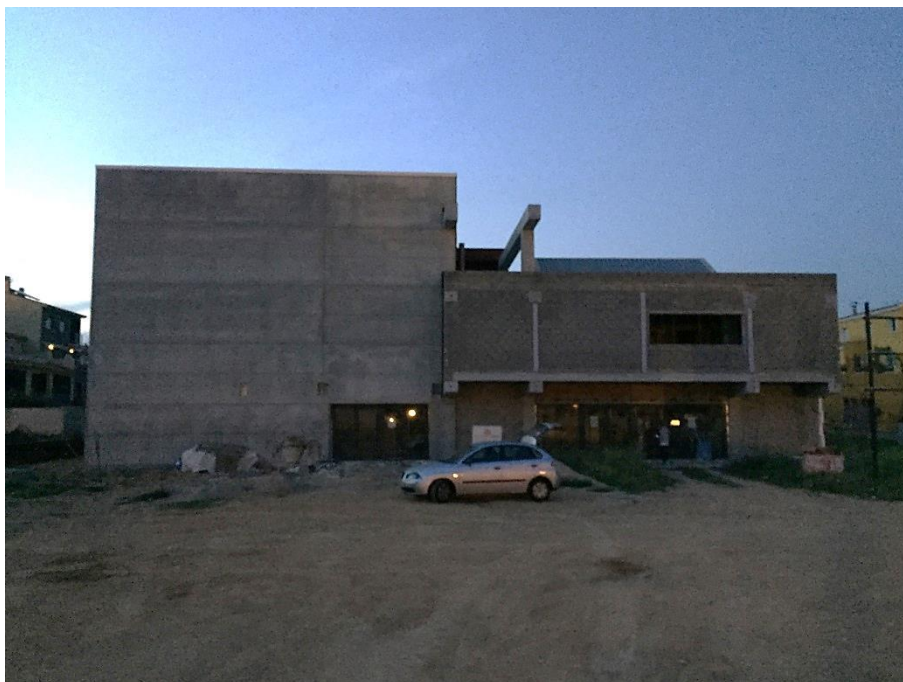
4.1. El recinte

El recinte que s'haurà de mesurar acústicament es troba a la població de Llorenç del Penedès, al carrer de l'Abat Escarré s/n. El promotor d'aquest edifici és na Montse Ventosa Robles, en representació de la Junta d'El Centre de Llorenç del Penedès, i l'arquitecte del projecte és na Maria Almirall Ferrerons.



Il·lustració 11: Disseny del recinte per part de l'estudi d'arquitectura

Es tracta d'una antiga nau industrial que està essent renovada per convertir-la en diversos espais amb diferents usos. L'edifici consta de dues plantes, tot i que no en tota la seva superfície; la planta baixa constarà d'una superfície útil de 385'99 m² respecte una superfície construïda total de 427'86 m², mentre que la primera planta consta de 345'19 m² de 375'32 m².



Il·lustració 12: Fotografia exterior del recinte

Constarà d'una gran sala polivalent, que es pretén dotar d'un escenari i, a la llarga, de grades retràctils. Aquest espai es destinarà a la celebració de concerts, representacions teatrals i conferències. Aquesta sala anirà acompanyada dels seus respectius lavabos i una zona d'exposició i magatzem. Sobre dels lavabos, a l'alçada del primer pis, es pretén establir la zona dels tècnics que s'encarregaran de la realització de l'espectacle.

Un altre dels espais serà un local de restauració, amb una barra de bar i diverses taules. Aquest local tindrà una cuina contigua i els seus propis lavabos.

La resta d'espais (majoritàriament pertinents a la primera planta) encara no tenen una funció assignada. En els plànols es contempla la instal·lació d'un ascensor a la zona central, la qual cosa, de realitzar-se, s'haurà de tenir en compte de cara a l'emissió de soroll cap a les zones estudiades.

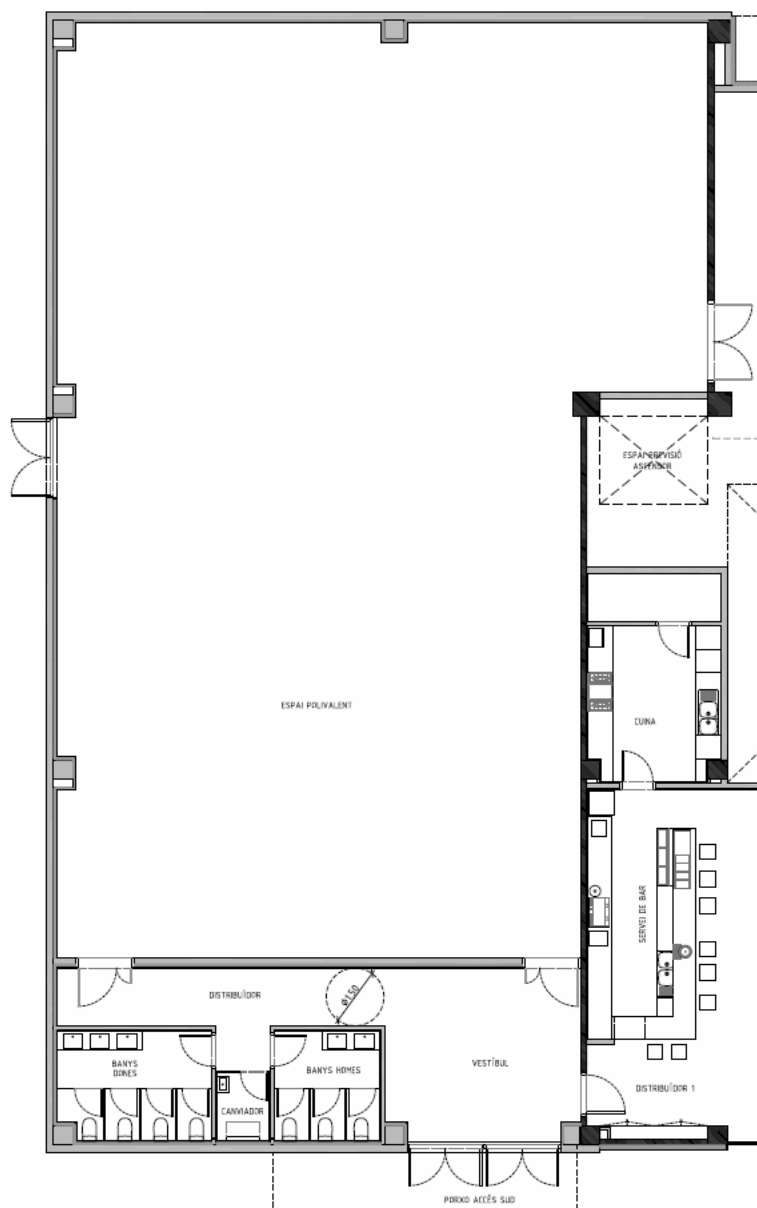
4.2. Detall dels espais a treballar

L'estudi acústic es centrarà en dues de les zones mencionades prèviament, l'espai polivalent i el local de restauració.

4.2.1. Espai polivalent

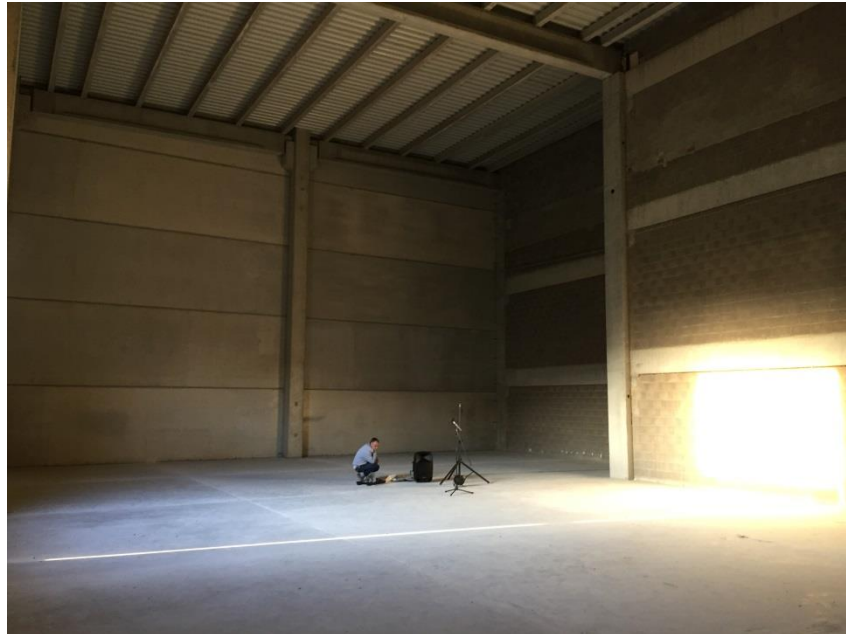
L'espai polivalent té una superfície útil de 360'10 m², amb un altell per als tècnics de 62'27 m² situat a 4'05 m. L'alçada de l'espai, amb l'excepció de la mencionada zona de tècnics, serà de 12 m. Per tant, el seu volum serà de 1.458'405 m³ a la planta baixa, de 3.357'84 m³ a la primera planta i això ens donarà un total de 4.816'245 m³, dada que serà d'utilitat a l'hora de fer-ne els càlculs acústics.

L'espai polivalent estarà connectat amb la zona de lavabos per dues portes de 1'40 x 2'20 m², una porta doble que connecta amb la zona d'exposicions/magatzem amb una porta de 2 x 2'33 m², i una porta doble de 2 x 2'95 m² que connecta directament amb l'exterior.



Il·lustració 13: Plànol espai polivalent

Les parets de l'espai estaven inacabades en el moment de les mesures. Aquestes estaven fetes de panells prefabricats de formigó una part i de blocs de formigó l'altre. La zona construïda dels lavabos, sobre la qual s'ubicaran els tècnics, estava feta de totxos d'argila. El sostre estava comprès per les bigues metàl·liques i plaques metàl·liques formades per panells sandvitx.



Il·lustració 14: Fotografia interior de l'espai polivalent

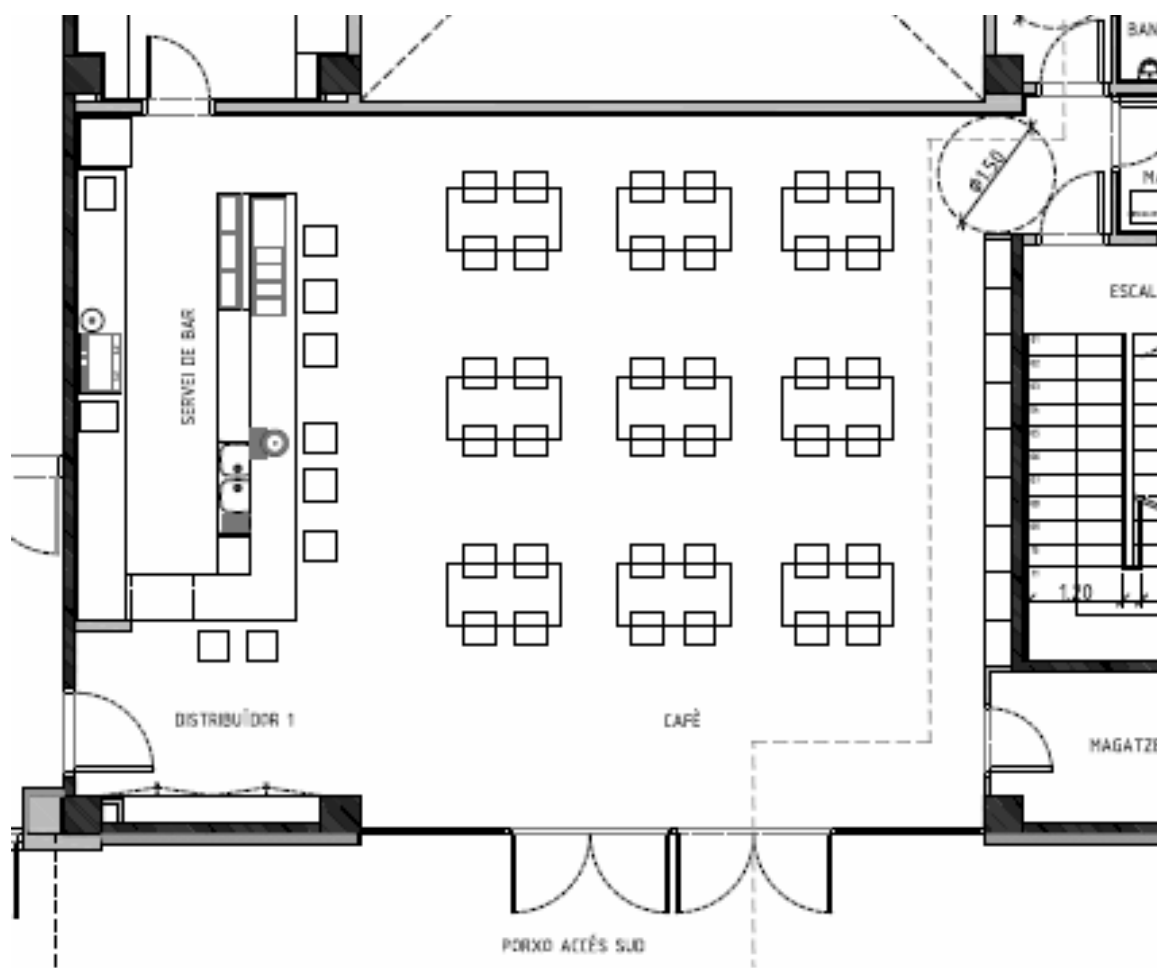


Il·lustració 15: Fotografia interior del sostre de l'espai polivalent

4.2.2. Local de restauració

El local de restauració té una superfície útil de 110'51 m², repartits en 77'89 m² de la part de cafeteria, 23'54 m² de la zona de la barra de bar i 9'08 m² del distribuïdor que uneix el local de restauració amb l'accés a la sala polivalent. L'alçada de la sala serà de 3 m amb un fals sostre, i el volum total de la sala serà de 331'53 m³, dada que serà d'utilitat a l'hora de fer-ne els càlculs acústics.

La cafeteria estarà connectada a diverses zones: la ja mencionada porta d'accés a l'espai polivalent, d'1 x 2'20 m², una porta d'accés a la cuina de 0'80 x 2'20 m², dues portes d'accés a dos magatzems de 0'80 x 2'20 m², una porta d'accés al distribuïdor de banys de 0'80 x 2'20 m² i una porta d'accés a l'escala que uneix la planta baixa i el primer pis de 0'80 x 2'20 m². També disposarà d'un grup de portes per accedir a l'edifici des de l'exterior, de 4'20 x 2'40 m².



Il·lustració 16: Plànol del local de restauració

Les parets estan recobertes de guix i pintades de color blanc, excepte la paret amb la porta d'entrada des de l'exterior, que és de vidre. Les portes interiors són de fusta, tot i que en el moment de la presa de

mesures no estaven acabades. Pel que fa al sostre, aquest és d'obra vista, construït amb blocs prefabricats de formigó. Segon els plànols, la idea és col·locar-hi un fals sostre.



Il·lustració 17: Fotografia interior del local de restauració

4.3. Descripció problema

Els espais encara es troben en un estat inicial de construcció, ja que la seva estructura està construïda i acabada però sense els revestiments interiors. Per aquest motiu, és moment de començar a prendre consciència del seu disseny interior i com aquest afectarà a les seves condicions acústiques.

Una bona planificació en aquest aspecte és clau per evitar després molts efectes perjudicials i canvis per revertir la situació. Per aquest motiu es decideix contactar amb un enginyer de realitzar un estudi acústic i tots els seus passos, i que proveirà al client d'un pla d'actuació per obtenir els resultats òptims i minimitzar d'aquesta manera els costos i els problemes degut a un mal condicionament acústic, juntament amb el compliment de la llei.

Abans de prendre mesures, amb un primer anàlisi ràpid es pot observar que tant el recinte de l'espai polivalent com el dedicat a un espai de restauració presenten una alta ressonància a qualsevol estímul sonor; completament normal si es té en compte l'estat del projecte.

4.4. Pla de mesures

A continuació es detalla el pla de mesures proposat. A l'apartat 2.1. de l'estat de l'art s'ha fet un anàlisi en profunditat de com ha de ser el protocol de mesures des d'un punt genèric i tenint en compte conceptes d'aïllament acústic i de condicionament acústic. En aquest apartat es fa una llista més breu, adequada al cas i sense incidir en profunditat en els diferents aspectes.

Aquests protocols es corresponen a la previsió inicial des d'un punt de vista teòric de com afrontar el projecte. No coincidirán completament amb els protocols seguits 'in situ' durant les mesures acústiques, com s'explica a l'apartat 5.2.

4.4.1. Protocol de mesures del local de restauració

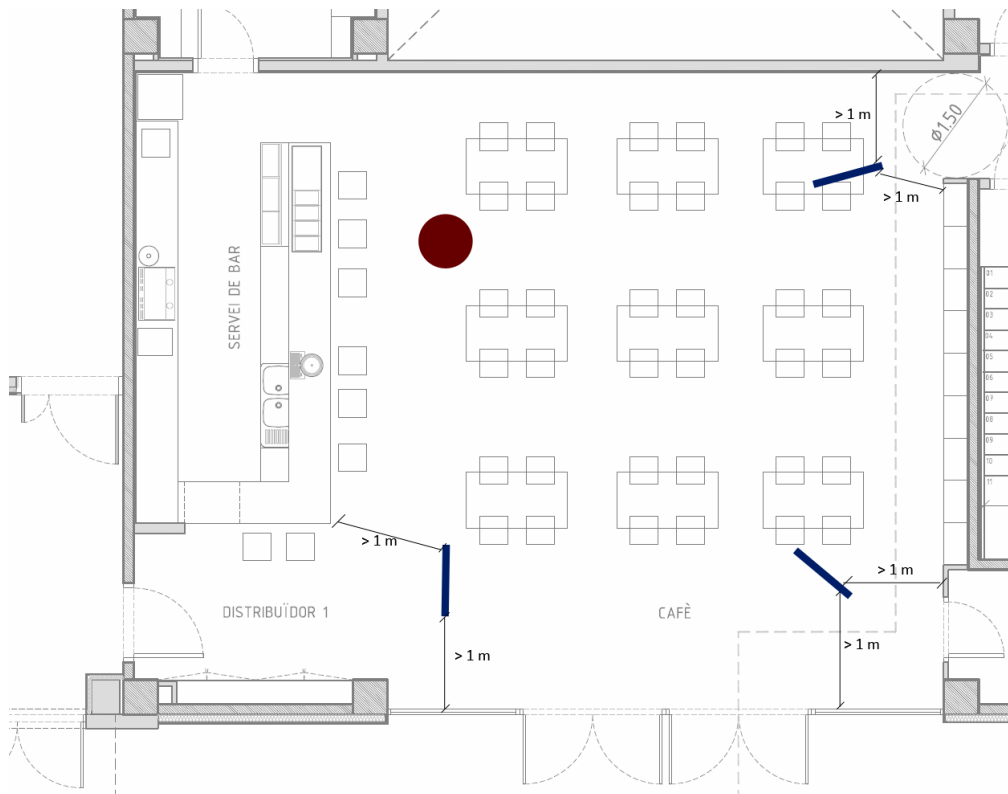
El protocol de la presa de mesures del local es realitzarà seguint els procediments de la norma UNE-EN ISO 3382.

1. Descripció del recinte a estudiar: dades bàsiques d'ubicació del recinte, les seves característiques i la seva geometria, materials de les seves superfícies, característiques sonores apreciables, dades tècniques (volum de la sala, mesura de les parets).
2. Comprovació del correcte funcionament de l'equip i calibratge del sonòmetre per garantir-ne la fiabilitat dels resultats i que compleix la normativa.
3. Mesura del soroll de fons utilitzant el sonòmetre per bandes de terç d'octava en diferents posicions del recinte.
4. Ubicació de la font emissora de soroll, l'altaveu omnidireccional, i del receptor, el sonòmetre. Aquests hauran d'estar a un mínim de 2 metres de separació entre ells, i a 1 metre com a mínim de qualsevol superfície reflectant. També s'haurà de col·locar la font a una alçada mínima d'1,2 metres i el sonòmetre a una alçada mínima d'1 metre.
5. Excitació del recinte mitjançant soroll rosa. Aquest soroll haurà d'emetre una pressió sonora de 45 dB per sobre del nivell de soroll de fons mesurat. S'emetrà durant un breu període de temps i després s'aturarà. El sonòmetre serà l'encarregat d'enregistrar la caiguda del nivell de dB per bandes d'octava i proporcionar els resultats en segons del temps de reverberació de la sala.
6. Es realitzarà aquest procediment de mesures per dues posicions de la font sonora i, per cada una d'aquestes, tres posicions diferents del receptor. Per cada una de les posicions del

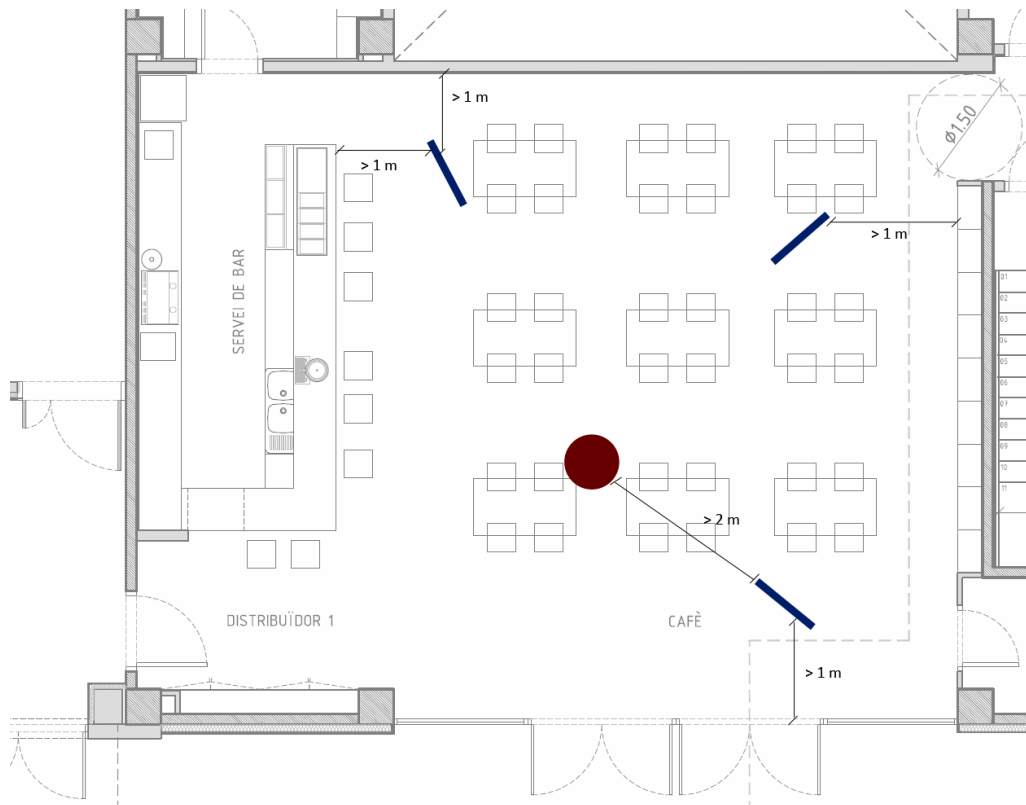
sonòmetre hi haurà 3 repeticions de les mesura, sense modificar res entre una i l'altra. Això farà un total de 18 mesures. Tots aquests valors s'enregistraran en la targeta de memòria del sonòmetre per al seu posterior anàlisi.

7. Es tornarà a mesurar el soroll de fons per bandes de terç d'octava per comprovar si hi ha hagut alteracions destacables.
8. Anotacions de les condicions meteorològiques i el número de persones que han realitzat la mesura, juntament amb qualsevol incidència destacable durant les mesures.

