

# Adequació acústica de la sala principal del Teatre-Auditori Sant Cugat

Hernández Altafaja, Daniel

Curs 2015-2016

Director: Enric Gaus Termens

GRAU EN ENGINYERIA DE SISTEMES  
AUDIOVISUALS



Universitat  
Pompeu Fabra  
Barcelona

Escola  
Superior Politècnica

Treball de Fi de Grau

# Índex

Agraïments .....	4
Introducció .....	5
Contextualització.....	5
Motivació .....	5
Objectius .....	6
Objectius principals.....	6
Objectius secundaris.....	6
Organització del projecte.....	7
1. Fonaments teòrics .....	8
1.1. Acústica arquitectònica.....	8
1.1.1. Principis bàsics del so .....	8
1.1.1.1. Definició.....	8
1.1.1.2. Generació i propagació .....	8
1.1.1.3. Freqüència .....	9
1.1.1.4. Espectre freqüencial.....	9
1.1.1.5. Classificació dels sons .....	9
1.1.1.5.1. Sons deterministes .....	9
1.1.1.5.2. Sons aleatoris .....	9
1.1.1.6. Pressió sonora .....	9
1.1.1.7. Banda de freqüències .....	10
1.1.1.8. Velocitat de propagació del so .....	10
1.1.1.9. Longitud d'ona .....	10
1.1.1.10. Nivell de pressió sonora (SPL) .....	10
1.1.1.11. Percepció del so en funció de la freqüència.....	11
1.1.1.11.1. Relació entre nivells de pressió sonora i freqüència.....	11
1.1.1.11.2. Emmascarament del so .....	12
1.1.1.12. Directivitat de les fonts sonores.....	12
1.1.2. Principis bàsics d'acústica .....	12
1.1.2.1. Mesura del so: el sonòmetre .....	12
1.1.2.2. Ponderació A.....	12
1.1.2.3. Criteris d'avaluació del soroll de fons en un recinte (corbes NC) .....	13
1.1.2.4. Propagació del so en l'espai lliure.....	15
1.1.2.5. Propagació del so en un recinte tancat.....	15
1.1.2.5.1. So directe .....	15
1.1.2.5.2. So reverberant .....	15
1.1.2.5.3. Estudi de les primeres reflexions. Acústica geomètrica .....	15
Percepció subjectiva de les primeres reflexions. Ecos .....	17

1.1.2.5.4.	Eco flotant .....	18
1.1.2.5.5.	Modes propis d'una sala. Acústica ondulatoria .....	19
1.1.2.5.6.	Balanç energètic sonor .....	19
1.1.2.6.	Intel·ligibilitat de la paraula .....	19
1.1.2.6.1.	Definició .....	19
1.1.2.6.2.	Càlcul de la intel·ligibilitat de la paraula: %ALCons i STI/RASTI..	21
1.1.3.	Teoria estadística.....	22
1.1.3.1.	Absorció .....	23
1.1.3.1.1.	Absorció de l'aire.....	24
1.1.3.2.	Temps de reverberació (RT).....	24
1.1.3.3.	Claredat musical (C80).....	25
1.1.3.4.	Claredat de la veu (C50).....	25
1.1.3.5.	Definició (D).....	26
1.2.	La resposta impulsional .....	26
1.2.1.	Concepte .....	26
1.2.2.	Usos .....	27
1.2.2.1.	Mesura de temps de retard .....	27
1.2.2.2.	Anàlisi de reflexions.....	27
1.2.2.3.	Càlcul del temps de reverberació .....	27
1.2.2.4.	Early-to-late energy ratios .....	27
1.2.2.5.	Speech intelligibility modeling .....	28
1.2.3.	La mesura.....	28
1.2.3.1.	Anatomia de la resposta impulsional .....	28
1.2.3.2.	Tècniques de mesura .....	29
1.2.3.2.1.	Mesura directa.....	29
1.2.3.2.2.	Mesura indirecta .....	29
2.	Simulació teòrica.....	31
2.1.	Descripció exhaustiva de l'espai .....	31
2.1.1.	Escenari .....	33
2.1.2.	Conxa acústica .....	35
2.1.3.	Platea .....	36
2.1.4.	Amfiteatre.....	37
2.1.5.	Parets posteriors .....	38
2.1.6.	Parets laterals .....	39
2.1.7.	Sostre .....	41
2.2.	Estudis previs.....	43
2.2.1.	Estudi acústic inicial per Higini Arau [1992] .....	43
2.2.1.1.	Mètodes i procediments emprats.....	44
2.2.2.	Instal·lació de dobles portes d'accés per l'aïllament acústic [1994].....	44
2.2.3.	Caracterització acústica per Antoni Carrión [1995] .....	45
2.2.3.1.	Mètodes i procediments emprats.....	46
2.2.4.	Ecos a l'escenari [2004].....	46
2.3.	Simulació.....	47
2.3.1.	Objectius.....	48
2.3.2.	Coefficients d'absorció .....	48
2.3.3.	Superfícies dels materials .....	48
2.3.4.	Volum de la sala .....	49
2.3.5.	Absorció.....	49
2.4.	Resultats .....	50
2.4.1.	Valors d'absorció total i RT60 .....	50
2.5.	Tractament acústic .....	52
2.5.1.	Cortines a les parets laterals .....	52

2.6.	Conclusions .....	53
3.	Mesures reals.....	54
3.1.	Sessió de mesures.....	54
3.1.1.	Introducció.....	54
3.1.2.	Objectius .....	54
3.1.3.	Preparació .....	55
3.1.3.1.	Dades generals.....	55
3.1.3.2.	Inventari .....	55
3.1.3.3.	Configuració.....	56
3.1.3.3.1.	Física.....	56
3.1.3.3.2.	Smaart.....	56
3.1.3.4.	Punts de mesura .....	57
3.1.3.4.1.	Platea .....	58
3.1.3.4.2.	Amfiteatre.....	59
3.1.4.	Protocol de mesura.....	59
3.1.4.1.	Mesures extretes .....	59
3.1.4.2.	Tractament de les dades .....	60
3.1.4.3.	Resultats d'interès.....	60
3.2.	Resultats .....	61
3.2.1.	Platea .....	61
3.2.2.	Amfiteatre.....	62
3.3.	Conclusions .....	63
4.	Conclusions i línies de futur.....	64
4.1.	Recapitulació .....	64
4.1.1.	Valoració dels resultats obtinguts.....	64
4.1.1.1.	Reverberació .....	64
4.1.1.2.	Claredat i definició .....	66
4.1.1.3.	Comentaris dels treballadors .....	67
4.2.	Conclusions .....	69
	Bibliografia .....	70

# Agraïments

Els meus agraïments van dirigits a tots aquells qui han dedicat com a mínim 1 minut de la seva vida en ajudar-me i aportar informació a aquest projecte. Dedico els meus agraïments més sincers i profunds a l'Enric Gaus per la dedicació i paciència que ha tingut amb mi. M'ha donat tot el que li he demanat i més. Dedico el mateix al Marc Urquizu i al Nicolás de Ángel per aportar tota la informació sobre la sala i el seu context que els he demanat, i òbviamment per posar a la meva disposició el Teatre per realitzar aquest projecte. Ha estat un regal. Per últim, agrair a tot el personal del Teatre-Auditori qui m'ha dedicat petits moments per solucionar cosetes i per aportar informació. Gràcies Miquel, Natàlia, Eva, Roger, Carles, Carolina, Gabi, Fernando, Àlex, Cris, Emma i Bernat. Gràcies a tots!



# Introducció

## Contextualització

El Teatre-Auditori de Sant Cugat (TASC) és l'auditori principal del Centre Cultural de la mateixa ciutat. Inaugurat l'any 1993, l'edifici fou obra dels arquitectes Ramon Artigues i Ramon Sanabria, mentre que el condicionament acústic de la sala principal va ser dut a terme per l'enginyer acústic Higiní Arau. Des de la seva inauguració, el TASC s'ha utilitzat com a sala polivalent i acull una gran varietat d'espectacles i esdeveniments durant tot l'any. Es realitzen, de mitja, uns 80 espectacles oficials de diferents disciplines anualment, incloent música moderna i clàssica, òpera, teatre, dansa, poesia, teatre musical i humor, entre d'altres.

És necessari remarcar un tret del TASC que és molt determinant pel desenvolupament d'aquest projecte: la polivalència de la sala. Una àmplia majoria d'espais escènics d'arreu del país són centres dedicats a una o a poques disciplines d'arts escèniques diferents. Dos possibles exemples d'aquest fet en són el Gran Teatre del Liceu, que acull fonamentalment òpera, música clàssica i dansa, i l'Auditori [de Barcelona], que programa una gran quantitat de concerts de música clàssica i alguns de moderna.

## Motivació

En un marc ideal, cada disciplina requereix un espai amb unes prestacions particulars pel que fa a escenari, sala i instal·lacions. En l'actualitat, està molt estès que la majoria d'espais escènics acullin una considerable varietat d'espectacles, sovint prescindint de les prestacions ideals que requereixen cadascun d'aquests. Cal afegir, també, que aquest fet no implica necessàriament un problema.

Aquesta circumstància pren un clar protagonisme en el cas del TASC, i ja ho va fer des del moment de la seva construcció. Des d'un inici la sala es va concebre com un espai capaç

---

d'oferir flexibilitat en diferents sentits, destacadament en el camp de l'acústica. És per això que Higiní Arau va desenvolupar un detallat estudi acústic de la forma i dels materials de la sala i l'escenari, prèviament a la seva construcció. A més, Arau també va concebre l'anomenada conxa acústica, un conjunt d'elements estructurals desmuntables, utilitzats per modificar notablement la resposta acústica de la sala quan fos requerit.

I és precisament d'aquest fet neix la motivació d'aquest projecte. Està realment preparada la sala del Teatre-Auditori per acollir tots els espectacles que acull? Assistir a un concert o espectacle i sortir-ne descontent per com ha sonat és quelcom força habitual, i més en recintes com el TASC. És per això que s'ha volgut realitzar una àmplia valoració de la sala a nivell d'acústica, i veure si realment la sala és apta per oferir tot el que acull.

## Objectius

### Objectius principals

L'objectiu fonamental d'aquest projecte és diagnosticar les possibles disfuncions acústiques que pugui tenir la sala i realitzar un mínim d'una proposta per solucionar-les. En altres paraules, es tracta d'entendre la problemàtica percebuda per alguns espectadors i definir possibles accions a emprendre per tal de solucionar-la.

### Objectius secundaris

La realització d'un estudi acústic en un context real requereix una feina prèvia de preparació molt extensa. És un àmbit molt delicat i convé estar familiaritzat amb conceptes, teories, procediments, criteris i errors comuns en aquest àmbit. Precisament d'aquest requeriment sorgeixen els objectius secundaris. D'una banda, aprendre l'aplicació real de tots aquestes elements teòrics que conformen el marc d'estudi previ del projecte. També és una bona oportunitat per consolidar l'aprenentatge de tots aquells continguts que s'han vist durant el transcurs del grau, però que per certes circumstàncies no s'havia pogut assolir amb consistència. Per últim, assolir la satisfacció personal en la realització d'aquest projecte és un objectiu clar.

# Organització del projecte

Aquest projecte es divideix en quatre blocs o fases d'estudi ben diferenciades.

Per començar, al capítol 1 es fa una extensa valoració de teories i conceptes sobre el so i l'acústica en sales. S'han exposat tots aquells termes que s'han considerat indispensables per a la correcta comprensió i execució de les següents parts del treball. Durant la realització de les mateixes, el capítol 1 ha estat una referència constant de consulta.

El capítol 2 s'ha dedicat a la realització d'una simulació teòrica de la sala, duta a terme mitjançant teories d'acústica estadística. Abans de la simulació en sí, s'ha fet una descripció exhaustiva de la forma i dels materials de tots els elements acústics presents a la sala, per tal que la simulació fos el més realista possible. També s'han revisat els estudis i reformes que ha acollit la sala al llarg dels anys.

El capítol 3 recull tota la informació sobre la sessió de mesures reals efectuada a la sala durant el desenvolupament d'aquest projecte. Es dona tot tipus de detall sobre la presa de les mesures, l'anàlisi i la posterior interpretació dels resultats.

Finalment, al capítol 4 es fa una valoració de tots els resultats obtinguts, es fa un diagnòstic de les mancances acústiques i es proposen algunes possibilitats per solucionar-les.



# 1. Fonaments teòrics

## 1.1. Acústica arquitectònica

### 1.1.1. Principis bàsics del so

#### 1.1.1.1. Definició

Des del punt de vista de la física, el so és una vibració mecànica que es propaga a través d'un medi material elàstic i dens, que és capaç de produir una sensació auditiva. En el context d'aquest projecte, el medi de propagació serà l'aire.

#### 1.1.1.2. Generació i propagació

L'element generador del so es denomina font sonora. Una font sonora (*e.g.* un tambor o la corda d'una guitarra) genera ones sonores quant aquesta entra en vibració. La vibració es transmet a les partícules d'aire adjacents a l'element vibrador, i successivament es va transmetent a la resta de partícules contigües. Les partícules no es desplacen amb la vibració, sinó que oscil·len al voltant d'una posició d'equilibri. Quan les partícules d'aire s'acumulen originen zones de compressió, mentre que quan es separen s'anomenen de dilatació. La manera en que aquesta pertorbació es desplaça es denomina propagació del so. Les ones sonores són longitudinals, ja que l'oscil·lació de les partícules es produeix en la mateixa direcció que la de la propagació de l'ona. La figura 1.1 mostra el procés de generació i propagació de les ones sonores.

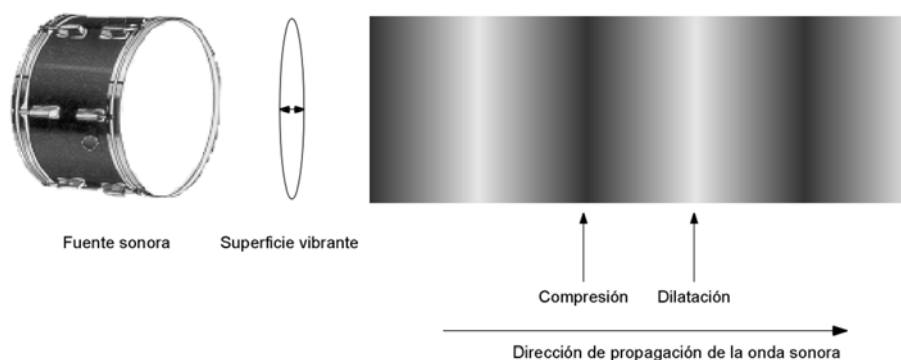


Fig. 1.1 - Procés de generació i propagació de les ones sonores

### 1.1.1.3. Freqüència

La freqüència ( $f$ ) d'una ona sonora és el nombre d'oscil·lacions per segon (s) que provoca una font sonora en les ones que aquesta genera. Es mesura en Hertz (Hz).

### 1.1.1.4. Espectre freqüencial

L'espectre freqüencial fa referència a la representació gràfica de les freqüències que componen una ona sonora, juntament amb el nivell de pressió sonora associat a cadascuna.

### 1.1.1.5. Classificació dels sons

#### 1.1.1.5.1. Sons deterministes

Els sons deterministes són aquells que es poden representar a través d'una expressió matemàtica que indica com varia la pertorbació sonora en funció del temps. Els sons periòdics (simples i complexos) i alguns transitoris són deterministes.

#### 1.1.1.5.2. Sons aleatoris

Els sons aleatoris són aquells que es caracteritzen per vibracions irregulars i irrepetibles. També reben el nom de soroll.

### 1.1.1.6. Pressió sonora

La pressió sonora expressa quantitativament la magnitud d'un camp sonor. Correspon a la força que exerceixen les partícules d'aire per unitat de superfície quan es produeix una pertorbació en l'aire. Es mesura en Pascals (Pa).

### 1.1.1.7. Banda de freqüències

La banda de freqüències d'una font sonora es compon per totes les freqüències que aquesta pot generar, des de la més greu fins la més aguda. Cada font té una banda associada única. En el context d'aquest projecte, aquest concepte fa referència al registre de cada instrument musical.

En el cas de l'audició humana, la banda de freqüències audibles s'estén de 20 Hz a 20 kHz, aproximadament.

### 1.1.1.8. Velocitat de propagació del so

La velocitat de propagació del so ( $c$ ) depèn de l'elasticitat i la densitat del medi de propagació. En el context d'aquest projecte, el medi d'interès serà únicament l'aire, cas en que ambdues magnituds depenen de la pressió atmosfèrica ( $P_0$ ) i de la temperatura ( $T$ ). L'estàndard de velocitat de propagació del so en l'aire és de 345 m/s en condicions d'1 atmosfera de pressió i 22 °C de temperatura.

### 1.1.1.9. Longitud d'ona

La longitud d'ona del so ( $\lambda$ ) es defineix com la distància entre dos punts consecutius del camp sonor que es trobin en el mateix estat de vibració en qualsevol instant de temps. La longitud d'ona compleix la següent relació amb  $c$  i  $f$ :

$$\lambda = cf$$

De l'anterior fórmula es desprèn que depèn del medi de propagació, ja que  $c$  és variable segons el medi. No obstant, l'únic medi de propagació que s'analitzarà en aquest projecte és l'aire, de manera que a cada freqüència s'associarà una única longitud d'ona.

### 1.1.1.10. Nivell de pressió sonora (SPL)

La pressió sonora expressa quantitativament la magnitud d'un camp sonor. Correspon a la força que exerceixen les partícules d'aire per unitat de superfície quan es produeix una pertorbació en l'aire. Es mesura en Pascals (Pa). Tal i com s'ha exposat a l'apartat 1.1.1.2., les partícules d'aire parteixen d'un estat d'equilibri (pressió  $P_0$ ) que es pot veure alterat per una pertorbació, generant així un seguit de valors de pressió fluctuants (pressió  $P_T$  de cada instant de temps). El valor de pressió sonora a considerar és la mitjana de diferències entre aquests dos esmentats valors.

No obstant, degut a que el sistema auditiu humà no respon linealment als estímuls, l'ús d'aquest valor mitjà no resulta pràctic. La resposta d'aquest és molt més propera a un model logarítmic, de manera que es fa ús d'una escala logarítmica per representar la pressió sonora. L'escala s'expressa en valors relatius a un valor de referència (el llindar d'audició humà,  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa), s'anomena nivell de pressió sonora (SPL, *Sound Pressure Level*) i es mesura en decibels (dB). Es pren el llindar d'audició humà com a valor de referència per representar tots els valors de pressió sonora audibles amb nombres positius. D'aquesta manera, el rang dinàmic de pressió sonora sempre es trobarà entre 0 i 135 dB (el llindar de dolor).

### 1.1.1.11. Percepció del so en funció de la freqüència

#### 1.1.1.11.1. Relació entre nivells de pressió sonora i freqüència

Com s'ha comentat en l'apartat anterior, la resposta del sistema auditiu és propera a un model logarítmic. A més, l'orella humana no té la mateixa sensibilitat per a tot el marge de freqüències. A la figura 1.2 s'observa la variació dels llindars d'audició i dolor en funció de la freqüència.

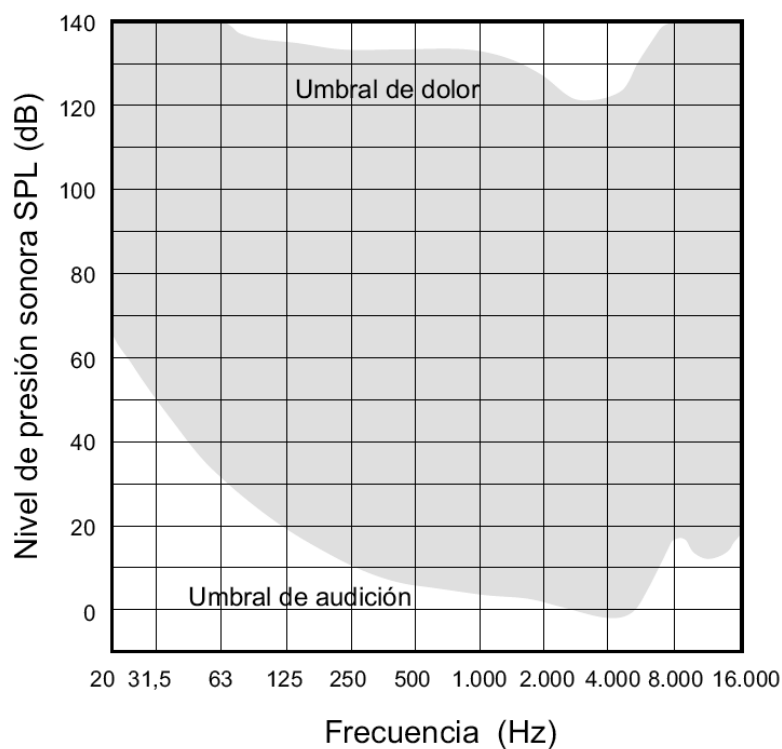


Fig. 1.2 - Llindars d'audició i dolor en funció de la freqüència

Resumidament, a la figura 1.2 s'observa una clara insensibilitat de l'oïda a baixes freqüències i una lleugera atenuació a les altes quan es tracta de nivells de sonoritat baixos. També s'aprecia que la resposta del sistema auditiu es comporta de forma més homogènia a mesura que el nivell de pressió sonora augmenta.

