

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

GRAU EN ING. SIST. DE TELECOM., SO I IMATGE



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudi acústic del Teatre Orfeó Montsià d’Uldecona (Tarragona)”

TRABALL FINAL DE GRAU

Autor/a:

Maria Balagué García

Tutors:

Jesús Alba Fernández

José Ramón Balagué Ortiz

GANDIA, 2020

Contingut

1. Introducció	6
1.1 Objectius	6
1.2 Estructura del projecte	6
2. Dades de partida i descripció de l'edifici	7
2.1 Teatre Orfeó Montsià. Context.	7
2.2 Dimensionat	8
2.3 Objectius de qualitat acústica	9
3. Fonaments teòrics i normativa	11
3.1 Fonaments teòrics	11
3.1.1 Paràmetres de qualitat	11
3.1.2 Teories acústiques	12
3.2 Normativa	16
4. Mesures in situ	19
4.1 Equipament	19
4.2 Metodologia i procediment	20
4.2.1 Procediment previ	20
4.2.2 Eleccions de les posicions de la font i dels receptors en la sala	20
4.2.3 Procediment de mesura	21
4.3 Resultats	22
4.3.1 Temps de reverberació amb sonòmetre	22
4.3.2 Corbes NC amb sonòmetre	24
4.3.3 Intel·ligibilitat de la veu (STIPA)	26
4.3.4 Resposta al impuls	27
4.4 Comparació de resultats	27
5. Estudi de geometria del teatre	28
5.1 Estudi de secció	28
5.2 Estudi de planta	29
6. Simulació	31
6.1 Edició del projecte	31
6.1.1 Autocad	31

6.1.2 Modelat EASE	33
6.2 Càlculs de paràmetres	36
6.2.1 Total SPL	36
6.2.2 Temps de reverberació	39
6.2.3 Claredat (C50,C80)	40
6.2.4 Definició	42
7. Interpretació de resultats	43
8. Conclusions	44
9. Bibliografia	46

Resum. L'objectiu principal d'aquest treball és fer un diagnòstic de l'estat acústic actual del teatre Orfeo Montsià d'Ulldecona i oferir possibles solucions de condicionament. L'estudi acústic presentat es basa en tres eixos fonamentals. Primer l'obtenció de paràmetres de qualitat, on es caracteritza la sala mitjançant mesures in situ. A continuació l'estudi geomètric, que defineix el comportament del camp acústic respecte la forma del recinte. I per últim la simulació acústica amb modelat 3D, proporciona una estimació dels paràmetres acústics distribuïts per totes les àrees d'audiència de la sala. Amb tots aquest estudis, es pretén concloure amb un diagnòstic detallat de les prestacions acústiques actuals del teatre.

Paraules claus : Acústica de sales, Teoria estadística, Teoria geomètrica, Reflexions, Temps de reverberació, Teatre, Condicionament acústic, Intel·ligibilitat de veu.

Abstract. The principal aim of this work treats to diagnose the ongoing acoustic state of Orfeo Montsià of Ulldecona theater and offer solutions of conditioning. The acoustic survey presented is based on three fundamental surveys. First, the study of parameters of quality, which characterizes the room by in situ measurements. Following, the geometric survey defines the behaviour of the acoustic area in relation to the form of the room. Thirdly and finally, the survey of an acoustic model simulated that provides acoustic parameters through room mapping. With all of these surveys, a detailed report of the theatre state can be concluded.

Key words. Acoustics of rooms, Statistical Theory, Geometric Theory, Reflections, Time of reverberation, Theater, Acoustic Conditioning, Intelligibility of voice.

Agraïments.

Aquest TFG ha estat possible gràcies a la col·laboració de l'Ajuntament d'Ulldecona. Vull recalcar la predisposició i recolzament de l'alcaldeessa Núria Ventura i de les regidores responsables del Teatre Orfeó Montsià, Elvira Labernia i Mónica Fabra. Al tècnic de l'Orfeó Vicent Obiol per tota l'ajuda rebuda i per la grandíssima paciència que ha tingut amb aquest projecte. Moltíssimes gràcies al Doctor en Musicologia Fernando Guarch per deixar-me la seva tarja de so. A Jordi Balagué per la immensa paciència per a donar-me la formació en AutoCad 3D. També al despatx d'enginyeria acústica ARION ACÚSTICS per deixar-me el laboratori i el software de simulació.

Maria Balagué Garcia.

1.INTRODUCCIÓ

El teatre Orfeó Montsià de la població catalana d'Ulldecona, pertanyent a la comarca del Montsià situada a l'extrem sud de la província de Tarragona, presenta unes condicions acústiques deficientes, especialment per a esdeveniments de tipus musical. I així ho venen percebent tant músics i actors que participen des de l'escenari com el públic que assisteix als diferents actes culturals que s'organitzen cada temporada.

1.1 OBJECTIUS

Aquest Treball Final de Grau tracta d'estudiar de manera minuciosa el comportament del camp sonor produït en l'interior del recinte. En concret s'estudiarà els elements constructius des del punt de vista geomètric així com la influència de les característiques dels revestiments associats a cada una de les superfícies que formen la *pell interior* del teatre i que poden afectar a la qualitat acústica de la sala.

Un cop identificats els problemes acústics derivats de les formes i orientacions de les superfícies i de les característiques d'absorció dels materials, s'aportaran possibles solucions a implementar per aconseguir un comportament acústic adequat tant per a música com per a teatre.

1.2 ESTRUCTURA DEL PROJECTE

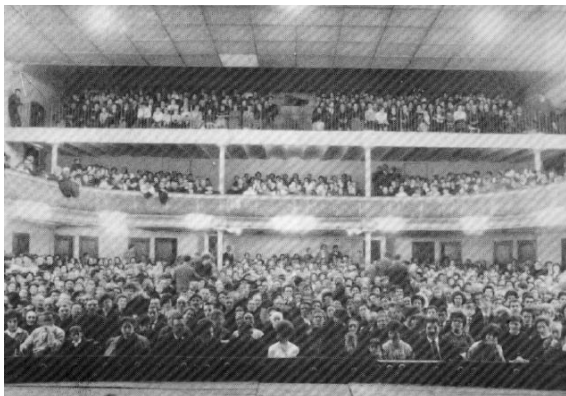
L'estudi acústic que es presenta en aquest TFG abasta les etapes, ben diferenciades, que es descriuen breument a continuació:

- **Introducció**, objectius i estructura del projecte
- **Descripció, contextualització i dimensionat de la sala.** Considerant un ús polivalent del recinte, s'establiran criteris de qualitat acústica que haurien d'assolir-se per a un òptim comportament. Els requisits acústics s'han de fixar amb un compromís tal, que música i veu han de compassar-se adequadament.
- **Conceptes i normativa.** Descripció teòrica i conceptual dels paràmetres que s'analitzaran per a obtenir un diagnòstic objectiu. Normativa aplicada als diferents procediments de mesura.
- **Mesuraments.** En aquest punt s'exposen les diferents *mesures in situ* efectuades durant el mes de juliol de 2020 en el Teatre Orfeó Montsià d'Ulldecona. S'estudien els diferents resultats obtinguts i es detalla els procediments emprats seguint la normativa de referència.
- **Estudi geomètric** on s'analitza la influència de les formes i orientacions de les superfícies, l'objectiu és identificar certes concentracions no desitjables d'energia sonora i la manca de primeres reflexions en punts específics de la sala.
- **Simulació acústica.** Aquest capítol se centra en la simulació mitjançant un software de simulació acústica anomenat EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers). També es detalla tot el procés de modelat 3D adaptat per a l'eina software. La simulació realitzarà càlculs de les magnituds energètiques que determinaran la qualitat acústica del recinte.
- **Interpretació de resultats.** Fet l'estudi geomètric, els mesuraments *in situ* i la simulació, cal interpretar els resultats i obtenir un diagnòstic clar del problema. És ací on conflueix la part experimental, la teòrica i la simulació per a reproduir de manera fidedigna la realitat del problema.
- **Conclusions.** S'emeten les conclusions de l'estudi, i s'aporten plantejaments de possibles millores a dissenyar i implementar en un proper treball.
- **Annexes.** Es presenten els resultats detallats de tots els punts mesurats.

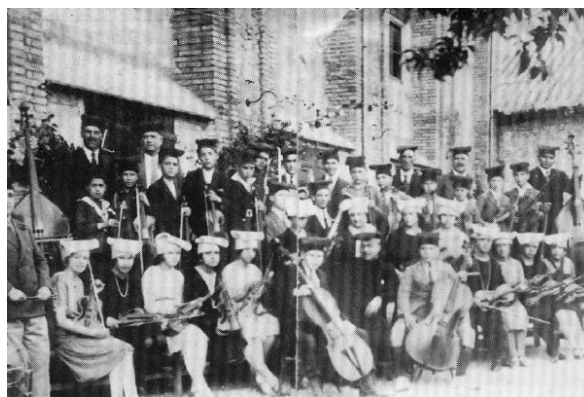
2. DADES DE PARTIDA I ESCRIPCIÓ DE L'EDIFICI

2.1 TEATRE ORFEÓ MONTSIÀ. CONTEXT

El teatre Orfeó Montsià fou inaugurat l'any 1924, d'estil noucentista va ser dissenyat per l'arquitecte Pau Montguió. Sorpren les dimensions i l'aforament d'un recinte destinat a una població de poc més de 6000 habitants als anys 20. La construcció del teatre va ser sufragada per pràcticament tot el poble a partir de la constitució de l'Orfeó Montsià en 1922. En poc temps se formà una orquestra amb 40 músics.



Il·lustració 2 : Teatre Orfeó Montsià en 1924 [8]



Il·lustració 1 : Orquestra de 40 músics[7]

Avui és habitual referir-se a usos polivalents en la construcció de nous espais culturals, però el teatre Orfeó Montsià fou, des d'un inici, pensat per a un ús molt versàtil. Com a mostra, aquest cartell de 1935 on s'anuncien fins a 4 activitats en un mateix dia. *Vermout dansat* a les 11, *Funció de CINE* a les 4, *GRAN BALL* a les 6, i a les 9 de la nit *inauguració de la temporada de teatre amb la bonica i divertida sarsuela La Dolorosa, música del mestre Serrano i lletra de Joan J. Lorente*.



Il·lustració 3 : Cartell publicitari d'activitats del teatre Orfeó Montsià[8]

Després de la guerra civil, l'activitat cultural va anant recuperant-se poc a poc. Torna l'Orfeó, a partir d'ara anomenat Orfeó Ulldeconenc, i l'any 1955 s'inicien les representacions de la Passió d'Ulldecona, que durant molts anys han estat uns dels segells culturals més importants de la zona.

A les representacions de la Passió era significativa l'assistència de públic des de Castelló, València i principalment de pobles de la Safor.

Jornades de teatre, concerts de música de banda, corals i tota mena d'esdeveniments culturals omplen d'activitat el vell Teatre Orfeó Montsià durant pràcticament tot l'any.

Als anys 70 es va realitzar una remodelació de l'edifici, amb la incorporació de material altament absorbent en parets i butaques dintre la sala de teatre. Des de llavors no s'han produït intervencions de rehabilitació rellevants respecte l'acústica de la sala



Il·lustració 5 : Teatre Orfeó Montsià en l'actualitat



Il·lustració 4 : Cartell de la passió d'Ulldecona

2.2 DIMENSIONAT

Situat al carrer Major nº 147 d'Ulldecona, la sala de teatre s'alça amb planta de ferradura per a la platea i parets laterals quasi paral·leles en primera i segona planta. Cal ressaltar que l'espai de la segona planta està tancada al públic des de ja fa uns quants anys per qüestions de compliment normatiu, encara que es tindrà en compte el volum per als càlculs de qualitat acústica.

A continuació es mostra el dimensionat de la sala relatiu a paràmetres acústics:

Volum sense caixa escènica (V)	3092 m ³
Aforament (N)	668 seients
Àrea d'audiència (S _A)	419 m ²
Volum de la caixa escènica (V _{CE})	1811 m ³
Relació V/N	4,6 m ³ /seient
Relació V/S _A	7,3 m
Us predominant	Teatre, música i presentacions

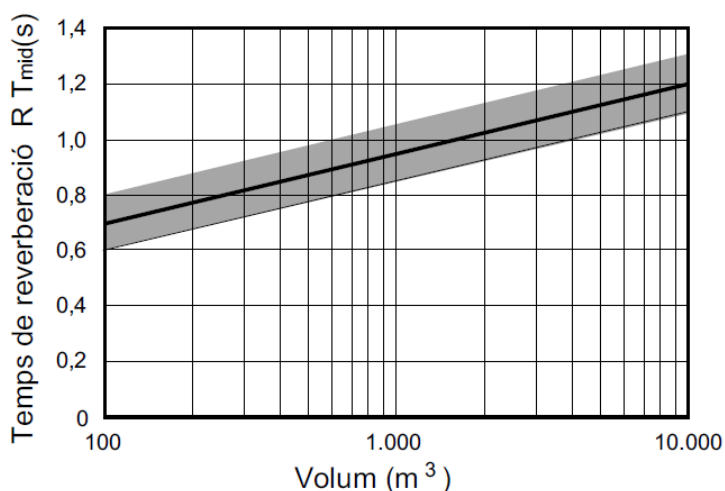
2.3 OBJECTIUS DE QUALITAT ACÚSTICA

Dintre d'aquest apartat, s'estableixen, per a dos tipus d'usos els valors òptims recomanables dels diferents paràmetres.