Distribució de les mesures:



Il·lustració 18: Distribució prevista de mesures 1, local de restauració

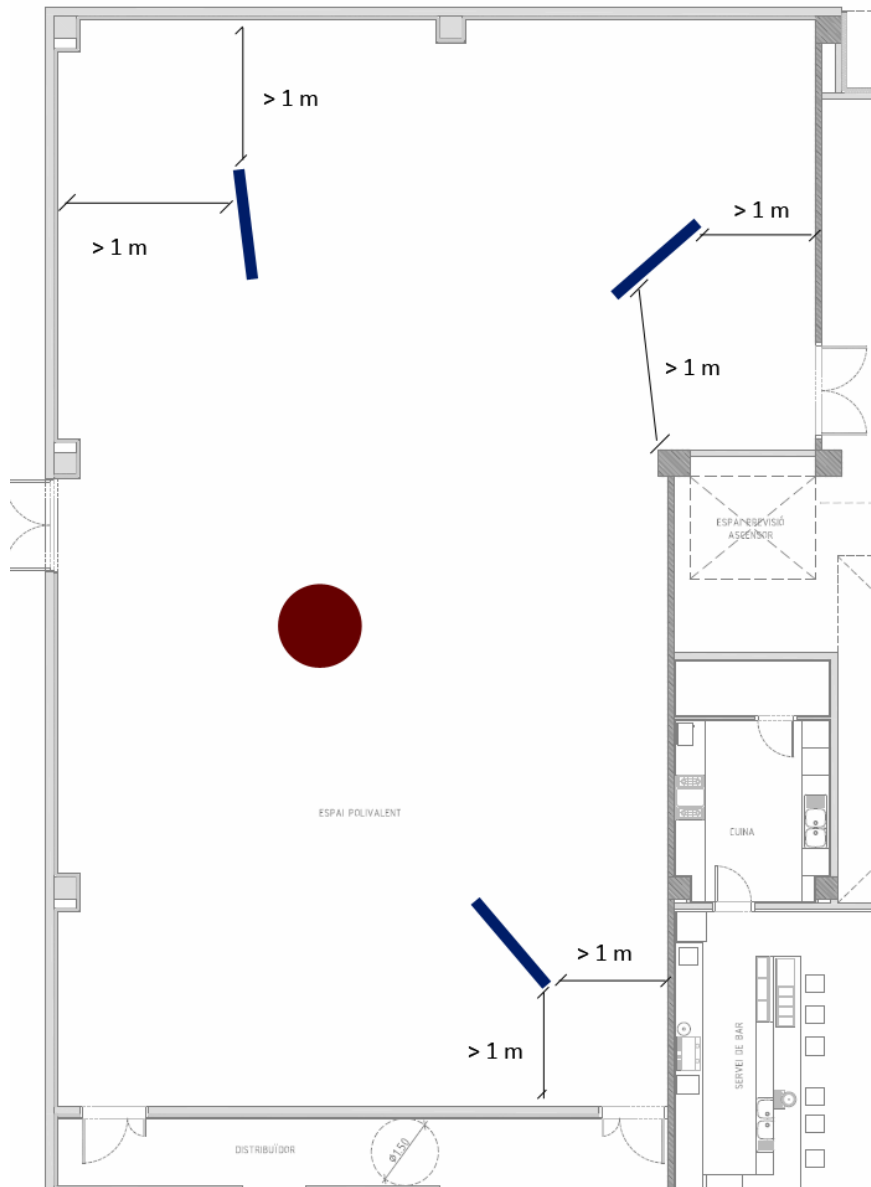


Il·lustració 19: Distribució prevista de mesures 2, local de restauració

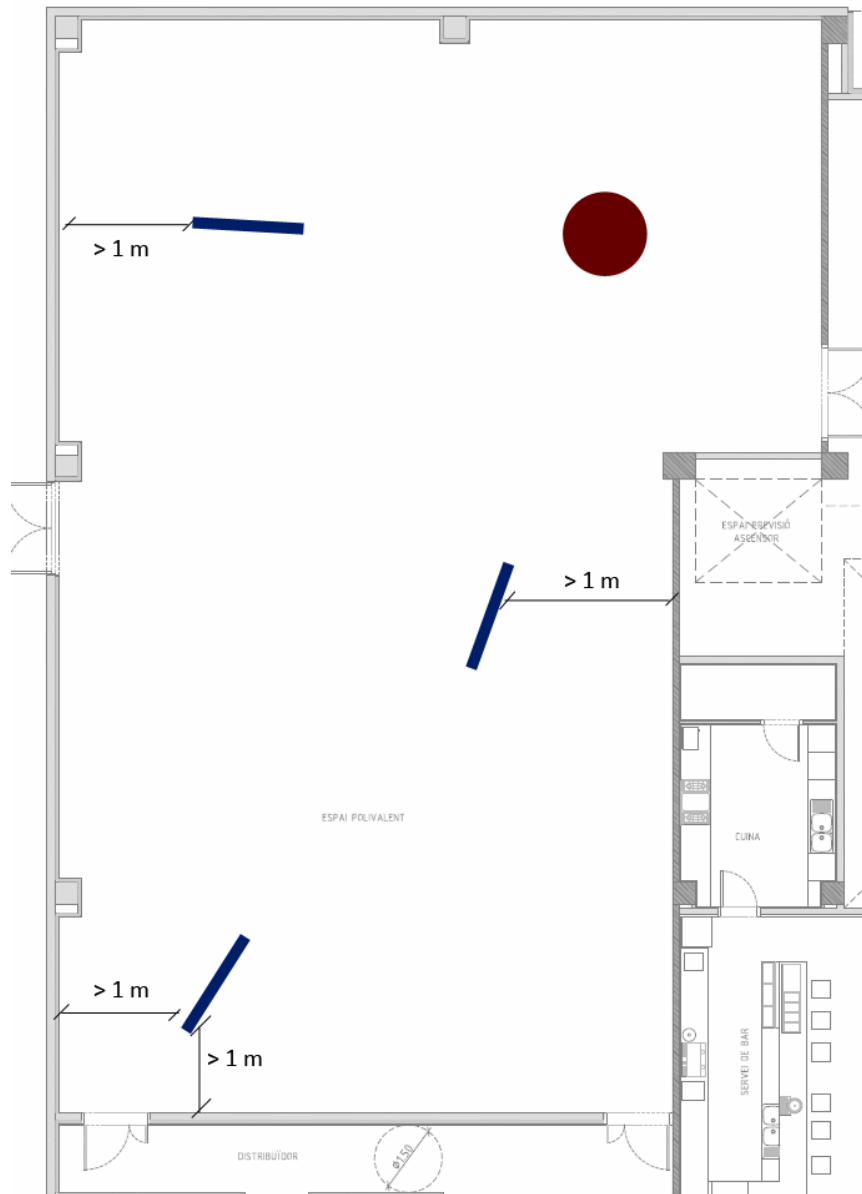
4.4.2. Protocol de mesures de la sala polivalent

El protocol de mesures a seguir per a la sala polivalent serà el mateix que amb el local de restauració. Al ser una sala polivalent, s'haurà d'avaluar quins usos se li pretenen donar a aquesta per tenir-los en compte de cara al condicionament acústic.

Distribució de les mesures:



Il·lustració 20: Distribució prevista de mesures 1, sala polivalent



Il·lustració 21: Distribució prevista de mesures 2, sala polivalent

5. Mesuraments

Aquest apartat es centra en tot el procés de mesurament, explicant l'equip que s'utilitzarà per a l'adquisició de dades i els protocols de mesures que es seguiran.

5.1. L'equip

L'equip essencial per a prendre mesures serà el sonòmetre i l'altaveu. A part d'això es pot necessitar altre equip tècnic relacionat amb aquest, com pugui ser un ordinador que s'haurà de connectar a l'altaveu per emetre un so, o per analitzar les dades rebudes del sonòmetre; o tot el sistema de cablejat necessari. També serà necessari un equip per a prendre mesures de les condicions meteorològiques, així com material (analògic o digital) per realitzar anotacions d'incidències o dades importants.

5.1.1. El sonòmetre

El sonòmetre i analitzador d'espectre utilitzat per a les mesures és el model SC420 de l'empresa CESVA. Aquest model és un sonòmetre de classe 1, segons la norma UNE-EN 61672 i l'Ordre ITC/2845/2007. El sonòmetre està equipat amb un micròfon de condensador de mitja polzada i és, a més, ampliable amb diferents mòduls per adaptar-se amb facilitat a les necessitats dels diferents tipus de mesures.

És totalment digital, permet fer diferents tipus de mesures, treballa tant en bandes d'octava com en bandes de terç d'octava i també té automatitzat tot un seguit de càlculs relacionats amb les mesures i la seva evolució temporal. Té integrades les ponderacions freqüencials A, C i Z; i les ponderacions temporals F, S i I.

Ofereix dos mètodes per a la mesura del temps de reverberació, el mètode de soroll interromput i el mètode de la resposta impulsiva integrada amb paràmetres de qualitat de la caiguda. En aquest projecte el mètode de mesura utilitzat per a la mesura del temps de reverberació és el mètode de soroll interromput.



Il·lustració 22: Sonòmetre model CESVA SC240
Font: <http://vetson.net/producto/sc-420>

5.1.2. L'altaveu

L'altaveu utilitzat és el Mark M15 ALWC de l'empresa Equipson. És un altaveu de 15 polzades i 120 W de potencia. Permet emetre en les freqüències d'entre 60 Hz i 20 kHz, amb la qual cosa comprèn l'espectre necessari per a les mesures a realitzar. La potència màxima que pot emetre és de 115 dB.



Il·lustració 23: Altaveu model Mark M15 ALWC

Aquest altaveu és un altaveu amb un component direccional, per tant no seria el més adequat per a realitzar les mesures. Aquest radiarà endavant principalment, i també cap als costats però no amb la mateixa potència. No podrà actuar com a equivalent d'un altaveu omnidireccional ja que no emetrà cap a dalt i a baix, ni cap a la part posterior, ni tampoc ho fa amb el mateix nivell en totes aquestes direccions.

Per compensar aquestes limitacions, es mesurarà el temps de reverberació movent l'altaveu en quatre direccions diferents, que estan separades 90° entre elles. D'aquesta manera, s'obté una mesura "omnidireccional" fent una mitjana dels diferents valors que es mesuren per cada direcció. Algunes de les mesures es van fer amb les 4 direccions, però al comprovar que les direccions separades 180° entre elles tenien uns valors semblants, la resta de mesura es van fer amb dues mesures amb una direcció de 90° entre elles, i fent-ne la mitjana.

5.2. Mesures realitzades

Finalment, les mesures realitzades no van ser les mateixes que les plantejades al pla de mesures. Els motius d'aquests canvis van ser diversos.

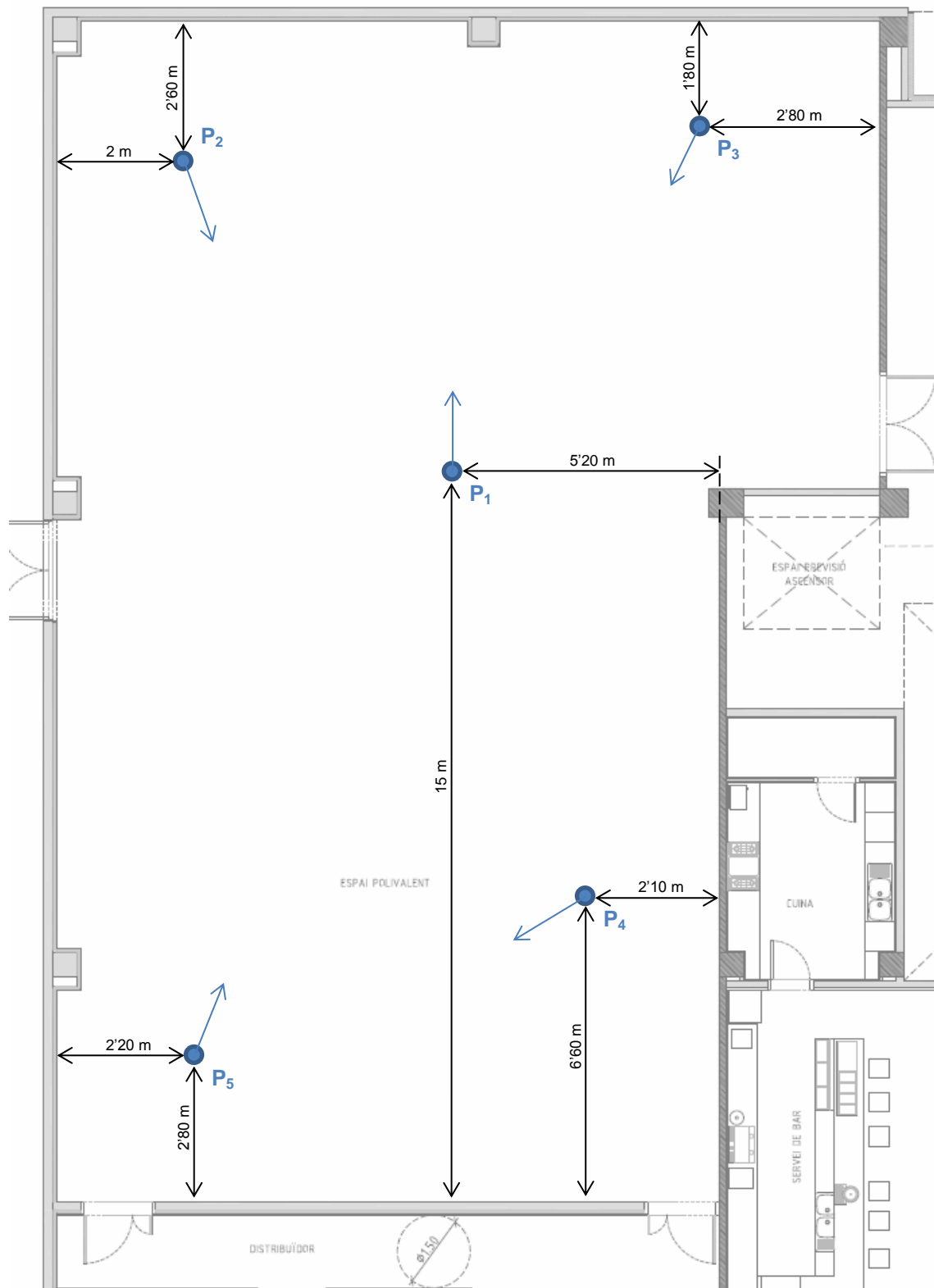
Durant la realització del pla de mesures, no era clar l'ús de la sala polivalent. Un cop al recinte es va confirmar que s'hi ubicaria un escenari. Per tant, els punts de la font emissora escollits per a la sala polivalent es van situar per aquesta zona d'escenari, i els punts receptors es van situar on hi aniria el públic. D'aquesta manera, els resultats i les posteriors actuacions de condicionament acústic seran més específiques i adequades.

Al local de restauració, les posicions també van canviar-se. Durant el disseny previ de les mesures es considerava que aquest local estaria ocupat amb mobiliari. Al comprovar l'estat inicial de les obres, es van poder redistribuir les posicions de la font i el sonòmetre ja que, entre altres coses, no s'havia de vigilar la distància d'aquests elements respecte el mobiliari.

Les limitacions tècniques i temporals van fer que el número de punts de mesura respecte la posició de la font es reduís de 3 a 2. A més, pels mateixos motius, a cada punt es realitzà una sola mesura enlloc de les tres previstes. A l'apartat 5.2.2. es detalla quines són aquestes limitacions tècniques.

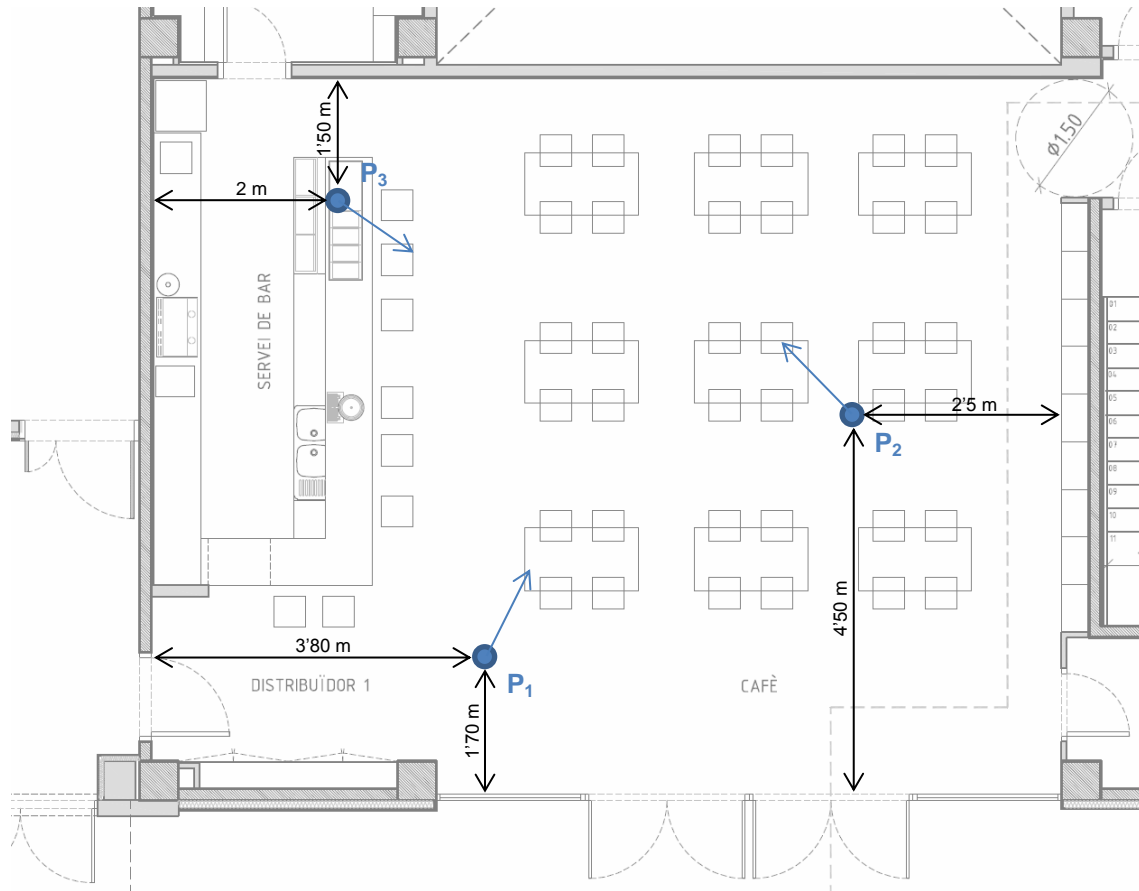
5.2.1. Plànols mesures

Distribució de les mesures de L_{Aeq} del soroll de fons a la sala polivalent, considerant que:



Il·lustració 24: Distribució real de mesures de soroll de fons, sala polivalent

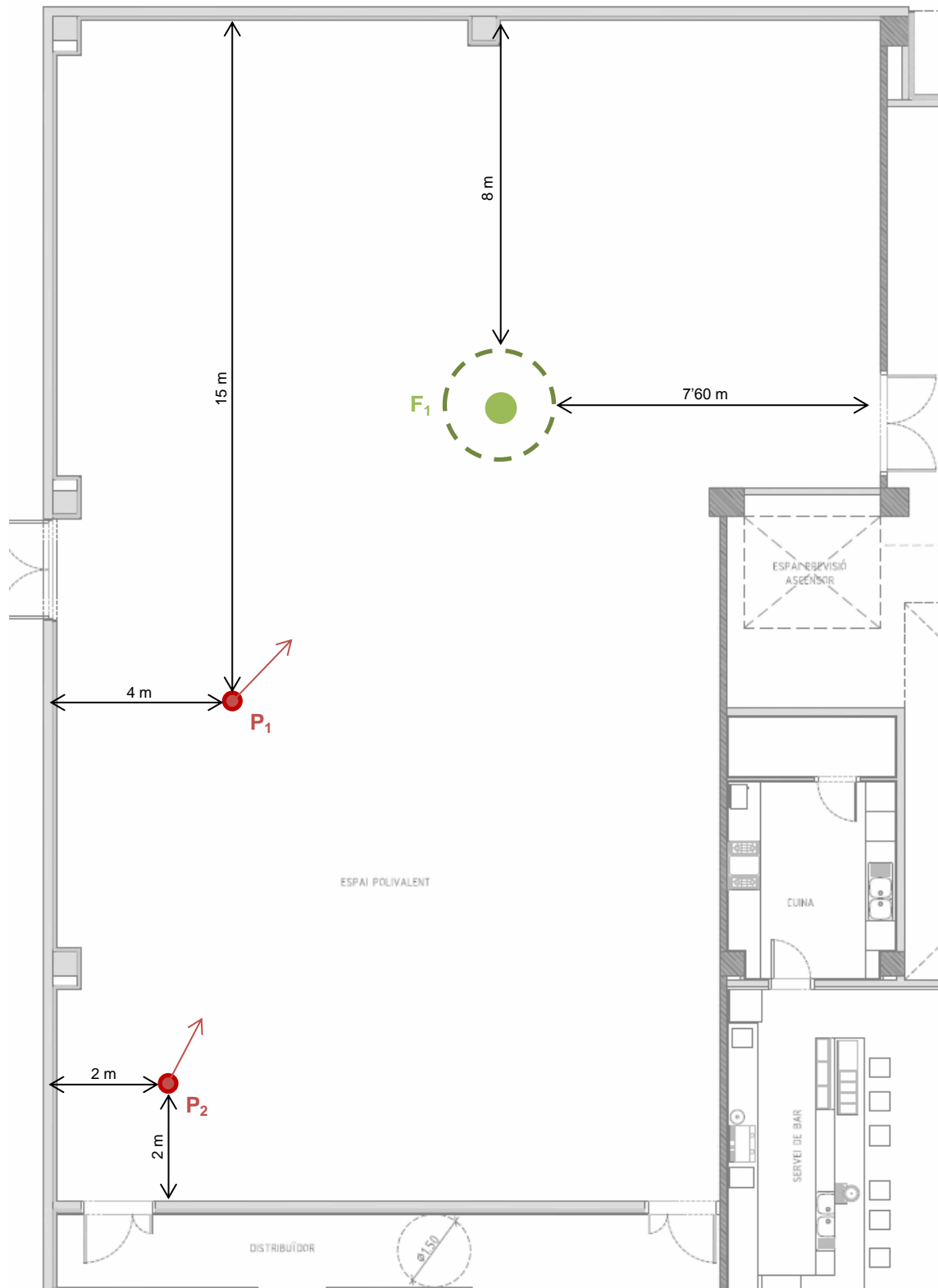
Distribució de les mesures de L_{Aeq} del soroll de fons al local de restauració:



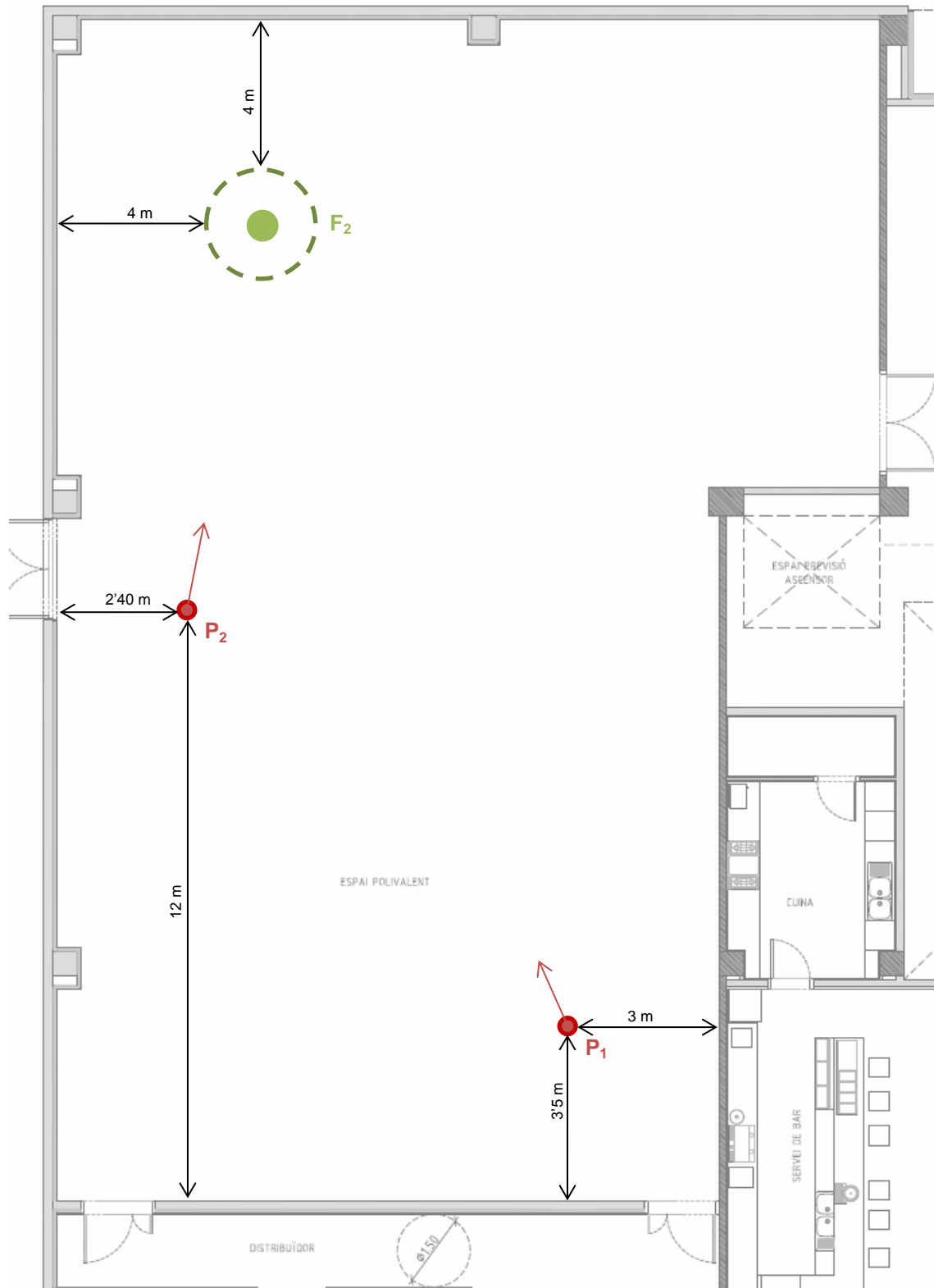
Il·lustració 25: Distribució real de mesures de soroll de fons, local de restauració

En aquests plànols, els punts blaus assenyalen la posició i orientació del sonòmetre en les mesures de soroll de fons.