#### 1.1.1.11.2. Emmascarament del so

L'emascarament del so pot produir-se quan la orella rep dos o més tons purs a freqüències diferents. Un d'aquests tons pot emascarar la resta, i per tant evitar la seva percepció parcial o totalment. L'explicació a aquest fenomen regeix en la fisiologia de l'oïda humana.

#### 1.1.1.12. Directivitat de les fonts sonores

La directivitat és una propietat que caracteritza la direcció en que l'energia és radiada per una font sonora. És dependent de la freqüència i s'expressa amb el denominat factor de directivitat ( $Q$ ). Quant més elevat és aquest factor, més directiva és la font que caracteritza. Una font sonora que radia uniformement en totes les direccions rep el nom d'omnidireccional i té factor de directivitat  $Q = 1$ .

### 1.1.2. Principis bàsics d'acústica

#### 1.1.2.1. Mesura del so: el sonòmetre

El sonòmetre és un instrument de mesura que permet mesurar nivells de pressió sonora de forma objectiva sota unes condicions prefixades i uns marges de tolerància coneguts. Permet realitzar mesures amb diferents nivells de resolució (bandes d'octava, etc.) i amb diferents respostes temporals (ràpida, lenta, impuls, etc.)

#### 1.1.2.2. Ponderació A

Degut a la complexitat del funcionament del sistema auditiu humà, el sonòmetre incorpora algunes opcions per aproximar la seva resposta freqüencial al comportament de l'oïda humana. A part de la resposta lineal, els sonòmetres ofereixen l'anomenada xarxa de ponderació A, que és el patró de resposta freqüencial més estès en l'ús d'aquests instruments. A la figura 1.3 es mostra la corba esmentada.

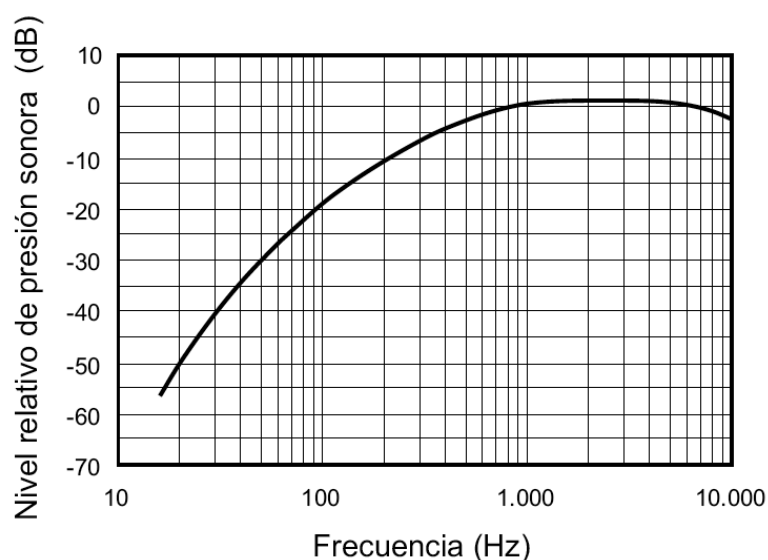


Fig. 1.3 - Corba de ponderació A

L'objectiu de la xarxa de ponderació A és acostar la resposta del sonòmetre a la resposta real del sistema auditiu, de manera que la mesura realitzada sigui més representativa de la sonoritat associada al so mesurat.

### 1.1.2.3. Criteris d'avaluació del soroll de fons en un recinte (corbes NC)

Les corbes NC (*Noise Criteria*) són una forma de valoració objectiva del grau de molèstia que un soroll ambiental provoca a un oient en un recinte, realitzada per la comparació dels sorolls presents en cada banda d'octava des de 63 Hz fins a 8 kHz per les diferents corbes de referència. S'utilitzen de forma generalitzada per establir els nivells de soroll màxims recomanables per diferents tipus de recintes, en funció de la seva aplicació. A la figura 1.4 es mostra la distribució de les corbes NC.



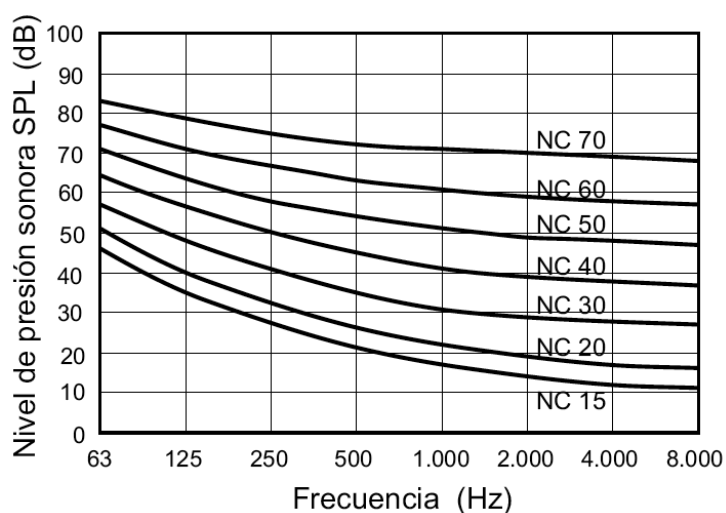


Fig. 4 - Distribució de les corbes NC

A l'anterior figura s'aprecia que les corbes segueixen de forma aproximada l'evolució de la sensibilitat de l'oïda en funció de la freqüència. Un recinte compleix un determinat criteri NC quan els nivells de soroll de fons, analitzats per cada banda d'octaves, estan sempre per sota de la corba corresponent. A la taula 1.1 es mostren les corbes NC recomanades per diferents tipus de recintes, juntament amb el seu nivell equivalent en dBA.

Tipus de recinte	Corba NC recomanada	Equivalència en dBA
Estudis de gravació	15	28
Sales de concerts i teatres	15-25	28-38
Hotels (habitacions individuals)	20-30	33-42
Sales de conferències/aules	20-30	33-42
Despatxos d'oficines/biblioteques	30-35	42-46
Hotels (vestíbuls i passadissos)	35-40	46-50
Restaurants	35-40	46-50
Sales d'ordinadors	35-45	46-55
Cafeteries	40-45	50-55
Poliesportiu	40-50	50-60
Tallers (maquinària lleugera)	45-55	55-65
Tallers (maquinària pesada)	50-65	60-75

Taula 1.1 - Corbes NC recomanades segons el tipus de recinte i nivell equivalent en dBA

#### **1.1.2.4. Propagació del so en l'espai lliure**

Es planteja conceptualment la propagació d'ones sonores en l'espai lliure a través del cas ideal més simple possible. Es considera una font omnidireccional que radia de forma esfèrica, és a dir, que radia energia uniformement en totes les direccions, de manera que el nivell SPL va disminuint seguint un patró esfèric. Concretament, la disminució del nivell de pressió sonora és de 6 dB cada vegada que es dobla la distància a la font, complint així l'anomenada llei quadràtica inversa.

Plantejat aquest context ideal, cal remarcar que en una àmplia majoria de situacions ni les fonts ni els espais permeten reproduir aquest comportament per totes les freqüències. En el marc d'estudi d'aquest projecte, gran part de les fonts tindran un comportament direccional.

#### **1.1.2.5. Propagació del so en un recinte tancat**

Quan una font sonora s'activa dins un recinte tancat genera ones sonores que arriben de dues formes diferents a un oient: el so directe i el so reverberant.

##### **1.1.2.5.1. So directe**

El so directe és aquella part de les ones radiades per una font sonora que arriba directament a l'oiuent, sense cap tipus de interferència, com si font i receptor es trobessin en l'espai lliure. L'energia associada al so directe depèn exclusivament de la distància del receptor a la font sonora.

##### **1.1.2.5.2. So reverberant**

El so reverberant és aquella part de les ones radiades per una font sonora que arriba a l'oiuent com a conseqüència de les diferents reflexions que pateixen aquestes en incidir sobre les diferents superfícies del recinte. L'energia associada al so reverberant depèn del camí recorregut per cada raig sonor. Es fa distinció de dues fases en l'evolució temporal del so reverberant: les primeres reflexions, que engloba totes aquelles reflexions que arriben immediatament després del so directe, i la cua reverberant, composta per totes aquelles reflexions més tardanes.

##### **1.1.2.5.3. Estudi de les primeres reflexions. Acústica geomètrica**

Generalment, es consideren primeres reflexions totes aquelles que tenen un ordre (n) inferior a 3 i/o que arriben, aproximadament, a partir de 100 ms després de l'arribada del so directe, i que per tant presenten un nivell energètic alt. L'ordre representa el nombre de vegades que un raig ha incidit sobre una superfície. Per representar de forma esquemàtica les reflexions en un recinte s'utilitzen els reflectograms i els ecogrames, que representen gràfica i temporalment l'arribada de raigs sonors en un punt d'anàlisi. A la figura 1.5 es mostra un exemple conceptual d'ecograma associat a un reflectograma.

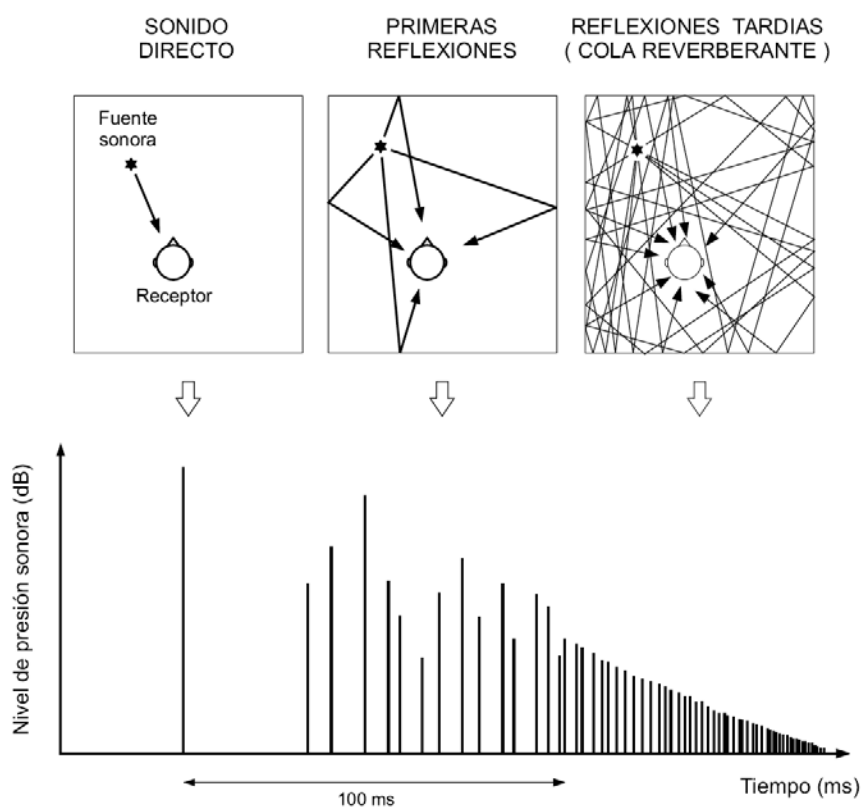


Fig. 1.5 - Ecograma i reflectograma conceptuals associats

A banda de l'ecograma, l'eina utilitzada per avaluar el comportament de les reflexions és la corba de decaïment energètic (ETC), que és específica per a cada punt d'anàlisi. A la figura 1.6 es mostra un exemple conceptual d'ETC.

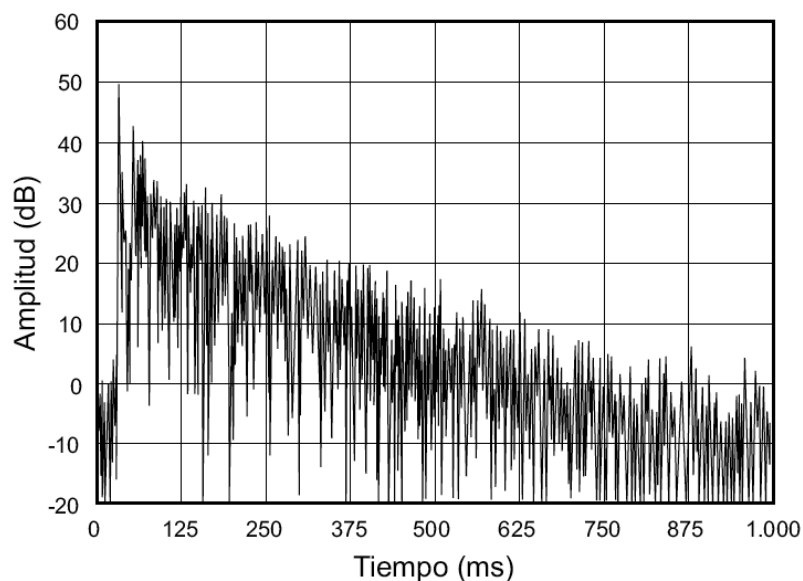


Fig. 1.6 - Exemple conceptual de corba ETC

#### 1.1.2.5.4. Percepció subjectiva de les primeres reflexions. Ecos

Totes aquelles reflexions que arriben a un oïent dins els primers 50 ms des de l'arribada del so directe són integrades per l'oïda humana, i en conseqüència, la seva percepció no és diferenciada del so directe. De fet, generalment aquestes reflexions contribueixen a millorar la comprensió del missatge i produeixen un augment en l'amplitud del so. Per contra, l'aparició de reflexions amb un retard superior a 50 ms és totalment contraproductiu per a la bona intel·ligibilitat, ja que es percep com una repetició del so directe. En tal cas, la reflexió s'anomena eco. A la figura 1.7 es mostren les quatre zones característiques pel que fa a la relació entre so retardat i intel·ligibilitat de la paraula.

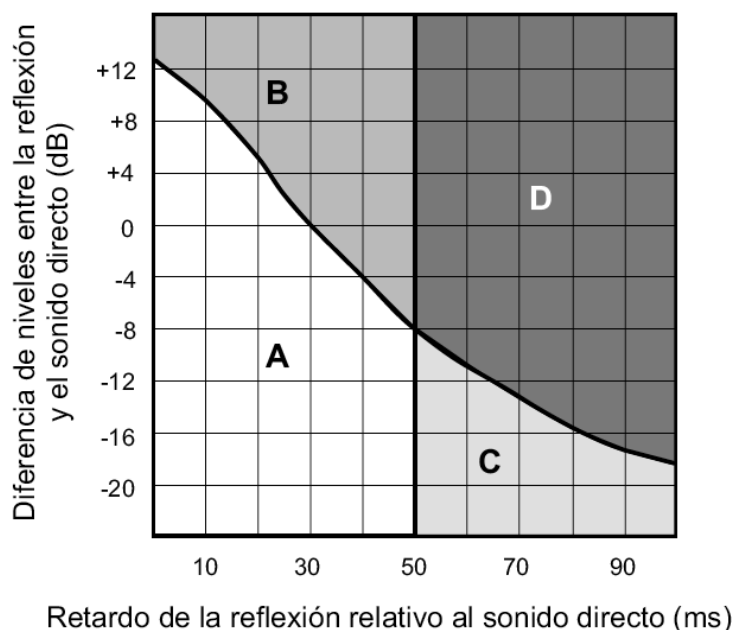


Fig. 1.7 - Relació entre el so retardat i la intel·ligibilitat de la paraula (zones característiques)

S'observa que a la zona A les reflexions arriben abans de 50 ms, però no són perjudicials perquè són integrades per l'oïda i es produeix una millora de la intel·ligibilitat i la sonoritat. En la zona B, en canvi, tot i que les reflexions també arriben abans de 50 ms, l'alt nivell fa que produeixi un desplaçament de la localització de la font. En la zona C, les reflexions arriben després de 50 ms, però no són perjudicials degut a que el seu nivell de sonoritat és baix. Per últim, les reflexions en la zona D es perceben com a eco, ja que arriben després de 50 ms amb un nivell relatiu considerablement més alt que el so directe.

#### 1.1.2.5.5. Eco flotant

L'eco flotant consisteix en una repetició múltiple, en un breu interval de temps, d'un so generat per una font sonora situada entre dues superfícies paral·leles, llises i reflectants. A la figura 1.8 es mostra una representació genèrica de l'eco flotant, tant físicament com en forma de corba ETC.

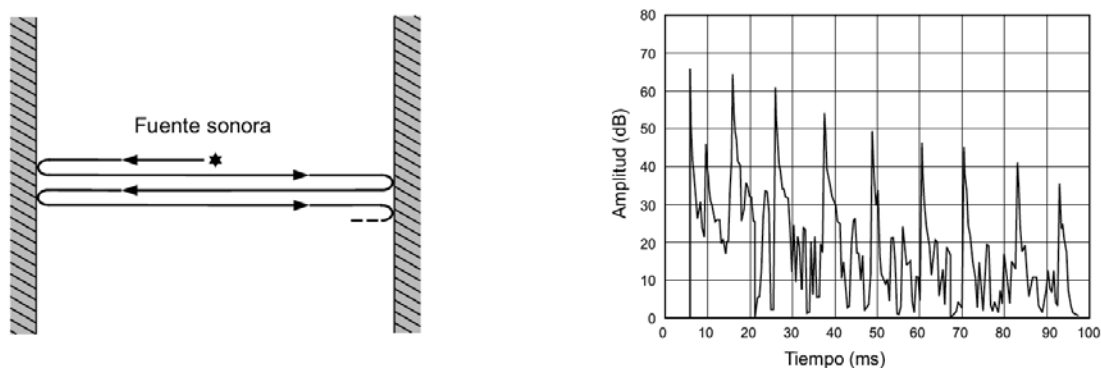


Fig. 1.8 - Representació conceptual d'eco flotant

#### 1.1.2.5.6. Modes propis d'una sala. Acústica ondulatoria

Els modes propis d'una sala són un conjunt d'ones estacionàries que apareixen com a conseqüència de les interferències constructives i destructives provocades per la combinació d'ones incidents i reflectides. Cada mode propi va associat a una freqüència, igualment denominada pròpia, i està caracteritzat per un nivell SPL que varia en funció del punt considerat. El nombre de modes propis presents en una sala és il·limitat. La seva presència provoca una acumulació d'energia a diverses freqüències, caracteritzant així la coloració de la sala.

Els modes propis depenen de la forma i geometria de cada sala, de manera que generalment són molt difícils de caracteritzar. Cal afegir també que els modes propis tenen una major incidència en sales petites. En el context d'estudi d'aquest projecte, els modes propis tenen una influència negligible, i per això no seran objecte d'estudi.

#### 1.1.2.5.7. Balanç energètic sonor

En aquest apartat es valora el comportament de les ones sonores considerant que la font sonora radia energia sonora de forma contínua. En tal cas, quan la font porta un temps emetent energia s'assoleix un estat d'equilibri caracteritzat pel fet que aquesta s'iguala amb l'absorció acústica produïda per les superfícies del recinte, produint-se així un balanç energètic sonor.

### 1.1.2.6. Intel·ligibilitat de la paraula

#### 1.1.2.6.1. Definició



La intel·ligibilitat de la paraula és la mesura de l'efectivitat en la comprensió de la veu parlada. En un missatge parlat, el temps d'emissió de les vocals és considerablement major que el de les consonants, i s'associen als anomenats règims permanent i transitori, respectivament. El fet que les vocals tinguin una durada major (de l'ordre de 90 ms contra 20 ms en les consonants) fa que el nivell SPL associat a elles sigui també superior (uns 12 dB). A més, el contingut freqüencial en les vocals és més ric en baixes freqüències, mentre que en les consonants és més ric en altes, fet que provoca que un alt percentatge de la intel·ligibilitat del missatge estigui determinat per la comprensió de les consonants. Per contra, les vocals aporten un major nivell de pressió sonora. Aquests dos fets es posen de manifest a la figura 1.9, que mostra la contribució freqüencial al nivell de veu i a la intel·ligibilitat de la paraula, dividit en bandes d'octava.