MÚSICA	
Paràmetres	Criteri
Temps de reverberació (T_{MID})	$1,2 \leq T_{MID} \leq 1,6$ s
Claredat de veu (C_{50})	-
Claredat de música (C_{80})	$-2 \leq C_{80} \leq 2$ dB
Definició (D)	-
Lluentor (Br)	$0,87 \leq Br$
Calidesa (BR)	$1,10 \leq BR \leq 1,35$
Intel·ligibilitat (STI)	$> 0,5$
Soroll de fons	NC-15

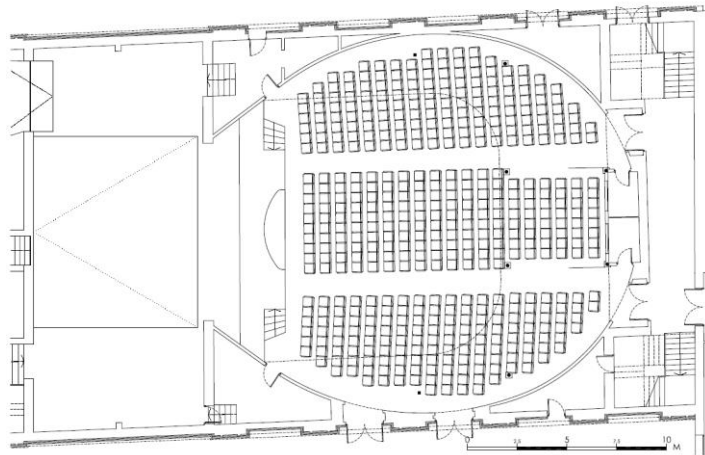
TEATRE	
Paràmetres	Criteri
Temps de reverberació (T_{MID})	$0,85 \leq T_{MID} \leq 1,2$ s
Claredat de veu (C_{50})	$C_{50} > 2$ dB
Claredat de música (C_{80})	-
Definició (D)	$D > 0,50$
Lluentor (Br)	$Br > 0,8$
Calidesa (BR)	$0,9 \leq BR \leq 1,3$
Intel·ligibilitat (STI)	$STI > 0,65$
Soroll de fons	NC-15

Per a teatre, el temps de reverberació, en funció del volum de la sala, s'ha obtingut a partir de la gràfica de dimensionat de Beranek publicada per Antoni Carrión. [1]

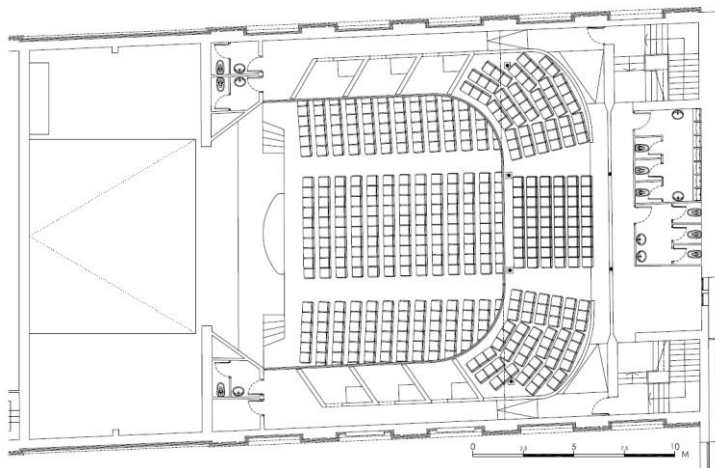


Il·lustració 6 :: Recomanació del temps de reverberació respecte al volum

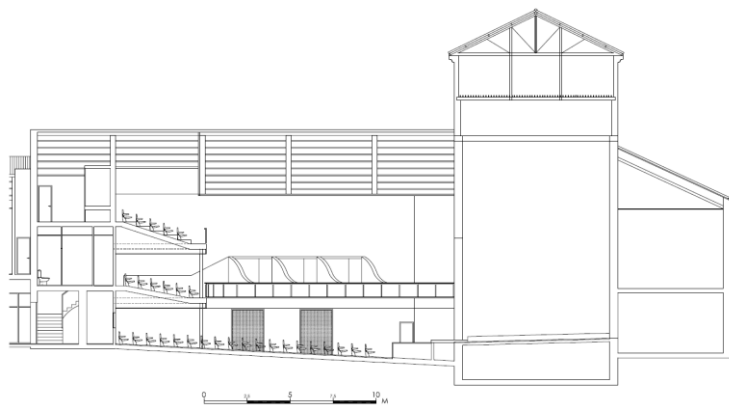
El departament tècnic de l'Ajuntament d'Ulldecona ens va facilitar aquestes tres vistes en format pdf sense escalar. Amb aquest material es va començar a preparar el model 3D.



Il·lustració 7 : Plànol de platea



Il·lustració 8 : Plànol del primer pis



Il·lustració 9 : Plànol de secció

3. FONAMENTS TEORICS I NORMATIVA

En l'anterior punt s'han fixat uns paràmetres objectiu de qualitat acústica, en aquest apartat es desenvoluparà les definicions d'aquests paràmetres i els fonaments teòrics en que es basen. A més, s'exposarà les normatives que s'han aplicat a l'hora de fer les mesures experimentals.

3.1 FONAMENTS TEÒRICS

3.1.1 Paràmetres de qualitat

Els valors de referència recomanats varien dependent de l'ús predominant del recinte. Com es tracta d'un teatre polivalent, en aquest cas, es definiran els paràmetres implicats en música i teatre.

-Temps de reverberació T_{60} (T_{10}, T_{20}, T_{30})

Temps que transcorre des de que la font de soroll es para, fins que el nivell de pressió sonora del recinte disminueix 60dB. La pendent de caiguda es pot calcular prenent diferents trams:

T_{10} (s)	Temps de reverberació des de la caiguda dels primers 10dB contats a partir del nivell estacionari des de que cau -5dB fins -15dB multiplicat per 6.
T_{20} (s)	Temps de reverberació des de la caiguda dels primers 20dB contats a partir del nivell estacionari des de que cau -5dB fins -25dB multiplicat per 3.
T_{30} (s)	Temps de reverberació des de la caiguda dels primers 30dB contats a partir del nivell estacionari des de que cau -5dB fins -35dB multiplicat per 3.
T_{mid} (s)	Mitjana del temps de reverberació corresponent a les bandes 500Hz i 1kHz. La seua expressió és: $T_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2}$

-Lluentor (Br)

El paràmetre subjectiu lluentor depèn fonamentalment de la relació entre el valor mitjà del temps de reverberació en freqüències altes (2kHz i 4kHz) i el valor mitjà del temps de reverberació en freqüències mitjanes (500Hz i 1kHz).

$$Br = \frac{TR_{2000Hz} + TR_{4000Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

-Calidesa (BR)

Indica la riquesa de baixes freqüències. Es defineix com el quocient de la mitja de baixes freqüències i la mitjana de freqüències centrals.