Distribució de les mesures de RT a la sala polivalent:

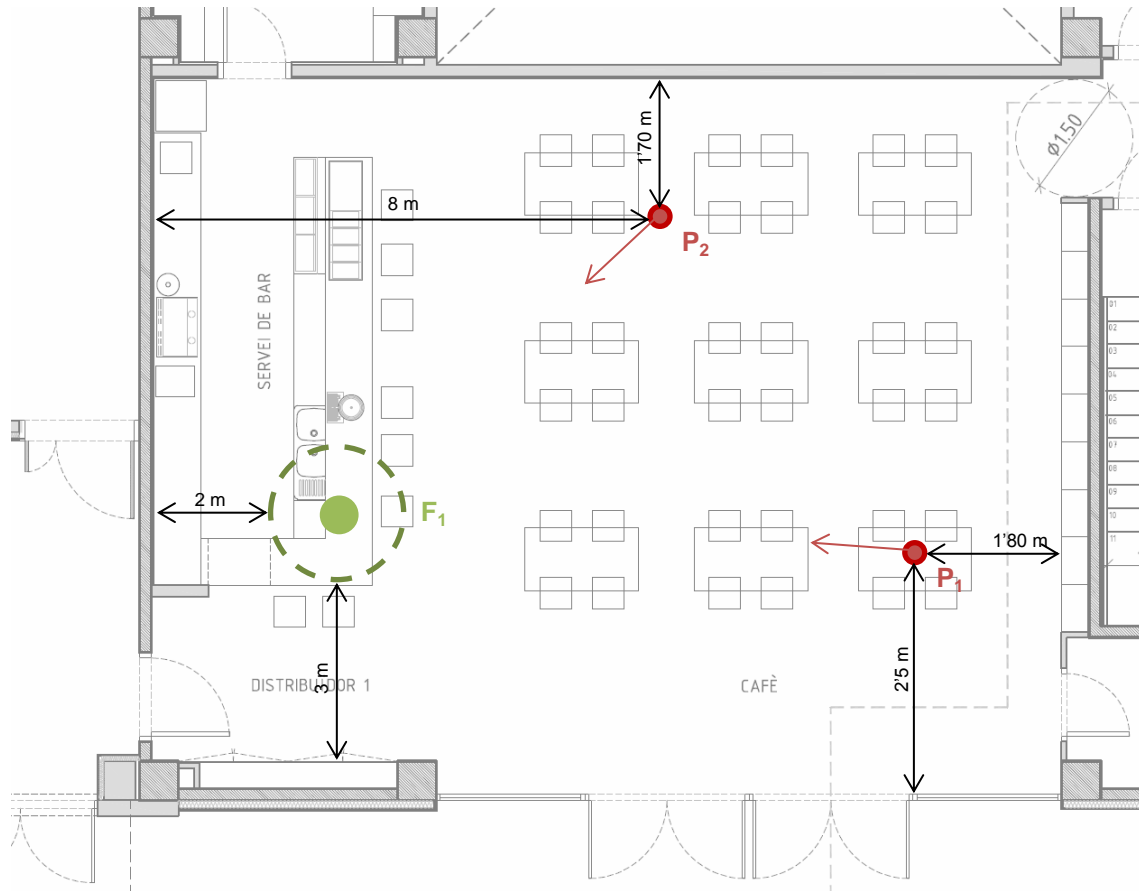


Il·lustració 26: Distribució real de mesures 1, sala polivalent

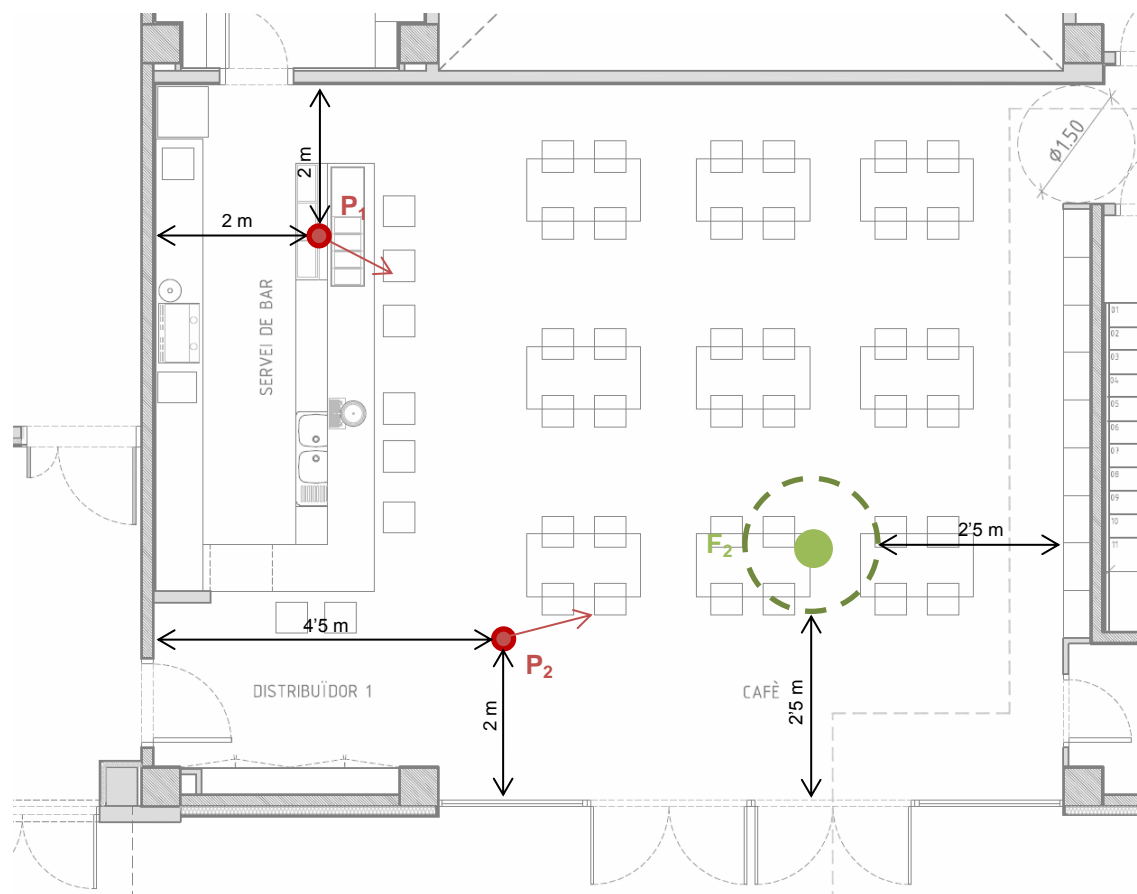


Il·lustració 27: Distribució real de mesures 2, sala polivalent

Distribució de les mesures de RT al local de restauració:



II-lustració 28: Distribució real de mesures 1, local de restauració



Il·lustració 29: Distribució real de mesures 2, local de restauració

En aquests plànols, els punts vermells assenyalen la posició i orientació del sonòmetre en les mesures del nivell de RT, mentre que els punts verds assenyalen la posició de la font sonora.

5.2.2. Legislació

La normativa UNE-EN ISO 3382 especifica quines condicions i requisits s'han de complir i com per a poder certificar les mesures segons la legalitat. Aquesta normativa és la de referència i s'especifica per a la mesura del temps de reverberació de recintes amb referència a altres paràmetres acústics. El procés de mesura seguit no compleix, però, tots aquests requisits. Per tant, no podrien ser considerades oficialment com a legals.

Les mesures van ser realitzades amb la presència de només 2 persones responsables d'aquesta tasca. Es prefereix que aquestes mesures es realitzin en els diferents estats d'ocupació, cosa que degut a l'estat en construcció del recinte, no es pot portar a terme. A més, el cas ideal és que el tècnic que manipula el sonòmetre se n'allunyi a una distància suficient per garantir que no està influenciant els resultats.

És necessari realitzar comprovacions de la temperatura i humitat de l'aire al recinte abans i després del procés. Per manca de les eines necessàries, aquesta comprovació no es va poder realitzar.

Respecte l'equip utilitzat, la font acústica hauria de ser tant omnidireccional com sigui possible. Preferiblement s'utilitza un altaveu omnidireccional, format per diferents altaveus que emeten en totes direccions, amb la figura geomètrica d'un dodecaedre. Com ja s'ha esmentat a l'apartat 5.1.2, l'altaveu utilitzat va ser un altaveu direccional.



Il·lustració 30: Exemple d'altaveu omnidireccional

Font: <https://www.bksv.com/es-ES/products/transducers/acoustic/sound-sources/omni-power-light-4292>

Tampoc es van assolir per a totes les bandes d'octaves els marges dinàmics de 45 dB per a calcular T_{30} o de 35 per a calcular T_{20} . Per tant, es pot afirmar que el soroll de fons tenia un nivell massa elevat i tenia massa influència sobre la mesura del temps de reverberació. Com es veurà en l'apartat corresponent, aquesta influència generalment es donava per a freqüències baixes.

En relació al soroll de fons, aquest va ser mesurat prèviament a l'iniciar les mesures, però no al finalitzar-les. La comprovació final de mesures es realitza per comprovar si el nivell de soroll de fons havia evolucionat, canviant així la seva influència respecte a les mesures executant-se a l'interior del recinte. Com és lògic, aquestes condicions poden variar de manera impredecible, per a això sempre s'aconsella realitzar les mesures de soroll de fons tantes vegades com sigui possible. Per tant, no es va poder certificar si les condicions de soroll de fons havien canviat en el temps que va durar el procés de mesura.

El sonòmetre utilitzat durant el procés sí que complia el requisit de ser de classe 1, complint la norma CEI 60651 i els filtres complien la normativa CEI 61260. Sí que complia tots els requisits legislatius, tant de classe, com del seu correcte funcionament ja que estava auditat i en vigència. El número de posicions d'aquest per als diferents punts de mesura de l'emissió de la font no van ser suficients, com estaven planejats en el pla de mesures; ni es van realitzar les 3 mesures necessàries per a cada punt per a fer-ne una mitjana.

6. Anàlisi de les dades

En aquest apartat es procedeix a analitzar les dades adquirides seguint el procés de l'apartat previ.

6.1. Mesures soroll de fons

Les mesures del soroll de fons són necessàries com a pas previ per a l'estudi del condicionament acústic d'un recinte. S'analitzarà el nivell d'aquest soroll per contextualitzar-lo i per partir d'aquestes dades per als càlculs posteriors.

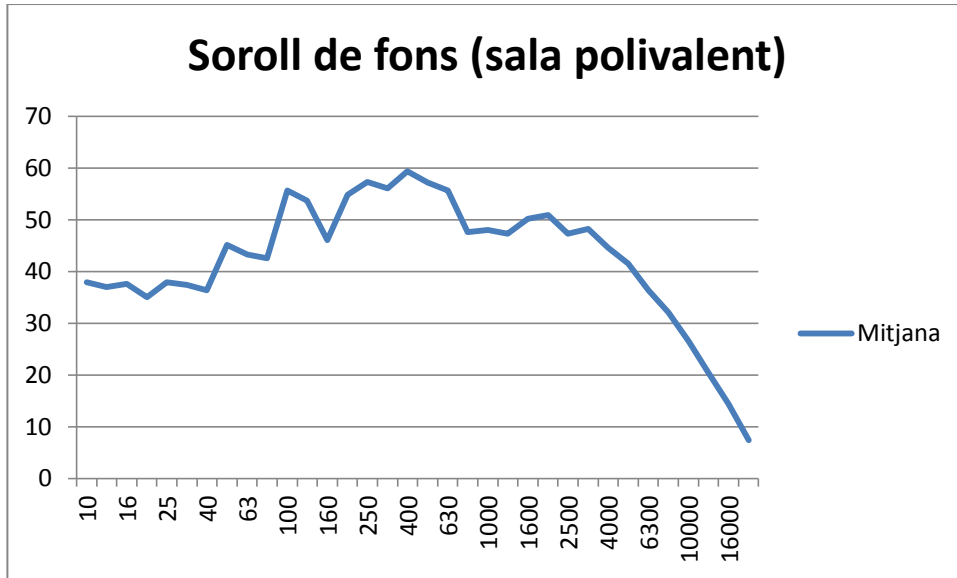
Aquest soroll pot estar provocat per l'activitat exterior al recinte, però també pot ser interior a l'edifici del recinte, és a dir, a altres sales. Per exemple, els soroll de la gent a l'exterior o del trànsit rodat, o el soroll provocat per un ascensor o un aire condicionat del mateix edifici.

6.1.1. Nivell de soroll equivalent

El nivell de soroll equivalent mesurat serveix per saber quina influència té el soroll de fons respecte els nivells del recinte estudiat. Quan es calculi el temps de reverberació amb el mètode del soroll interromput, s'haurà d'excitar la sala amb un marge mínim respecte els valors del soroll de fons.

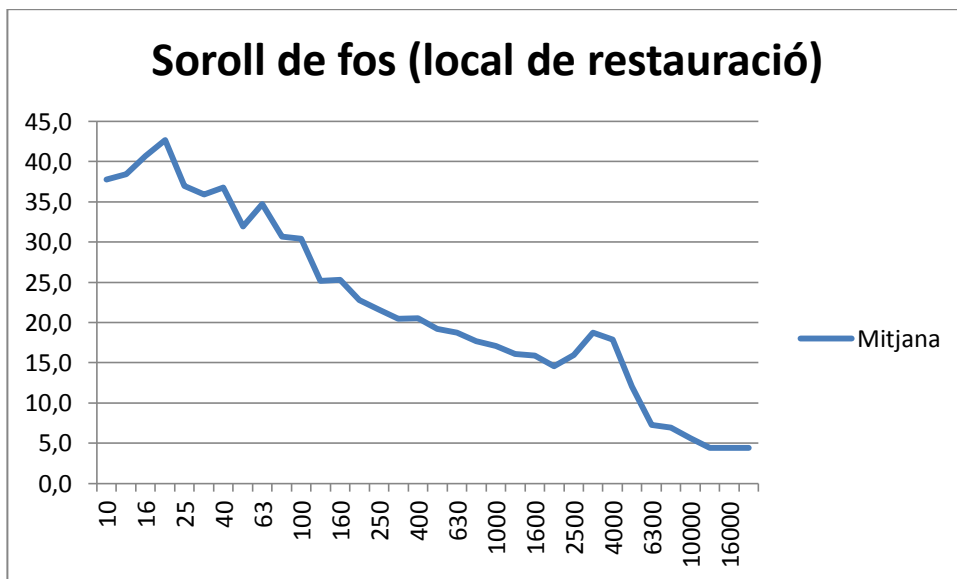
Analitzant aquest soroll es veu per a quines freqüències el soroll de fons té més afectació i, per tant, serà més difícil aconseguir el marge desitjat.

Pel que fa a la sala polivalent es van prendre mesures a cinc punts diferents. Aquestes mesures van ser amitjanades pel sonòmetre en un sol registre i es pot veure el seu resultat repartit per bandes d'octava a la gràfica 31. Es pot observar com a les freqüències centrals es manté un nivell relativament constant entre els 50 i 60 dB, seguit d'una caiguda en picat a les freqüències més altes. Per a freqüències molt baixes, el nivell és entre 10 i 20 dB més baix.



Il·lustració 31: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüències de terç d'octava, sala polivalent

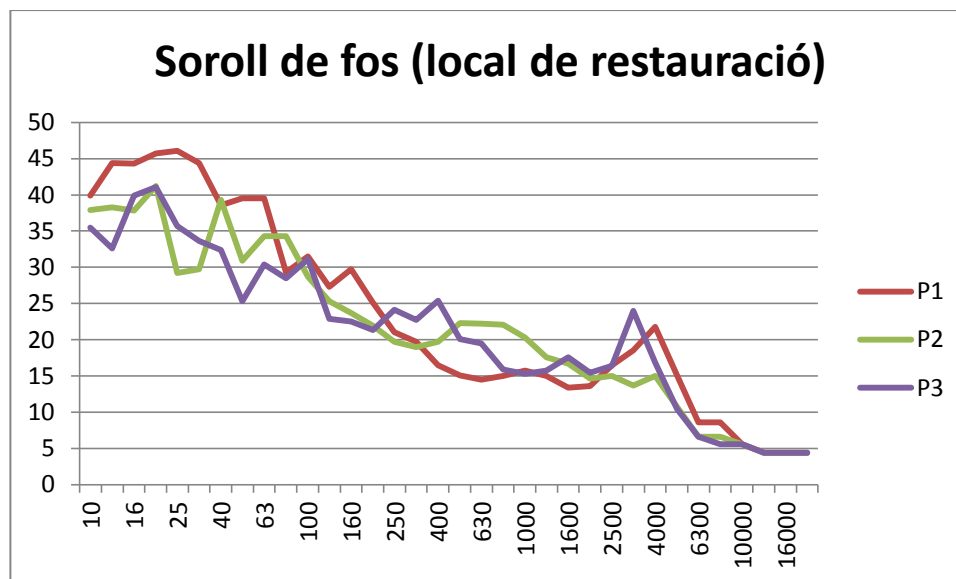
Respecte al local de restauració, es van prendre tres registres de mesures diferents en un breu període de temps. A la gràfica 32 que analitza els sorolls de fons per a bandes de terç d'octava, es pot comprovar que el soroll de fons té molta més incidència en freqüències baixes que a freqüències altes. També es pot comprovar un pic notable a les freqüències del voltant de 4000 Hz. Aquesta afectació trenca el comportament descendent de la gràfica en què el nivell de dB i els Hz són inversament proporcionals.



Il·lustració 32: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüències de terç d'octava, local de restauració

Si s'analitzen els tres registres per separat, es pot comprovar a la gràfica 33 que els nivells presentats són molt semblants i segueixen la mateixa tendència. Evidentment hi ha certes variacions, ja que el

soroll provinent de l'exterior té un cert comportament aleatori degut al diferent comportament de les fonts sonores de l'exterior, ja que aquestes estan en moviment, el comportament del vent, etc.



Il·lustració 33: Gràfica soroll de fons en dB per bandes de freqüència de terç d'octava, local de restauració

La primera mesura és la que presenta un comportament més extrem, obtenint valors superiors respecte les altres a baixes i altes freqüències, i mínims en les freqüències centrals.

6.2. Mesures temps de reverberació

Les mesures del temps de reverberació proporcionaran les dades per a treballar el condicionament acústic dels recintes del projecte. Un cop s'hagin obtingut els valors d'aquest temps, es sabrà quin marge d'actuació s'ha de portar a terme.

El temps de reverberació està provocat per diferents factors, com poden ser el volum de l'espai, el material del que estan fetes les parets del recinte, la geometria del recinte o els elements que hi hagi a dins d'aquest.

6.2.1. Detall del temps de reverberació de l'espai polivalent

Per a fer aquest anàlisi en detall del temps de reverberació s'ha tingut en compte la mesura fet a l'espai polivalent, corresponent a la segona mesura (M_2) que es va fer a la primera posició de la font (F_1) i la primera posició del sonòmetre (P_1).

Com s'ha explicat a l'apartat 4.3., el RT d'una sala es correspon al temps que triga a caure 60 dB el nivell de pressió sonora, un cop s'atura la font emissora. A la taula 5, es detalla per bandes de freqüències el nivell inicial, que és el nivell a partir del qual el sonòmetre comença a calcular el RT; el nivell final, que en aquest cas ha estat l'escollit per fer referència i és el corresponent al nivell a l'instant que es compleix el T_{30} ; el marge, corresponent a la diferència entre el nivell inicial i el final; i els valors de T_{30} i T_{20} .

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Nivell inicial	75,1	85,8	80,5	83,6	73,7	73,4	73,8	66
Nivell final	29,6	30,6	26,2	27	24,7	28,1	---	18,8
Marge	45,5	55,2	54,3	56,6	48,7	45,3	---	47,2
T_{30}	2,23	2,41	3,69	3,54	3,69	3,41	---	1,58
T_{20}	3,76	3,39	4,27	3,73	3,48	2,91	2,2	1,55

Taula 5: Estudi paràmetres RT, espai polivalent F₁ P₁ M₂

Si es segueix la taula, es pot comprovar que el marge existent, en el moment en què es compleix el RT definit per T_{30} , en cap freqüència resulta de 60 dB de marge; tots es comprenen entre 45 dB i 57 dB. Per tant, no es pot obtenir T_{60} directament i es calcularà a partir de T_{30} .

Si es comparen els valors de T_{30} i T_{20} , es pot observar que en algunes freqüències els seus valors coincideixen bastant, però en altres hi ha certa diferència, especialment a baixes freqüències. El motiu pel qual prevaldrà T_{30} per determinar RT enlloc de T_{20} és per què aquest té una base més sòlida ja que té en compte més valors reals mesurats amb el sonòmetre.