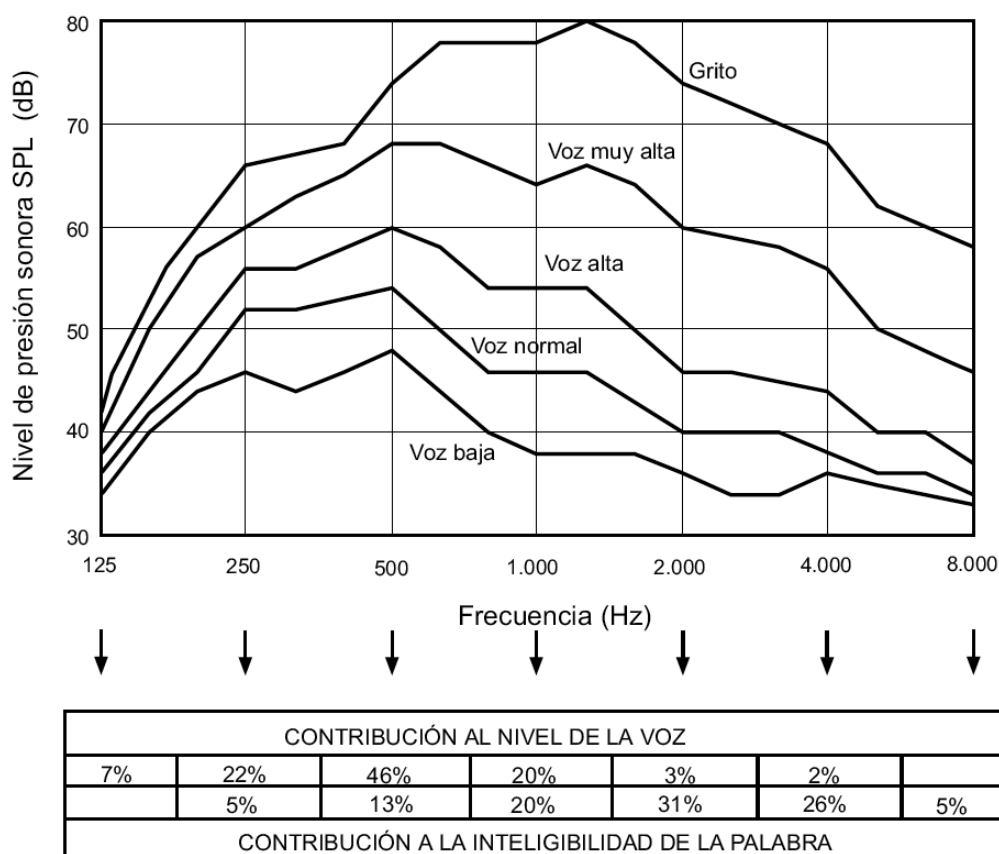


Fig. 1.9 - Contribució freqüencial al nivell de veu i a la intel·ligibilitat de la paraula

Segons el que s'ha exposat, en una sala amb un temps de reverberació alt el decaïment energètic d'una vocal és considerablement més lent que el seu decaïment propi.

### 1.1.2.6.2. Càlcul de la intel·ligibilitat de la paraula: %ALCons i STI/RASTI

%ALCons (*Articulation Loss of Consonants*) és una eina de mesura de la intel·ligibilitat de la paraula. El paràmetre expressa un percentatge de pèrdua, de manera que quant més baix sigui millor serà el grau de intel·ligibilitat. El %ALCons s'obté mitjançant una llei matemàtica que relaciona el temps de reverberació i la diferència de nivells de pressió sonora del camp directe ( $L_D$ ) i del camp reverberant ( $L_R$ ), expressada de forma gràfica a la figura 1.10.

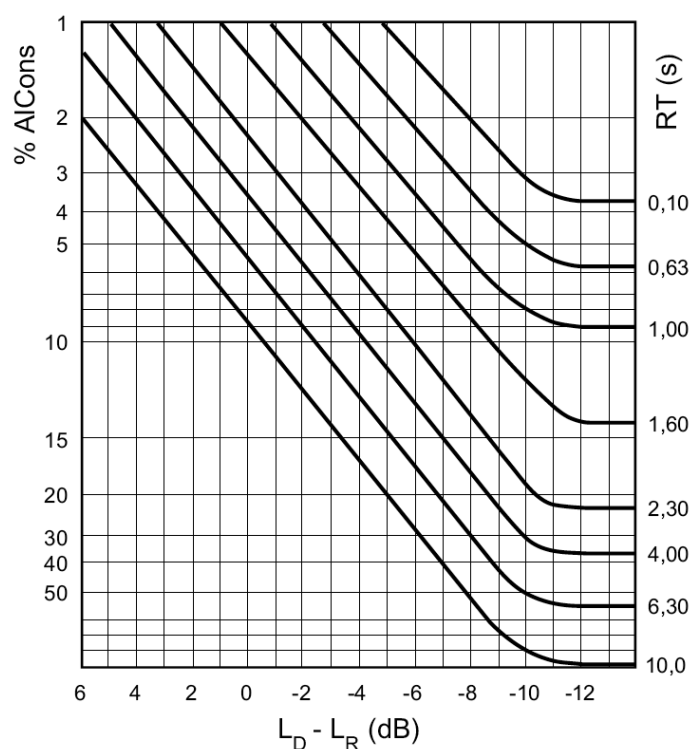


Fig. 1.10 - Obtenció del %ALCons a partir d'RT i d' $L_D - L_R$

L'expressió matemàtica per deduir la diferència de nivells entre camp directe i reverberant és la següent:

$$L_D - L_R = 10 \log \left( \frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (dB)}$$

on,  $Q$  és el factor de directivitat de la font,  $R$  és la constant de la sala ( $\text{m}^2$ ) i  $r$  és la distància de la font al punt de mesura (m).

A banda del %ALCons, l'STI (*Speech Transmission Index*) és un altre paràmetre que quantifica la intel·ligibilitat de la paraula. El seu valor oscil·la entre 0 (intel·ligibilitat nul·la) i 1 (intel·ligibilitat màxima), i s'obté a partir de la reducció

dels diferents índex de modulació de la veu degut a l'existència de reverberació i del soroll de fons de la sala. L'STI es calcula a partir de 14 valors de freqüències de modulació i de les 7 bandes més representatives de la veu.

Existeix una versió simplificada de l'STI, denominada RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*), que consisteix en reduir el nombre de freqüències de modulació i les bandes de freqüència de la veu utilitzades per realitzar el càlcul.

A la figura 1.11 es pot observar la bona correlació entre els paràmetres %ALCons i STI/RASTI.

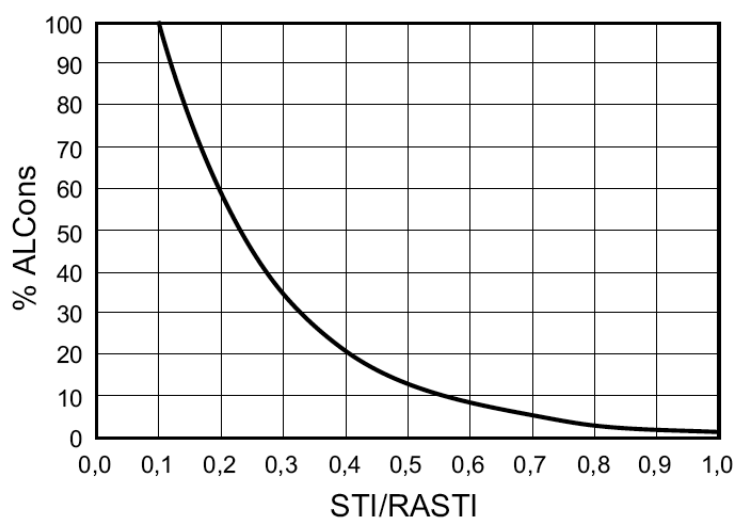


Fig. 1.11 - Correlació entre %ALCons i STI/RASTI

A la taula 1.2 es mostra una valoració subjectiva del grau de intel·ligibilitat segons el valor de %ALCons i STI/RASTI.

%ALCons	STI/RASTI	Valoració subjectiva
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excel·lent
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Bona
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Acceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobra
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Dolenta

Taula 1.2 - Valoració subjectiva de la intel·ligibilitat segons els valors de %ALCons i STI/RASTI

### 1.1.3. Teoria estadística

### 1.1.3.1. Absorció

En el camp de l'acústica, es considera l'absorció com la reducció d'energia associada a les ones sonores. Qualsevol ona sonora que no es propagui en l'espai lliure patirà, molt possiblement, atenuació a causa del contacte amb l'aire i qualsevol superfície que s'interposi en la seva trajectòria. L'absorció que pateixen les ones sonores que incideixen en les diferents superfícies d'un recinte, però, no sempre és igual, sinó que depèn del grau d'absorció del material. S'utilitza el coeficient d'absorció ( $\alpha$ ) per quantificar aquesta magnitud, i és únic per a cada material i freqüència. L'expressió general per a l'obtenció d'aquest coeficient d'absorció és la següent:

$$\alpha = \frac{\text{Energia absorbida}}{\text{Energia incident}}$$

Aquesta expressió, no obstant, no és utilitzada en els camps de disseny i caracterització d'espais. En el seu lloc s'utilitzen els coeficients d'absorció proporcionats pels fabricants dels materials, obtinguts mitjançant un procediment de laboratori homologat i amb validesa certificada. Els valors dels coeficients, que oscil·len sempre entre 0 i 1, es faciliten per bandes d'octava, generalment entre 125 i 4000 Hz.

Els coeficients caracteritzen les propietats absorbents dels materials, però el que caracteritza el comportament acústic d'una sala és l'absorció en sí de cada material, mesurada en Sabins (S). Aquesta magnitud s'obté al multiplicar el total de superfície de cada material pel seu corresponent coeficient d'absorció:

$$A_x = \alpha_x S_x$$

Per a la caracterització estadística d'un recinte s'obté un valor d'absorció per a cada banda d'octava compresa entre 125 i 4000 Hz, per a cada superfície de material diferent present. Posteriorment es sumen totes les absorcions parcials per obtenir l'absorció total ( $A_T$ ) del recinte:

$$A_T = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

Finalment, s'obté el valor del coeficient d'absorció mig ( $\bar{\alpha}$ ) dividint l'absorció total entre la superfície total ( $S_T$ ) del recinte:

$$\bar{\alpha} = A_T S_T$$

on  $S_T$  és la suma de totes les superfícies de la sala.

### 1.1.3.1.1. Absorció de l'aire

Es considera l'absorció produïda per l'aire únicament quan es treballa amb recintes de grans dimensions i amb percentatges baixos d'humitat relativa. S'expressa amb la denominada constant d'atenuació del so en l'aire ( $m$ ). El valor d'aquesta constant es determina amb l'ús de les gràfiques de la figura 1.12.

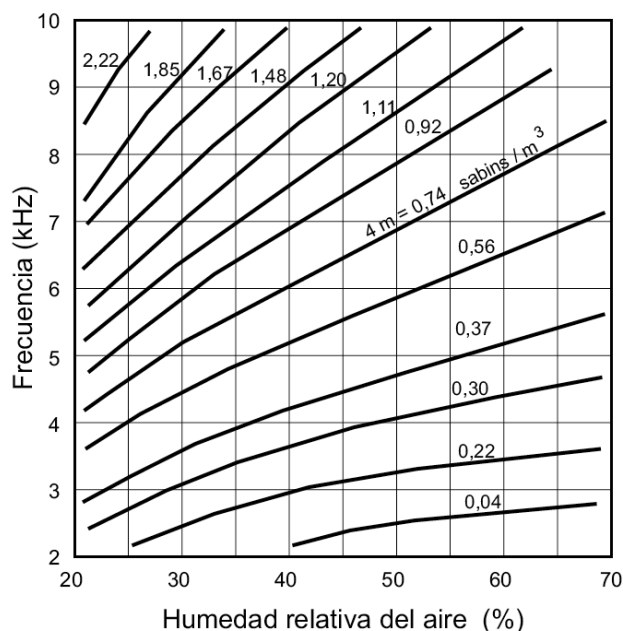


Fig. 1.12 - Gràfiques per a la determinació del producte  $4m$

Noti's que l'anterior gràfica de la figura 1.12 proporciona el valor del producte  $4m$ .

### 1.1.3.2. Temps de reverberació ( $RT$ )

El temps de reverberació ( $RT$ ) és una quantificació de la reverberació existent en una espai. Es defineix el temps de reverberació a una freqüència concreta com el temps que triga a decaure el nivell SPL un cert nombre concret de dB respecte el nivell inicial. El paràmetre més extensament utilitzat és l' $RT_{60}$  (temps en decaure 60 dB), i es mesura en segons (s). Generalment, l' $RT$  és variable segons la freqüència a la que s'avalui, i acostuma a ser menor a freqüències altes. És un paràmetre fonamental en el disseny i caracterització de l'acústica de recintes.

L' $RT_{60}$  és el paràmetre més estès i fonamental en l'anàlisi acústica. En certa manera, sintetitza molta informació en un sol valor, així que és molt revelador de molta informació sobre l'acústica d'un recinte. A la taula 1.3 es mostra una taula amb els

marges de valors recomanats d' $RT_{60}$  mig ( $RT_{MID}$ ) per a diferents tipus de recintes. Es considera que les sales estan ocupades.

Tipus de sala	$RT_{MID}$ (s)
Sala de conferències	0,7 – 1,0
Cinema	1,0 – 1,2
Sala polivalent	1,2 – 1,5
Teatre d'òpera	1,2 – 1,5
Sala de concerts (música de càmera)	1,3 – 1,7
Sala de concerts (música simfònica)	1,8 – 2,0
Església/catedral (orgue i cant coral)	2,0 – 3,0
Locutori de ràdio	0,2 – 0,4

Taula 1.3 - Valors recomanats d' $RT_{MID}$  segons el tipus de recinte

L' $RT_{60}$  es pot calcular mitjançant la denominada fórmula de Sabine:

$$RT_{60} = \frac{60V}{1,086c(S_T\bar{\alpha} + 4mV)}$$

on  $V$  és el volum de la sala,  $c$  és la velocitat del so en l'aire,  $S_T$  és la suma de superfícies de tota la sala,  $m$  és el coeficient d'absorció mig dels materials de la sala i  $4m$  és el coeficient d'absorció de l'aire. Noti's que  $A_T = S_T\bar{\alpha}$ , és a dir, l'absorció total de la sala.

### 1.1.3.3. Claredat musical ( $C_{80}$ )

La claredat musical ( $C_{80}$ ) es defineix com la relació d'energia sonora que arriba a l'oient durant els primers 80 ms des de l'arribada del so directe i la que arriba després dels primers 80 ms. Es calcula entre en cada banda de freqüències entre 125 Hz i 4 kHz i s'expressa en dB. La claredat musical es pot calcular mitjançant la següent fórmula:

$$C_{80} = 10 \log \frac{E < 80 \text{ ms}}{E > 80 \text{ ms}}$$

Perceptivament, el  $C_{80}$  indica el grau de separació entre els diferents sons individuals integrants d'una composició musical.

### 1.1.3.4. Claredat de la veu ( $C_{50}$ )



La claredat de la veu ( $C_{50}$ ) es defineix com la relació d'energia sonora que arriba a l'oient durant els primers 50 ms des de l'arribada del so directe i la que arriba després dels primers 50 ms. Es calcula entre en cada banda de freqüències entre 125 Hz i 4 kHz i s'expressa en dB. La claredat musical es pot calcular mitjançant la següent fórmula:

$$C_{50} = 10 \log \frac{E < 50 \text{ ms}}{E > 50 \text{ ms}}$$

El  $C_{50}$  és un indicador de la intel·ligibilitat de la paraula. Es considera que el valor mínim de claredat per assegurar una bona intel·ligibilitat ha de superar els 2 dB.

### 1.1.3.5. Definició ( $D$ )

La definició ( $D$ ) es defineix com la relació d'energia sonora que arriba a l'oient durant els primers 50 ms des de l'arribada del so directe i l'energia total rebuda pel mateix. Es calcula entre en cada banda de freqüències entre 125 Hz i 4 kHz i s'expressa en %. La claredat musical es pot calcular mitjançant la següent fórmula:

$$D = 100 \frac{E < 50 \text{ ms}}{E_T}$$

La definició és un indicador de la intel·ligibilitat i la sonoritat de la paraula. Es considera que el valor de definició ha de ser superior al 50% per assegurar una bona intel·ligibilitat i sonoritat de la paraula.

## 1.2. La resposta impulsional

### 1.2.1. Concepte

El concepte de resposta impulsional es pot descriure des de diferents punts de vista. En processament de senyal, la resposta impulsional (IR) es defineix com la resposta d'un sistema lineal i invariant (LTI) quan aquest es sotmet a un senyal d'entrada breu, anomenada impuls. Els sistemes LTI estan completament caracteritzats per la resposta impulsional, fet que implica que es pot trobar la sortida a partir del senyal d'entrada i de la resposta impulsional, per a qualsevol tipus d'entrada. La Transformada de Fourier (FT) de la IR resulta en la funció de transferència en domini freqüencial.

En el camp de l'acústica arquitectònica, el propòsit de la resposta impulsional és l'anàlisi acústica. La IR s'associa a la resposta acústica d'una sala a un estímul sonor de durada molt curta, on el sistema és el propi recinte. La resposta és única per a cada posició de font i receptor diferent, i conté tota la informació sobre el camp sonor en el punt on s'avalua, incloent el temps d'arribada i el contingut freqüencial del so directe i de les reflexions discretes, les característiques del decaïment de la reverberació, la resposta freqüencial de la sala, l'SNR i la intel·ligibilitat de la veu humana, entre d'altres. La IR es representa gràficament mitjançant l'ús de corbes ETC, on es mostra l'amplitud de la mesura en funció del temps.

## 1.2.2. Usos

### 1.2.2.1. Mesura de temps de retard

L'ús més habitual de la IR és la mesura de temps de retard quan es realitzen mesures amb funcions de transferència i alineacions de sistemes d'altaveus. Fonamentalment, s'analitza l'arribada del so directe, que sol ser el pic més pronunciat de la IR.

### 1.2.2.2. Anàlisi de reflexions

Un altre ús molt comú de la IR és l'avaluació de reflexions discretes que són potencialment problemàtiques per a la qualitat auditiva d'un oient en un recinte. Aquest ús és, precisament, el que se li donarà a la resposta impulsional en aquest projecte.

### 1.2.2.3. Càlcul del temps de reverberació

La IR també es fa servir per calcular paràmetres acústics com l' $RT_{60}$  o l'*EDT*. L'*EDT* (*Early Decay Time*) és un paràmetre subjectiu resultat de interpolar una recta entre els punts 0 i -10 dB de la corba de decaïment mesurada en un recinte.

### 1.2.2.4. Early-to-late energy ratios

Els *early-to-late energy ratios* mesuren la relació entre l'energia sonora que arriba després d'un cert interval de temps del so directe i l'energia restant de la IR. Permet una avaluació directa de la relació entre el les reflexions beneficioses per a la bona audició i les que no ho són.

### 1.2.2.5. Speech intelligibility modeling

La resposta impulsional pot ser útil també per calcular factors de intel·ligibilitat, com ara el %ALCons o l'STI/RASTI. Aquests factors s'han exposat en anteriors apartats.

## 1.2.3. La mesura

### 1.2.3.1. Anatomia de la resposta impulsional

Tot i que cada resposta impulsional mesurada és única i irrepetible, generalment totes comparteixen un seguit de trets anatòmics que es poden observar a la figura 1.13.