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

-Claredat musical (C_{80})

Relatiu a la qualitat musical de la sala. Analitza la quantitat d'energia sonora immediata que es produeix en els primers 80ms respecte a l'energia sonora tardana que es produeix després d'haver transcorregut 80ms. Si el valor és elevat, expressa que dins dels primers 80ms es produeixen moltes reflexions, afavorint una bona resposta sonora musical.

$$C_{50} = \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

- Claredat de veu (C_{50})

Avalua la qualitat de la expressió verbal d'un recinte. Analitza la quantitat d'energia sonora immediata que es produeix en els primers 50ms respecte a l'energia sonora tardana que es produeix després d'haver transcorregut 50ms. Si s'obté un alt C_{50} significa que l'energia sonora és molt tardana, i per tant, el so és clar. L'expressió matemàtica és la següent:

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

- Definició (D)

Segons *Thiele* la definició és la relació entre l'energia que arriba a l'oient dins dels primers 50ms des de l'arribada de les primeres reflexions (incloent el so directe) i l'energia total rebuda pel mateix.[1]

$$D = \frac{\text{Energia fins a 50ms}}{\text{Energia total}}$$

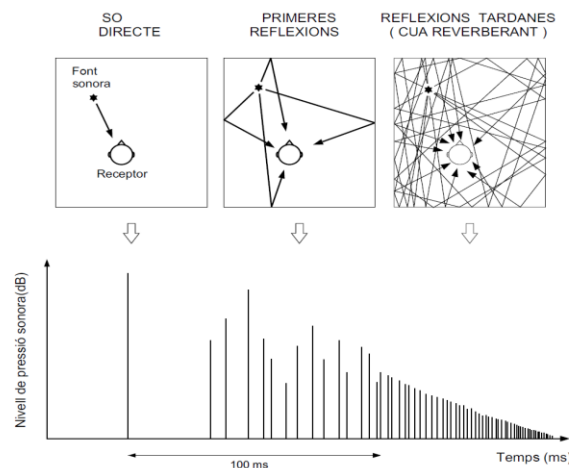
- Intel·ligibilitat (STI)

L'índex d'intel·ligibilitat (*Louchner-Burger*) es calcula amb una funció que depèn del temps de reverberació, de la relació senyal respecte al soroll de la sala i dels possibles ecos.

3.1.2 Teories acústiques

TEORIA ESTADÍSTICA

El so generat en l'interior d'un recinte tancat arriba a l'audiència de dos maneres diferents, una l'oient rep part d'energia de forma directa i per un altra li arriba procedent de reflexions, gràcies al rebot de l'ona quan incideix sobre una superfície. Aquest fenomen és molt important a l'hora de com es comporta una sala, i per això es quantifica les reflexions amb càlculs estadístics, perquè la distribució de les reflexions és aleatòria. La visualització de l'evolució temporal del so reflectit amb el nivell d'energia corresponent a cada reflexió, es denomina ecograma.



Il·lustració 10: Ecograma de l'evolució del so directe i reflexions[1]

En l'ecograma de la il·lustració 10 es pot distingir dos zones .Per una banda la primera zona que engloba el so directe ,que seria la primera delta, i les primeres reflexions. Aquest tram de primeres reflexions té un límit aproximat de 100 ms. D'altra banda la segona zona mostra les reflexions tardanes, també anomenat cua reverberant , on cada reflexió va arribant en menys energia.

Coeficients d'absorció sonora

La quantitat d'energia absorbida d'un material s'anomena coeficient d'absorció. Es tracta del quocient de la energia absorbida per una superfície respecte a l'energia incident en funció de la freqüència.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Per analitzar les propietats d'absorció dels materials és necessari tindre en compte l'angle d'incidència de les reflexions que incideixen damunt d'ells, degut a que l'absorció pot dependre de l'angle, per tant , la capacitat d'absorció és la mitjana dels valors de la contribució de les ones que incideixen des de tots el angles.

En cas de n espais de igual superfície, el coeficient d'absorció mig té la següent expressió matemàtica:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 * S_1 + \alpha_2 * S_2 + \dots + \alpha_n * S_n}{S}$$

A continuació es determina l'àrea d'absorció sonora equivalent com unitat d'absorció en m² que representa una superfície capaç d'absorbir so igual que una superfície de 1 m² totalment absorbent.

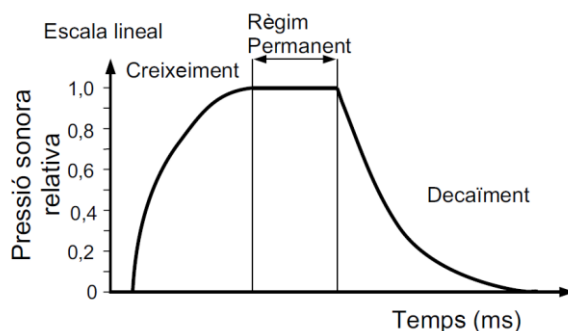
$$A = \bar{\alpha} * S$$

Temps de reverberació

Quant una font de soroll genera un so continuu en funció del temps, l'energia generada es propagada de forma lliure per la sala fins que aquesta es redueix per l'absorció de les superfícies del recinte. Però arriba a un moment que el recinte absorbeix la mateixa energia per unitat de temps que l'emesa per la font, quedant el camp acústic estacionari. A partir d'aquest moment, la densitat de d'energia mitjana de la sala roman constant. Si la font de so deixés d'emetre, la densitat d'energia sonora disminueix gradualment fins a dissipar-se. Segons les característiques absorbents i el volum de la sala, el decaïment potser més o menys abrupte.

En la il·lustració 11 es pot distingir tres parts diferents a l'evolució de la densitat d'energia sonora respecte al temps:

- La primera part, anomenat creixement, la densitat d'energia va creixent de forma gradual i continua.
- La següent part es denomina règim permanent, on s'igualen les energies generades per la font de so amb l'absorció del recinte.
- I per últim, la part de decaïment, en un determinat temps t₀ la font deixa d'emetre, com a conseqüència la densitat d'energia comença a decaure.



Il·lustració 11 : Evolució teòrica de la pressió sonora en un punt d'un recinte. Escala lineal. [1]

Es denomina el temps de reverberació al temps que transcorre en decaure 60dB l'energia que rep el receptor després de interrompre la font d'excitació (T60).

Sabine

L'expressió matemàtica de Sabine planteja, basant-se en el lliure recorregut mitjà ($l_m=4V/S$), que el temps de reverberació d'una sala està determinat pel volum de la mateixa i l'àrea d'absorció equivalent total, independentment de la distribució del material absorbent de sala.

$$T_R = \frac{0,162 * V}{A}$$

$$A = \alpha_1 * S_1 + \alpha_2 * S_2 + \dots + \alpha_n * S_n$$

La fórmula de Sabine per a calcular el temps de reverberació és una de les més utilitzades en el camp acústic, encara que solament dona bons resultats a recintes que posseeix un coeficient d'absorció mig menor o igual a 0,2.