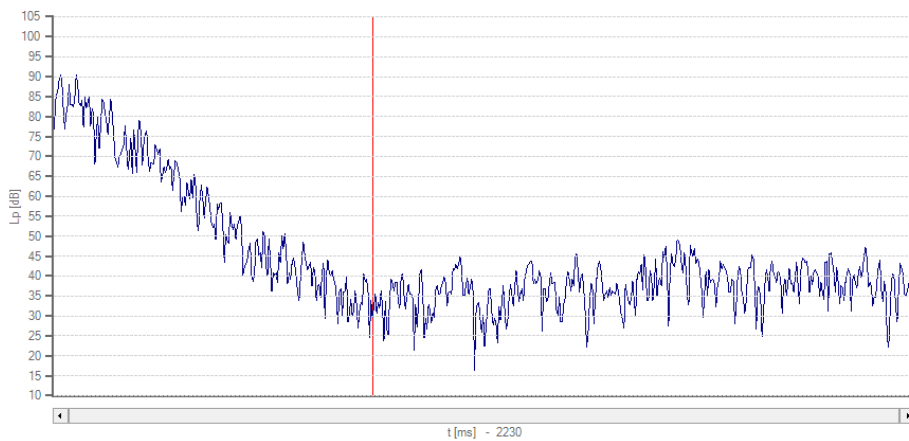
Observant les gràfiques, es pot interpretar que el temps determinat per T_{30} (indicat a les gràfiques per la línia vertical vermella) podria marcar un temps posterior perquè l'evolució de la gràfica segueix descendint abans de mantenir-se en un nivell fluctuant estable. Això es pot comprovar fàcilment a la gràfica 38, corresponent a 1 kHz.

Aquesta incoherència és deguda a que la caiguda de la senyal no és lineal, tot i que s'hi acostava. El càlcul del RT mitjançant T_{30} es basa en què aquesta caiguda sí que ho és i, per tant, segueix una recta teòrica i, com que el pendent de caiguda és major als primers instants, dona un valor menor del que podria esperar-se observant la gràfica. En totes les gràfiques s'observa lleugerament com la caiguda dels valors de pressió abans d'estabilitzar-se pateixen una "frenada" deguda a la influència d'aquest soroll de fons estacionari.

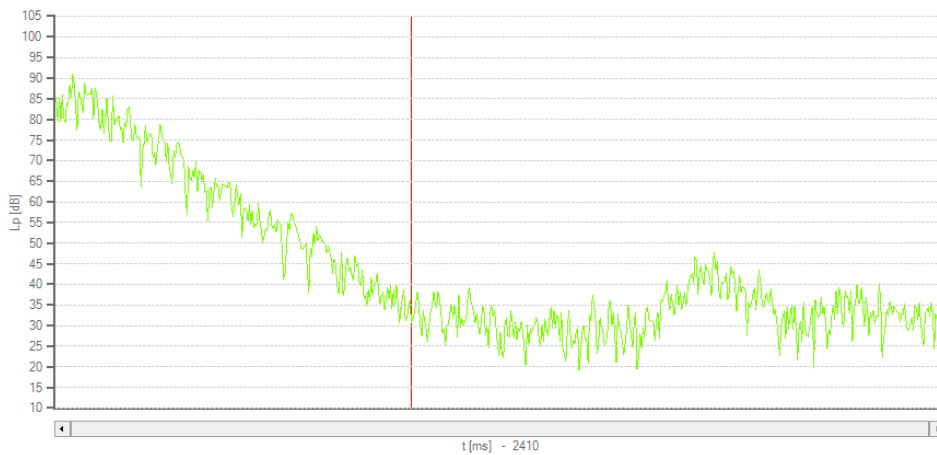
També es pot observar que per a aquesta mesura de la posició F₁ P₁ es produeix un error a la banda de freqüències de 4 kHz. Si es mira la gràfica 40 corresponent, hi ha l'aparició de sorolls espuris que es repeteixen. Això fa que els valors aconseguits no fossin prou bons per poder establir un RT determinat.

Es pot observar que aquests sorolls es repeteixen als 8 kHz, però amb un marge dinàmic més gran que sí que permet aconseguir un valor de RT. També es pot intuir aquesta oscil·lació per a les freqüències més baixes, però amb una evolució molt més lenta.

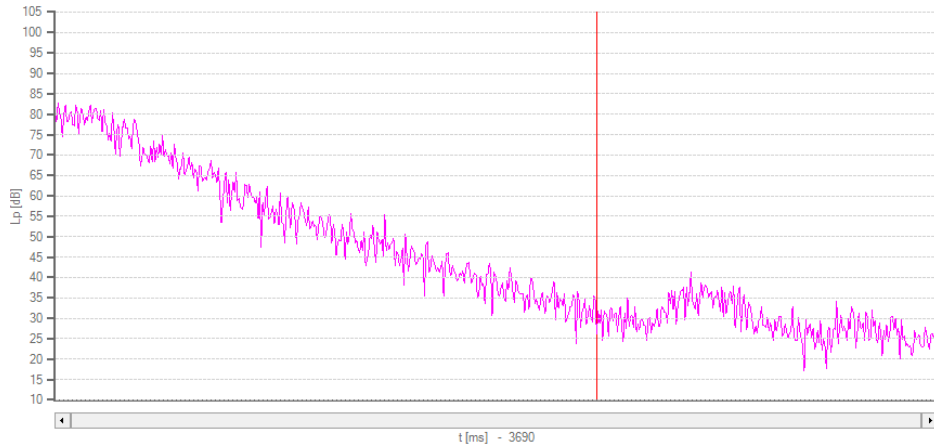
Durant la realització de mesures es va comptar amb la presència d'un niu d'ocells amb ocells piulant constantment, i això deuria ser la probable causa que interfereix les mesures. A més, si es considera que el to de les piulades és molt aguda, i la banda de freqüències on més efecte té és a 4 kHz, tindria sentit que així fos i es confirmaria la hipòtesi.



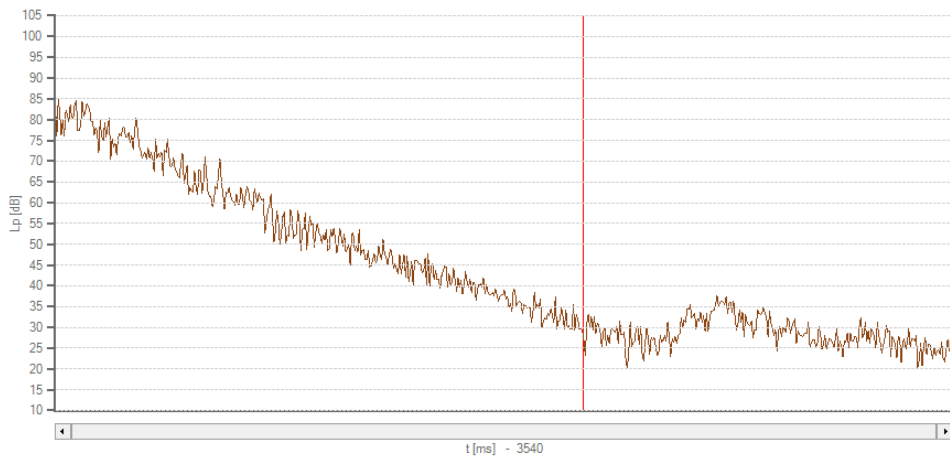
Il·lustració 34: RT banda de 63 Hz, espai polivalent F₁ P₁ M₂



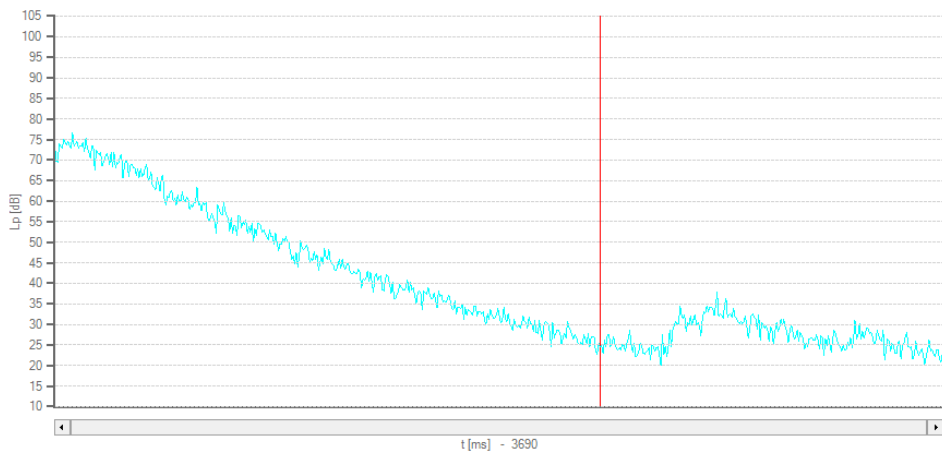
Il·lustració 35: RT banda de 125 Hz, espai polivalent F₁ P₁ M₂



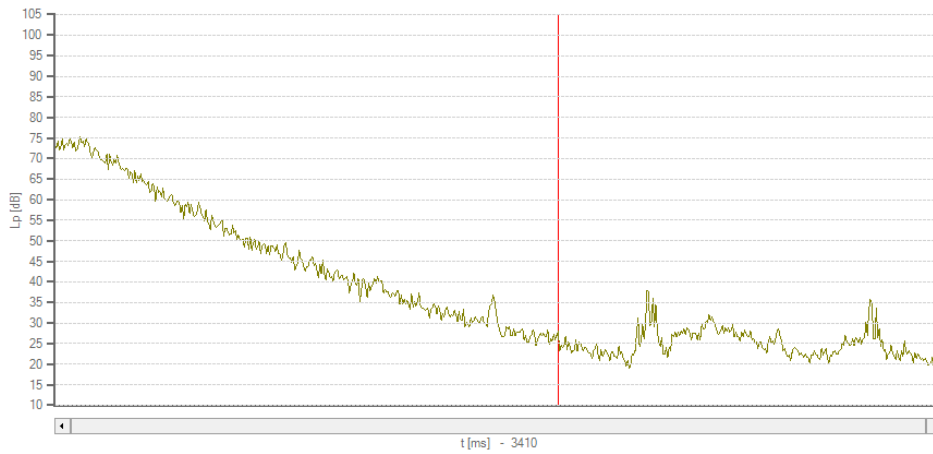
Il·lustració 36: RT banda de 250 Hz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$



Il·lustració 37: RT banda de 500 Hz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$



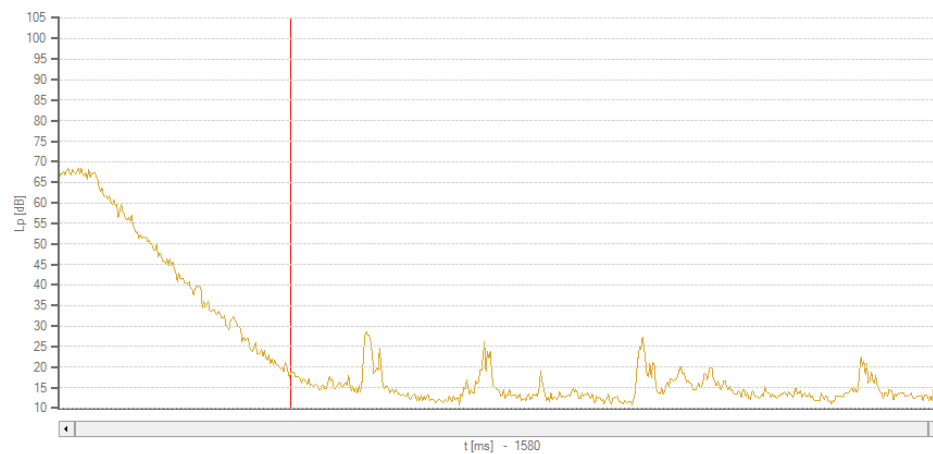
Il·lustració 38: RT banda de 1 kHz, espai polivalent $F_1 P_1 M_2$



Il·lustració 39: RT banda de 2 kHz, espai polivalent F_1 P_1 M_2



Il·lustració 40: RT banda de 4 kHz, espai polivalent F_1 P_1 M_2



Il·lustració 41: RT banda de 8 kHz, espai polivalent F_1 P_1 M_2

6.2.2. Detall del temps de reverberació del local de restauració

Per a fer aquest anàlisi en detall del temps de reverberació s'ha tingut en compte la mesura fet al local de restauració, corresponent a la primera mesura (M_1) que es va fer a la segona posició de la font (F_2) i la primera posició del sonòmetre (P_1).

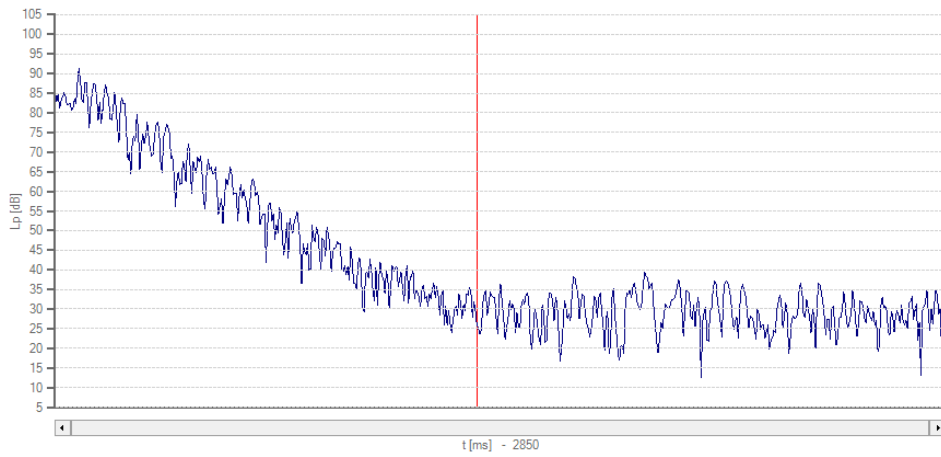
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Nivell inicial	85,4	78,2	81,8	86,9	81,7	79,7	80,4	73,1
Nivell final	25,9	34,9	30,9	31,6	28,3	27,2	25,2	20
Marge	59,5	43,3	50,9	55,3	53,4	52,5	55,2	53,1
T₃₀	2,72	2,29	2,68	2,78	2,83	2,53	2,03	1,52
T₂₀	---	1,14	2,68	3,04	2,94	2,44	1,94	1,54

Taula 6: Estudi paràmetres RT, local de restauració $F_2 P_1 M_1$

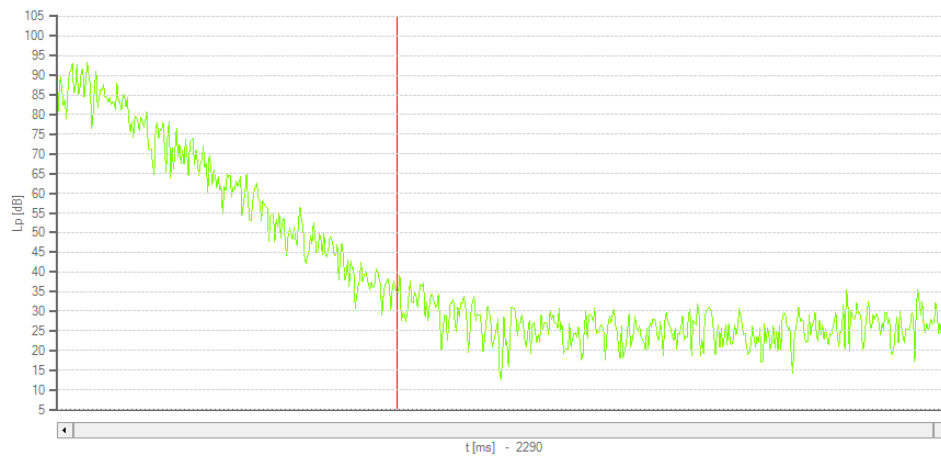
De la mateixa manera que passava amb l'anàlisi de la sala polivalent, amb les dades del local de restauració tampoc s'aconsegueix el marge de 60 dB, encara que en aquestes mesures els valors són més pròxims, entre 50 dB i 60 dB (exceptuant el valor de 125 Hz). Per tant, es tornarà a analitzar aquests valors i a definir el RT a partir de T_{30} ; fet molt habitual en les mesures de RT de recintes.

En aquest cas, els valors de T_{30} i T_{20} coincideixen estretament en moltes de les bandes de freqüències, amb l'excepció de les freqüències baixes, on T_{20} per 63 Hz no va poder ser calculat i per 125 kHz, que sí que dóna un valor concret, però trenca la tònica de les altres dades mesurades. S'haurà de tenir en compte doncs, que pot ser un resultat poc fiable en cas que s'utilitzi T_{20} .

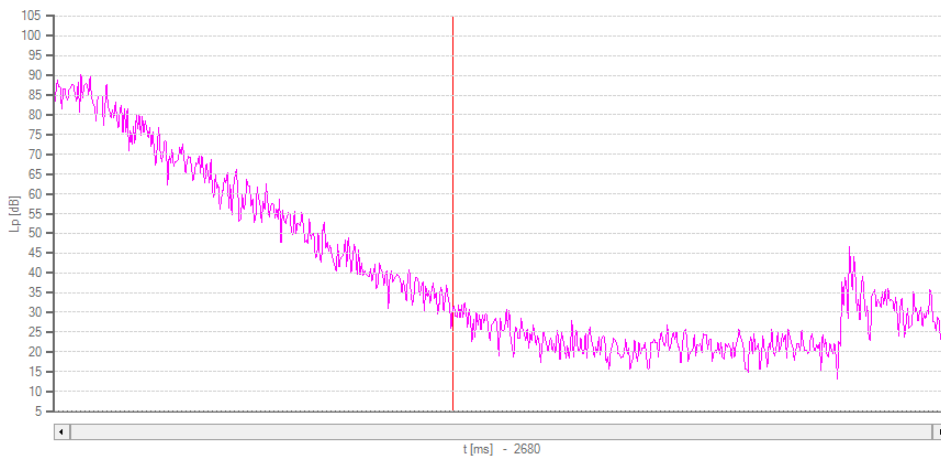
Analitzant la línia vertical vermella que indica el temps definit per T_{30} , es pot realitzar un anàlisi semblant al de l'espai polivalent. La caiguda és pseudo-lineal fins a mantenir-se estable, tenint un comportament més lineal a l'inici de la caiguda, que és la part utilitzada per T_{30} per determinar l'RT del local de restauració, i per això es podria considerar que dóna uns valors erronis per precipitats.



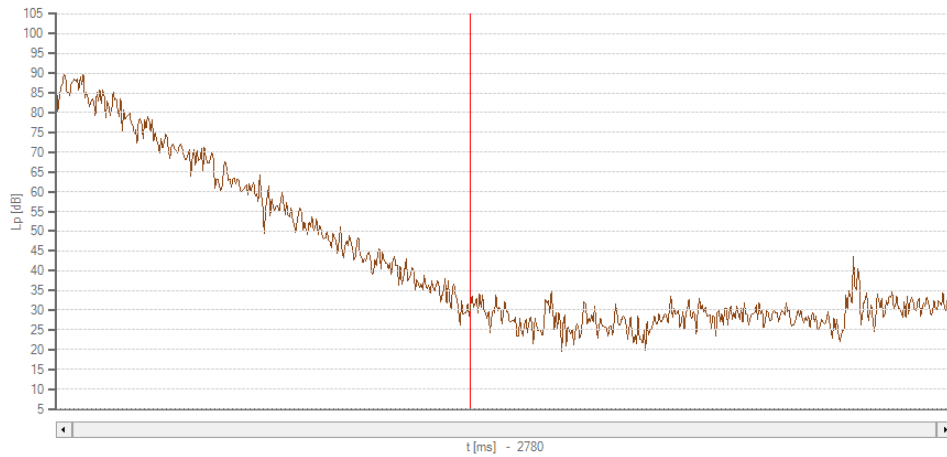
II-lustració 42: RT banda de 63 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



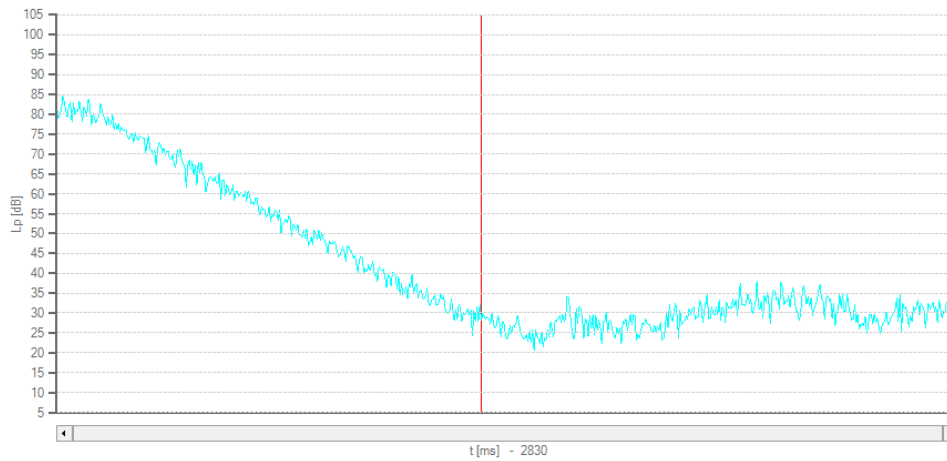
II-lustració 43: RT banda de 125 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



II-lustració 44: RT banda de 250 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



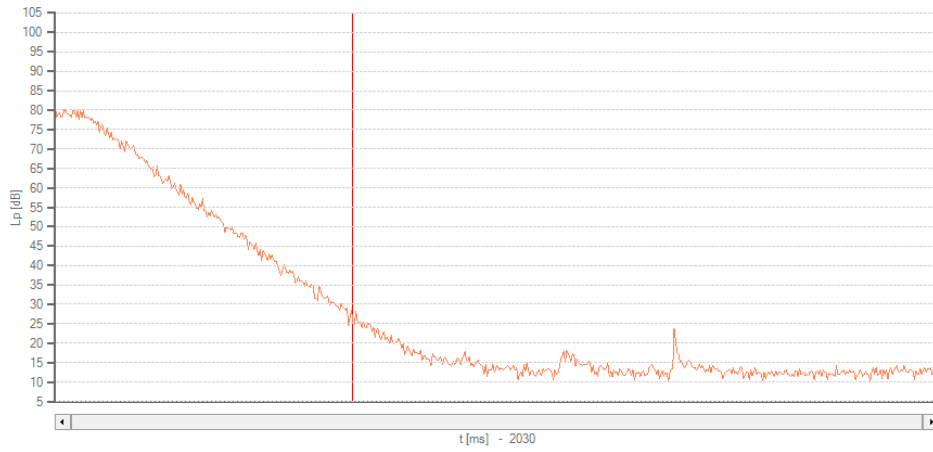
II-lustració 45: RT banda de 500 Hz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



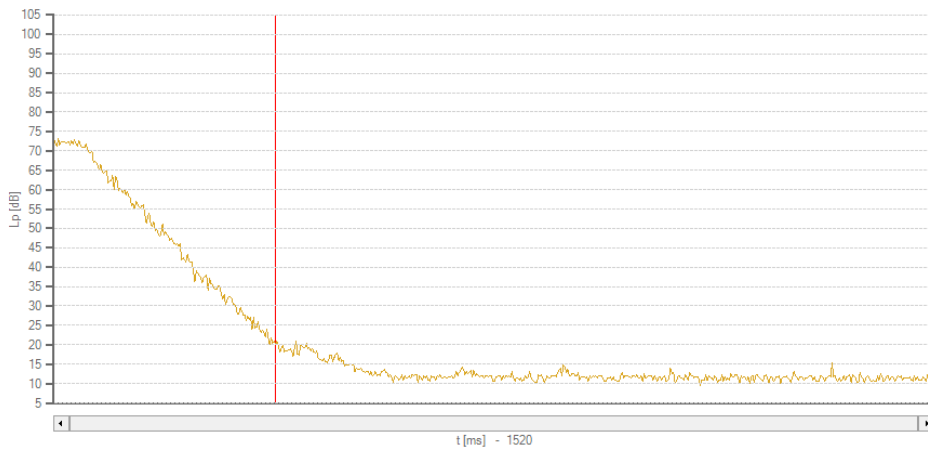
II-lustració 46: RT banda de 1 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



II-lustració 47: RT banda de 2 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



Il·lustració 48: RT banda de 4 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$



Il·lustració 49: RT banda de 8 kHz, local de restauració $F_2 P_1 M_1$

6.2.3. Resultats

A partir dels resultats obtinguts de les mesures realitzades, seguint el pla de mesures realitzat explicat a l'apartat 4.4.2., es procedeix al seu anàlisi.