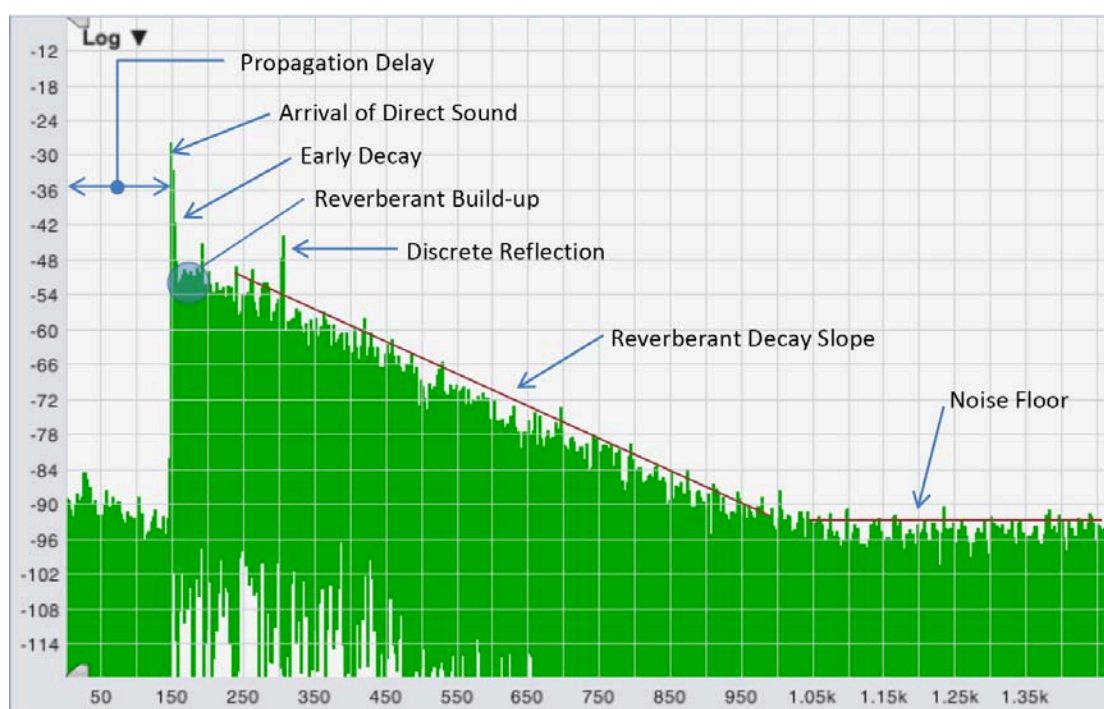


Fig. 1.13 - Resposta impulsional acústica amb les parts més comunes marcades

El retard de propagació (*Propagation Delay*) és el temps que tarda el so directe de la font sonora en arribar a la posició de mesura. Inclou el retard que el propi sistema de mesura pugui ocasionar i el temps que tarda el so en desplaçar-se d'una posició a l'altra. L'arribada del so directe (*Arrival of Direct Sound*) és el punt on el so arriba pel camí més curt possible: la línia recta. Serà, generalment, el punt més alt de la IR. Les reflexions discretes (*Discrete Reflection*) són aquells punts on arriba el so pels camins immediatament més directes després del so directe, és a dir, reflexions de baix ordre (1 o 2). Es manifesten en forma de pic. La recuperació de la reverberació (*Reverberant*

*Build-Up*) es produeix un cop el so segueix rebotant, i per tant generant reflexions d'ordre superior. L'energia d'aquests rebots pot combinar-se constructivament en un període petit de temps, resultant en una acumulació de so reverberant. Aquesta part de la IR no és sempre visible. La pendent de decaïment de la reverberació (*Reverberant Decay Slope*) inclou tota la cua reverberant de la IR. Per últim, el soroll de fons (*Noise Floor*) arriba quan no es pot distingir el la cua reverberant del soroll de fons de la sala. El soroll de fons pot estar provocat pel soroll acústic de l'ambient, pel soroll elèctric del sistema de mesura o pel soroll de quantització de la digitalització del senyal, entre d'altres.

### 1.2.3.2. Tècniques de mesura

#### 1.2.3.2.1. Mesura directa

La manera més simple de mesurar la resposta impulsional és utilitzant un impuls acústic i enregistrar la resposta de la sala. Idealment, l'impuls hauria de ser perfectament instantani i omnidireccional, de manera que radiés la mateixa densitat d'energia en totes les direccions i en totes les freqüències. Això vol dir que en el domini temporal hauria de percebre's com un pic d'una mostra de durada, i en el freqüencial com una línia recta, d'igual magnitud i fase per totes les freqüències. Els estímuls tipus pistola de fogueig o petards, àmpliament utilitzats, estan lluny de complir les propietats ideals anteriorment esmentades. Presenten alguns clars desavantatges:

- Tant els estímuls com les mesures són difícils de repetir exactament
- Es té poc control sobre la direccionalitat i el nivell de l'impuls
- L'impuls presenta poca energia a baixes freqüències
- S'obté una mala SNR

Davant la poca fiabilitat d'aquest mètode tradicional, s'han desenvolupat altres procediments per realitzar mesures més fiables de respostes impulsional.

#### 1.2.3.2.2. Mesura indirecta

Els mètodes de mesura indirecta de resposta impulsional segueixen un model més actualitzat i fiable que el dels mètodes directes. Inicialment, s'utilitzen dos senyals en dos canals separats: el senyal que s'introdueix al sistema i la sortida del sistema en resposta a aquesta entrada. Posteriorment, es transformen aquests dos senyals

utilitzant la Transformada de Fourier, i en domini freqüencial es calcula la funció de transferència (TF). Finalment, es transforma la TF a domini temporal mitjançant la Transformada de Fourier Inversa (IFT). A la figura 1.14 es mostra el diagrama de blocs del procés.

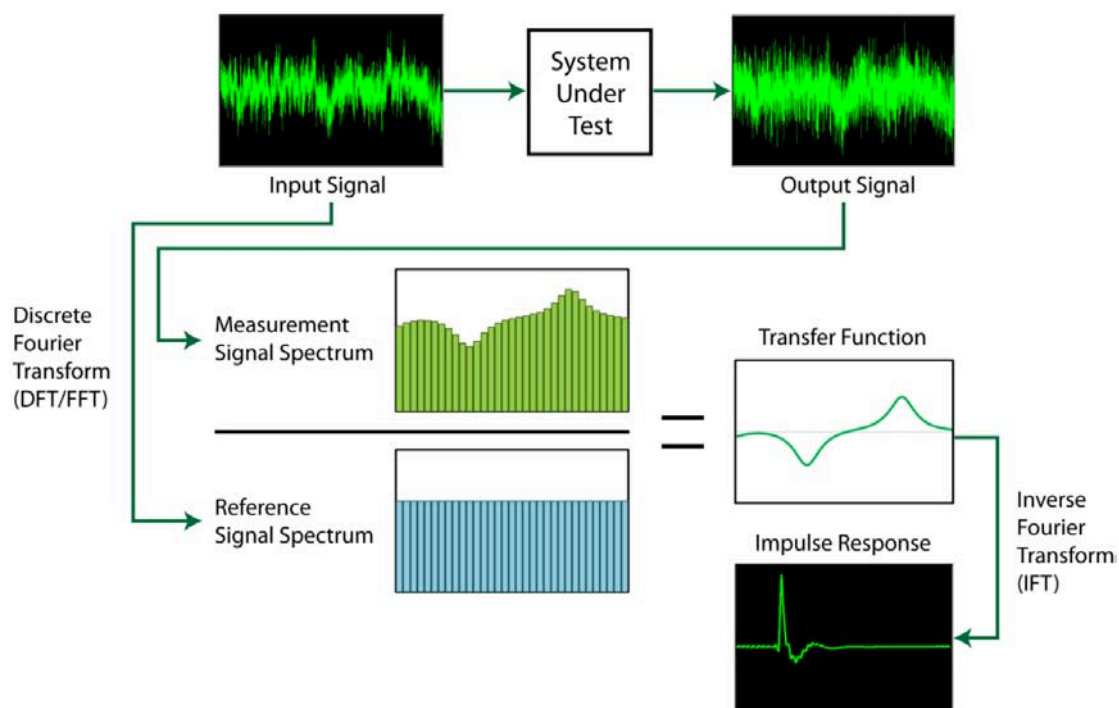


Fig. 1.14 - Diagrama de blocs d'una mesura indirecta d'IR

## 2. Simulació teòrica

En acústica és habitual realitzar simulacions teòriques d'espais, sobretot abans de construir-los. A les simulacions es busca predir el comportament del so en l'espai en condicions teòriques. Hi ha molts tipus de simulacions i es poden dur a terme amb finalitats força diferents. Per exemple, l'estudi acústic que es realitza a l'hora de dissenyar un cotxe és notablement diferent al que es realitza en el present capítol. En aquest projecte, la finalitat de la simulació és correctiva. Es pretén estudiar el comportament teòric actual, estudiar els resultats obtinguts i valorar si seria precís proposar millores.

Prèviament a la simulació en sí, cal realitzar un estudi detallat de l'espai en qüestió per tal de determinar la forma, les dimensions i els materials dels elements que el componen. En primer lloc, en aquest capítol es realitza una descripció exhaustiva de totes les parts que afecten al so de la sala. Posteriorment, es descriuen i es valoren els estudis acústics realitzats prèviament a el present. Finalment, es realitza la simulació de la sala del Teatre-Auditori, analitzant el comportament acústic dels nombrosos elements acústics que la formen.

### 2.1. Descripció exhaustiva de l'espai

A continuació es realitza una descripció exhaustiva de totes les parts que afecten al so de la sala. L'espai que s'estudia es compon de set parts diferenciades que es tractaran separatament: l'escenari, la conxa acústica, la platea, l'amfiteatre, les parets posteriors i laterals i els sostre. Es descriuen totes aquelles característiques físiques que són rellevants pel present projecte. Les figures 2.1 i 2.2 mostren l'alçat i el perfil de la sala, respectivament.



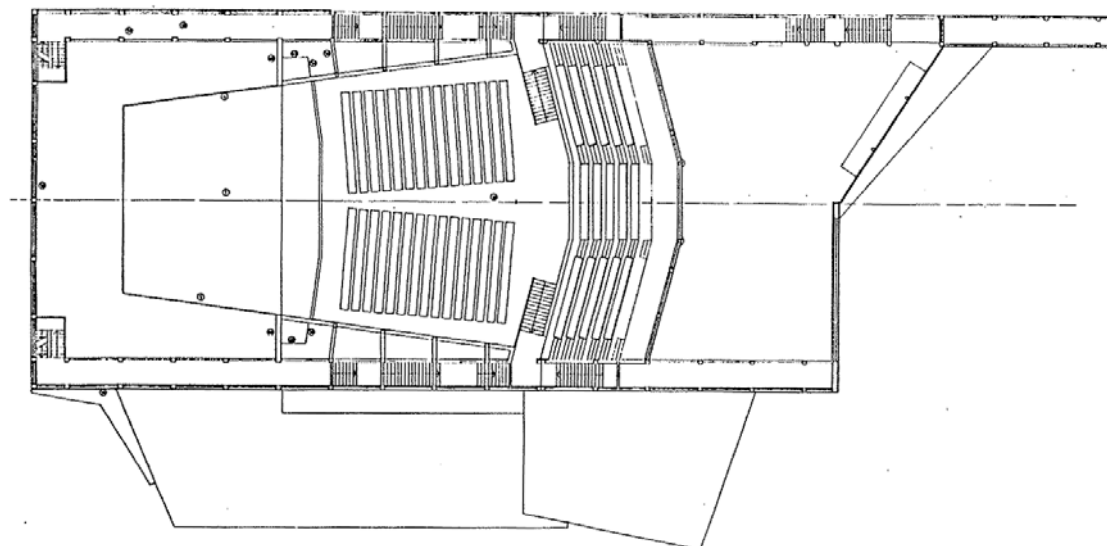


Fig. 2.1 - Plànol de l'alçat de la sala

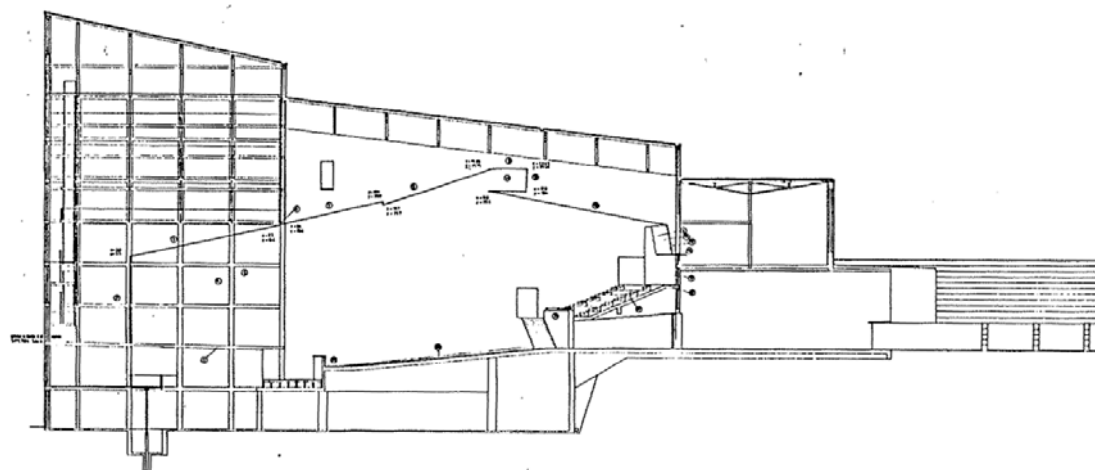


Fig. 2.2 - Plànols del perfil de la sala

La figura 2.3 correspon a una fotografia de la visió general de la sala des de l'escenari.



Fig. 2.3 - Fotografia de la visió general de la sala des de l'escenari

### 2.1.1. Escenari

L'escenari és la zona on es desenvolupa l'escena. Hi ha diferents models de disseny d'escenari segons l'ús que se li dóna i com es presenta al públic. L'escenari del TASC segueix el model de teatre a la italiana, la forma habitual de la gran majoria de sales de teatre occidentals. Essencialment, aquest model respon a escenaris amb els següents trets estructurals característics:

- És elevat
- Està situat davant del públic
- Està delimitat per l'arc de prosceni o embocadura (obertura de l'escenari al públic)
- Està tancat per un teló
- Disposa de corbata (part avançada davant del teló)
- Disposa d'*hombros* (espais laterals ocults)
- Disposa de fossat d'orquestra (situat entre el prosceni i la primera fila de butaques)

El terra té un revestiment de fusta en la totalitat de la seva superfície. A la zona central hi ha tres elevadors hidràulics de càrrega que serveixen per transportar el material de cada espectacle des del moll de càrrega del teatre fins l'escenari. La part davantera de l'escenari (la corbata) es compon també de tres elevadors hidràulics, que en retirar-se es converteixen en el fossat d'orquestra. La figura 2.4 correspon a una fotografia de l'escenari, on s'aprecien gran part de les característiques comentades.



Fig. 2.4 - Fotografia de l'escenari

A continuació es detallen les dimensions de l'escenari:

- Fondària espai escènic: 16,60 m
- Fondària total (de corbata a paret): 19,00 m
- Amplada boca: 18,00 m
- Amplada *hombro* esquerra: 3,50 m
- Amplada *hombro* dret: 3,50 m
- Amplada total (de paret a paret): 25,00 m

- Alçada (terra escenari a pinta): 20,00 m
- Superfície total: 400,00 m<sup>2</sup>
- Volum: 12857,00 m<sup>3</sup>
- Amplada embocadura: 18,00 m
- Alçada embocadura: 9,50 m
- Amplada fossat d'orquestra: 18,00 m
- Fondària fossat d'orquestra: 4,50 m

### 2.1.2. Conxa acústica

La conxa acústica és un conjunt d'elements estructurals que serveixen per modificar la resposta acústica de la sala. Es fa servir exclusivament quan la sala acull concerts de música no amplificada — clàssica en la majoria d'ocasions.

La conxa acústica és un excel·lent element d'acústica variable que redueix dràsticament el volum de l'escenari. Consta d'un total de 6 peces repartides en terra, paret posterior, parets laterals i sostre. La conxa acústica està concebuda com una continuació de la sala. Tant les parets laterals com els sostre són una continuació dels mateixos elements en la sala. La conxa del TASC només admet una única configuració de muntatge de la mateixa.

El material de les peces és el mateix que el material predominant en el sostre, un contraplacat de fusta que afavoreix la generació de primeres reflexions a la zona del públic i a la mateixa cavitat de la conxa. Es tracta d'un material llis, no porós i totalment rígid que reflexa la majoria d'energia sonora incident. El correcte funcionament de la conxa acústica s'aconsegueix gràcies a la perfecta hermeticitat en l'acoblament de les diferents peces. Qualsevol petita escletxa en la unió dels diferents elements provocaria fugues d'energia que comprometrien l'efecte de la conxa.

Aquest element d'acústica variable funciona perfectament i dona els resultats desitjats.

La figura 2.5 correspon a una fotografia d'una de les peces de la conxa acústica.



Fig. 2.5 - Paret esquerra de la conxa acústica (plegada)

A continuació es detallen les dimensions de la conxa acústica:

- Fondària: 13,70 m
- Amplada boca: 18,00 m
- Amplada fons: 13,80 m
- Alçada boca: 20,00 m
- Alçada fons: 7,50 m
- Superfície total: 218,00 m<sup>2</sup>
- Volum: 1725,70 m<sup>3</sup>

### 2.1.3. Platea

La platea o pati de butaques és la zona situada davant l'escenari que està dedicada a l'audiència. En el cas del TASC, la platea es compon d'un total de 508 butaques repartides uniformement en 16 fileres. Les butaques se situen a banda i banda d'un



passadís central que travessa longitudinalment el pati de butaques. El terra sobre el que se situen les butaques és un pla lleugerament inclinat. A diferència de molts teatres, aquest no disposa ni de llotges ni de butaques laterals.

La figura 2.6 correspon a una fotografia de la meitat de la platea.

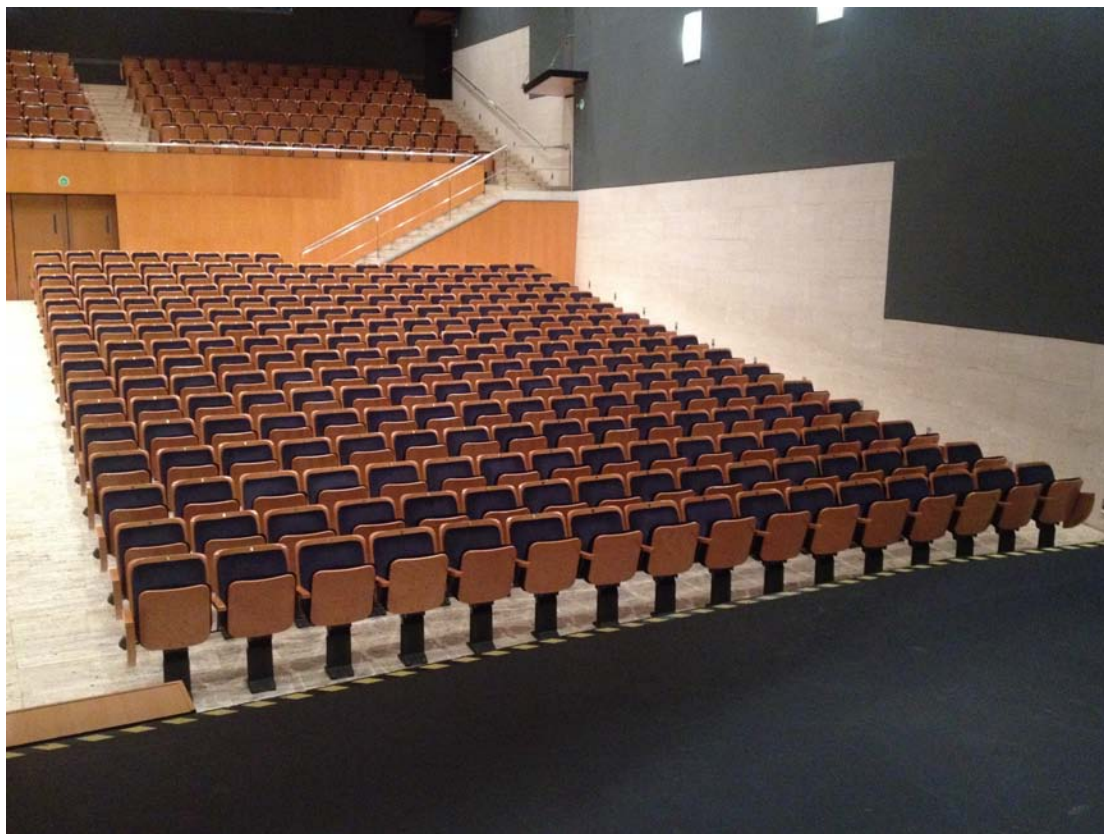


Fig. 2.6 - Fotografia de part de la platea

#### 2.1.4. Anfiteatre

L'anfiteatre és la zona de butaques situada al final de la platea, a un nivell d'alçada superior. Conté 280 butaques distribuïdes uniformement en tres grups de 7 fileres, separats per dos passadissos. Les butaques se situen sobre un terra en forma de graderia, de manera que cada filera està sobre un esglaó a diferent altura. Les butaques s'encaren a l'escenari per una millor visió de l'espectador.