Eyring

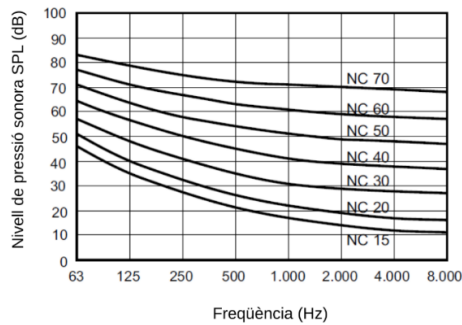
La teoria de Eyring corregeix les limitacions de l'equació de Sabine mantenint la suposició del camp difús, a més de basar-se també en el lliure recorregut mitjà.

$$RT = 0,162 * \frac{V}{-S * \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Corbes de soroll (NC)

El soroll de fons és tot aquell soroll que apareix en un recinte quan no es realitza cap activitat en la sala. Aquest soroll pot ser degut a la instal·lació d'aire, motors de la instal·lació escènica i/o provinent de l'exterior del recinte provocat pel soroll de tràfic.

Aquest soroll ambiental avalua de manera objectiva el nivell de molèstia d'un oient, mitjançant una comparació de nivells de soroll existent en un recinte, en cada banda d'octava abasta entre 63Hz i 8kHz, amb un conjunt de corbes de referència (Il·lustració 12) anomenades NC(Noise Criteria) [1].



Il·lustració 12 : Corbes NC

En la taula següent es mostra el nivell màxim de corba NC recomanable per a diferents tipus de recintes en funció de l'ús al que estan destinats.

Tipus de recintes	Corba NC
Estudis de gravació	15
Sales de concerts i teatres	15-25
Sales de conferències/Aules	20-30
Despatxos d'oficines / Biblioteques	30-35
Restaurants	35-40
Cafeteries	40-45
Poliesportius	40-50

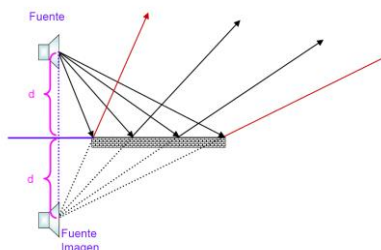
Taula 1: Corbes NC recomanades per cada tipus de recinte.

TEORIA GEOMÈTRICA

La teoria geomètrica té com a objectiu estudiar el comportament de l'ona mitjançant rajos acústics. A més, el trajecte que segueix la propagació acústica, és útil a l'hora d'analitzar la distribució del so en un recinte, el camp acústic directe i les primeres reflexions. Per un altra banda, es pot detectar focalitzacions i ecos provocats per l'orientació de les superfícies del recinte, és a dir, permet detectar factor negatius de les reflexions sonores. Aquest mètode permet proporcionar una alta fiabilitat si la longitud d'onda és menuda respecte la superfície d'incidència. Aquesta teoria es pot realitzar amb programari de simulació acústic o mitjançant software de dibuix com l'AutoCAD.

Mètode de la font imatge

El mètode d'estudi de l'acústica de sales mitjançant la teoria geomètrica es basa en construir diagrames que indiquen la trajectòria dels rajos sonors reflectits. Cada raig es pot considerar que prové d'una font imaginària (imatge) simètrica a la font real respecte a la superfície d'incidència, atenuant la intensitat inversament proporcional al quadrat de la distància recorreguda. Gràcies a la representació de la font imaginària es pot conèixer el nombre de fronts d'onda que arriben a la posició d'un oient situat en un determinat punt, il·lustració 13.



Il·lustració 13: Diagrama de font imatge i rajos reflectits

Ecós

Totes aquelles reflexions que arriben a l'oient en els primers 50 ms des de que arriba el so directe són incloses per l'oïda humana.

Es produeix quan el so de veu apareix en un punt d'escolta d'una reflexió de nivell elevat amb un retard superior a 50ms (formalment 100 ms.). És un fenomen contraproduent i un problema per a obtenir una intel·ligibilitat bona. Aquesta reflexió es denomina eco.[5]

Focalitzacions

Les focalitzacions es produeixen quan una superfície generadora de reflexions té forma còncaua i concentra l'energia reflectida a una zona concreta del recinte ocupat pel públic. Afectant de manera negativa a la uniformitat de cobertura.[5]

3.3 NORMATIVA

En aquest punt es farà una síntesis de les normatives aplicades referides a la presa de mesures experimentals i els càlculs necessaris per a aconseguir els paràmetres de qualitat i intel·ligibilitat. El present treball a seguit amb rigor dos normatives, la ISO 3382-1:2010 i la IEC6068-16:2011.

ISO 3382-1:2010

La norma ISO 3382-1:2010 defineix i explica com s'han d'elaborar les mesures de paràmetres de qualitat acústica i el temps de reverberació (TR) mitjançant respostes impulsives i de soroll interromput. A més estableix el procediment de mesura, quin equipament utilitzar i el mètode d'avaluació de les dades.

Equipament per a mesurar

- **Font acústica.** Altaveu altament omnidireccional, la taula 14 mostra la desviació màxima permesa de la directivitat de la font. Ha de superar els 45dB com a mínim de soroll de fons, en cas contrari, s'utilitza tècniques de mitjana sincrònic amb senyals pseudoaleatòries.

f (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Desviació màxima (dB)	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

Il·lustració 14 :Taula de desviació

- **Micròfon.** Omnidireccional, complint la norma CEI 60651.
- **Filtres.** Seguint les especificacions de la norma CEI 61260.
- **Sonòmetre.** Complint la norma CEI 61672-1.

Metodologia de mesurament

Han de mesurar-se les condicions de temperatura i humitat. També cal indicar l'estat d'ocupació del recinte (buit, amb músics, ocupació amb públic de 80%).

Posicions de mesura:

- Entre les posicions de mesura deixar uns 2 m., aproximadament $\lambda/2$.
- Situar el micròfon a més d'1 m. respecte la paret més pròxima, $\lambda/4$.
- L'altura del micròfon ha de ser 1,2 m. simulant la de l'oient assegut.
- Excloure posicions de mesura pròximes a la font de soroll, per evitar excessiva influència del camp directe a la font.

- S'han d'elegir almenys dos posicions de la font de soroll, a una altura de 1,5 m. del terra.

Procediment de mesures

Es vàlid dos tipus de mètodes per a mesurar el temps de reverberació: el mètode del soroll interromput i la resposta impulsiva integrada.