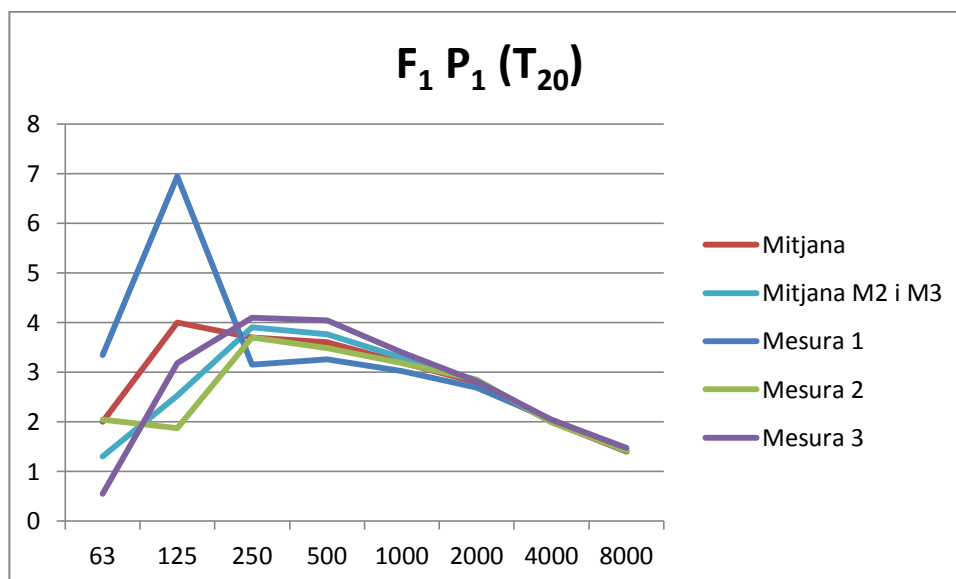
El total de mesures realitzades i la seva distribució és la següent, on F equival a posició e la font i P als punts de mesura.

Posicions	Mesures
Sala polivalent F ₁ P ₁	Mitjana de 12 mesures, 3 repeticions per a 4 direccions separades 90º
Sala polivalent F ₁ P ₂	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Sala polivalent F ₂ P ₁	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Sala polivalent F ₂ P ₂	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Local de restauració F ₁ P ₁	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Local de restauració F ₁ P ₂	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Local de restauració F ₂ P ₁	Mitjana de 2 mesures, separades 90º
Local de restauració F ₂ P ₂	Mitjana de 2 mesures, separades 90º

Taula 7: Relació mesures sales per posicions

Un cop processades les dades, s'obtenen les mitjanes dels RT per a cada banda de freqüències a partir del seu T₂₀ i el seu T₃₀.

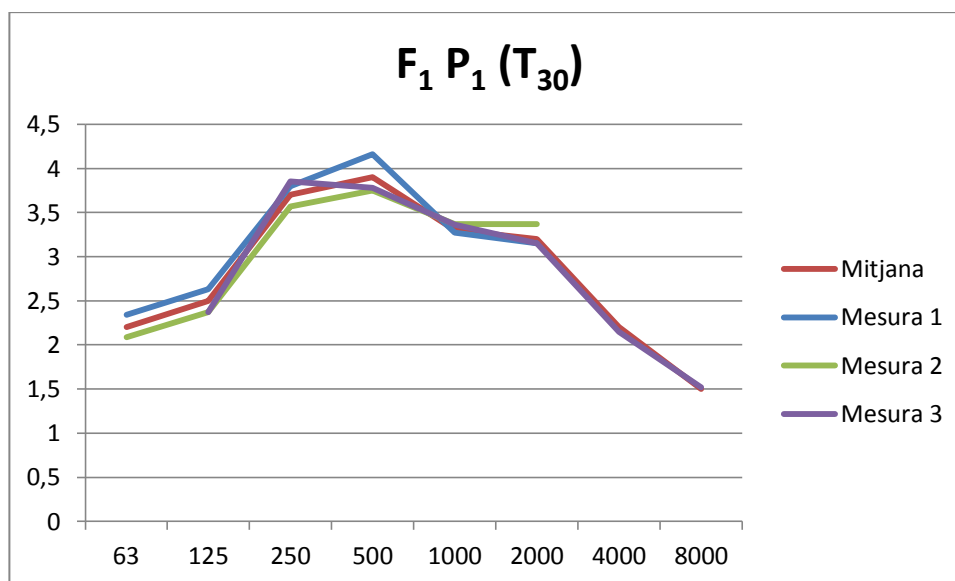
En les següents gràfiques, corresponents a la sala polivalent, es poden veure l'evolució del temps de reverberació segons la banda de freqüències.



Il·lustració 50: Gràfica RT, a partir de T₂₀, per bandes de freqüències, sala polivalent

A la gràfica 50 es pot comprovar que a freqüències baixes, les mesures resulten menys fiables que a freqüències altes ja que hi ha una gran dispersió entre els resultats. La mesura 1, per exemple, ofereix uns valors molt elevats a 63 Hz i 125 Hz, que no es repeteixen en les altres mesures. Això indica que la mesura no és fiable i que els paràmetres mínims de qualitat del sonòmetre no es compleixen.

Es podria optar per excloure aquesta mesura de la mitjana dels valors, ja que aquesta queda distorsionada, tal com es pot comprovar a la gràfica si es comparen els resultats corresponents als valors de la Mitjana i els corresponents als de la Mitjana M_2 i M_3



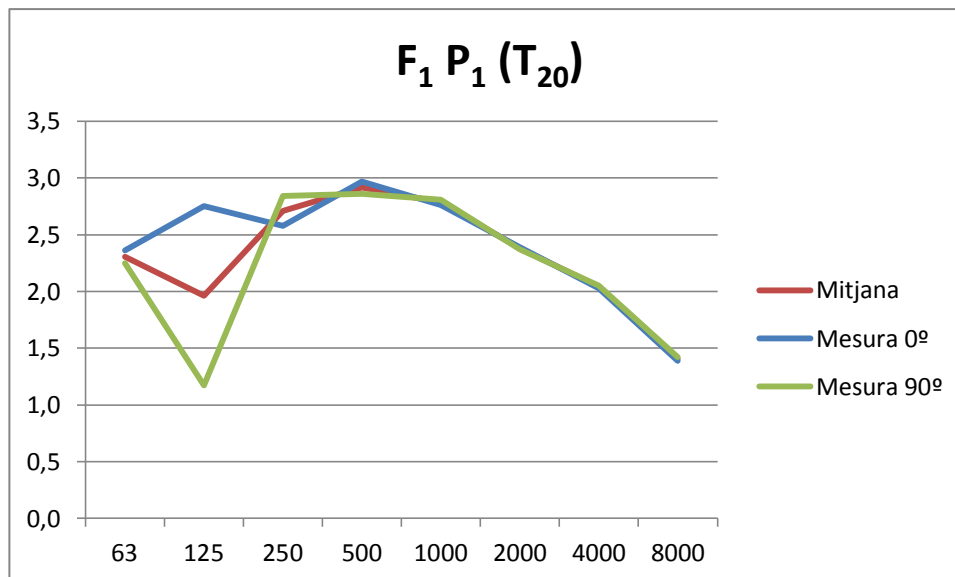
Il·lustració 51: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, sala polivalent

Les gràfiques 50 i 51 mostren els diferents resultats obtinguts amb diferents preses de mesures, sense modificar-ne la posició de la font ni del receptor. Totes dues gràfiques mostren una gran coincidència entre les seves mesures en freqüències mitges i altes i, en el cas de T_{30} , també per a freqüències baixes. La fiabilitat mostrada en aquest exemple, i en les altres mesures, fan que s'utilitzin els valors corresponents a T_{30} com a referència.

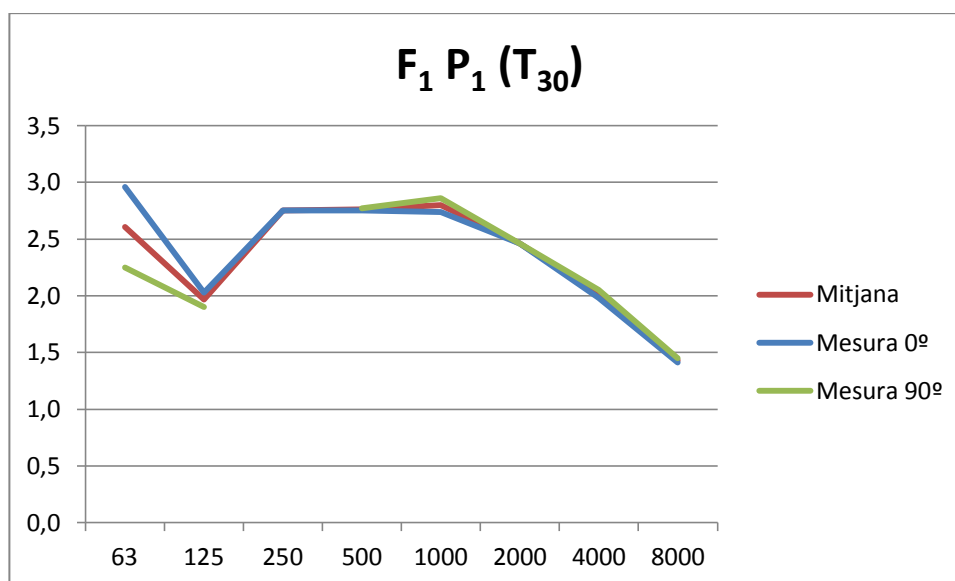
Només per a T_{20} es tenen valors molt diferents i, com es va repetint al llarg de tot l'anàlisi de dades, aquests valors de discrepància corresponen a freqüències molt baixes. En aquests casos, la utilització de mitjanes aritmètiques d'aquests valors aconseguirà donar una resposta prou acurada i vàlida per a treballar-hi.

També cal destacar que el fet que coincideixin de valors de diferents mesures en diferents posicions determinaria que el desplaçament de les ones sonores pel recinte és força homogeni i s'eviten, a priori, problemes com ara focalitzacions.

En les següents gràfiques, 52 i 53, corresponents al local de restauració, es poden veure l'evolució del temps de reverberació segons la banda de freqüències. Si en el cas anterior es comprovava l'encert a l'hora d'utilitzar valors amitjanats per a mesures repetides, en aquest cas es corrobora aquest fet per a mesures amb rotació de 90° de la font emissora.



Il·lustració 52: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, local de restauració

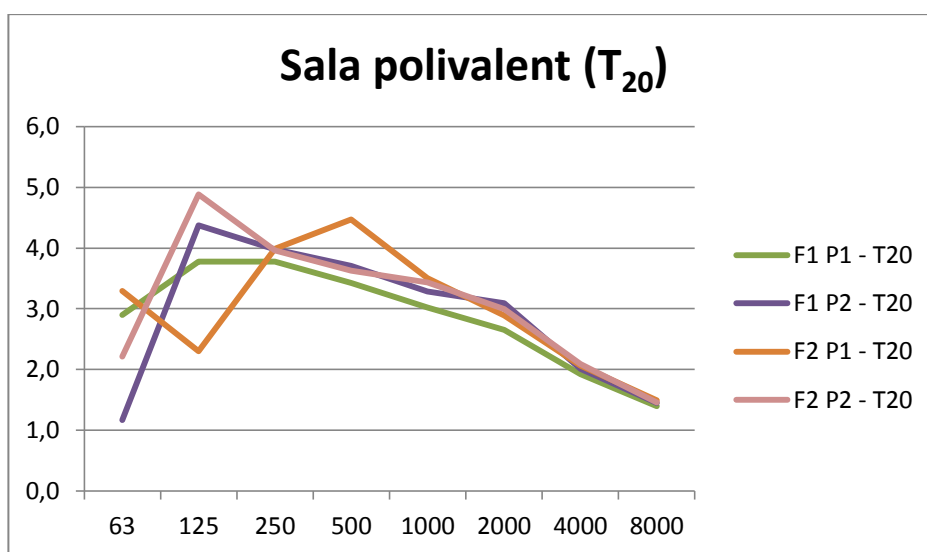


Il·lustració 53: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, local de restauració

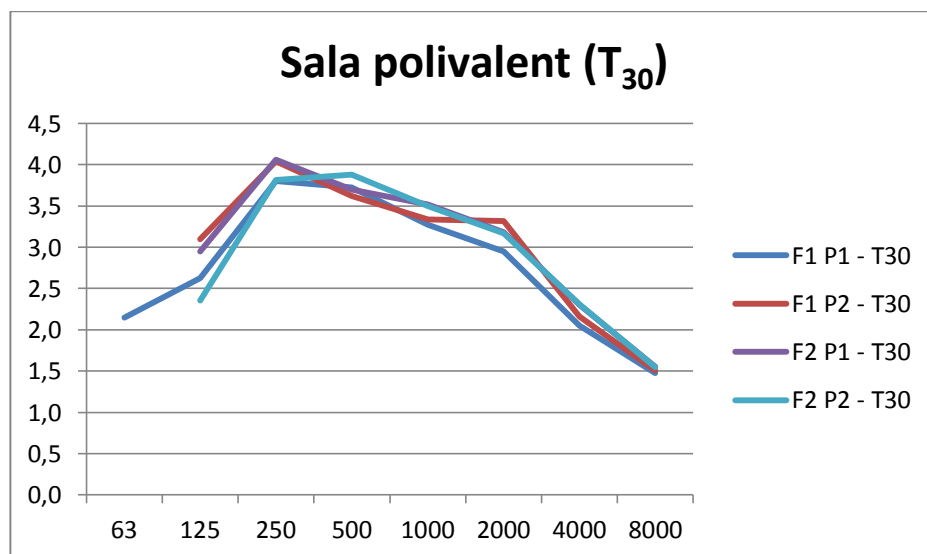
En aquestes gràfiques es pot observar que els valors coincideixen força, sense importar la orientació de l'altaveu. Aquest canvis són mínims degut a que ni la font ni el receptor canvien de lloc, i degut al comportament acústic de la sala. L'única diferència palpable es dona a les freqüències baixes del càlcul de T_{20} , però són unes freqüències que han donat valors poc fiables durant tot l'anàlisi fet fins ara.

Insistir, doncs, que també en el cas d'utilitzar mesures d'altaveu orientat cap a diferents direccions, la mitjana aritmètica dels seus valors és un recurs útil i efectiu i que permet treballar amb menys valors i més fiables, ja que s'eviten valors més extrems.

La mesura del RT resulta més fiable per a les mesures de T_{30} que per a les de T_{20} , ja que en les mesures que tenen en compte 45 dB de caiguda tots els valors obtinguts són molt semblants i demostren una certa coherència. En canvi, per a les mesures que tenen en compte els 35 dB de caiguda es veuen algunes mostres amb pics "aleatoris". Aquestes incongruències es produeixen, sobretot a baixes freqüències; i més a les mesures de la sala polivalent que no a les mesures del local de restauració.

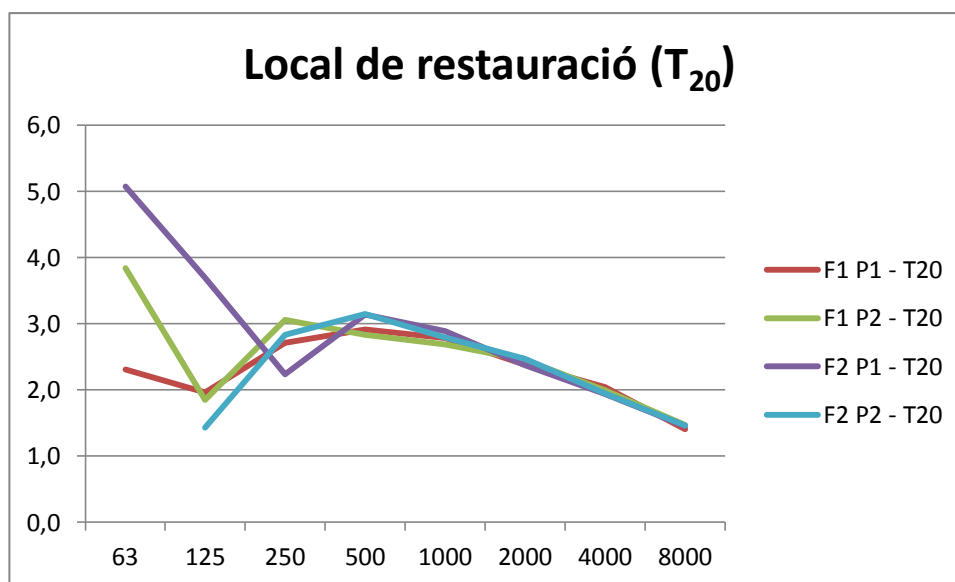


Il·lustració 54: Gràfica RT, a partir de T_{20} , per bandes de freqüències, sala polivalent

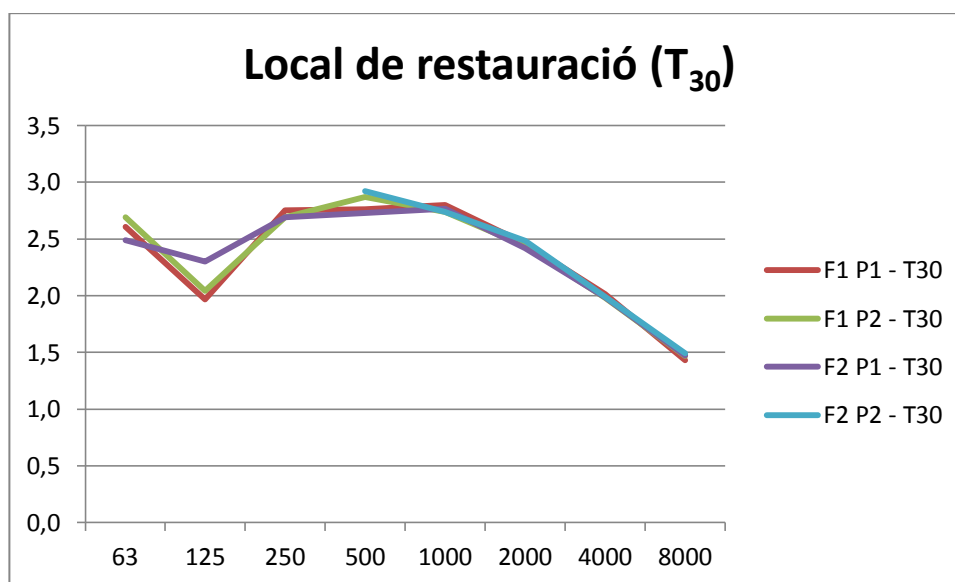


Il·lustració 55: Gràfica RT, a partir de T_{30} , per bandes de freqüències, sala polivalent

Respecte a la sala polivalent, es pot comprovar que els seus RT tenen un rang d'aproximadament 1'5 s – 4 s. Els valors màxims es produeixen a les freqüències baixes-mitges, concretament, en els valors compresos entre 250 Hz i 1 kHz. Els valors mínims es produeixen a les freqüències més altes, sobretot 4kHz i 8 kHz. A baixes freqüències, es pot comprovar com algunes de les mesures no han donat resultats vàlids.



Il·lustració 56: Gràfica RT, a partir de T₂₀, per bandes de freqüències, local de restauració



Il·lustració 57: Gràfica RT, a partir de T₃₀, per bandes de freqüències, local de restauració

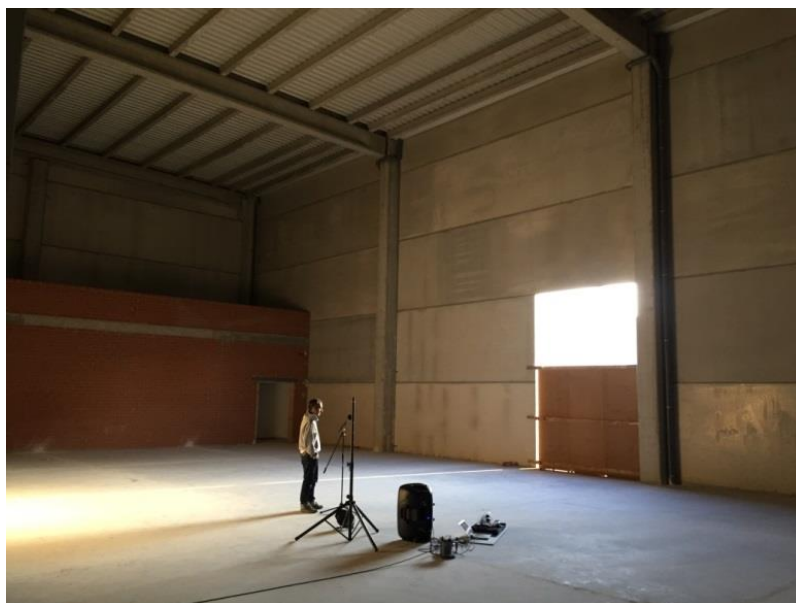
Pel que fa al local de restauració, els RT obtinguts tenen un marge dinàmic més petit, comprès entre els 1'5 s i els 3 s. Els valors màxims s'obtenen a les bandes de freqüències baixes-mitges, entre 250 Hz

i 1 kHz. Els valors mínims es troben a altes freqüències, sobretot a 4kHz i, més encara, a 8 kHz. Es pot comprovar que hi ha una davallada dels valors de la gràfica a la banda de freqüències de 125 Hz.

6.3. Incidències durant les mesures

Durant l'adquisició de les dades, aquestes es van veure afectades per diversos problemes.

El primer i més important és que la porta que connecta la sala polivalent amb l'exterior no estava acabada, i a sobre d'aquesta porta hi havia un espai obert que trencava la separació entre exterior i interior. Per tant, el soroll de fons tenia més influència del que tindrà un cop estigui acabat, i això fa que les dades no siguin fiables. Com a conseqüència, tenir una obertura, que equivaldrà a tenir una àrea amb un coeficient d'absorció igual a 1, comportarà que els RT obtinguts siguin menors que els que s'obtidrien en un recinte tancat completament.



Il·lustració 58: Fotografia interior de l'espai polivalent

A conseqüència d'aquest forat, els ocells entraven i sortien de la sala durant les mesures, i a més a més, es podia sentir clarament la presència d'un niu amb cries a dins de la nau. A l'estar aquests piulant, les mesures recollien aquests sorolls anormals en un procés de condicionament acústic. Altres sorolls que influenciaven les mesures del soroll de fons i el feien augmentar per $c_{u,p}$ a d'aquest forat estructural eren gossos bordant o trànsit rodat. Per tant, alguns valors de les freqüències altes es veien afectats pels xiscles dels ocells, o d'altres de les freqüències baixes es veien augmentats pel soroll de vehicles pesants circulant.

Un altre dels problemes, tant a la sala polivalent com al local de restauració, era l'estat de les portes, ja que aquestes estaven inacabades. Això no en va permetre el seu tancament i, consegüentment, el temps de reverberació de la sala no es podia mesurar com a recinte tancat. Aquest fet també pot haver tingut influència en les dades obtingudes.

7. Propostes de disseny

En aquest apartat es descriuran els objectius a assolir per a un bon condicionament acústic dels recintes, i es realitzarà la simulació per demostrar els resultats obtinguts. També es farà una explicació de les propostes acústiques per a aconseguir els objectius proposats prèviament, fent una llista per recinte i per zona d'actuació, i s'acompanyarà amb els resultats obtinguts a la simulació per mostrar-ne el seu efecte.