A la zona de l'anfiteatre es fa distinció de les següents superfícies:

La figura 2.7 correspon a una fotografia de la zona de l'amfiteatre i de les parets posteriors.

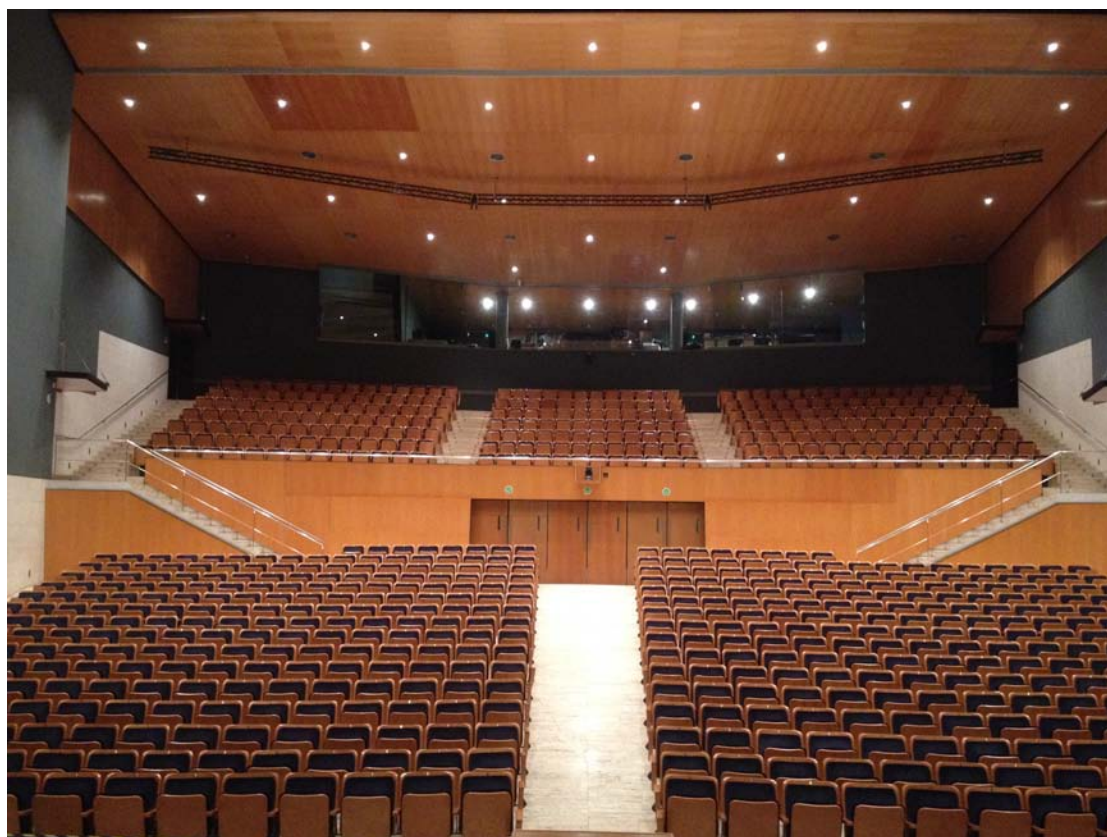


Fig. 2.7 - Fotografia de la zona de l'amfiteatre i de les parets posteriors

### 2.1.5. Parets posteriors

Es distingeixen dues parets posteriors que es tractaran separatament: la de platea (també anomenada mur de separació d'audiències) i la d'amfiteatre.

A la part posterior de la platea, que coincideix amb la part inferior de l'amfiteatre, s'emplacen les portes d'accés general a la sala. Un total de sis portes contigües es troben centrades en aquesta paret. Als laterals d'aquesta paret, en disposició simètrica, se situen les escales que accedeixen a l'amfiteatre. La totalitat d'aquesta primera paret posterior està recoberta de contraplacat de fusta, igual al del sostre.

Val a dir que aquesta paret ha patit modificacions amb el pas del temps. De fet, en un inici la totalitat de la superfície era de pedra (com el terra i les parets laterals), i les portes d'accés estaven cobertes per unes cortines corredisses de vellut. A més, cal afegir també que aquestes portes d'accés donaven directament al vestíbul. Actualment no és així, ja que

a l'any 2004 es va instal·lar una segona filera de portes entre les d'accés i el vestíbul per aconseguir un major aïllament acústic (per a més informació, veure 2.2.2.). També es van suprimir les cortines de vellut i es va cobrir tota la superfície de la paret amb el contraplacat de fusta del sostre. Per últim, es va afegir una petita inclinació al límit superior de la paret (a sobre les portes) neutralitzar rebots incidents.

La paret posterior de la zona d'amfiteatre delimita el final de la sala. Una bona part de la superfície d'aquesta paret és l'obertura de les cabines dels tècnics de llums i so. La resta de superfície és paret amb revestiment de Texturglas, igual que en les laterals. A la figura 2.6 es poden observar les dues parets posteriors.

Aquesta segona paret també ha patit algunes modificacions. En un inici, les cabines estaven cobertes de vidrieres en la seva totalitat. Es van suprimir les vidrieres ràpidament, ja que d'una banda generaven unes reflexions molt fortes, i de l'altra dificultaven molt la feina dels tècnics, degut a que aquests no sentien el so directe de la sala. La figura 2.8 correspon a una fotografia d'aquestes vidrieres.

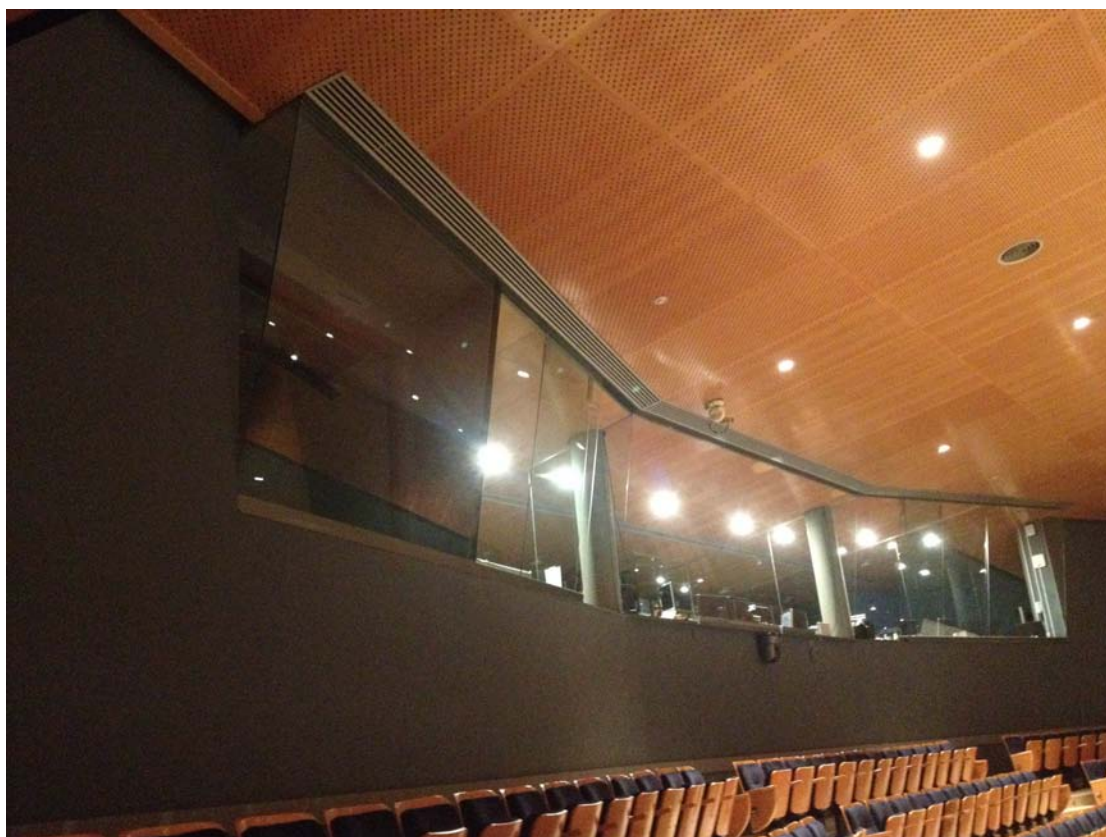


Fig. 2.8 - Fotografia de les cabines dels tècnics

## 2.1.6. Parets laterals



Les parets laterals de la sala principal del TA són un dels elements centrals d'estudi en aquest projecte. Degut a la seva disposició i composició, les parets són un potencial focus de resposta acústica no desitjada.

La disposició tant d'elements com de materials és simètrica a les dues parets laterals. Se situen tres portes d'accés a cada banda: una a la platea (a peu d'escenari) i dues a l'amfiteatre. Al llarg de tota la sala, la zona de la paret més propera al terra es compon del mateix revestiment de pedra que aquest. No obstant, la majoria de superfície de les parets es componen d'un revestiment de Texturglas pintat, que arriba fins al contacte amb el sostre. Per últim, en una petita zona de l'amfiteatre, al final de la sala, hi ha una petita extensió del contraplacat de fusta amb ressonadors del sostre. Les figures 2.9 i 2.10 corresponen a fotografies de les parets laterals de platea i d'amfiteatre, respectivament.

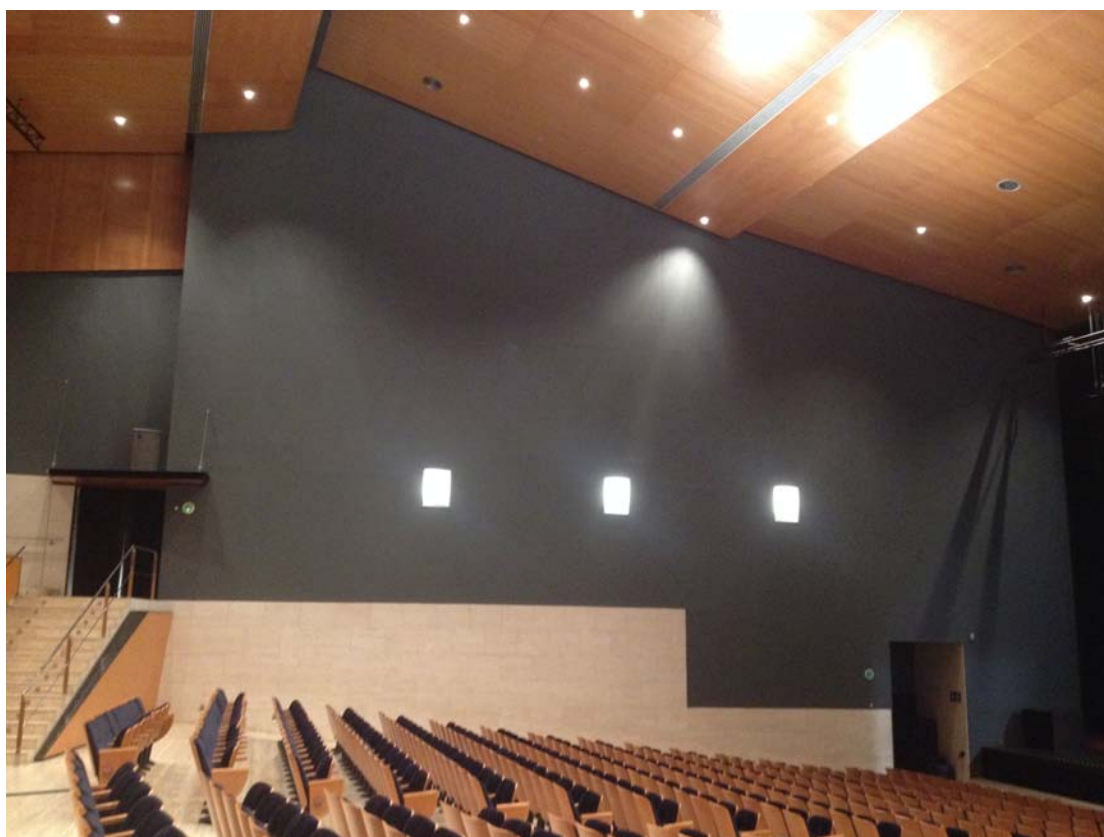


Fig. 2.9 - Fotografia de la paret lateral de la zona de platea

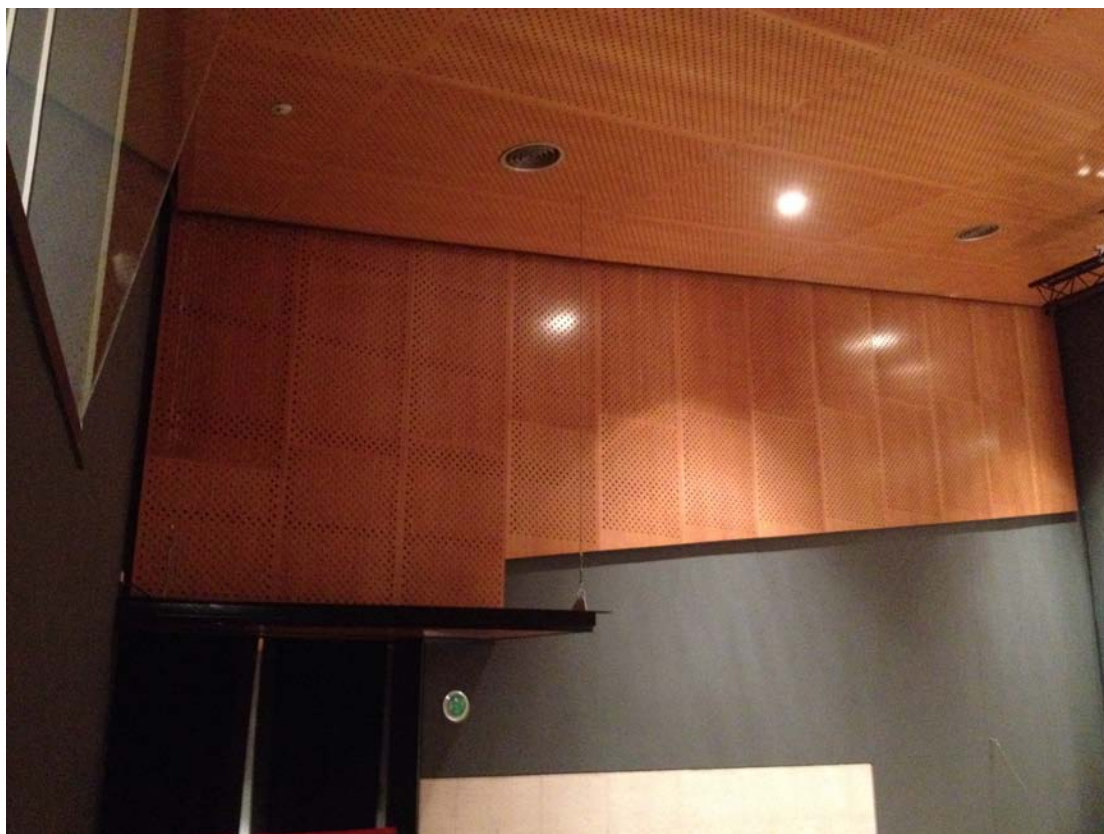


Fig. 2.10 - Fotografia de la paret lateral de la zona de l'amfiteatre

## 2.1.7. Sostre

La sala del TASC està delimitada per un fals sostre en la seva part superior. El sostre real de l'edifici és d'obra i no té contacte amb el de la sala. Aquest fet suposa un aïllament acústic i tèrmic de l'exterior, i facilita molt el tractament del so dins la sala.

El fals sostre està format per tres grans peces de fusta, que estan disposades d'una forma particular i actuen com a reflectors. Cada peça afavoreix la generació de primeres reflexions en zones específiques del públic. La zona posterior de la sala és la que rep el so directe més dèbilment, de manera que requereix una major recepció d'aquestes reflexions.

Tot i que la superfície del sostre és integralment de fusta i és aparentment uniforme, s'hi distingeixen tres tipus de superfícies:

- Contraplacat de fusta de 25 mm envernissat (peça 1 i 2)

- Contraplacat de fusta de 45 mm envernissat (peça 3)
- Ressonador circular format per (contorn paret peça 2 i 3):
  - Fons sòlid del ressonador: aglomerat de fusta DM de 10 mm de gruix
  - Cambra d'aire de 20 mm
  - Fibra de vidre: panell PA de ISOVER de 30 mm
  - Contraplacat de fusta de 10 mm envernissat, amb perforacions de 20 mm de diàmetre interdistanciades 40 mm.

La figura 2.11 correspon a una fotografia general del sostre de la sala.

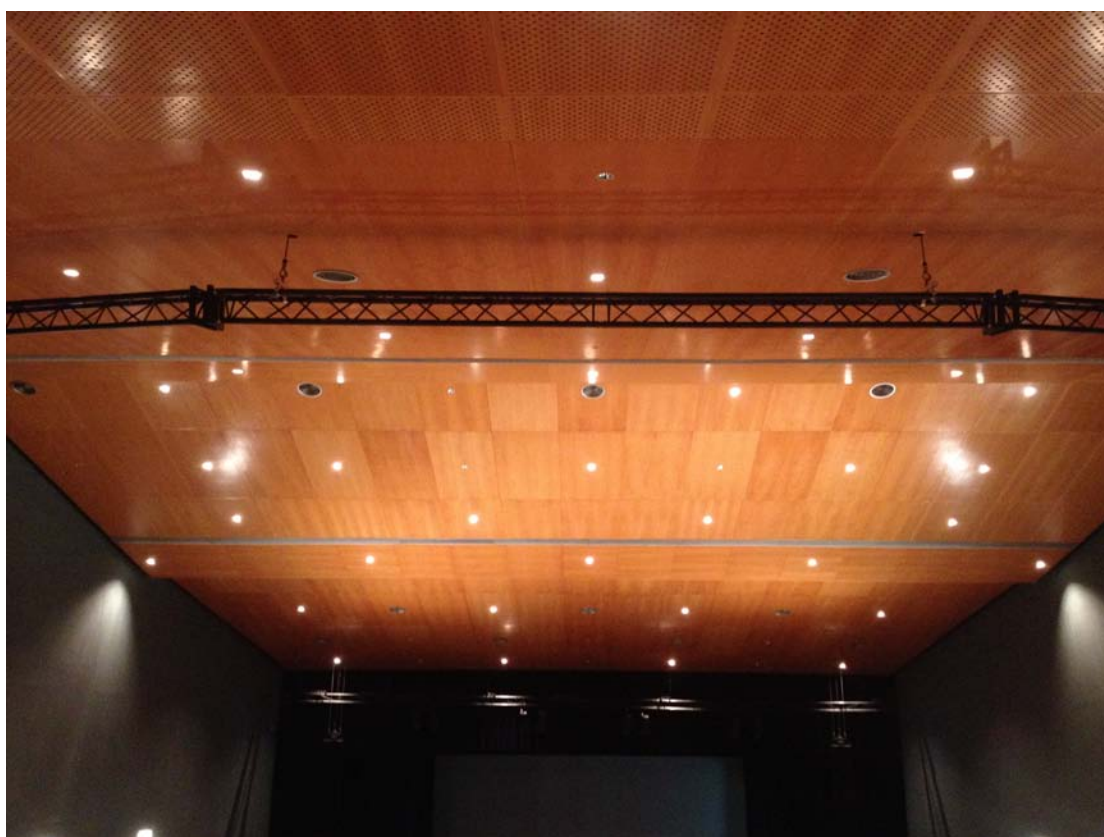


Fig. 2.11 - Fotografia de la vista general del sostre de la sala

La figura 2.12 correspon a una fotografia on s'aprecien els límits de les tres peces del sostre.