- Mètode del soroll interromput. S'ha d'utilitzar un altaveu i una senyal rebuda procedent d'un soroll elèctric de banda ampla aleatòria, com el soroll rosa, o pseudoaleatòria amb una relació senyal soroll que arribi a 45dB almenys en tota la banda freqüencial per a mesurar el T_{30} .

La duració abans d'aturar el soroll generat, ha de ser suficient per a que arribi a tota la sala el camps acústic, per aquesta raó, és convenient deixar uns segons no inferiors al temps de reverberació.

Una vegada obtingudes totes les mesures, cal fer la mitjana de totes les mesures realitzades, hi han formes de calcular-ho:

- Trobant els temps de reverberació individuals per a totes les corbes de decreixement i traient el valor mitjà.
- Fent una mesura del conjunt dels decreixements de pressió acústica al quadrat i trobant el temps de reverberació de la corba de decreixement resultant.

- Mètode de la resposta a l'impuls. La resposta impulsiva es pot mesurar emprant una font impulsiva o qualsevol altra font que el seu espectre siga suficientment ample per arribar a totes les bandes freqüencials. Uns altres tipus de senyals que serveixen per mesurar son els senyals acústic com escombratges seqüencials o seqüències pseudoaleatòries de longitud màxima MLS respectant els requisits de l'espectre i les característiques direccionals de la font.

Com es tracta d'un soroll aleatori és menester realitzar tres mesures de corba de caiguda i de la resposta a l'impuls, posterior es calcula la mitjana. A continuació s'explica el mètode utilitzat en el treball.

Sine sweep exponencial

Per a generar aquesta senyal ha de definir-se una senyal sinusoidal $g(t)$ amb la fase $\phi(t)$ dependent del temps.

$$g(t) = \sin(2\pi\phi(t))$$

On la fase s'expressa de la següent manera

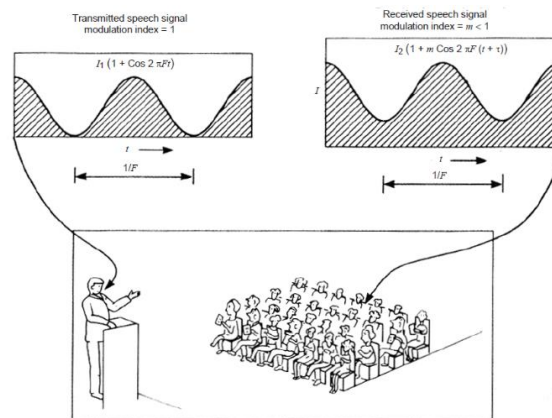
$$\phi(t) = \frac{f_1 T}{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} * \left[e^{\frac{t}{T} * \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} - 1 \right]$$

Sent f_1 la freqüència i f_2 la freqüència final del escombratge seqüencial.

INTEL·LIGIBILITAT. MESURA DEL STIPA SEGONS IEC60268-16: 2011

L'índex de transmissió de la veu (STI) mesura la qualitat de les transmissions de veu. La predicció de la intel·ligibilitat de la parla depèn d'una contribució ponderada de 7 bandes d'octava. Com a tal, el mètode STI es basa en modular en amplitud un soroll en cadascuna d'aquestes bandes d'octava, on les freqüències de modulació es trien perquè coincideixin amb les de parla natural.

La pèrdua de la modulació que es produeix al canal de transmissió representa la pèrdua de modulació de la veu parlada, i per tant, constitueix una mesura de la pèrdua de la intel·ligibilitat. El mesurament d'intel·ligibilitat es basa en mesurar les MTF (Funcions de transferència de modulació) en bandes de 7 octaves. Per a cada banda d'octava, 1 MTF quantifica el grau de conservació de la intensitat de les modulacions en aquesta banda.



Il·lustració 15: Modulació de transmissió de veu i modulació rebuda per l'audiència. [18]

El fabricant *Bose* va desenvolupar un nou mètode per mesurar la intel·ligibilitat de la parla en instal·lacions de megafonia. El resultat és STIPA, que permet proves ràpides i precises amb instruments portàtils.

STIPA aplica un procediment simplificat per a calcular el MTF, però determina una MTF analitzant les set bandes de freqüència, de manera que cada banda es modula amb dues freqüències.

Suposant que no hi ha soroll ambiental impulsiu sever i que no ocorren distorsions no lineals massives, el mètode STIPA proporciona resultats tan precisos com el mètode STI complet. No obstant això, si hi ha soroll ambiental impulsiu durant les hores normals de funcionament de sistema, s'ha de fer el mesurament en un moment més favorable.

El mètode STIPA considera totes les bandes de 7 octaves i les 14 freqüències de modulació. Aquest mètode es recollit en l'annex B de la IEC60268-16: 2011 [18].

Octave band Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
First modulation frequency Hz	1,60	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,50
Second modulation frequency Hz	8,00	5,00	3,15	10,0	6,25	4,00	12,5

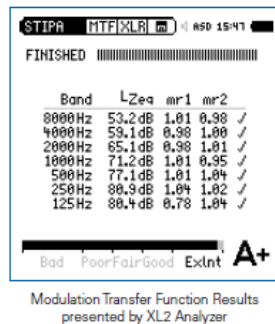
STIPA es basa en mesurar la MTF (funció de transferència de modulació). Aquesta funció quantifica el grau en què es conserven les modulacions de veu en bandes d'octaves individuals. El mètode STIPA determina la MTF analitzant les set bandes de freqüència. Cada banda es modula amb dues freqüències, el que dóna com a resultat la relació de modulació MR1 i MR2:

- MR1: freqüència de modulació ,63-2,5 Hz
- MR2: freqüència de modulació 3,15-12,5 Hz

Els nivells de MR1 i MR2 han d'estar el més a prop possible de la valor de 1,00 per a una intel·ligibilitat perfecta; com menor sigui el valor, menor serà la modulació transmesa. Tots els

Índexs combinats amb models psicoacústics proporcionen el resultat d'intel·ligibilitat de la parla de valor únic.

Aquest mètode és àmpliament utilitzat per a mesurar la intel·ligibilitat dels sistemes de megafonia per a evacuació i emergència en grans instal·lacions com aeroports, estacions de METRO o centrals nuclears.



Il·lustració 16 : Exemple de la pantalla de l'analitzador en STIPA

4. MESURES IN SITU

Per a caracteritzar el teatre Orfeó primer es van realitzar una sèrie de mesures acústiques experimentals *in situ*.

Aquest apartat correspon a la part pràctica de l'estudi acústic, on a partir de les dades obtingudes es compararen amb els resultats presentats pel simulador (*EASE*) per a poder extraure conclusions del comportament acústic del teatre.

4.1 EQUIPAMENT

El material emprat en la elaboració de les mesures estan recollits en la norma UNE-EN 3382-1:2010. La següent taula presenta els elements utilitzats.