7.1. Temps de reverberació objectius dels recintes

Observant la taula 2, es pot comprovar que l'objectiu de RT que s'ha de tenir a una sala polivalent és d'entre 1'2 s i 1'5 s. Per tant, s'haurà de treballar tot el marge de freqüències en profunditat per reduir-ne els seus valors. Per ara, com es demostra a la gràfica 55, només la banda de freqüències de 8 kHz compleix el requisit i, a mesura que s'apliquin materials específics per reduir els valors dels RT, potser s'haurà de reforçar aquesta freqüència per evitar que es situï per sota del marge desitjat.

L'objectiu de RT que s'ha de tenir a un local de restauració es recomana que sigui de 0'9 s, tal com està especificat al Codi Tècnic d'Edificació (CTE)⁹. Per tant, com es pot veure a la gràfica 57, cap banda de freqüències el compleix, i s'haurà de treballar amb totes elles per reduir-les en major o menor mesura.

La diferència entre els valors de RT de referència entre un recinte i l'altre és degut a que en recintes destinats a música, és interessant que hi hagi una certa reverberació per donar més "cos" a aquesta música, mentre que en locals on predominarà la veu parlada en diferents converses, s'ha de vigilar que no hi hagi un RT tan gran que provoqui l'efecte *cocktail party*, entre altres.

⁹ <http://www.arquitectura-tecnica.com/hit/Hit2016-2/DBHR.pdf>

7.2. Simulació de les mesures de l'espai polivalent

Amb els resultats obtinguts dels valors numèrics de les gràfiques 54 i 55, es fa una mitjana de tots els valors de T_{20} i de T_{30} per obtenir un resultat únic de RT de la sala polivalent.

	125	250	500	1000	2000	4000
T_{20}	3,8	3,9	3,8	3,3	2,9	2,0
T_{30}	2,8	3,9	3,7	3,4	3,2	2,2

Taula 8: RT mitjà dels valors mesurats per a la sala polivalent

A partir del temps RT especificat a la taula 8, es pot fer una simulació de l'estat de la sala polivalent i quins materials la formen i com es reparteixen aquests materials, per aconseguir aquests valors de RT per cada banda de freqüències.

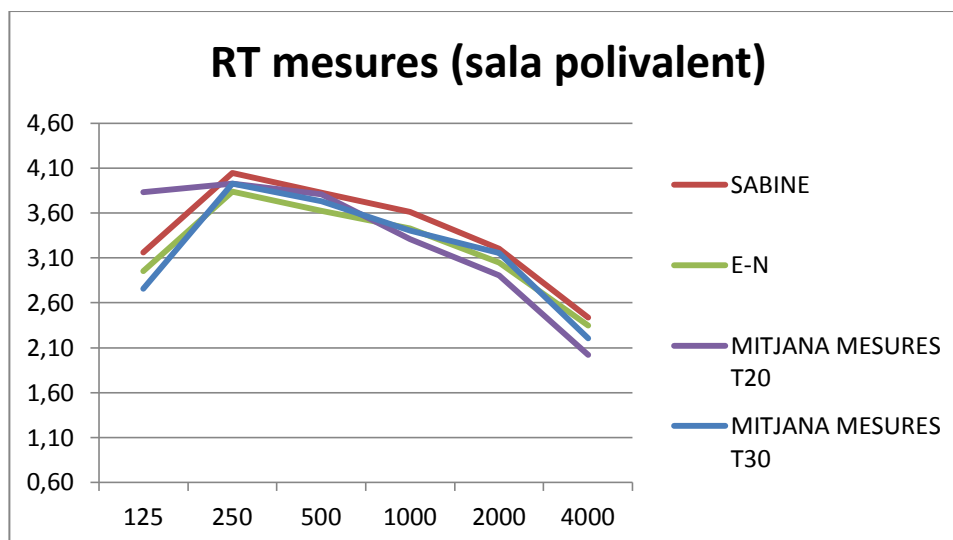
MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SOSTRE	TERRA
Porta fusta	0,42	0,21	0,1	0,8	0,8	0,6	5,9		
Obertura + portes obertes	1	1	1	1	1	1	15,82		
PARET (Totxo Formigó)	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	333,636		
PARET (Totxo argila)	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	94,602		
PARET (Formigó sense pintar)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	611,90		
SOSTRE (plaques metàl·liques)	0,4	0,28	0,28	0,3	0,3	0,3		422,37	
TERRA (terra ciment)	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02			422,37

Taula 9: Materials actuals de la sala polivalent, els seus coeficients i la superfície que ocupen.

Es tractaran els materials descrits a l'apartat 4.2.1. i hi ha diversos punts a destacar. Les obertures mencionades a l'apartat 6.3., tant a l'exterior com a través de les portes obertes, seran una clara font d'absorció, ja que el fet de que la sala no pugui estar tancada farà que aquestes obertures actuïn amb la màxima absorció; que és 1, l'equivalent a una finestra oberta.

De la resta d'elements que formen part del recinte, l'únic que tindrà influència com a absorbent, i per tant, determina el resultat obtingut, serà el sostre amb les plaques metàl·liques formades per panells sandvitx.

Per comprovar els valors obtinguts, a la gràfica 59 es comparen aquests amb les mitjanes obtingudes del T_{20} i el T_{30} . Com es pot observar, els valors són bastant coincidents al llarg de tot el marge de freqüències.



Il·lustració 59: Gràfica RT, comparativa entre simulació actual i mesures de la sala polivalent

7.3. Condicionament acústic de l'espai polivalent

A la taula 10, s'especifiquen les dades referents a les mesures de la sala. Aquestes dades han estat extretes de la documentació proporcionada per l'estudi d'arquitectura, tal com s'ha especificat a l'apartat 4.2.1. Com que el recinte té una zona a la planta baixa destinada a altres instal·lacions, de l'alçada d'un pis, s'ha separat l'espai per poder fer els càlculs exactes. Aquesta zona és la corresponent als tècnics, ja que la idea original del client és la d'establir la zona de treball dels tècnics a aquest primer pis.

SALA	Públic	Tècnics	TOTAL
PERÍMETRE (m)	82,38	9,22	91,6
ALÇADA (m)	12	7,95	12
TERRA (m²)	360,1	62,27	422,37
PARET (m²)	988,56	73,299	1061,86
VOLUM (m³)	4321,2	495,05	4816,25

Taula 10: Mesures de l'espai polivalent

Les dades a tenir en compte per al disseny acústic de l'espai seran el volum del recinte, la superfície de les seves parets i la del terra, la qual es considerarà de la mateixa extensió per al sostre. Aquestes dades seran necessàries per complir amb les equacions 5 i 9 de Sabine i Eyring-Norris.

7.3.1. Absorció de l'aire

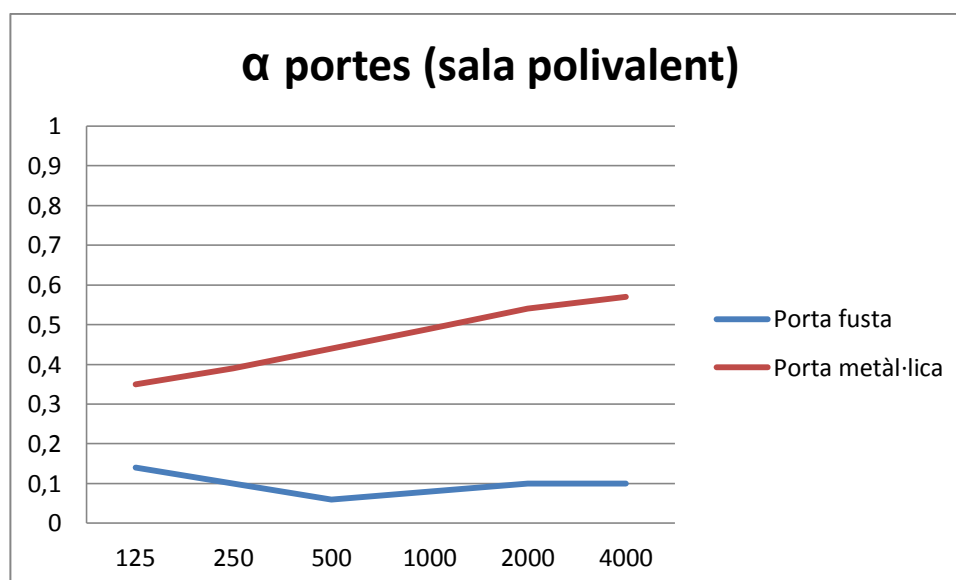
Per a recintes amb un volum gran, com és el cas de l'espai polivalent, serà necessari comptar amb l'absorció provocada per l'aire. Aquesta absorció influeix, sobretot, a freqüències altes a partir de 2 kHz, però és negligible per a baixes. Dependrà de la humitat, com menor sigui aquesta, més gran en serà l'absorció

La fórmula per calcular l'absorció de l'aire està especificada a l'apartat 3.6. Tal com s'ha explicat a l'apartat 5.2.2., com que no es tenen mesures de temperatura, pressió i humitat corresponents a les mesures, s'agafarà un valor estàndard d'humitat de 50%.

Tal com es pot comprovar al full de càlcul de la simulació adjuntat a l'annex A, la seva aportació serà negligible a les bandes de 125 a 500 Hz, aportant una reducció de 0,02 s a 1 kHz, de 0,1 s a 2 kHz i de 0,33 s a 4 kHz.

7.3.2. Parets

Per a dissenyar les solucions acústiques de les parets, s'ha de tenir en compte quin espai estarà ocupat per tres portes de fusta, dues simples i una doble, i una porta metàl·lica. Les portes de fusta presentaran una coeficient d'absorció baix en línies generals mentre que la metàl·lica presenta una atenuació creixent amb un coeficient mig, entre valors de 0,35 i 0,6.

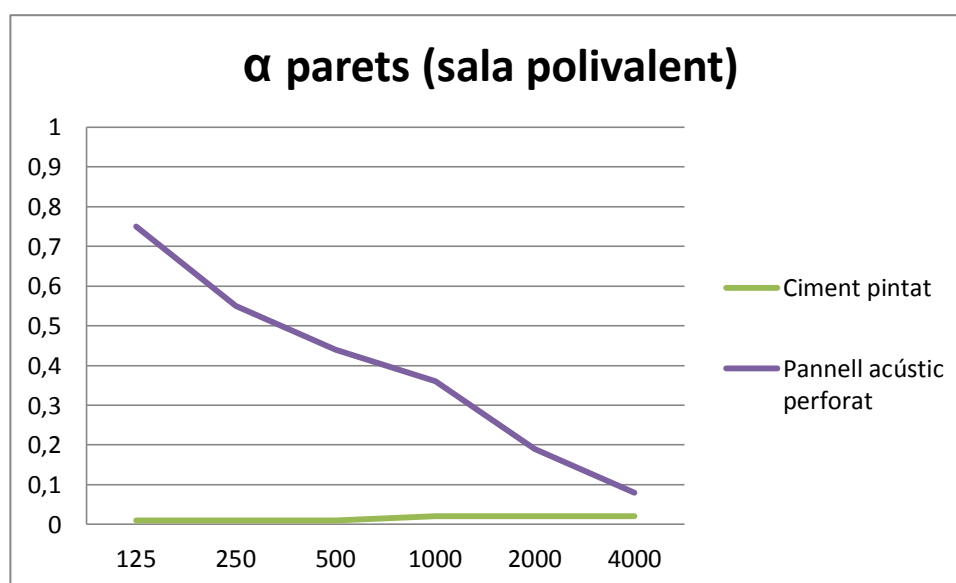


Il·lustració 60: Coeficients d'absorció dels materials de les portes

Degut a la poca superfície ocupada per les portes, la seva influència en el resultat final serà purament testimonial.

Les parets estaran constituïdes de panells acústics perforats¹⁰ de la marca Decustik. S'escull el panell acústic perforat perquè té un absorció molt gran per a freqüències baixes, i d'aquesta manera s'aconsegueix atenuar aquestes bandes de freqüències, que són les que presenten en general menys resposta en la majoria d'altres materials.

Aquests panells acústics aniran des del nivell de terra fins a una alçada de 4 metres. Dels 4 als 12 metres, les parets estaran constituïdes de panells prefabricats de formigó una part i de blocs de formigó l'altre, com a l'actualitat. Aquesta distribució s'escull per a què els panells acústics estiguin a l'alçada del públic per a què notin millor aquest efecte d'absorció.



Il·lustració 61: Coeficients d'absorció dels materials de les parets

La resposta del material escollit per a aquest cas es pot veure a la gràfica 61, i es tracta d'un material absorbent ressonador, tal com s'ha explicat a l'apartat 3.9.2. El panell presenta una distribució alterna de les files i columnes de forats, els quals seran de 200 mm, i contindrà llana mineral.

A la taula 11 es pot veure el resum dels materials utilitzats per a les parets.

¹⁰ http://www.decustik.com/arxius/docs/FTP_PAP048_2015_es.pdf

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	PARET (m ²)
Porta fusta	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	10,82
Porta metàl·lica	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57	5,9
Ciment pintat	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	715,62
Panell acústic perforat	0,75	0,55	0,44	0,36	0,19	0,08	329,52

Taula 11: Materials utilitzats per a les parets, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà

7.3.3. Sostre, terra i públic

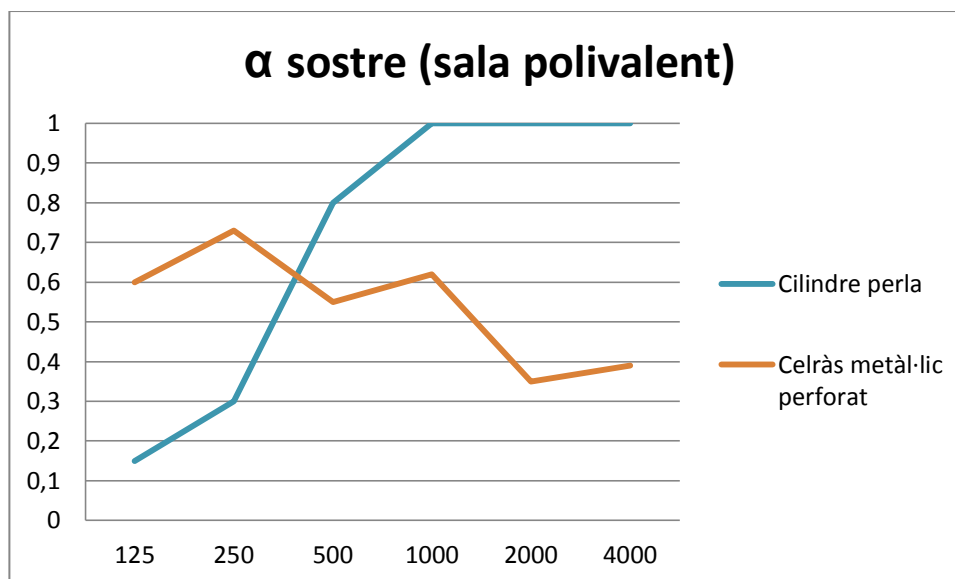
El sostre serà la superfície principal d'actuació per al disseny de les solucions acústiques. La seva gran extensió, juntament amb el fet de que no ha de complir cap requisit al no estar amb contacte ni amb usuaris del recinte, ni amb cap altre element d'aquest, fa que sigui idoni per invertir-hi les solucions més efectives per a l'absorció del so.

Per a aconseguir aquesta fita s'ha optat per a plantejar un sostre amb una combinació de dos materials, que quedaran distribuïts alternament pel sostre.

Per una banda s'utilitzarà el Cilindre perla¹¹ de la casa Serinac, que combinarà una efectivitat màxima d'absorció a freqüències mitges i altes, de 500 Hz a 4 kHz, amb un disseny modern i efectiu, ja que consta d'un grup de cilindres de diferents diàmetres que penjen verticalment del sostre.

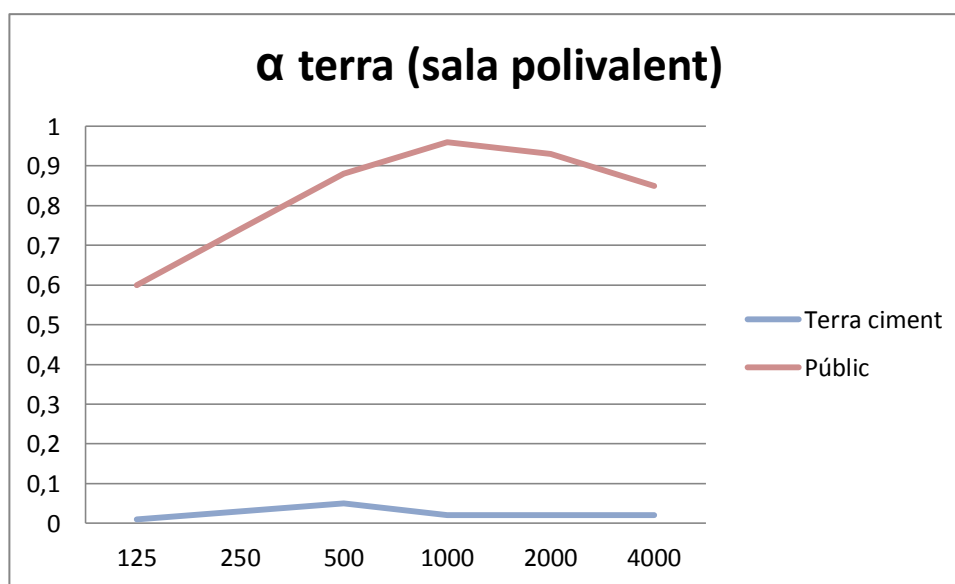
Els cilindres es combinaran amb panells de Celràs de perfils metàl·lics ranurats un 17% i amb llana de vidre. Aquest material és un fals sostre que presenta una bona absorció a totes les freqüències, especialment a baixes.

¹¹ <http://serinacinsonorizaciones.es/Catalogo-Serinac.pdf>



Il·lustració 62: Coeficients d'absorció dels materials del sostre

La solució proposada per al terra del recinte serà mantenir el que es té en l'actualitat, un terra de ciment simple, que presentarà una resposta molt baixa d'absorció en totes les freqüències, és a dir, resultarà altament reflectiu.



Il·lustració 63: Coeficients d'absorció dels materials del terra i el públic

També s'haurà de tenir en compte el públic assistent al recinte, ja que els temps especificats d'objectiu de RT, no mencionen que sigui sense públic. Per tant, s'agafaran els valors d'absorció del públic, molt alts en totes les bandes de freqüències, especialment mitges, i se li assignarà una superfície. Degut a que la nau és molt gran i part d'aquesta estarà ocupada per l'escenari, per unes grades planificades en un futur i per la zona dels tècnics, i tenint en compte que no sempre estarà plena, s'assigna una

superfície de 200 m² d'ocupació per part el públic, que equivaldrà a gairebé la meitat de la superfície útil de l'espai.

A la taula 12 es pot veure el resum dels materials utilitzats per al sostre i el terra:

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	SOSTRE (m ²)	TERRA (m ²)
Cilindre perla	0,15	0,3	0,8	1	1	1	220	
Celràs metàl·lic perforat	0,6	0,73	0,55	0,62	0,35	0,39	202,37	
Ciment terra	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02		222,37
Públic	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85		200

Taula 12: Materials utilitzats per al sostre i el terra, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà

7.4. Simulació de les mesures del local de restauració

Per realitzar la simulació actual del local de restauració, es necessiten primer els RT per cada banda de freqüències. Aquests valors s'aconsegueixen de fer la mitjana de totes les mesures de les gràfiques 56 i 57.

	125	250	500	1000	2000	4000
T ₂₀	2,2	2,7	3,0	2,8	2,4	2,0
T ₃₀	2,1	2,7	2,8	2,8	2,5	2,0

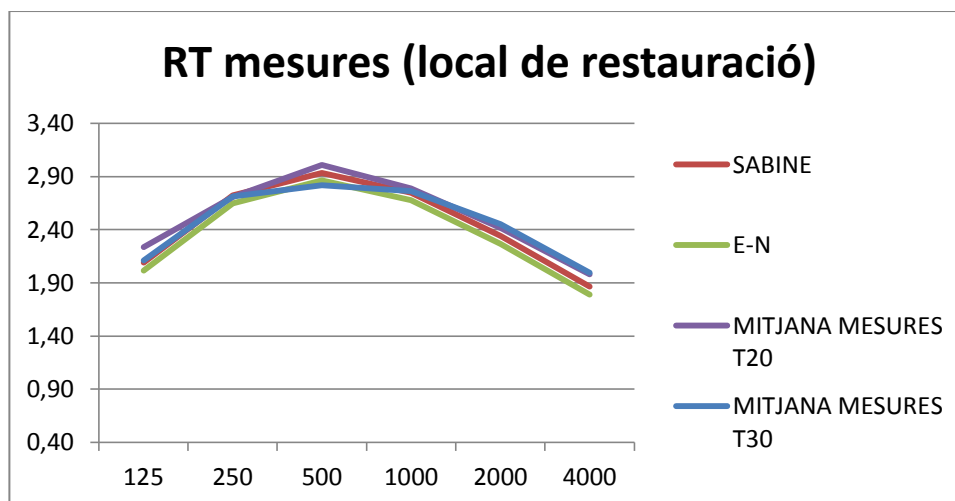
Taula 13: RT mitjà dels valors mesurats per a la sala polivalent

Un cop s'ha aconseguit el RT, es pot procedir a la simulació de l'estat del local, format pels materials descrits a l'apartat 4.2.2. i la superfície que aquests ocupen.

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SOSTRE	TERRA
Vidre	0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	10,08		
Portes obertes	1	1	1	1	1	1	11		
Paret guix	0,1	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09	119,92		
Terra rajoles	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02			110,51
Sostre formigó	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04		110,51	

Taula 14: Materials actuals del local de restauració, els seus coeficients i la superfície que ocupen

Com es pot observar a la taula 14, la configuració del local de restauració a l'actualitat és bastant simple. Els únics elements rellevants en quant a absorció acústica són el vidre de les portes de l'entrada i el seu comportament, i les portes interiors que a l'estar obertes es consideren amb el coeficient màxim d'absorció



Il·lustració 64: Gràfica RT, comparativa entre simulació actual i mesures del local de restauració

Al representar a la gràfica 64 els RT obtinguts de les mitjanes de tots els T_{20} i els T_{30} coincideixen bastant amb les simulacions

7.5. Condicionament acústic del local de restauració

A la taula 15, s'especifiquen les dades referents a les mesures del local. Per saber-ne aquestes dades es va consultar l'informe de l'estudi d'arquitectura

SALA	TOTAL (m)
PERÍMETRE (m)	47
ALÇADA (m)	3
TERRA (m^2)	110,51
PARET (m^2)	141
VOLUM (m^3)	331,53

Taula 15: Mesures del local de restauració

Les dades per al càlcul que necessitem, explicades a l'apartat 4.2.2., són el volum del local, la superfície del terra; la del sostre, que és equivalent a la mateixa superfície del terra; i la suma de superfícies. S'utilitzaran per a les fórmules 5 i 9.

7.5.1. Parets

A l'hora de realitzar l'estudi acústic de les parets, s'ha de complir una condició externa: una de les parets, corresponent a la que dona a l'exterior, estarà formada en gran part per vidre degut a criteris de

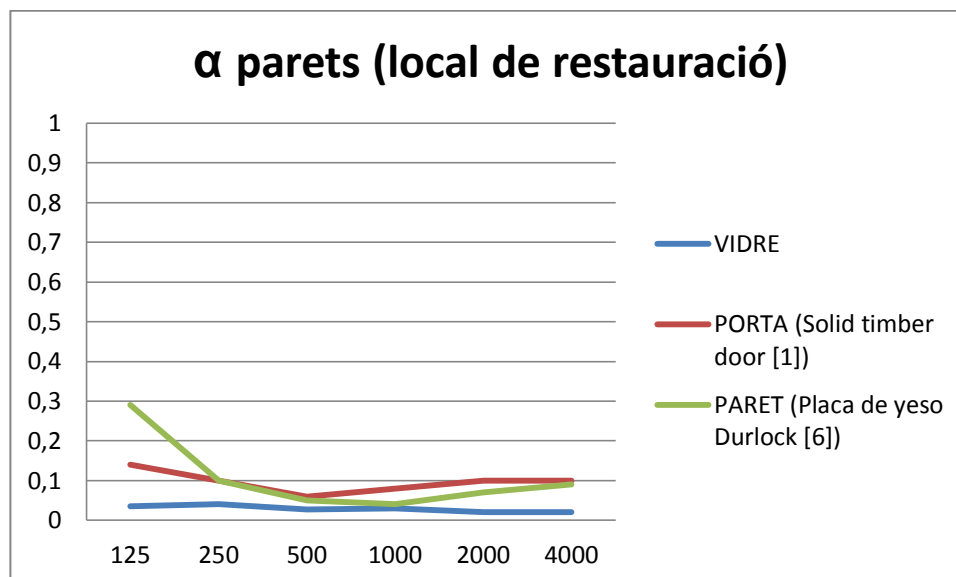
disseny per part de l'estudi d'arquitectura. Aquesta serà una condició que s'haurà d'assumir a l'hora de dissenyar les solucions acústiques ja que influenciaran el càlcul del RT.