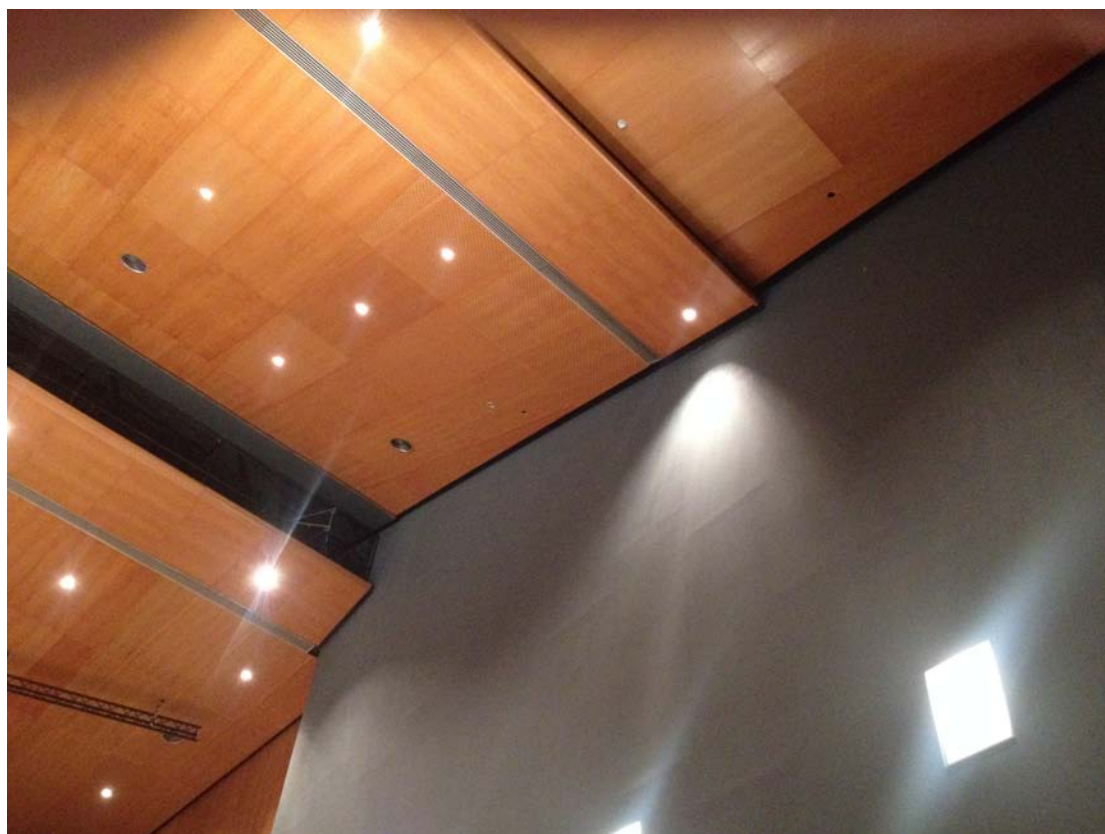


Fig. 2.12 - Fotografia dels límits de les peces del sostre

## 2.2. Estudis previs

### 2.2.1. Estudi acústic inicial per Higiní Arau [1992]

Tal i com s'ha comentat anteriorment, el Teatre-Auditori forma part de l'anomenat Centre Cultural de Sant Cugat, un petit complex arquitectònic format per un cinema, una escola de música i el propi teatre. El projecte de construcció del Centre Cultural va començar l'any 1989, data en que els arquitectes van iniciar la fase de disseny de l'edifici. Però no va ser fins el 1992 que l'enginyer acústic Higiní Arau va realitzar l'estudi del condicionament acústic de la sala principal.

Arau va realitzar un exhaustiu estudi acústic virtual, basat en simulacions i utilitzant teories d'acústica estadística i traçat de rajos. L'estudi està recollit en el llibre *Estudi de condicionament acústic de l'auditori principal del Centre Cultural de Sant Cugat*, que conté totes les dades sobre materials i distribució dels mateixos, així com resultats dels



experiments, entre d'altres. El Teatre-Auditori ha facilitat l'accés a aquest llibre i s'ha utilitzat com a referència en bona part del desenvolupament d'aquest projecte.

Cal remarcar que a Higini Arau se li va encarregar únicament l'estudi de formes i materials, però no la direcció i seguiment de l'obra. En aquell moment l'edifici ja estava en construcció, i de fet faltava poc per enllestir l'obra. Aquestes circumstàncies no s'haurien d'haver produït d'aquesta manera, ja que en un projecte d'aquest tipus les fases de disseny arquitectònic, acústic i escènic-tècnic s'han de dur a terme paral·lelament. El fet que Arau no dirigís l'obra va provocar que els arquitectes encarregats no implementessin alguns elements o materials presentats a l'estudi, per motius fonamentalment econòmics i estètics. A més, cap de les modificacions realitzades respecte l'estudi acústic inicial es va consultar amb Arau, fet que molt possiblement provoqués alguns desajustos acústics en la sala que es manifestarien més tard. Aquest esdeveniment va tenir lloc, en gran part, per desconeixença sobre la importància d'alguns aspectes que van ser ignorats.

### **2.2.1.1. Mètodes i procediments emprats**

En aquest estudi es defineixen tots els materials i superfícies presents a la sala. Es parla de dimensions, formes i distribució dels materials segons la seva funció. En el quart capítol, anomenat *Requeriments acústics que la sala ha de complir*, es valora els temps de reverberació màxim i l'índex de claredat que la sala hauria d'assolir per assegurar una audició de qualitat. En el sisè capítol es realitza una simulació molt semblant a la que s'ha dut a terme en aquest projecte. També es realitza un estudi de reflexions mitjançant un traçat informàtic de rajos, utilitzat per determinar la forma i distribució del sostre. La conclusió de l'estudi és que tots els paràmetres calculats en la simulació realitzada compleixen els criteris acceptats universalment per la caracterització acústica de sales (*i.e.* RT60, C80, etc.)

## **2.2.2. Instal·lació de dobles portes d'accés per l'aïllament acústic [1994]**

Després de la inauguració del Centre l'any 1993, degut a la bona reputació de l'acústica de la sala, el Teatre-Auditori va començar acollir moltes gravacions i una gran varietat d'espectacles. Aproximadament un any després de la inauguració, no obstant, es van manifestar els primers problemes acústics. Es va detectar un problema evident d'aïllament

acústic entre la sala el vestíbul d'accés a la mateixa. La presència de qualsevol soroll al vestíbul es traslladava directament a la sala, i en un context d'enregistrament aquest fenomen es va considerar inadmissible. Es va contractar a Audioscan, una empresa especialitzada en enginyeria de so liderada per l'enginyer acústic Antoni Carrión.

Carrión va recollir el seu estudi i la conseqüent diagnosi en el dossier *Estudi de l'aïllament acústic entre la sala i el vestíbul de l'auditori de Sant Cugat del Vallès*. En aquest estudi es va proposar la instal·lació d'una segona filera de portes d'accés a la sala i d'una cortina per afavorir l'aïllament entre espais. A més, es va proposar també un tractament absorbent integral al sostre del vestíbul per reduir el nivell de pressió sonora en aquest espai. Finalment, només es van instal·lar les portes i les cortines, fet que va solucionar satisfactòriament els problemes d'aïllament que presentava l'espai inicialment. La figura 2.13 correspon a una fotografia de les dobles portes instal·lades l'any 1994.



Fig. 2.13 - Fotografia de les dobles portes

### 2.2.3. Caracterització acústica per Antoni Carrión [1995]

L'any 1995, poc després d'acabar la reforma recent exposada, Antoni Carrión va realitzar un seguit de caracteritzacions acústiques de sales d'arreu del país, en un projecte en col·laboració amb Generalitat de Catalunya. El Teatre-Auditori Sant Cugat va ser una d'aquestes sales. L'objectiu bàsic dels estudis era fer un diagnòstic del comportament acústic de les sales basats en la interpretació dels valors dels paràmetres obtinguts a partir de les mesures efectuades. L'estudi realitzat a la sala del Teatre-Auditori està recollit en el llibre *Caracterització acústica de l'Auditori del Centre Cultural de Sant Cugat del Vallès*.

Es van realitzar multitud de mesures i experiments amb les dues configuracions de l'escenari, és a dir, amb i sense la conxa acústica. La valoració global de les mesures amb la configuració de sala de concerts (és a dir, amb la conxa acústica) va ser positiva. No es van reportar trets negatius, sinó tot el contrari. Per contra, la valoració amb la configuració de sala de teatre va ser negativa. Es va reportar una greu manca de difusió del so, traduïda en una pèrdua en la intel·ligibilitat de la paraula i una aparició d'ecos a l'escenari i en certes zones de la platea, provocada pel rebot del so en la paret posterior de la sala. Els plafons mòbils de l'amfiteatre van quedar totalment desqualificats per la seva ineficàcia.

Cal afegir que, tot i la negativa valoració de la sala en configuració de teatre, no es van prendre les mesures que Carrión va recomanar degut a motius aliens al focus d'estudi d'aquest projecte.

### **2.2.3.1. Mètodes i procediments emprats**

Les sessions de mesures realitzades en aquest estudi són molt similars a les realitzades en aquest projecte, que es detallaran en el següent capítol. Es van utilitzar diversos tipus de micròfons (omnidireccionals i bidireccionals), un altaveu de 12 vies i equipament informàtic de qualitat. Es van recollir multitud de paràmetres, com ara el soroll de fons, l' $RT_{60}$ , la calidesa, la brillantor i el  $C_{80}$ , entre d'altres. L'anàlisi és realment exhaustiu i s'extreu molta informació de les corbes EDT.

### **2.2.4. Ecos a l'escenari [2004]**

Des de la caracterització acústica realitzada l'any 1995 fins el 2004 no es van realitzar estudis acústics de cap mena a la sala del Teatre-Auditori. Va ser precisament l'any 2004 quan es va realitzar un estudi per tractar la presència d'ecos reportats en repetides ocasions a l'escenari. L'estudi va ser realitzat per l'enginyer acústic de l'obra original,

Higini Arau. L'estudi està recollit en el dossier *Estudi dels ecos en l'escenari de l'auditori de Sant Cugat del Vallès*, on es valora l'efecte dels ecos i es proposa una solució per eliminar la seva presència. Es van proposar reformes en tres punts estratègics de la sala: la paret del fons de platea, la zona de cabines de control i el pont de llums de sala.

La reforma proposada no es va implementar en la seva totalitat. De fet, només es van aplicar les mesures correctores proposades en una de les tres zones conflictives, la paret de fons de platea. La totalitat d'aquesta paret es va recobrir amb una estructura de fusta, amb una lleugera inclinació a la part superior per reorientar les reflexions incidents. Aquesta reforma va servir per eliminar l'esmentada presència d'ecos a l'escenari i a la platea en la seva totalitat. La figura 2.14 correspon a una fotografia que mostra el resultat del tractament acústic aplicat per Arau.



Fig. 2.14 - Fotografia dels elements acústics instal·lats per eliminar els ecos a l'escenari

No s'han realitzat més reformes ni estudis de cap mena des d'aquest realitzat al 2004.

## 2.3. Simulació



### 2.3.1. Objectius

L'objectiu de la simulació és adquirir una primera valoració sobre l'acústica del recinte, tot utilitzant valors teòrics i paràmetres per veure com es comporta la sala sobre paper. Amb la simulació s'obté un valor d' $RT_{60}$  calculat a partir de l'absorció produïda pels diferents materials de la sala. Segons una primera valoració dels paràmetres obtinguts amb la configuració actual de la sala, podria requerir-se que la sala necessités assolir uns altres valors d' $RT_{60}$ , de manera que s'hagués de refer la simulació amb nous elements.

### 2.3.2. Coeficients d'absorció

La taula 2.1 recull els coeficients d'absorció de tots els materials presentats en els anteriors apartats.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Contraplacat de fusta	0,20	0,15	0,10	0,05	0,04	0,04
Ressonador circular	0,20	0,14	0,43	0,76	0,65	0,33
Pedra	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Seients entapissats (sense audiència)	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
Texturglas	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04
Obertura	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,50

Taula 2.1 - Coeficients d'absorció dels materials presents a la sala

Cal comentar que l'última fila de coeficients correspon a elements que no s'han tractat de la mateixa forma que un material convencional. En el cas de les portes d'accés laterals, les cabines dels tècnics i la boca de l'escenari s'han tractat com una obertura, d'aquí l'elevat valor dels coeficients. Una obertura és un element molt absorbent, i amb aquest tractament els càlculs se simplifiquen considerablement. De fet, els valors s'han pres de l'estudi acústic realitzat per Arau l'any 1992, on es va tractar també d'aquesta manera. S'ha considerat aquest criteri com una manera vàlida de realitzar la simulació. La resta de materials s'han tractat normalment.

### 2.3.3. Superfícies dels materials

La taula 2.2 recull el total de superfície ocupada per cada material present a la sala.

Zona	Element	Superfície (m <sup>2</sup> )
Terra platea	Paviment de pedra	178,52
	Seients entapissats	228
Terra amfiteatre	Paviment de pedra	77,67
	Seients entapissats	126,33
Paret lateral	Paret amb revestiment de Texturglas	202,02
	Paret amb revestiment de pedra natural	51,42
	Ressonador circular	24,30
	Portes (3)	14,27
Sostre	Contraplacat de fusta	547,44
	Ressonador circular	234,62
Pla frontal platea	Boca d'escenari	171,00
	Mur frontal sota escenari	15,92
Paret posterior platea	Mur separació audiències	76,20
Paret posterior amfiteatre	Paret amb revestiment de Texturglas	61,00
	Cabines tècnics	41,40

Taula 2.2 - Superfície ocupada per cada material present a la sala

### 2.3.4. Volum de la sala

A la taula 2.3 consten els volums dels tres espais bàsics de la sala.

Zona	Volum (m <sup>3</sup> )
Sala	7660,30
Caixa d'escenari	5196,70
Conxa acústica	1725,70

Taula 2.3 - Volums dels tres espais bàsics de la sala

### 2.3.5. Absorció

A la taula 2.4 consten els valors d'absorció corresponents a cada superfície per a cada una de les sis bandes de freqüència d'estudi.

	Superfície	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sostre	Contraplacat de fusta	109,49	82,12	54,74	27,37	21,90	21,90
	Ressonador circular 1	46,92	32,85	100,89	178,31	152,50	77,42
Terra	Terra audiència	2,56	2,56	2,56	5,12	5,12	5,12
	Seients	155,91	212,60	272,83	315,35	290,55	248,03
Paret esquerra	Texturglas	28,28	20,20	12,12	10,10	8,08	8,08
	Pedra	0,51	0,51	0,51	1,03	1,03	1,03
	Ressonador circular 1	4,86	3,40	10,45	18,47	15,80	8,02
	Portes 1, 2 i 3	4,28	5,71	7,14	8,56	8,56	7,14
Paret dreta	Texturglas	28,28	20,20	12,12	10,10	8,08	8,08
	Pedra	0,51	0,51	0,51	1,03	1,03	1,03
	Ressonador circular 1	4,86	3,40	10,45	18,47	15,80	8,02
	Portes 4, 5 i 6	4,28	5,71	7,14	8,56	8,56	7,14
Paret frontal	Boca d'escenari oberta	51,30	68,40	85,50	102,60	102,60	85,50
	Frontal sota escenari	0,16	0,16	0,16	0,32	0,32	0,32
Parets posteriors	Paret fons (Texturglas)	8,54	6,10	3,66	3,05	2,44	2,44
	Murs separació audiències	15,24	11,43	7,62	3,81	3,05	3,05
	Vidres cabines	12,42	16,56	20,70	24,84	24,84	20,70

Taula 2.4 - Valors d'absorció corresponents a cada superfície de la sala per bandes de freqüència

## 2.4. Resultats

### 2.4.1. Valors d'absorció total i $RT_{60}$

La taula 2.5 mostra els resultats finals d'absorció i d' $RT_{60}$  de la simulació:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Absorció total (Sabins)	478,41	492,42	609,10	737,10	670,25	513,01
Coefficient d'absorció mig	0,20	0,21	0,26	0,31	0,29	0,22
$RT_{60}$ (s)	2,53	2,50	2,30	2,11	2,20	0,49

Taula 2.5 - Valors finals d'absorció, coeficient d'absorció mig i  $RT_{60}$  per bandes de freqüència

$$RT_{MID} = 2,02 \text{ s}$$

Els resultats obtinguts s'han sotmès a una minuciosa revisió per tal de determinar-ne la seva fiabilitat. A simple vista, els valors són aparentment elevats. Tal i com s'ha exposat al capítol 1, el temps de reverberació mig teòric per una sala polivalent amb audiència hauria d'estar entre 1,20 i 1,50 s (sala plena). Els valors calculats fan referència a la sala buida, però tot així semblen excessivament alts. Amb la finalitat de realitzar una comparació objectiva, a la taula 2.6 es presenten els valors obtinguts en la simulació d'Higini Arau amb la sala buida:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$RT_{60}$ (s)	1,91	1,87	1,67	1,40	1,46	1,44

Taula 2.6 - Valors d' $RT_{60}$  de la simulació d'Higini Arau

$$RT_{MID} = 1,62 \text{ s}$$

Els valors obtinguts per Arau difereixen considerablement en comparació als obtinguts en la present simulació. A més, considerant que el temps de reverberació amb la sala plena sempre seran més baixos que si està buida, els valors són aparentment vàlids. Aquests superen subtilment el temps de reverberació recomanat. Comparant els tres valors de temps de reverberació mig s'observa que els nombres obtinguts en la simulació serien clarament excessius per a una bona audició. De fet, els valors més alts són els de les tres bandes de freqüència més greus, de manera que la intel·ligibilitat de la veu humana i, possiblement, de molts altres elements sonors, es veuria greument afectada. Aquesta exagerada vivesa de la sala no seria positiva acústicament i molt possiblement caldria tractar-la.

## 2.5. Tractament acústic

### 2.5.1. Cortines a les parets laterals

A la taula 2.4 s'observa que les parets laterals absorbeixen molt poca energia sonora en comparació a la gran superfície que ocupen. A continuació s'estudia l'efecte que tindria cobrir la totalitat de cada una de les parets laterals amb una cortina de vellut amb un gramatge de 500 a 600 g/m<sup>2</sup>. Aquest és el tipus de cortina que tapava les portes d'accés a la sala fins l'any 2004. La taula 2.7 mostra els coeficients d'absorció de la cortina esmentada.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Cortina de vellut amb gramatge 500 a 500 mg/m <sup>2</sup>	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

Taula 2.7 – Coeficients d'absorció de la cortina de vellut

A la taula 2.8 hi consten els valors d'absorció corresponents a les parets laterals amb les zones de pedra i Texturglas cobertes amb les cortines.

	Superfície	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Paret esquerra	Cortina	35,48	88,70	139,39	182,48	177,41	164,74
	Ressonador circular 1	4,86	3,40	10,45	18,47	15,80	8,02
	Portes 1, 2 i 3	4,28	5,71	7,14	8,56	8,56	7,14
Paret dreta	Cortina	35,48	88,70	139,39	182,48	177,41	164,74
	Ressonador circular 1	4,86	3,40	10,45	18,47	15,80	8,02
	Portes 1, 2 i 3	4,28	5,71	7,14	8,56	8,56	7,14

Taula 2.8 - Valors d'absorció amb tractament acústic

La taula 2.9 mostra els resultats finals d'absorció i d' $RT_{60}$  de la simulació al afegir les cortines.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
--	--------	--------	--------	---------	---------	---------

Absorció total (Sabins)	491,78	628,40	862,62	1079,79	1006,86	824,27
Coefficient d'absorció mig	0,21	0,27	0,37	0,46	0,43	0,35
$RT_{60}$ (s)	2,50	2,27	1,95	1,73	1,80	0,47

Taula 2.9 - Valors finals d'absorció, coeficient d'absorció mig i  $RT_{60}$  amb tractament acústic, per bandes de freqüència

$$RT_{MID} = 1,79 \text{ s}$$

S'observa que tant l' $RT_{60}$  com l' $RT_{MID}$  han disminuït considerablement gràcies a l'efecte de les cortines. Concretament, la incorporació d'aquest element altament absorbent ha fet disminuir molt notablement l' $RT_{60}$  a les bandes de 250, 500, 1000 i 2000 Hz, que són les que tenen més continguts energètic en termes generals. La disminució de l' $RT_{MID}$  ha estat de 0,23 s respecte la mesura inicial.