<p>SONÒMETRE Analitzador d'audio i acústica tipus 1 de NTI model XL2</p> 	<p>FONT DE SOROLL Font omnidireccional dodecaèdrica de CESVA model BP012</p> 
<p>MICRÒFON Micròfon de 1/2" omnidireccional classe 1, tipus WS2F, N° 3083</p> 	<p>AMPLIFICADOR Amplificador per a la font de soroll de CESVA model AP602</p> 
<p>SENSE FIL Receptor: LR de Lectrosonics L series Transmissor: HMa de Lectrosonics Wideband Plug-on Transmitter</p> 	<p>CALIBRADOR Calibrador sonor tipus 1 model CB006 de CESVA</p> 
<p>GENERADOR Generador de senyal NTI model MR-PRO</p> 	<p>TARGETA DE SO Targeta de so model UA-25EX de EDIROL by Roland</p> 

Il·lustració 17 : Taula de materials utilitats.

A més s'ha utilitzat un software per al mesurament de la resposta al impuls, anomenat ARTA versió v1.9.3.

4.2.METODOLOGIA I PROCEDIMENT

La elaboració de les mesures s'inicia amb un estudi de plantejament de les posicions del receptor i font de soroll per a cada tipus de mesurament, seguint la norma UNE-EN 3382-1:2010.

Per poder obtenir la resposta al impuls, es necessita una targeta de so, en aquest cas s'ha utilitzat UA-25EX Edirol i el programa ARTA, és menester instal·lar el software a l'ordinador. També es necessari instal·lar els drivers corresponents a la tarja de so.

4.2.1 Procediment previ

Com s'ha comentat al principi d'aquest apartat hi ha dos tipus de mesures, una obtinguda amb el sonòmetre i l'altra consisteix en obtenir la resposta a l'impuls de la sala mitjançant el software ARTA. En tots dos procediments s'ha de calibrar la cadena de mesura mitjançant el calibrador classe 1 del fabricant CESVA model CB006. Respecte l'ARTA també s'ha de calibrar l'entrada i sortida de la targeta de so, en aquest punt s'explicarà els passos de preparació dels mesuraments.

Calibrat de la targeta d'àudio

Per a tindre una resposta al impuls correcta cal calibrar la entrada i sortida de la targeta de so.[14]

SORTIDA

Els passos per a calibrar la sortida son els següents:

1. Connectar el multímetre a la sortida esquerra.
2. Generar al ARTA una sinusoidal de 400Hz, *generate sine*.
3. Ingressar el valor mesurat pel multímetre, *enter volmeter value*.
4. Pulsar a estimar el màxim a la sortida, *estimate peak output*.
5. Acceptar, *accept*.

ENTRADA

Per a calibrar l'entrada es necessari :

1. Connectar el canal esquerre de sortida a la entrada esquerra.
2. Generar una senyal sinusoidal de 400Hz al ARTA, *generate sine* , i ajustar el nivell d'entrada.
3. Ingressar el valor del generador en *enter voltage*.
4. Estimar el valor, *estimate peak input* , controlant que el nivell d'entrada no s'aturi. I per últim acceptar, *accept* .

SENSIBILITAT DEL MICRÒFON

I per últim ajustar la sensibilitat del micròfon:

1. Connectar el preamplificador a la entrada.
2. Posar el calibrador al micròfon.
3. Estimar la sensibilitat del micròfon, *estimate Mic.Sensitivity*, si ix massa alta es pot ajustar amb el guany del preamplificador, *preamp. gain*.
4. Acceptar, *accept*

4.2.2 Eleccions de les posicions de la font i el receptor en la sala

Per als paràmetres de qualitat de la sala s'han utilitzat posicions basades en la normativa UNE - EN ISO 3382-1:2010, encara que s'ha superat el nombre de mostreig que recomana la normativa per a obtenir un mostreig més detallat. A més s'ha respectat l'alçada adequada de la font de soroll 1,50 m i la del receptor 1,20 m. En l'annex 3 apareixen totes les posicions per cada mesura. Respecte l'aïllament s'ha seguit la normativa UNE-EN ISO 16283-1:2011 en la decisió del nombre i llocs de posicions de la font de soroll i del receptor. En l'annex 3,4 i 5 apareix les posicions per cada mesura.

4.2.3 Procediment de mesura

L'objectiu principal d'aquest apartat és explicar de manera detallada la metodologia que s'ha emprat en cada tipus de mesura.

Les mesures amb el sonòmetre es va elaborar amb la configuració de la il·lustració 18. El generador es va utilitzar per a la mesura STI, perquè la senyal generada és coneguda per l'analitzador NTI.



Il·lustració 18 : Esquema de connexió de sonòmetre

Per a obtenir la resposta al impuls es va utilitzar la configuració de la il·lustració 19. Un ordinador amb el programa ARTA, la tarja de so com a *interface* entre ordinador i amplificador, un amplificador i una font de soroll per generar una SPL adequada. A diferència de les mesures amb sonòmetre es va fer ús d'un micròfon inal·làmbric, d'aquesta manera l'ordinador no s'ha de desplaçar i s'evita grans tirades de cablejat.