La resta de les parets seran de guix, com ja ho són en l'actualitat, sobre plaques Durlock¹². També es tindrà en compte la superfície de les portes que connecten amb les sales.

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	PARET (m ²)
Vidre	0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	10,08
Porta fusta	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	11
Guix	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	119,92

Taula 16: Materials utilitzats per a les parets, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà

A la taula 16, es poden comprovar els coeficients d'absorció dels materials. A la gràfica 65, es poden observar els coeficients d'absorció repartits per bandes de freqüències dels tres materials de la paret: el vidre, la porta de fusta i la paret de guix.



Il·lustració 65: Coeficients d'absorció dels materials de les parets

Es pot comprovar que, per aquests materials, tots els coeficients α són molt baixos. Això és perquè tots tres materials són molt llisos i poc porosos, convertint-se així en materials reflectors. L'únic component amb un valor destacable és el coeficient de la paret de guix, que té un component més alt que la resta per a baixes freqüències,

Aquests materials no tenen cap objectiu acústic concret, ja que són material simples que no han estat escollits per a això, sinó simplement per motius estètics i/o pràctics.

¹² <https://www.durlock.com/productos/>

7.5.2. Sostre i terra

A l'hora d'estudiar els efectes del sostre i del terra, es faran consideracions per separat. No es pretén realitzar cap actuació acústica amb el terra de rajoles, que ja estan construïdes. S'especifiquen els seus coeficients i la petita aportació que tenen al nivell global de tota la sala.

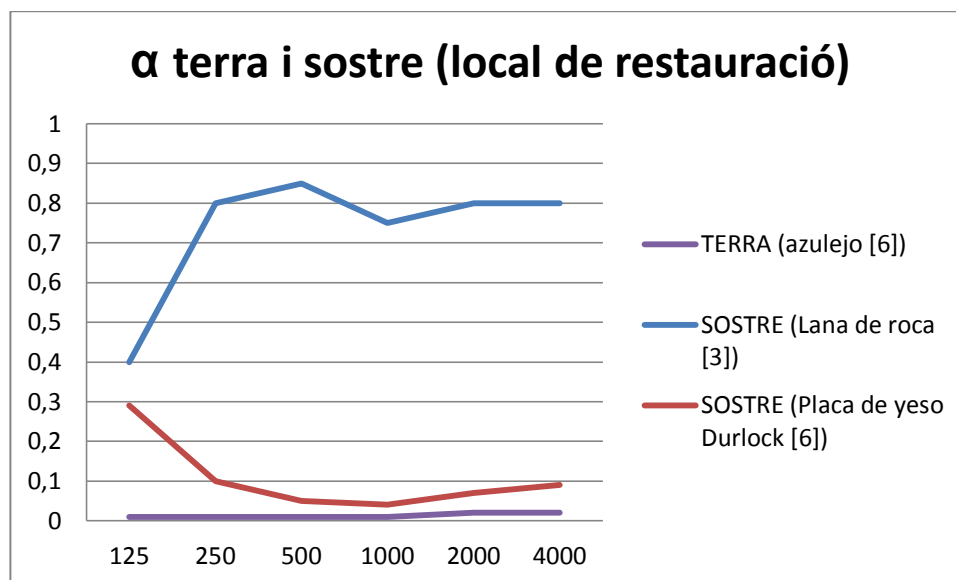
Sostre llana de roca combinat amb material freqüències baixes.

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	SOSTRE (m ²)	TERRA (m ²)
Rajola	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02		110,51
Llana de roca	0,4	0,8	0,85	0,75	0,8	0,8	70	
Guix	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	40,51	

Taula 17: Materials utilitzats per al sostre i el terra, els seus coeficients i la superfície que se n'instal·larà

En canvi, el sostre serà la superfície escollida per a realitzar la major actuació a nivell acústic. El sostre serà un panell de llana de roca¹³ de l'empresa Rockfon, amb les seves propietats específiques.

Com es pot comprovar a la gràfica 66, la llana de roca pel sostre té un grau d'absorció molt alt a totes les freqüències, excepte les freqüències baixes, on tindrà un coeficient mig. Les rajoles en canvi, tenen una resposta pràcticament nul·la.



Il·lustració 66: Coeficients d'absorció dels materials del terra i del sostre

¹³ https://diaterm.com/wp-content/uploads/2016/11/Rockfon_Pacific-1.pdf

Ja que el material utilitzat per al sostre té uns coeficients tant grans d'absorció, no es podrà aplicar a tot el sostre, per què si no es produiria una absorció excessiva que resultaria perjudicial per a l'objectiu del disseny acústic de la sala. Per tant, s'opta per combinar aquest material específic amb un sostre del mateix guix amb plaques Durlock que tenen les parets.

La utilització del guix com a material en contraposició amb la llana de roca resulta especialment útil perquè compensa l'absorció menor a baixes freqüències d'un amb una absorció més gran de l'altre, aconseguint així una situació d'equilibri.

7.5.3. Públic

El RT de referència és per a locals buits, per tant, no es tindrà en compte l'absorció que podrien proporcionar la gent assistent al local. Com que el recinte, a més, encara està en un estat de construcció molt primerenc, tampoc se sap quin serà el seu mobiliari, per tant no se sap tampoc el número de persones que hi podria haver.

7.6. Simulació resultats

Després d'analitzar l'efecte dels materials i el seu coeficient d'absorció, es passa analitzar l'efecte global que té aquest conjunt de materials en els temps de reverberació de les sales estudiades.

Aquest temps obtingut s'ha de comparar amb l'especificat com a òptim per a cada tipus de recinte, tal com s'ha comentat a l'apartat 3.4.4.

7.6.1. Espai polivalent

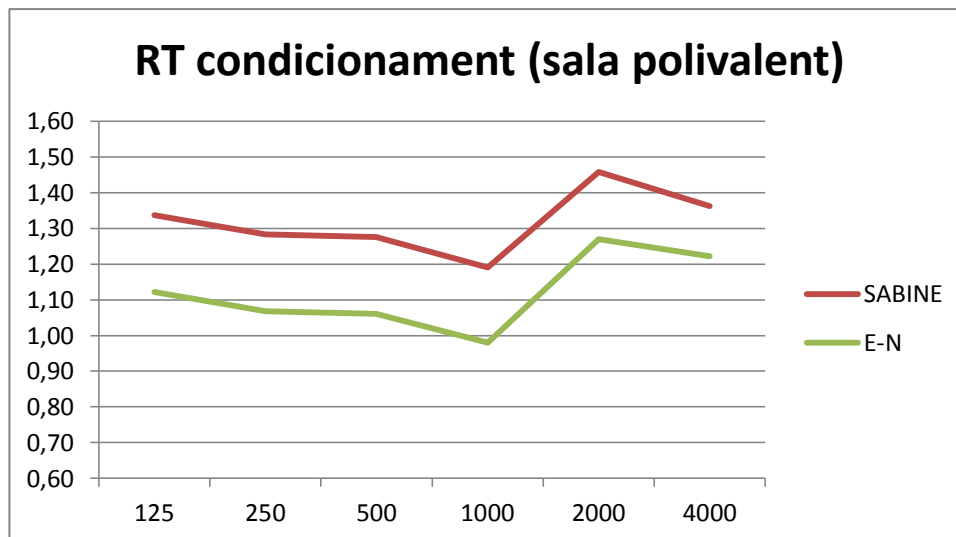
Després de realitzar els càlculs pertinents utilitzant les fórmules 5 i 9, s'obtenen els següents temps de reverberació a l'espai polivalent.

SABINE	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s)	1,34	1,28	1,28	1,19	1,46	1,36

E-N	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s)	1,12	1,07	1,06	0,98	1,27	1,22

Taula 18: RT segons mètode de càlcul per banda de freqüències de la sala polivalent

S'agafen com a referència els valors de la fórmula de Sabine. Si es té en compte que els per als recintes polivalents els temps de reverberació recomanats són d'entre 1,2 i 1,5 s, es pot comprovar que el disseny de solucions acústiques ha complert el seu objectiu, ja que tot el marge de freqüències es troba entre el marge especificat.



Il·lustració 67: RT segons mètode de càlcul per a la sala polivalent

L'únic punt conflictiu és el de la banda de freqüències d'1 kHz, ja que està per sota del marge recomanat. Al ser només per 0,01 s, es considera aquest marge d'error acceptable.

7.6.2. Local de restauració

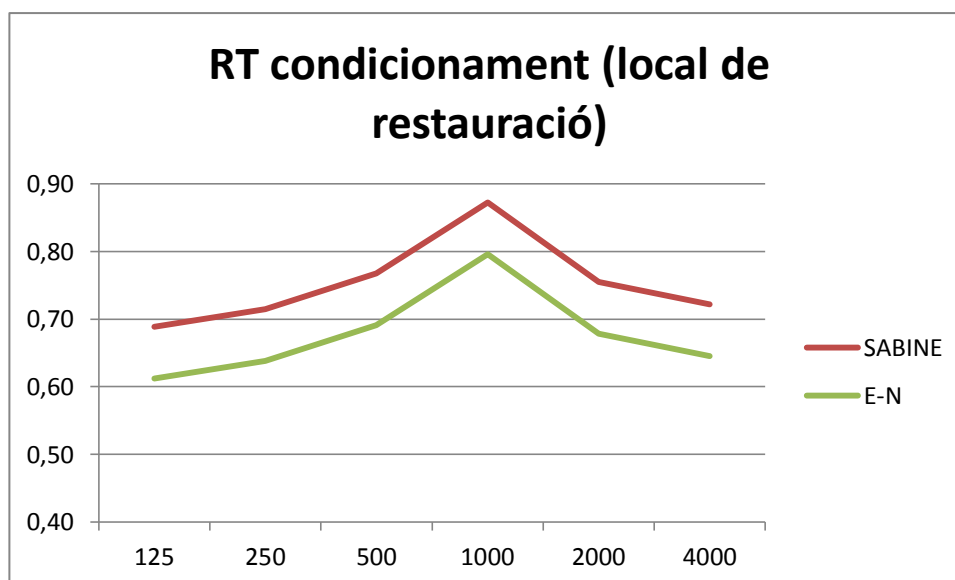
Després de realitzar els càlculs pertinents segons el mètodes de càlcul de Sabine i Eyring-Norris, s'obtenen els temps de reverberació especificats a la taula 19 per al local de restauració.

SABINE	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s)	0,69	0,72	0,77	0,87	0,75	0,72

E-N	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s)	0,61	0,64	0,69	0,80	0,68	0,65

Taula 19: RT segons mètode de càlcul per banda de freqüències del local de restauració

S'agafen com a valor de referència els temps de la fórmula de Sabine. Com es pot observar també a la gràfica 68, si es té en compte que la condició era que el local estigués per sota dels 0,9 s de RT, aquest objectiu s'ha aconseguit.



Il·lustració 68: RT segons mètode de càlcul per al local de restauració

Totes les bandes de freqüències compleixen aquesta condició amb molt de marge, exceptuant la banda de freqüències d'1 kHz que té un pic de temps de reverberació, sense arribar a sobrepassar el valor especificat.

7.6.3. Comparativa Sabine/Eyring-Norris

Com es pot comprovar a les gràfiques 67 i 68, i a les taules 20 i 21, les fórmules de Sabine i d'Eyring-Norris no coincideixen en els seus valors.

	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s) SABINE	1,34	1,28	1,28	1,19	1,46	1,36
TR (s) E-N	1,12	1,07	1,06	0,98	1,27	1,22
Diferència (s)	0,22	0,21	0,22	0,21	0,19	0,14

Taula 20: Diferències de RT entre Sabine i Eyring-Norris, sala polivalent

	125	250	500	1000	2000	4000
TR (s) SABINE	0,69	0,72	0,77	0,87	0,75	0,72
TR (s) E-N	0,61	0,64	0,69	0,80	0,68	0,65
Diferència (s)	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07

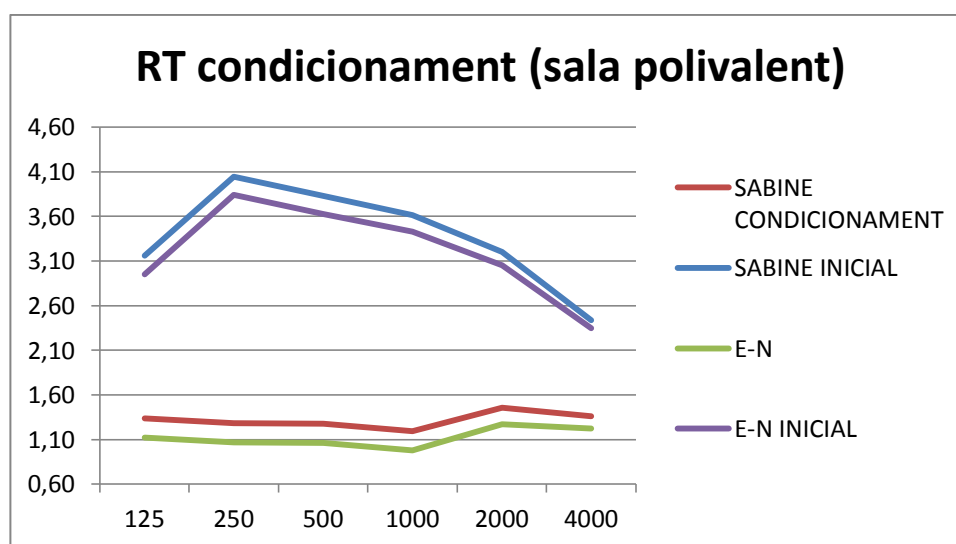
Taula 21: Diferències de RT entre Sabine i Eyring-Norris, local de restauració

Tot i això la diferència entre ambdues fórmules es manté constant per la majoria de bandes de freqüències, excepte a freqüències més altes. En principi, el fet de treballar amb les mateixes variables en aquestes fórmules, i la relació entre elles, fa que cada cop que en canviem una de les característiques a estudiar, les dues equacions es modifiquin proporcionalment.

Per tant, el factor que marcarà la diferència serà el $\ln(1 - \bar{\alpha})$ que incorpora la fórmula d'Eyring-Norris, que té en compte l'energia que perd el raig per cada reflexió. La pèrdua d'energia explica que el temps de reverberació sigui menor que en la fórmula de Sabine, ja que caurà amb més rapidesa els 60 dB necessaris per a establir un RT.

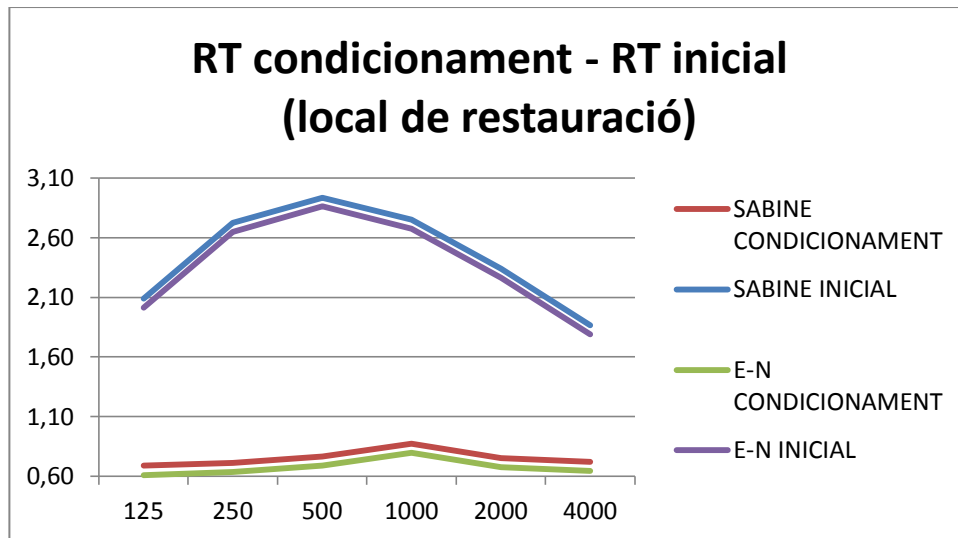
7.6.4. Comparativa entre resultats i situació inicial

Finalment, es pot observar com han canviat els temps de reverberació simulats amb les propostes de solució acústiques respecte els temps de reverberació mesurats de la situació inicial.



Il·lustració 69: RT comparatiu abans i després de les mesures de condicionament, sala polivalent

A la gràfica 69, es pot comprovar la diferència de RT aconseguida per a la sala polivalent. Aquests temps s'han reduït en un marge d'entre 1,5 i 2,8 s. També s'ha aconseguit una resposta freqüencial més plana, essent el marge entre les diferents freqüències de les solucions proposades de 0,3 s, metre que en les mesures actuals és superior a 1,5 s. Ha passat de tenir un pic de freqüència a una freqüència baixa, 250 Hz, a una d'alta, 2 kHz.



Il·lustració 70: RT comparatiu abans i després de les mesures de condicionament, local de restauració

A la gràfica 70, es poden veure els diferents valors de RT en l'espectre de freqüències que va dels 125 Hz als 4 kHz per als valors adquirits al local de restauració i els valors simulats amb les solucions acústiques.

Es pot observar com els valors de RT s'han reduït en un marge d'entre 1,2 i 2,1 s., i que el marge dinàmic dels valors obtinguts ha passat a ser molt més pla, des de 1,1 s a 0,2. El pic de valor s'ha desplaçat dels 500 Hz a 1 kHz.

8. Conclusions i línies de futur

En aquest apartat, un cop finalitzat el projecte amb èxit, es procedirà a fer unes conclusions finals a mode de resum, considerats quins eren els objectius plantejats en un inici i quins resultats s'han obtingut, juntament amb una reflexió crítica per analitzar quins punts haurien pogut ser millors. També es proposarà en quina línia es podria continuar amb aquest projecte en un futur.

8.1. Conclusions

A continuació es farà una reflexió de les conclusions personals sobre el projecte realitzat, les lliçons que se'n poden extreure, considerar si s'han assolit els objectius i una mica d'autocrítica.

8.1.1. Lliçons

Amb aquest projecte s'ha pogut aprofundir i aprendre molts conceptes de la acústica des de la seva vessant de ciència. S'ha fet una exposició al comportament del so en recintes interiors, saber com actua, per què, i predir-ne el comportament.

S'ha fet un èmfasi especial en l'explicació i l'anàlisi dels temps de reverberació, ja que és la característica essencial dels passos que s'han seguit al llarg de tot el treball. S'han analitzat les diferents parts que formen el temps de reverberació de l'ona sonora, des del raig directe, passant per les primeres reflexions i acabat amb la cua reverberant. Això ha permès entendre com es distribueix el camp sonor en l'interior d'una sala i quina problemàtica pot sorgir si aquesta no està condicionada acústicament, com ara focalitzacions, aparicions d'ecos o l'aparició efecte *cocktail party*.

S'ha fet un anàlisi dels passos a l'hora de prendre mesures. Des d'un punt de vista d'un enginyer acústic, s'han explicat els instruments que s'utilitzen per adquirir les dades, la legislació que es segueix, i com elaborar un pla de mesures. També s'han vist els diferents tipus de materials que es poden utilitzar per al condicionament acústic,.

S'ha vist la importància de paràmetres com el T_{60} i el T_{30} i els seus valors, relacionats amb la comprensió d'un missatge parlat, per exemple. D'aquesta manera, a l'analitzar unes mesures de RT,

ràpidament es pot discernir quins valors són els adequats i quins necessiten ser treballats acústicament.

S'ha vist quins són els problemes acústics que sorgeixen als recintes que no han estat degudament tractats i, com a conseqüència, s'ha explicat detalladament com es procedeix a fer el disseny i el condicionament acústic del cas pràctic. S'ha començat per un repàs dels diferents tipus de materials, les seves propietats i quin efecte poden tenir als recintes segons les característiques de cada un d'ells; seguint amb una simulació dels càlculs matemàtics per determinar les solucions acústiques i un anàlisi final dels resultats obtinguts.

Aquests càlculs matemàtics han estat basats en les equacions de Sabine i Eyring-Norris, permetent la comprensió dels factors que en determinen els resultats, i utilitzant-les en el cas pràctic per aconseguir realitzar el condicionament acústic adequat.

8.1.2. Assoliment d'objectius

En aquest projecte s'han assolit els objectius plantejats a l'apartat 1.2.

L'objectiu de l'enginyer era satisfer la necessitat del client. Aquest va sol·licitar la intervenció d'un enginyer per a realitzar el disseny de solucions acústiques per als seus locals, i s'ha aconseguit fer una proposta de disseny que adequa els espais als valors òptims per al seu ús.

Concretament s'han aconseguit, mitjançant el condicionament acústic, uns resultats de RT òptims per als recintes estudiats i l'ús que se'n vol fer d'aquests. S'ha proveït al client de l'estudi i la simulació dels recintes, i d'una proposta de solucions acústiques a adoptar.

Respecte la sala polivalent, s'ha passat d'uns temps de reverberació mesurats en l'estat actual del recinte d'entre 1,5 i 4 s depenent de la freqüència a uns resultats d'entre 1,2 i 1,5 s. Per tant, treballant aquests temps de RT mitjançant el disseny de materials amb diferents propietats acústiques, s'ha complert l'objectiu.

Pel local de restauració, els resultats han estat els adequats també. Es parteix d'uns temps de reverberació d'entre 1,5 i 3 s, a uns temps d'entre 0,6 i 0,9 s.

Per tant, el disseny acústic ha permès que el client pugui disposar d'uns recintes amb una configuració que evitarà els problemes acústics més habituals d'aquest tipus de recintes.

Tal com s'ha explicat a l'apartat 8.1. de lliçons, l'objectiu pedagògic també s'ha complert. L'aplicació teòrica al cas pràctic ha permès una millor comprensió de tots els aspectes de l'acústica estudiats, ja que permetia veure'n els efectes i experimentar amb el seu ús.

D'altra banda, la realització del projecte ha servit per tenir un primer contacte amb la manera de treballar dels enginyers acústics. Poder ser capaç de realitzar mesures acústiques en un recinte, com es faria en l'àmbit professional, resulta una bona activitat pràctica per experimentar com es treballa en aquest sector.

Finalment, pel que fa als objectius del client, també s'han complert. La proposta de disseny acústic li permetrà disposar d'uns recintes amb una configuració acústica òptima, evitant així els problemes acústics més habituals d'aquest tipus de recintes, com el ja mencionat efecte *cocktail party*.

8.1.3. Reflexió crítica

Analitzant amb un punt de vista crític el procés d'elaboració d'aquest projecte, el major problema ha estat la planificació d'aquest. Es va trigar molt a poder fer les mesures dels recintes a treballar, i això va fer que es concentrés la major part del treball en les últimes setmanes, i no es va poder aprofundir tant com hagués estat possible.

També es va destinar un temps en l'aprenentatge d'un programa de simulació acústica, l'Olive Tree Lab, del qual al final no es va disposar de llicència educacional i, per tant, és un temps i invertit que no s'ha vist reflectit en el projecte.