## 2.6. Conclusions

Després de realitzar aquesta simulació s'ha observat que a la sala hi conviuen elements molt i poc absorbents. El revestiment de pedra del terra i part de les parets, per exemple, contribueix molt més a la reflexió d'energia que a l'absorció. En una sala amb una vivesa tan pronunciada, aquest fet és, intuïtivament, molt poc beneficiós per la bona sonoritat de la mateixa.

També s'ha observat que les cortines que s'han afegit posteriorment tenen un gran efecte en termes d'acústica estadística, i podrien tenir-lo també en condicions reals. Caldrà analitzar, doncs, quin és el focus de la majoria de reflexions que contribueixen a disminuir la bona sonoritat de la sala. Les parets laterals podrien ser uns elements potencialment perjudicials en aquest aspecte.

En aquesta simulació s'ha valorat exclusivament el temps de reverberació segons l'absorció i la superfície de cada material present a la sala, però el càlcul podria estendre's a multitud de magnituds acústiques addicionals, com ara la claredat, la intel·ligibilitat o la presència d'ecos, entre molts d'altres.

# 3. Mesures reals

## 3.1. Sessió de mesures

### 3.1.1. Introducció

Després d'unes setmanes al Teatre-Auditori s'han pogut realitzar multitud d'audicions crítiques a espectacles de caires molt diversos. S'ha assistit a concerts de música simfònica sense amplificar, teatre amplificat i no amplificat, música amplificada i conferències, entre d'altres. S'han realitzat anàlisis subjectius de cada disciplina i s'ha assimilat la sonoritat de cadascuna d'elles. Un cop superada aquesta fase s'ha realitzat un estudi objectiu de la sonoritat de la sala, és a dir, una caracterització acústica amb paràmetres estandarditzats.

En aquesta fase d'estudi es realitza una quantificació i parametrització de les percepcions adquirides en la fase d'audició subjectiva ja esmentada, amb la finalitat de fer un diagnòstic del comportament acústic de la sala des d'un punt de vista purament objectiu. El conjunt de paràmetres utilitzats és acceptat universalment com a estàndard per a la caracterització de sales.

S'han pres com a referència dues fonts totalment fiables i consistents. D'una banda, els continguts i metodologies rebuts a la universitat, específicament a l'assignatura Acústica Arquitectònica. De fet, aquest projecte segueix de ben a prop tots els continguts de l'assignatura, i és un perfecte exemple d'aplicació pràctica del contingut proporcionat en aquesta. D'altra banda, els continguts dels anteriors estudis realitzats a la sala, especialment la *Caracterització Acústica de l'Auditori del Centre Cultural de Sant Cugat del Vallès* realitzat per Antoni Carrión l'any 1995, han estat una altra de les referències.

### 3.1.2. Objectius

L'objectiu d'aquesta sessió és obtenir la resposta impulsional de la sala en diferents punts per valorar objectivament l'acústica de la mateixa. Després de l'obtenció de les respostes impulsional es prepararan les dades obtingudes per a la posterior anàlisi. La valoració es durà a terme mitjançant l'estudi del temps de reverberació ( $RT_{60}$ ), la claredat ( $C_{80}$  i  $C_{50}$ ) i la definició (factor  $D$ ), paràmetres que s'obtidran gràcies a eines informàtiques d'anàlisi de dades.

### 3.1.3. Preparació

A continuació es realitza una descripció exhaustiva de la sessió de mesures efectuada per la caracterització acústica de la sala.

#### 3.1.3.1. Dades generals

- Data de la sessió: 18 de maig de 2016
- Equip de treball: Daniel Hernández
- Condicions de mesura:
  - Sala buida
  - Escenari sense conxa acústica (configuració teatre)
  - Temperatura: 24 °C
  - Humitat relativa: 47 %

#### 3.1.3.2. Inventari

A continuació es detalla la llista d'elements utilitzats en la sessió de mesures:

- Ordinador portàtil amb *Smaart* v7.0
- Targeta de so
- 2 micròfons de mesura
- 2 suports de micròfon
- Altaveu autoamplificat
- Suport altaveu
- 3 cables XLR mascle - XLR femella llargs



### 3.1.3.3. Configuració

#### 3.1.3.3.1. Física

La configuració que s'ha utilitzat és simple i totalment habitual en el context de mesures en sales. És pràcticament idèntica a la utilitzada a la caracterització de Carrión de 1995. El cervell del sistema és l'ordinador, i l'eina d'anàlisi, l'*Smaart*. La targeta de so actua com a complement de l'ordinador i permet disposar de les entrades i sortides necessàries per realitzar la sessió. S'han utilitzat dues entrades pels micròfons de referència i mesura, i una sortida per transmetre el so que produeix l'excitació a la sala a través de l'altaveu. L'altaveu s'ha situat a 1,70 m del terra i s'ha orientat cap al públic, amb la intenció de provocar l'efecte que provocaria un instrument musical o un locutor en una situació real. El micròfon de referència s'ha ubicat just davant de l'altaveu, a una distància d'1 m, i ha restat estàtic durant tota la sessió. L'altre micròfon, el de mesura, ha estat l'encarregat de recollir la mesura en cada un dels punts d'anàlisi. S'ha posat a una alçada d'1,20 m, que correspon, aproximadament, a la distància al terra d'un cap d'una persona asseguda.

La directivitat dels dos micròfons utilitzats segueix un patró omnidireccional, mentre que el patró de cobertura de l'altaveu és de 110° x 60°. Teòricament, aquesta cobertura hauria de fer arribar energia sonora constant a tota la zona de mesures.

#### 3.1.3.3.2. Smaart

Per efectuar i processar les mesures s'ha utilitzat el *software Smaart*, l'eina d'anàlisi acústica més estesa i utilitzada en aquest camp. *Smaart* opera en dos modes de mesura diferents: temps real (*Real-Time*) i resposta impulsional (*Impulse Response*). S'han utilitzat ambdós modes per adquirir les dades desitjades. S'ha configurat el programa de manera que les dues entrades de la targeta de so es visualitzin a la pantalla simultàniament. A part de visualitzar i processar, *Smaart* també disposa d'una eina per generar senyals d'excitació per a tot tipus de context. La documentació d'*Smaart* recomana el soroll rosa pel tipus d'experiment que s'ha realitzat.

Abans de realitzar cap mesura ha estat precís configurar correctament els valors de la mida de l'FFT i del nombre d'amitjanaments en el càlcul de la resposta impulsional. Aquests dos paràmetres determinen la duració de la mesura. El valor

triat per la mida de la finestra de l'FFT ha estat 32k, que és un valor força alt. Això és degut a que aquest paràmetre va lligat a la mida del recinte on s'efectuï la mesura. A major mida de la sala, més llargues han de ser les captures, i per tant més gran ha de ser la finestra. El nombre d'avitjaments determina la quantitat de respostes impulsional que realitza Smaart en una sola mesura. En aquesta sessió s'han utilitzat 16 avitjaments. El benefici d'utilitzar valors d'avitjament alts és millorar l'SNR de les mesures, en perjudici, però, del temps que triga Smaart a realitzar-les. Com que en aquesta sessió de mesures s'ha disposat de temps il·limitat s'ha optat per triar valors alts, amb la finalitat d'obtenir uns resultats nets i fàcils d'analitzar.

També s'han configurat els senyals de referència i mesura per a una correcta visualització de la funció de transferència. S'han ajustat els guanys d'ambdós senyals perquè coincidissin de forma aproximada en amplitud, amb la finalitat de que no es produïssin grans salts d'un senyal a l'altre.

#### 3.1.3.4. Punts de mesura

El criteri per establir els punts de mesura en aquest experiment ha estat purament intuïtiu, no està fonamentat en cap teoria establerta. S'han distingit dues zones de mesura separades: platea i amfiteatre. S'ha decidit tractar aquestes dues seccions de la sala separatament fonamentalment per la separació física entre elles, i les conseqüències que aquest fet implica en la resposta sonora de la sala. El volum de la platea és molt gran i la presència de so directe és molt alta, de manera que és molt susceptible a la generació de reflexions. A la zona de l'amfiteatre succeeix justament el contrari: té un volum baix i l'arribada de so directe és baixa. Aquesta diferència notòria de comportaments acústics justifiquen el tractament per separat de la platea i l'amfiteatre.

S'han triat 7 punts de mesura en cada una de les dues zones distingides. Els punts s'han distribuït en l'espai de manera intuïtiva buscant possibles diferències en la trajectòria i el comportament dels rajos sonors. S'han triat posicions potencialment conflictives acústicament (*i.e.* a la butaca més propera de la paret lateral, a la última fila de butaques, etc.) i d'altres que no necessàriament ho són *a priori*. Als apartats 3.1.3.4.1. i 3.1.3.4.2. es llisten els punts exactes on s'ha situat el micròfon de mesura en cada una de les mesures.

### 3.1.3.4.1. Platea

- Fila 15, butaca 32
- Fila 13, butaca 2
- Fila 8, butaca 16
- Fila 1, butaca 32
- Fila 3, butaca 6
- Fila 9, butaca 32
- Fila 14, butaca 16

La figura 3.1 mostra la situació dels punts de mesura en el plànol de la platea.

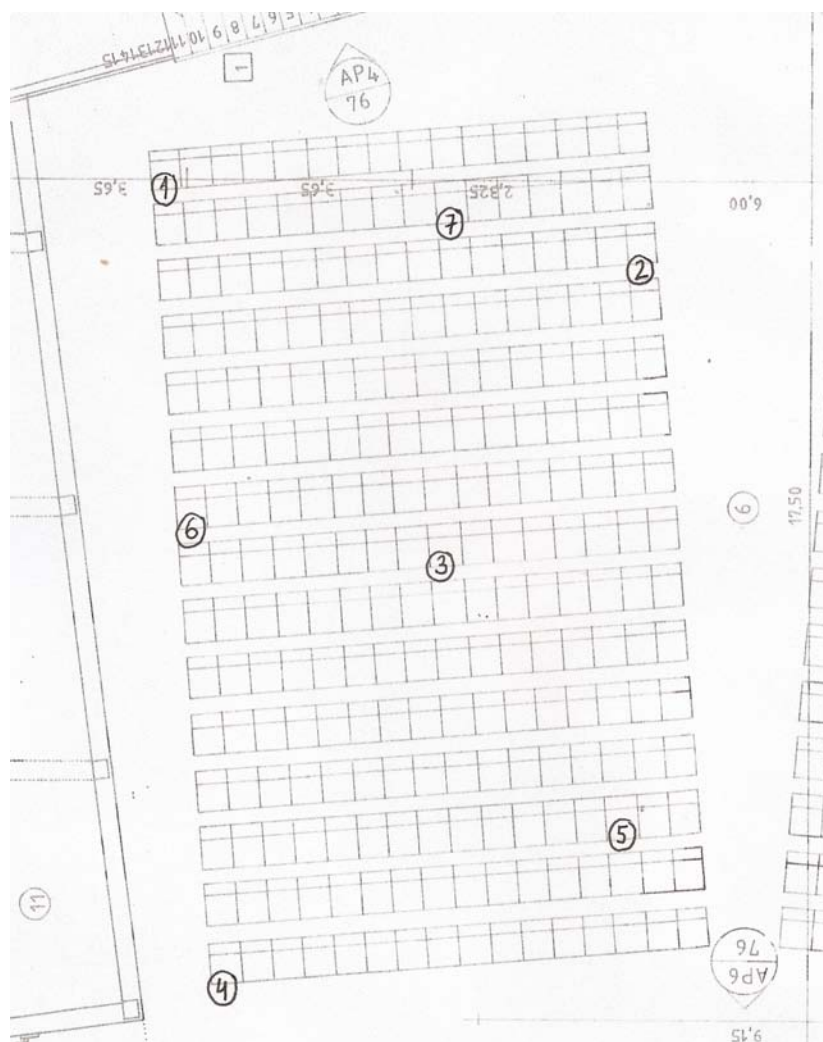


Fig. 3.1 - Ubicació dels punts de mesura a la zona de platea

### 3.1.3.4.2. Amfiteatre

- Fila 1, butaca 40
- Fila 1, butaca 18
- Fila 1, butaca 6
- Fila 4, butaca 28
- Fila 7, butaca 40
- Fila 7, butaca 16
- Fila 5, butaca 12

La figura 3.2 mostra la situació dels punts de mesura en el plànol de l'amfiteatre.

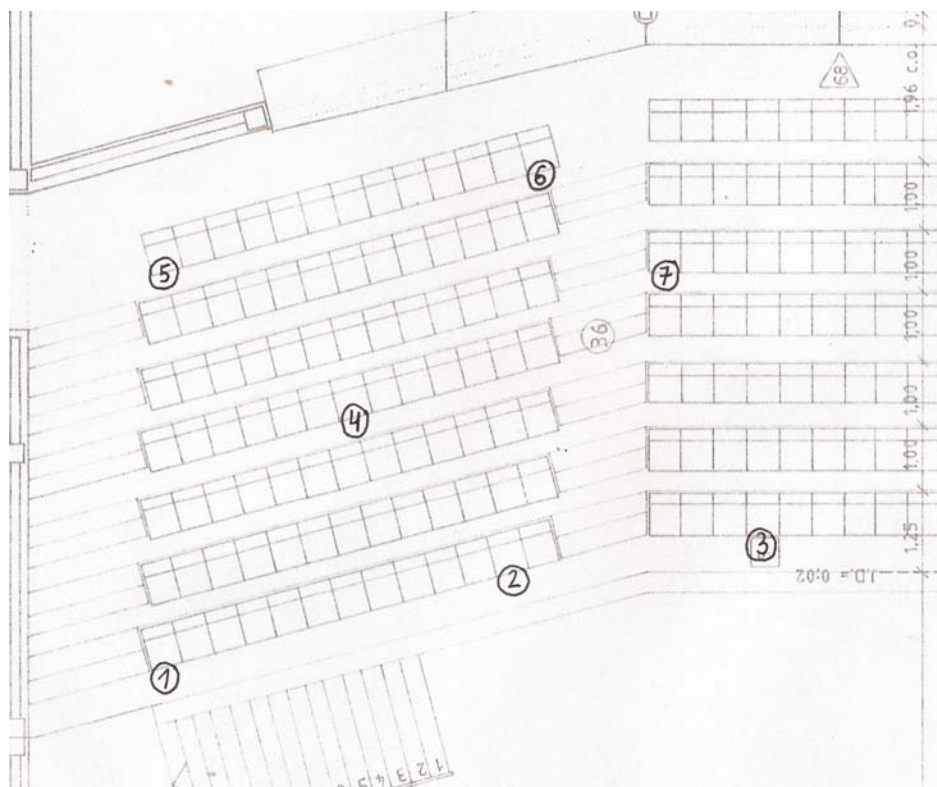


Fig. 3.2 - Ubicació dels punts de mesura a la zona de l'amfiteatre

## 3.1.4. Protocol de mesura

### 3.1.4.1. Mesures extretes

Per a cada mesura realitzada s'han extret dos tipus de dades. D'una banda, s'ha extret la resposta impulsional de cada punt de mesura en format WAV. Aquests arxius contenen una secció d'àudio amb la resposta de la sala a un impuls. Recordi's que la resposta impulsional conté els valors de magnitud en funció del temps. D'altra banda, s'han exportat els valors de la funció de transferència trobada a cada mesura a un fitxer de text, de manera que cada arxiu conté la resposta en freqüència de cada punt mesurat. El resultat *material* de la sessió de mesures ha estat, doncs, 7 arxius *.wav* i 7 arxius *.txt*.

### 3.1.4.2. Tractament de les dades

Un cop finalitzada la sessió de mesures ha estat precís tractar part de les dades per a preparar-ne l'anàlisi. Concretament, els fitxers de text s'han importat a un llibre *Excel* per a facilitar-ne la comprensió i la manipulació. Els fitxers contenen la informació de la magnitud de cada mesura per a valors de freqüència continguts entre 10 Hz i 20 kHz. Cal puntualitzar, però, que els valors de magnitud obtinguts per a freqüències entre 10 i 40 Hz manquen de sentit, ja que tots ells coincideixen en un mateix nombre: 1234,56789. S'interpreta que això és degut a que l'altaveu amb que es van realitzar les mesures no era capaç d'emetre freqüències entre aquests dos valors, de manera que han estat omesos.

Quant als arxius que contenen les respostes impulsional, s'han importat els 14 arxius d'àudio en un projecte d'*Audacity*, cadascun d'ells en una pista diferent. Posteriorment, s'han analitzat amb el complement d'*Audacity* anomenat *AURORA Acoustical Parameters*. Aquest *plug-in* és una eina de d'anàlisi acústica objectiva que permet, entre altres coses, calcular multitud de paràmetres acústics a partir d'una resposta impulsional, com ara el temps de reverberació o la sonoritat. L'eina calcula un total d'14 paràmetres acústics en 10 bandes de freqüències diferents (de 31,5 Hz a 16 kHz). No obstant, tot i disposar d'una gran base de dades de cada mesura, l'estudi s'ha centrat únicament en 5 paràmetres i en 6 bandes de freqüència, ja que la major part de la informació acústica més rellevant es pot trobar en aquesta secció de dades seleccionada.

Desgraciadament, en cada una de les graelles de dades de cada mesura es repeteix l'aparició de nombrosos valors nuls, sobretot en el cas del  $T_{20}$  i del  $T_{30}$ . Aquest fet ha dificultat molt la manipulació i la anàlisi del temps de reverberació.

### 3.1.4.3. Resultats d'interès

Els paràmetres acústics seleccionats per a l'anàlisi són el temps de reverberació ( $T_{20}$  i  $T_{30}$ ), l'índex de claredat ( $C_{80}$  i  $C_{50}$ ) i el factor de definició ( $D$ ).

*AURORA* no dóna el temps de reverberació a través de l' $RT_{60}$  convencional, sinó que ho fa a través de la mesura del temps de decaïment de la reverberació. Considerant un decaïment lineal, els paràmetres  $T_{20}$  i  $T_{30}$  corresponen al temps que tarda el so en decaure 20 i 30 dB, multiplicat per 3 i per 2, respectivament, respecte el seu punt de màxima energia inicial. Noti's que, tot i mesurar els temps de decaïment per a valors de 20 i 30 dB, el temps de reverberació sempre s'expressa per un decaïment de 60 dB.

## 3.2. Resultats

### 3.2.1. Platea

Després de realitzar un intensiu anàlisi de la resposta freqüencial en cada punt de mesura es poden observar dos tipus de comportament força diferenciats. D'una banda, les mesures 3, 4, i 7, que corresponen a posicions allunyades de l'eix de la sala, presenten una resposta molt similar, amb molt pocs pics sobtats i una resposta relativament plana. La mesura 5 ressegueix bona part de les respostes esmentades, amb la diferència que el decaïment a freqüències altes és molt menys pronunciat. De fet, la mesura 5 és la més plana i la que té una resposta més elevada a totes les freqüències. Possiblement això vingui donat per la notable proximitat entre aquest punt de mesura i la font.

Per contra, les mesures 1, 2 i 7 tenen un comportament molt més irregular, amb molts canvis de magnitud continus i pics molt sobtats i exagerats. Tot i això, totes les respostes comparteixen dues propietats. Una d'elles és l'alta ressonància de freqüències inferiors a 100 Hz, sobretot en les mesures 2 i 6. L'altra, és un pic comú clarament visible a 8 kHz aproximadament, on coincideixen la totalitat de les mesures. S'intueix també el mateix fenomen a 12 kHz. L'aparició d'aquest pic a tan alta freqüència pot ser degut a la presència de vibracions provocades per algun element que vibra dins la sala, o per algun fenomen similar. En qualsevol cas, seria estrany parlar de ressonància de la sala, ja que la longitud d'ona a 8 kHz és molt petita.

La gràfica de la figura 3.3 mostra el comportament de la sala en els diferents punts de mesura de la zona de la platea.