8.2. Línies de futur

Les principals línies de futur d'aquest projecte serien diverses. Des d'aprofundir encara més en els temes exposats en aquest projecte, a continuar amb el projecte estudiant més conceptes acústics, i perfeccionar l'estudi i el condicionament acústic realitzat en aquest projecte.

8.2.1. Seguiment del projecte

Com s'ha destacat al llarg del projecte, els recintes encara estaven en un estat inicial de construcció. Seria molt interessant poder seguir l'evolució del cas en les posteriors fases de construcció.

D'aquesta manera, es podria anar comprovant els passos a seguir per al disseny acústic. Aquest seguiment permetria corroborar els resultats obtinguts en les simulacions acústiques realitzades en aquest projecte. Així, doncs, es podria demostrar la seva validesa no només en una situació simulada, si no en una situació real, per validar-ne els resultats

Es podria comprovar si sorgeixen nous problemes a partir de la disposició dels materials acústics i complementar el projecte amb un disseny de solucions acústiques més específiques i més adaptades a la realitat.

8.2.2. Anàlisi més profund dels resultats

Un dels punts a millorar seria realitzar un estudi més profund de totes les dades adquirides durant el procés de mesura. Durant el projecte s'han estudiat les característiques de les dades obtingudes del sonòmetre, però no s'ha entrat en fer-ne un anàlisi en profunditat de la seva fiabilitat, ni descartar-ne els valors poc precisos.

Amb l'estudi dels altres paràmetres proveïts pel sonòmetre, com són el paràmetre de curvatura, el paràmetre de no linealitat i el producte entre l'ample de banda i el temps de reverberació, es podria determinar de manera més segura si les caigudes obtingudes en alguns casos han donat valors erronis. Al projecte, aquests possibles valors erronis quedaven compensats per la mitjana aritmètica que es feia de les mesures proveïdes pel sonòmetre, que en compensava els valors extrems.

Seria interessant fer aquest anàlisi per a totes les mesures enregistrades, ja que es van detectar valors anòmals en algunes mesures per a freqüències baixes i en algunes per a freqüències altes, com s'ha mencionat a l'apartat 6.2.1.

També seria interessant poder realitzar les mesures del temps de reverberació amb un altaveu omnidireccional, tal com estableix la llei. Permetria comparar l'efectivitat d'aquest altaveu envers l'utilitzat en aquest projecte, i comprovar els valors que s'obtidrien.

8.2.3. Simulació

Seguint amb l'aprofundiment de l'estudi del cas del projecte, seria molt interessant també, de cara a realitzar un estudi molt més precís, comptar amb una simulació dels espais utilitzant un programa informàtic de simulació acústica.

D'aquesta manera, es podria aconseguir l'excel·lència acústica sense haver de recolzar-se només en fórmules teòriques. Els programes de simulació acústica, com s'ha explicat a l'apartat 2.4., permeten fer una simulació del recinte i assignar els materials amb les seves propietats a les superfícies i, mitjançant acurats càlculs físics, permeten analitzar el RT resultant.

Per tant, es podria fer aquesta simulació amb les solucions dissenyades en aquest projecte i comprovar-ne el comportament. Això permetria fer un anàlisi de fins a quin punt els càlculs de l'acústica estadística han estat precisos, i reafirmar amb més proves per al client la idoneïtat d'aquestes solucions.

Aquests programes permeten aprofundir en molts més conceptes a part del RT. Es poden caracteritzar els recintes i analitzar els altres paràmetres especificats per aprofundir en l'estudi del condicionament acústic.

8.2.4. Estudi més profund dels recintes

Seria molt interessant aprofundir en l'estudi d'aquest projecte perfeccionant-lo amb l'ampliació a tots els paràmetres del condicionament acústic, no només al temps de reverberació i es podrien incloure altres paràmetres que no s'han tingut en consideració en aquest projecte.

Aquests paràmetres són el %ALCons (*Articulation Loss of Consonants*) i el RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*), que són els indicadors de la intel·ligibilitat de la paraula, és a dir, són els paràmetres que determinen la correcta comprensió del missatge de l'emissor al receptor. Serveixen també per detectar l'aparició d'ecos o ecos flotants en una sala.

El %ALCons fa referència al percentatge de consonants que no s'entenen d'un missatge i, per tant, com més baix sigui millor per a la comprensió d'aquest. Per la seva banda, el RASTI estudia les característiques del canal de transmissió del missatge per mantenir les característiques de la parla. Aquests dos conceptes estan estretament lligats i són una referència més a l'hora d'avaluar les característiques d'una sala. També, poden ser estudiats juntament amb el temps de reverberació ja que aniran lligats a si aquest és alt o baix.

Altres paràmetres de condicionament acústic que es podrien estudiar per a l'aplicació en el cas pràctic són el BR (*Bass Ratio*) o calidesa acústica i el Br (Brillantor). Aquests paràmetres relacionen el RT amb les freqüències baixes (BR) i amb les altes (Br) per estudiar-ne quina resposta demostra a aquestes freqüències i si aquesta és bona o no.

Si una sala presenta una bona resposta a freqüències baixes, serà càlida. La calidesa implica riquesa de greus i, consegüentment, una música més suau i melosa. En canvi, si una sala presenta una bona resposta a freqüències altes, serà brillant, i s'ha de vigilar que aquesta brillantor no sigui excessiva per un mal ús dels sistemes d'amplificació del so.

8.2.5. Ampliació a diferents àmbits de l'acústica

Un cop analitzats tots els aspectes mencionats en aquest apartat, seria interessant ampliar l'àmbit d'estudi. Fins ara, tots els procediments estaven relacionats amb el condicionament acústic d'una sala. El següent pas seria, per tant, estudiar-ne l'aïllament acústic.

L'aïllament acústic serveix per regular la influència de la pressió sonora exterior en els recintes, és a dir, el nivell de soroll de fons que hi ha. Aquest aspecte es igual d'important que el condicionament acústic, ja que un recinte mal aïllat farà que la comunicació a l'interior d'aquest sigui més complicada.

A nivell legislatiu, cal tenir en compte que és obligatori que els edificis compleixin les normes d'aïllament acústic, que varien segons l'activitat a la que es destina cada recinte, la zona geogràfica on estigui ubicat aquest i la pròpia legislació local.

A part de la influència externa en els recintes estudiats, també es podia ampliar l'estudi en la influència que aquests recintes tenen en els altres edificis. En el projecte estudiat, s'ha de tenir en compte que a prop de l'edifici hi ha una zona residencial. Per tant s'hauria d'assegurar que no s'incompleixen els límits d'emissió a l'exterior quan, per exemple, es celebrin concerts de música en directe o festes, que són les activitats que acostumen a generar un major nivell de pressió sonora.

A l'apartat 2.1, corresponent a l'estat de l'art, s'expliquen algunes característiques de l'aïllament acústic des d'un punt de vista teòric i pràctic.

Bibliografia

Publicacions:

Abad Sorbet, M. *Estudio acústico y electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid)*. Universidad Politécnica de Madrid.

Artís Gabarró, P. *Acústica ambiental*. Universitat Oberta de Catalunya.

Artís Gabarró, P. *Aïllament acústic*. Universitat Oberta de Catalunya.

Artís Gabarró, P. *Condicionament acústic: Materials, recintes i disseny acústic*. Universitat Oberta de Catalunya.

Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, 2003.

Carrión Isbert, A. *Acústica: Apunts*. Edicions UPC.

Cierco Molins, E. *Introducció a l'acústica*. Universitat Oberta de Catalunya.

Fahy, F. *Foundations of Engineering Acoustics*. Elsevier 2001.

Felipe Sexto, L. *¿Cómo elegir un sonómetro?*

Fernández González, E. *Estudio de la reverberación en las aulas y zonas comunes de la ETSAV*. Universidad de Valladolid, 2016.

Juliá Sanchis, E. *Modelización y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica*. Universitat Politècnica de València, 2008.

Lorente José, A. *Aislamiento y acondicionamiento acústico: Estudio de grabación*. La Salle, 2010.

Menéndez Rodríguez, V. *Instrumentación acústica*. Garcia BBM S.L., 2007.

Pérez de Siles Marín, A. C. *Aplicación informàtica orientada a la formación y evaluación de riesgos derivados de la exposición a ruido en ambientes Industriales*. Universidad de Córdoba, 2001.

Tarrazona Gasque L. *Acondicionamiento acústico de un auditorio existente en Valencia*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

de la Torre Sánchez, I. *Análisis de la precisión en la medida del tiempo de reverberación y de los parámetros asociados*. Universidad Politécnica de Madrid, 2016.

Manuais:

AENOR. *Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos (UNE-EN ISO 3382)*. AENOR. 2001.

CESVA. *Manual del usuario*. CESVA, v014 2005.

Universidad de Vigo. *Guía de Aislamiento Acústico*.

Articles de Wikipedia:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_\(sonido\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_(sonido))
[https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(acoustics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_(acoustics))
https://es.wikipedia.org/wiki/Absorbente_ac%C3%A1stico
https://es.wikipedia.org/wiki/Acondicionamiento_ac%C3%A1stico
https://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%A1stica_variable
<https://es.wikipedia.org/wiki/Auralizaci%C3%B3n>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Auralization>
https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_sonoro
https://es.wikipedia.org/wiki/Early_decay_time
https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_de_fiesta_de_c%C3%B3ctel
https://ca.wikipedia.org/wiki/Marge_din%C3%A0mic_lliure_d%27espuris
https://es.wikipedia.org/wiki/Nivel_de_presi%C3%B3n_sonora
https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_curve
https://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_sonora
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_(physics))
<https://es.wikipedia.org/wiki/Reverberaci%C3%B3n>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation>
[https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_\(sonido\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_(sonido))
https://es.wikipedia.org/wiki/Ruido_rosa
https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_level_meter
<https://es.wikipedia.org/wiki/Son%C3%B3metro>
https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure
[https://es.wikipedia.org/wiki/Trazado_de_rayos_\(f%C3%ADsica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Trazado_de_rayos_(f%C3%ADsica))

Pàgines web

<http://acusticaysonido.com/?p=115>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Acoustic/revmod.html#c1>
<https://www.absorcionacustica.com/10-conceptos-clave-sobre-acustica/>
<http://acusticaysonido.com/?p=115>
<http://www.ehu.eus/acustica/espanol/salas/tires/tires.html>
<http://www.elruido.com/portal/web/guest/acondicionamiento-acustico>
<http://www.ingenieriaacusticafacil.com/ingenieria-acustica-como-calcular-el-tiempo-de-reverberacion/>
<http://www.noisess.com/que-es-el-tiempo-de-reverberacion/>
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355ev002.pdf
<https://www.youtube.com/watch?v=buDCgB9b9d4>

Annexos

En aquest apartat s'adjunta informació important respecte al projecte, per si se'n vol fer una revisió.

Annex A: Simulacions

Aquest annex es correspon als fulls de càlcul del programa Excel de Microsoft Office, utilitzats per calcular l'absorció dels materials presents durant les mesures de temps de reverberació, i també dels materials utilitzats per al disseny de solucions acústiques.

- A.1.** Simulació de l'estat actual dels recintes; primer la sala polivalent i després el local de restauració.

- A.2.** Simulació proposta de disseny sala polivalent.

- A.3.** Simulació proposta de disseny local de restauració.

A.1.

SALA POLIVALENT															
SALA	Públic		Tècnics		TOTAL		SABINE TR (s)	125	250	500	1000	2000	4000		
	PERÍMETRE (m)	ALÇADA (m)	TERRA (m ²)	VOLUM (m ³)	PERÍMETRE (m)	ALÇADA (m)								TERRA (m ²)	VOLUM (m ³)
	82,38	12	7,95	12	91,6			3,16	4,04	3,83	3,61	3,20	2,44		
	360,1	422,37	62,27	422,37											
	988,56	1061,86	73,299	1061,86											
	4321,2	4816,25	495,05	4816,25											
MATERIAL															
MATERIAL	COEFICIENT				SUPERFÍCIE				ABSORPCIÓ						
	125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SOSTRE	TERRA	125	250	500	1000	2000	4000
PORTA (Thin plywood panells)	0,42	0,21	0,1	0,8	0,8	0,6	5,9			2,48	1,24	0,59	4,72	4,72	3,54
OBERTURA (+ portes obertes)	1	1	1	1	1	1	15,82			15,82	15,82	15,82	15,82	15,82	15,82
PARET (TOTXO CIMENT Hormi)	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	333,636			36,70	26,69	23,35	20,02	16,68	16,68
PARET (TOTXO ARGILA [1])	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	94,602			4,73	3,78	1,89	3,78	4,73	4,73
PARET (Ciment sense pintar [0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	611,90			12,24	12,24	18,36	24,48	30,60	30,60
SOSTRE (plaques	0,4	0,28	0,28	0,3	0,3	0,3	422,37			168,95	118,26	118,26	126,71	126,71	126,71
TERRA (Concrete floor [4])	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	422,37			4,22	12,67	21,12	8,45	8,45	8,45
							1061,859			245,14	190,71	199,40	203,98	207,71	206,53
							TOTAL								
							Absorció aire (m			1,6037E-05	5,2103E-05	0,000169282	0,00055	0,00178696	0,00580583
							Humitat (h			50					
LOCAL RESTAURACIÓ															
SALA	TOTAL (m)						SABINE TR (s)	125	250	500	1000	2000	4000		
	PERÍMETRE (m)	ALÇADA (m)	TERRA (m ²)	VOLUM (m ³)	PERÍMETRE (m)	ALÇADA (m)								TERRA (m ²)	VOLUM (m ³)
	47	3						2,09	2,72	2,94	2,75	2,34	1,86		
	110,51														
	141														
	331,53														
MATERIAL															
MATERIAL	COEFICIENT				SUPERFÍCIE				ABSORPCIÓ						
	125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SOSTRE	TERRA	125	250	500	1000	2000	4000
VIDRE	0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	10,08			0,35	0,40	0,27	0,30	0,20	0,20
PORTA (portes obertes)	1	1	1	1	1	1	11			11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
PARET (Placa de yeso Durlock	0,1	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09	119,92			11,99	6,00	3,60	4,80	7,20	10,79
TERRA (azulejo [6])	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	110,51			1,11	1,11	1,11	1,11	2,21	2,21
SOSTRE (Hormigón normal tei	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	110,51			1,11	1,11	2,21	2,21	2,21	4,42
							TOTAL			25,56	19,61	18,19	19,41	22,82	28,63

A.2.

SALA POLIVALENT															
	SALA		Tècnics				SABINE				TOTAL				
	125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000			
PERÍMETRE (m)	82,38	12	9,22	91,6		TR (s)	1,34	1,28	1,28	1,19	1,46	1,36			
ALÇADA (m)	360,1	62,27	7,95	422,37											
TERRA (m2)	988,56	73,299	1061,86												
PARET (m2)	4321,2	495,05	4816,25			E-N	1,12	1,07	1,06	0,98	1,27	1,22			
VOLUM (m3)						TR (s)									
MATERIAL	COEFICIENT				SUPERFÍCIE				ABSORCIÓ						
	125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SOSTRE	TERRA	125	250	500	1000	2000	4000
PORTA (Solid timber door [1])	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	10,82			1,51	1,08	0,65	0,87	1,08	1,08
PORTA (Double sheet steel skin [1])	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57	5,9			2,07	2,30	2,60	2,89	3,19	3,36
PARET (Ciment pintat [6])	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	715,62			7,16	7,16	7,16	14,31	14,31	14,31
PARET (Panel acústico perforado con agua)	0,75	0,55	0,44	0,36	0,19	0,08	329,52			247,14	181,24	144,99	118,63	62,61	26,36
SOSTRE (Cilindro perla [2])	0,15	0,3	0,8	1	1	1	120			18,00	36,00	96,00	120,00	120,00	120,00
SOSTRE (Cieloraso de perfiles met. ranurados 17% c/ lana vidrio [7])	0,6	0,73	0,55	0,62	0,35	0,39	302,37			181,42	220,73	166,30	187,47	105,83	117,92
TERRA (Concrete floor [4])	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02		302,37	222,37	2,22	6,67	11,12	4,45	4,45	4,45
PÚBLIC (Areas with audience, orchestra, or seats, including narrow aisles [1])	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85				120,00	148,00	176,00	192,00	186,00	170,00
							1061,859	422,37	422,37	579,52	603,18	604,81	640,61	497,47	457,49
							TOTAL								
									Absorció aire (m)	1,6037E-05	5,2103E-05	0,000169282	0,00055	0,00178696	0,00580583
									Humitat (h)		50				

A.3.

LOCAL RESTAURACIÓ																
		SALA				SABINE				ABSORPCIÓ						
		TOTAL (m)	125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	2000	4000			
		PERÍMETRE (m)	47	0,69	0,72	0,77	0,87	0,75	0,72	0,75	0,72	0,75	0,72			
		ALÇADA (m)	3													
		TERRA (m ²)	110,51													
		PARET (m ²)	141													
		VOLUM (m ³)	331,53													
		E-N				E-N				ABSORPCIÓ						
		TR (s)	0,61	0,64	0,69	0,80	0,68	0,65	0,68	0,68	0,65	0,68	0,65			
MATERIAL		125	250	500	1000	2000	4000	PARET	SUPERFÍCIE		125	250	500	2000	4000	
		COEFICIENT	SOSTRE		TERRA		TERRA		TERRA		TERRA		TERRA		TERRA	
VIDRE		0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	10,08	0,35	0,40	0,27	0,30	0,20	0,20	0,20	
PORTA (Solid timber door [1])		0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	11	1,54	1,10	0,66	0,88	1,10	1,10	1,10	
PARET (Placa de yeso Durlock [6])		0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	119,92	34,78	11,99	6,00	4,80	8,39	10,79	10,79	
TERRA (Azulejo [6])		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	110,51	1,11	1,11	1,11	1,11	2,21	2,21	2,21	
SOSTRE (Lana de roca [3])		0,4	0,8	0,85	0,75	0,8	0,8	70	28,00	56,00	59,50	52,50	56,00	56,00	56,00	
SOSTRE (Placa de yeso Durlock [6])		0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	40,51	11,75	4,05	2,03	1,62	2,84	3,65	3,65	
TOTAL			110,51	110,51	110,51	110,51	110,51	110,51	77,52	74,65	69,56	61,20	70,74	73,95	73,95	

[1] http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf
 [2] <http://serinacionizaciones.es/Catalogo-Serinac.pdf>
 [3] https://diaterm.com/wp-content/uploads/2016/11/Rockfon_Pacific-1.pdf
 [4] https://cdfs.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf
 [5] http://www.decustik.com/arxius/docs/FTP_PAP048_2015_es.pdf
 [6] <http://www.equaphon-university.net/wp-content/uploads/2015/09/44.png>
 [7] <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf>

Annex B: Fitxes tècniques

En aquest annex s'adjunten les fitxes tècniques dels materials proposats per al condicionament acústic dels recintes.

B.1. Cilindre perla Serinac, utilitzat per al sostre de la sala polivalent.

CILINDRO



DESCRIPCIÓN 📄

Absorbente fabricado con espuma acústica de alta calidad.

Cuando el diseño de la sala es una parte fundamental, los cilindros son una elección perfecta.

La instalación aleatoria de cilindros de diferentes diámetros, a diferentes alturas crea un espectacular efecto visual en el techo, a la vez que reduce el tiempo de reverberación.

COLORES DISPONIBLES 🎨


Blanco


Gris perla


Gris antracita

MEDIDAS 📏



Diámetros:
100 mm.
150 mm.
200mm.

RESISTENCIA AL FUEGO 🔥

Blanco y Gris perla: B, s1, d0; Apto para instalación en locales públicos. Cumple las exigencias del CTE.
Gris antracita: E, d0;

* Las medidas y los colores pueden personalizarse según carta RAL bajo pedido.

ABSORCIÓN ACÚSTICA 🔊



	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
Blanco / perla	0,15	0,30	0,80	1,10	1,15	1,05	A 0,82
Antracita	0,10	0,25	0,65	1,00	1,15	1,10	B 0,77



27

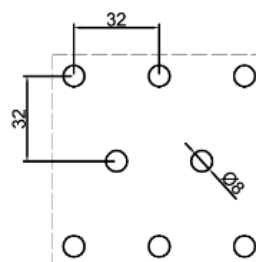
B.2. Panell acústic perforat Decustik, utilitzat a les parets de la sala polivalent.

FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO
PANELES ACÚSTICOS



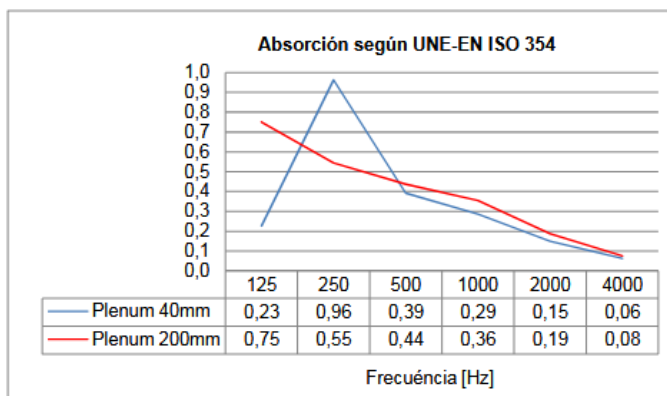
REFERENCIA PAP048

DESCRIPCIÓN Panel acústico perforado con agujeros alternados



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Paso entre agujeros (mm) 32x32
 Alterno
 Diámetro agujero (mm) Ø 8
 Prof. agujero (mm) Pasante
 Superficie perforada (%) 4,9
Absorción acústica
 Plenum 40mm α_w 0,20
 NRC 0,45
 Plenum 200mm α_w 0,20
 NRC 0,40
 Clase de absorción E
 Lana Mineral 40mm
 30kg/m³



CARACTERÍSTICAS GENERALES

Materiales de base MDF Estándar D-s2,d0
 MDF Ignifugo B-s2,d0 (núcleo rojo o natural)
 MDF Coloreado en masa D-s2,d0
 MDF Coloreado en masa B-s2,d0

Espesor (mm) 16mm y 12mm (MDF)
 Para otros materiales y espesores, consultar

Peso medio aprox. (kg/m²) 7,5 (MDF Estándar 12mm) 9,5 (MDF Ignifugo 12mm)
 10,0 (MDF Estándar 16mm) 12,5 (MDF Ignifugo 16mm)

Formatos (mm) MDF 12mm : 600x600 / 1200x600
 MDF 16mm : 2400x600 / 1200x600
 Para otras dimensiones, consultar

Acabado final Sin acabado Rechapado de madera natural barnizada
 Lacado a color RAL Laminado alta presión (HPL) Melamina
 Para otros acabados, consultar

APLICACIONES

Revestimiento muros (MDF 16mm)

Falso techo (MDF 12mm)

Sin mecanización
 Ranura



Sin mecanización
 Semi oculto
 Oculto registrable



DECUSTIK®
 www.decustik.com

C/ Llevant, 2 - P.I. Mas Les Vinyes
 08570 Torelló (BARCELONA)

T. +34 8590838 / F. +34 938596394
 comercial@decustik.com

FTP_PAP048_V2015_es

B.3. Panell llana de roca Rockfon Pacific, utilitzat al sostre del local de restauració.



PRESTACIONES



Absorción acústica

α_{w} : 0,80 (Clase B)



Espesor (mm) / Plenum (mm)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	α_w	Clase de absorción	NRC
12 / 200	0,40	0,80	0,85	0,75	0,80	0,80	0,80	B	0,80



Reacción al fuego

A1



Reflexión de la luz

82%



Resistencia a la humedad y estabilidad dimensional

Hasta 100 % HR



Mantenimiento

- Aspirador



Higiene

La lana de roca no contiene ningún elemento que favorezca el desarrollo de microorganismos.



Medio ambiente

Totalmente reciclable



Clima Interior

Una selección de productos ROCKFON posee la etiqueta