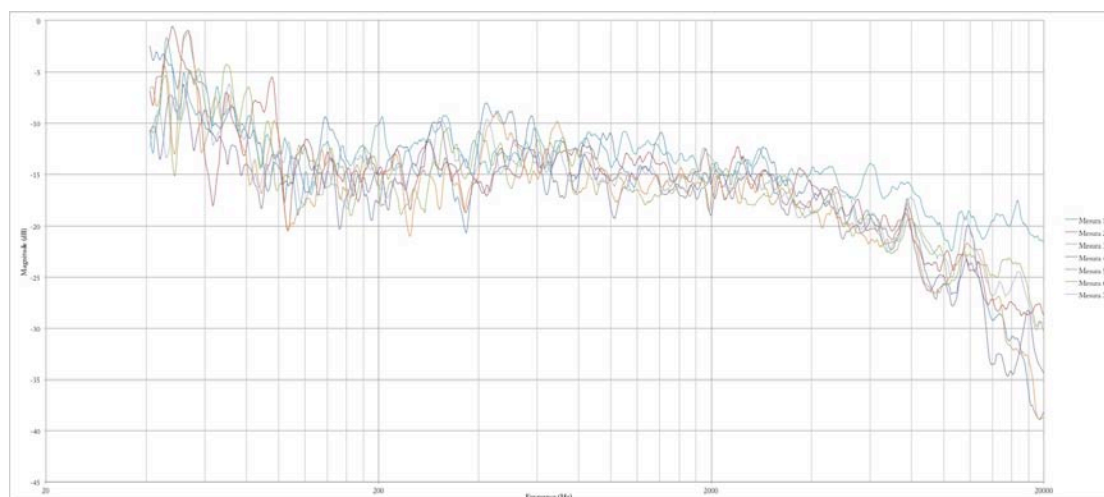


Fig. 3.3 - Gràfica de la resposta freqüencial de la sala en els 7 punts de mesura de la platea

### 3.2.2. Amfiteatre

El comportament acústic de l'amfiteatre és notablement més suau que el de la platea. Els símptomes són els mateixos que s'han trobat en el comportament de la platea, però amb una representació més moderada. Tots els punts de mesura presenten una concentració pronunciada d'energia a freqüències molt baixes, entre 40 i 45 Hz. Com en el cas de platea, també presenten un pic clarament visible a 8 kHz. La punt de mesura 5, situat al vèrtex de l'amfiteatre, presenta alguns pics sobtats al llarg de l'espectre. La resta de punts de mesura presenten petits pics, però cap d'ells té un comportament exagerat. En general, la resposta freqüencial de l'amfiteatre és força estable entre els punts de mesura analitzats. La gràfica de la figura 3.4 mostra el comportament de la sala en els diferents punts de mesura de la zona de l'amfiteatre.

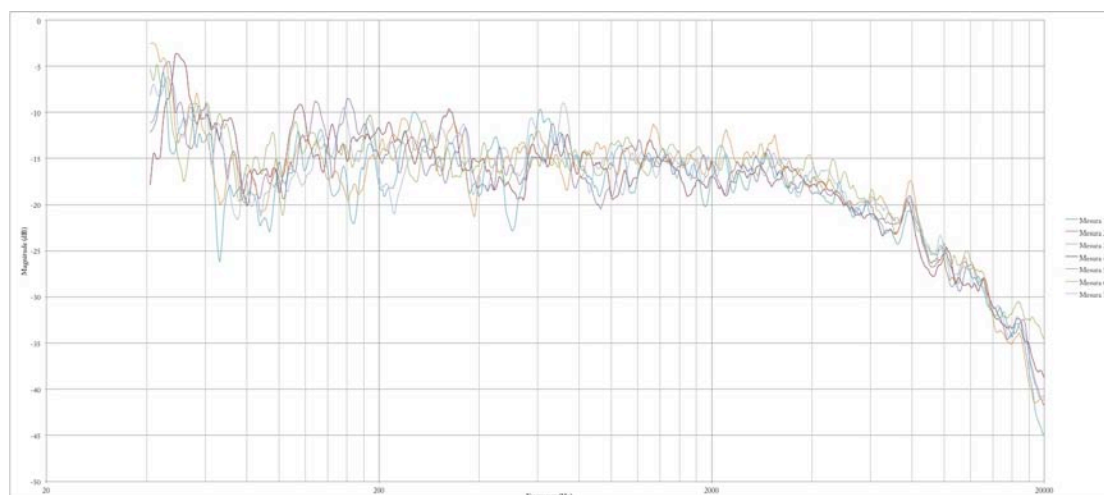


Fig. 3.4 - Gràfica de la resposta freqüencial de la sala en els 7 punts de mesura de l'amfiteatre

### 3.3. Conclusions

Després de realitzar la sessió de mesures i d'analitzar-ne els resultats es pot concloure que la audició a la sala és bona en general. Cal comentar, però, que s'ha detectat que es produeixen ressonàncies força notables a baixes freqüències, concretament entre 40 i 100 Hz, i possiblement hi hagi algun element vibrador present a la sala que ressona a 8 kHz.

Pel que fa la zona de platea, l'audició és generalment bona. La meitat més propera a l'escenari (files 1 a 8) aparentment no presenta trets problemàtics que puguin perjudicar la bona audició. La meitat de la platea més allunyada de l'escenari (files 8 a 16), en canvi, presenta possibles irregularitats auditives a les butaques properes al passadís i a la paret.

La zona d'amfiteatre té un comportament molt regular en tota la seva superfície i presenta una bona audició en general. Únicament s'ha detectat la presència d'una notable ressonància de baixes freqüències als vèrtexs posteriors de l'amfiteatre. L'acumulació de freqüències greus en aquest racó és un focus potencial de mala audició en aquesta zona.



# 4. Conclusions i línies de futur

## 4.1. Recapitulació

En els dos anteriors capítols s'ha analitzat l'acústica de la sala del Teatre-Auditori de dues formes molt diferents. D'una banda, amb la simulació s'ha fet una anàlisi teòrica del comportament acústic de tots els elements presents a la sala. S'ha determinat l'absorció de cadascun d'ells per a posteriorment calcular alguns paràmetres acústics. D'altra banda, la sessió de mesures ha servit per obtenir una resposta acústica real de la sala. S'han utilitzat eines informàtiques d'anàlisi que han permès extreure'n els paràmetres acústics. Aquests dos procediments són totalment habituals en el camp de l'acústica arquitectònica i s'han dut a terme de forma curosa.

### 4.1.1. Valoració dels resultats obtinguts

#### 4.1.1.1. Reverberació

Durant el transcurs d'aquest projecte s'han trobat valors d' $RT_{60}$  provinents de diferents experiments. Tant en la simulació d'Arau com en la caracterització de Carrión, el temps de reverberació és el principal paràmetre d'anàlisi. Així doncs, s'ha disposat de valors d' $RT_{60}$  obtinguts d'una simulació i d'una sessió de mesures, que han estat plenament útils per comparar-los als obtinguts en aquest projecte. De fet, han servit per certificar la versemblança dels valors obtinguts. La figura 4.1 mostra la

gràfica comparativa de l' $RT_{60}$  obtingut en els diferents estudis (simulacions i sessions de mesures) realitzats a la sala. Noti's que el temps de reverberació obtingut a la sessió de mesures es presenta com a  $T_{20}$  i  $T_{30}$  i. Tots els valors han estat obtinguts amb la sala buida.

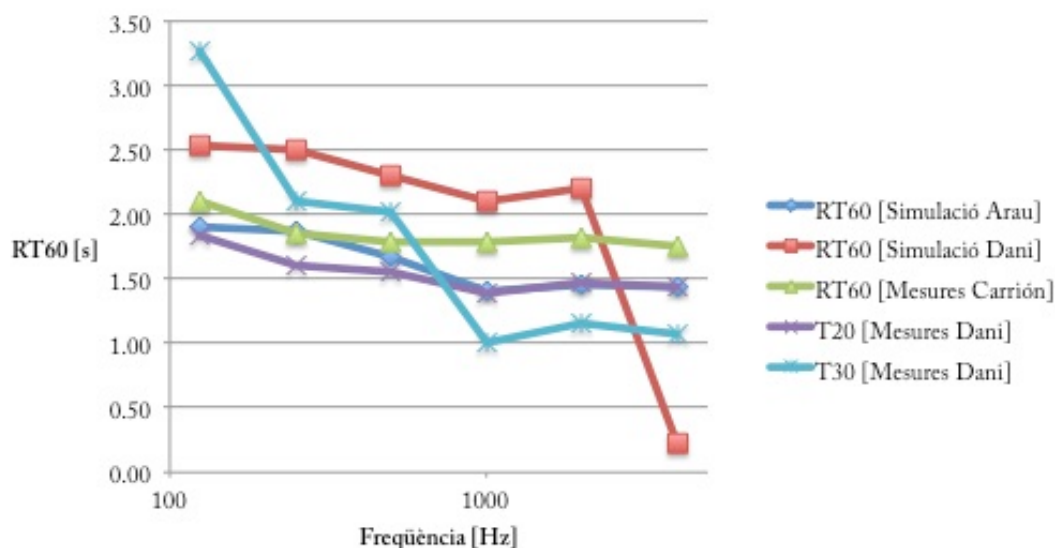


Fig. 4.1 - Gràfica comparativa de l' $RT_{60}$  obtingut en cada estudi

A la gràfica s'observa que hi ha tres sèries de valors que apareixen molt properes entre sí, i també que segueixen una línia amb canvis suaus d'una banda de freqüències a l'altra. Aquestes sèries corresponen a la simulació d'Arau, la caracterització de Carrión i el  $T_{20}$  de la sessió de mesures realitzada en el present projecte. La simulació d'Arau dóna uns valors lleugerament més alts que els obtinguts en les sessions de mesures. L' $RT_{60}$  obtingut per Carrión gairebé ressegueix els nombres obtinguts en la simulació d'aquest projecte. Aquest fet confirma la fiabilitat dels valors obtinguts en la sessió de mesures.

Les dues sèries restants corresponen als resultats de la simulació i al  $T_{30}$  de la sessió de mesures. En ambdós casos, l'observació dels valors porta a concloure que són susceptibles de ser incorrectes. En el cas de l' $RT_{60}$  de la simulació, els temps són més de 0,50 s més alts que els obtinguts per Arau. Es pot observar que a la banda corresponent als 4 kHz el valor cau en picat i és molt proper a 0. Molt possiblement, aquesta diferència sobtada en els valors és deguda al factor  $4m$  de la fórmula Sabine, que s'ha utilitzat per a calcular l' $RT_{60}$ . Qualsevol petita variació en el valor de la humitat relativa ha provocat grans canvis en els valors finals. Per a major comprensió,

veure la figura 1.12. Per aquest motiu es posa en dubte també la fiabilitat de la resta de valors obtinguts en la simulació teòrica. Pel que fa als valors de  $T_{30}$ , en una gran proporció de mesures realitzades el comportament del paràmetre ha estat molt canviant. És per això que s'ha considerat que la fiabilitat d'aquests resultats és totalment dubtosa.

És destacable que l' $RT_{60}$  en totes les sèries de valors és més elevat a baixes freqüències, sobretot a la banda de 125 Hz. En les bandes restants, el temps de reverberació és més moderat i presenta un comportament gairebé pla a totes les freqüències analitzades.

Pel que fa a l' $RT_{MID}$ , els valors obtinguts es mostren a la taula 4.1.

Estudi	$RT_{MID}$ [s]
Simulació Arau	1,62
Simulació Dani	2,02
Mesures Carrión	1,85
Mesures Dani [ $T_{20}$ ]	1,55
Mesures Dani [ $T_{30}$ ]	1,77

Taula 4.1 - Valors de l' $RT_{MID}$  obtingut a cada estudi

Dels valors considerats prèviament com a fiables, s'observa que el valor mig calculat a partir de  $T_{20}$  és el més baix en comparació als altres dos. Aquest valor és 0,30 s més baix que l'obtingut de la sessió de mesures de Carrión, fet que també posa un dubte la seva correctesa.

#### 4.1.1.2. Claredat i definició

A banda de temps de reverberació, en aquest projecte s'han valorat dos altres paràmetres acústics que aporten informació molt reveladora sobre les capacitats sonores d'un recinte: la claredat i la definició. En aquest projecte, ambdós paràmetres s'han trobat només en les sessions de mesures reals, no en les simulacions.

Pel que fa a la claredat, en la simulació realitzada s'han obtingut els valors de  $C_{50}$  i  $C_{80}$ . En la caracterització de Carrión es van obtenir també ambdós valors, però malauradament el  $C_{80}$  es va calcular amb la conxa acústica, de manera que queda automàticament exclòs de la comparativa de resultats. El valor de claredat musical mig obtingut a la sessió de mesures és de 6,27 dB. El valor recomanat de claredat musical en cada punt de la sala pot oscil·lar entre -4 i 0 dB. El valor obtingut està clarament

per sobre del marge recomanat. Considerant que el valor obtingut no és erroni, la interpretació d'aquest valor tan alt de  $C_{80}$  és que la proporció d'energia fins a 80 ms és molt més alta que l'energia a partir de 80 ms. Com que la sala s'ha avaluat amb un senyal continu, possiblement aquesta explicació només tindria sentit si s'hagués excitat la sala amb un impuls.

Quant al  $C_{50}$ , el valor obtingut en l'estudi de Carrión és d'1,35 dB, contra els 1,16 dB obtinguts en aquest projecte. El valor recomanat de claredat de la veu en cada punt d'una sala ha d'estar per sobre dels 2 dB, de manera que els valors obtinguts en ambdues sessions de mesura són insuficients per assegurar una bona intel·ligibilitat de la paraula. De fet, en molt poques de les 14 mesures realitzades durant la sessió el valor de  $C_{50}$  supera els 2 dB, fet que confirma la falta d'intel·ligibilitat general a la sala. Aquest fet es veu agreujat a la zona de l'amfiteatre, on els valors de  $C_{50}$  oscil·len entre 0 i 1 dB.

Pel que fa a la definició de la sala, tant els valors obtinguts en la simulació com els obtinguts per Carrión són alts, tractant-se de 68,13% i 57,00%, respectivament. Es considera que una sala té una bona definició quan el valor és superior al 50% en cada punt d'una sala, per a cada banda de freqüències. La definició mitjana en els dos casos estudiats supera aquest nombre, de manera que, en termes generals es pot considerar que la sala té una bona definició. No obstant, el fet que els valors de definició difereixin en 11 punts resta fiabilitat al valor obtingut a la sessió de mesures. S'observa que els valors de definició, al igual que els de claredat de la veu, són més baixos a l'amfiteatre que a la platea.

#### **4.1.1.3. Comentaris dels treballadors**

El Teatre-Auditori disposa d'un equip de tècnics de so residents que realitzen i supervisen tots els muntatges i dissenys de so que es duen a terme a la sala dia rere dia. En aquest projecte s'ha comptat amb la paraula de Nicolás de Ángel, el tècnic de so habitualment present durant la majoria d'espectacles que es realitzen a la sala. De Ángel és ple coneixedor de les propietats acústiques de la sala i està totalment familiaritzat amb multitud de registres sonors.

D'una banda, ha valorat molt positivament el comportament acústic del recinte amb la configuració de sala de concerts. Aquesta configuració incorpora la conxa acústica i és utilitzada quan el TASC acull música simfònica. De Ángel ha destacat la satisfacció amb el comportament acústic de la sala en presència de la conxa acústica.

Ha comentat que el seu disseny, tant de formes com de materials, és òptim per aconseguir una ressonància i una reverberació natural, i que juntament amb les característiques de la sala, fa que sigui ideal per a música simfònica.

Per contra, de Ángel ha destacat que les bones prestacions de la sala en context de música simfònica fan que, precisament, perjudiqui el comportament en altres contextos. Pel que fa a teatre, l'elevada vivesa de la sala fa que la reverberació es converteixi en quelcom antinatural, dificultant així greument la intel·ligibilitat i al credibilitat psicoacústica de l'espectacle. Ha afegit que les tasques de microfonatge són dificultoses a causa d'aquest fet, ja que les múltiples reverberacions són captades pels micròfons i tornen a emetre's per la PA. Ha assenyalat que aquest fet comporta l'aparició de fenòmens del tipus filtres pinta, reverberació metàl·lica i sonoritat poc realista. En resum, el tractament del so en context de teatre és una tasca molt difícil i molt marcada per les propietats acústiques inherents a la sala.

Pel que fa a la música amplificada, el ventall de problemes s'estén més encara. De Ángel ha destacat l'excessiva proporció de senyal amplificada que torna ser captada pels micròfons i el fort rebot del so de PA a en parets, sostre i terra. La sala actua com un amplificador natural difícil de controlar i influeix molt en l'audició per part del públic. Ha destacat l'inadequat comportament de la sala quan aquesta acull música amb un elevat component percussiu (*i.e.* música *Pop*, *Rock* o *Jazz*), ja que es tracta de sons amb molt d'atac, curts i brillants, provocant així que la sonoritat sigui estrident i poc definida i que tingui una enorme presència de reverberacions. En canvi, quan es tracta de músiques amb atacs més lents (*i.e.* cantautors, dansa clàssica o música de cambra) l'efecte no és tan dramàtic, i fins i tot, en alguns casos, la sala pot arribar a afavorir.

Nicolás de Ángel ha assenyalat també l'irregular comportament de les baixes freqüències en diferents punts de la sala. Ha comentat que les parets són un focus de cancel·lacions de freqüències greus, i que l'aparició de interferències destructives i constructives varia segons la col·locació dels altaveus de greus.

Finalment, de Ángel ha comentat que si la sala disposés d'algun sistema físic altament absorbent (*i.e.* cortines a les parets laterals) es podria tractar l'acústica de la sala segons les propietats que requereix l'espectacle present. Això atenuaria la vivesa de la sala i faria que, d'una banda l'audició en teatre fos més realista, i de l'altra que aquesta fos més controlable en espectacles amplificats. Ha puntualitzat que aquesta solució

possiblement seria efectiva en altes freqüències, i que per tractar les baixes probablement caldria realitzar reformes més dràstiques que podrien no ser factibles.

## 4.2. Conclusions

La conclusió més notòria després de tots els estudis i anàlisis realitzats en aquest projecte és que s'han confirmat les sensacions auditives adquirides des del punt de vista de l'espectador. Els diagnòstics de la simulació, de la sessió de mesures i l'entrevista amb el tècnic de la sala són plenament coincidents. I precisament aquesta coincidència enllaça amb el tret característic de la sala que s'ha destacat a l'inici del projecte: la polivalència. Tots els estudis realitzats assenyalen a certes disfuncions acústiques que possiblement posen en dubte aquesta propietat.

Cal remarcar, però, que és significatiu que la sala hagi acollit els nombrosos estudis acústics que s'han revisat en aquest projecte. La realització d'aquests estudis ha estat valorada sempre positivament per la direcció del TASC i s'han aplicat les millores que s'hi recomanen en alguns d'ells.

Realitzada la diagnosi, restaria estudiar la possibilitat d'incorporar modificacions acústiques que atenuessin o acabessin amb les problemàtiques detectades. Això inclouria, d'una banda, l'estudi dels elements físics i/o de les reformes que es podrien incorporar a la sala per tal que complís els requeriments desitjats, i de l'altra estudiar-ne la seva viabilitat segons l'explotació d'aquestes millores dins la rutina de la programació del TASC. En altres paraules, valorar si compensaria realitzar una inversió de diners i de mitjans d'acord a l'ús que se li donaria als nous elements.

# Bibliografia

Arau, Higiní (1992): *Estudi acústic de l'auditori principal del Centre Cultural de Sant Cugat*

Arau, Higiní (2004): *Estudi dels ecos en l'escenari de l'auditori de Sant Cugat del Vallès*, Estudi Acústic H. Arau

Campanini, Simone i Farina, Angelo: *"A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation mode"*

Carrión, Antoni (1994): *Estudi de l'aïllament acústic entre la sala i el vestíbul de l'auditori de Sant Cugat del Vallès*, AUDIOSCAN Enginyeria del So

Carrión, Antoni (1995): *Caracterització Acústica de l'Auditori del Centre Cultural de Sant Cugat del Vallès*

Carrión, Antoni (1998): *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Edicions UPC

Cengarle, Giulio (2013): Seminaris 2 i 3 de l'assignatura Acústica Arquitectònica, UPF

D. Henderson, Paul (2015): *"The Fundamentals of FFT-Based Audio Measurements in SmaartLive"*, Rational Acoustics

Guaus, Enric (2004): *"Teoria estadística"*

Rational Acoustics (2010): *"Getting Started with Smaart v7: Basic Setup and Measurement"*, Rational Acoustics LLC

Rational Acoustics (2015): *Smaart 7 Impulse Response Measurement and Analysis Guide*, Rational Acoustics LLC

[www.auditori.cat](http://www.auditori.cat)

[www.liceubarcelona.cat](http://www.liceubarcelona.cat)

[www.tasantcugat.cat](http://www.tasantcugat.cat)