Il·lustració 19 : Esquema de connexió per a mesurar la resposta al impuls

4.3 RESULTATS DE LES MESURES

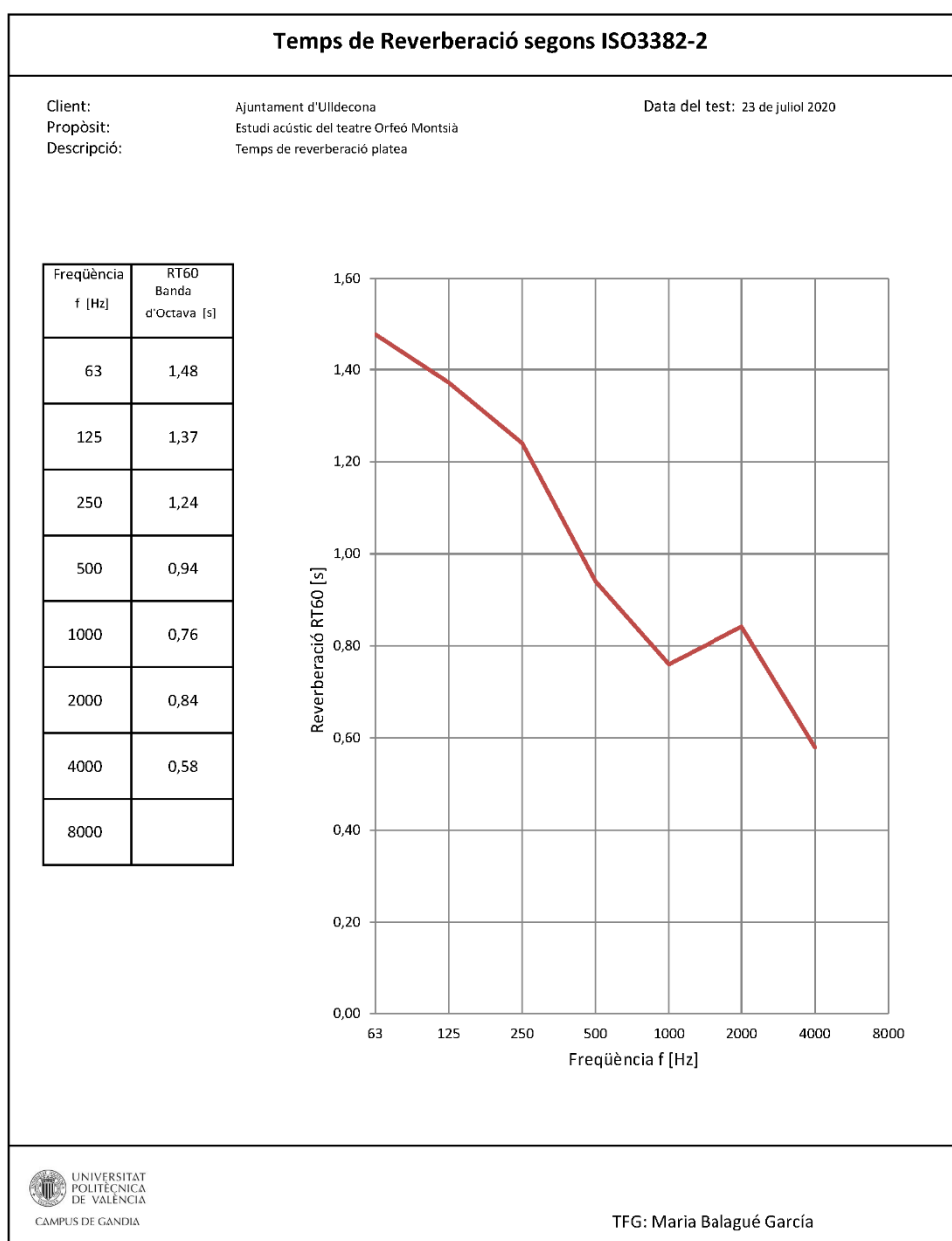
4.3.1 Temps de reverberació amb el sonòmetre

El temps de reverberació es pot mesurar en T20 i T30, però a l'hora de fer les mesures l'analitzador mostrava més errors en la corba T30. Per a questa raó, es va fer el temps de reverberació en T20 únicament. Es van capturar 6 mostres per cada posició de la font de soroll. En total es van mesurar 8 posicions a platea i 4 al primer pis, el resultat és la mitjana del mostreig.

PLATEA

El T_{mid} , mitjana del temps de reverberació a 500Hz i 1kHz, es:

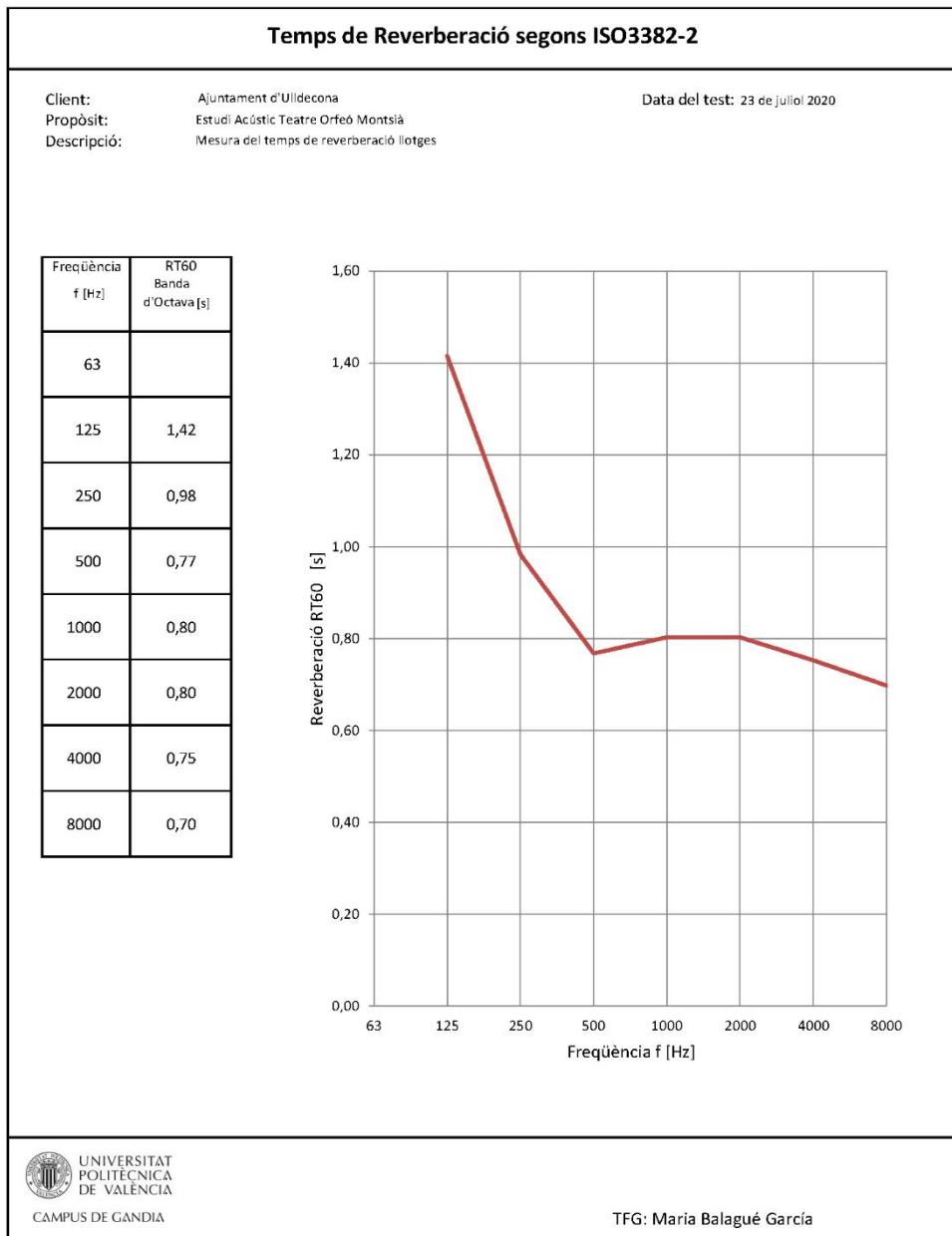
$$T_{mid} = \frac{0,94 + 0,76}{2} = 0,85s$$



Il·lustració 20 : Temps de reverberació platea

PRIMERA PLANTA

$$T_{mid} = \frac{0,77 + 0,80}{2} = 0,78s$$



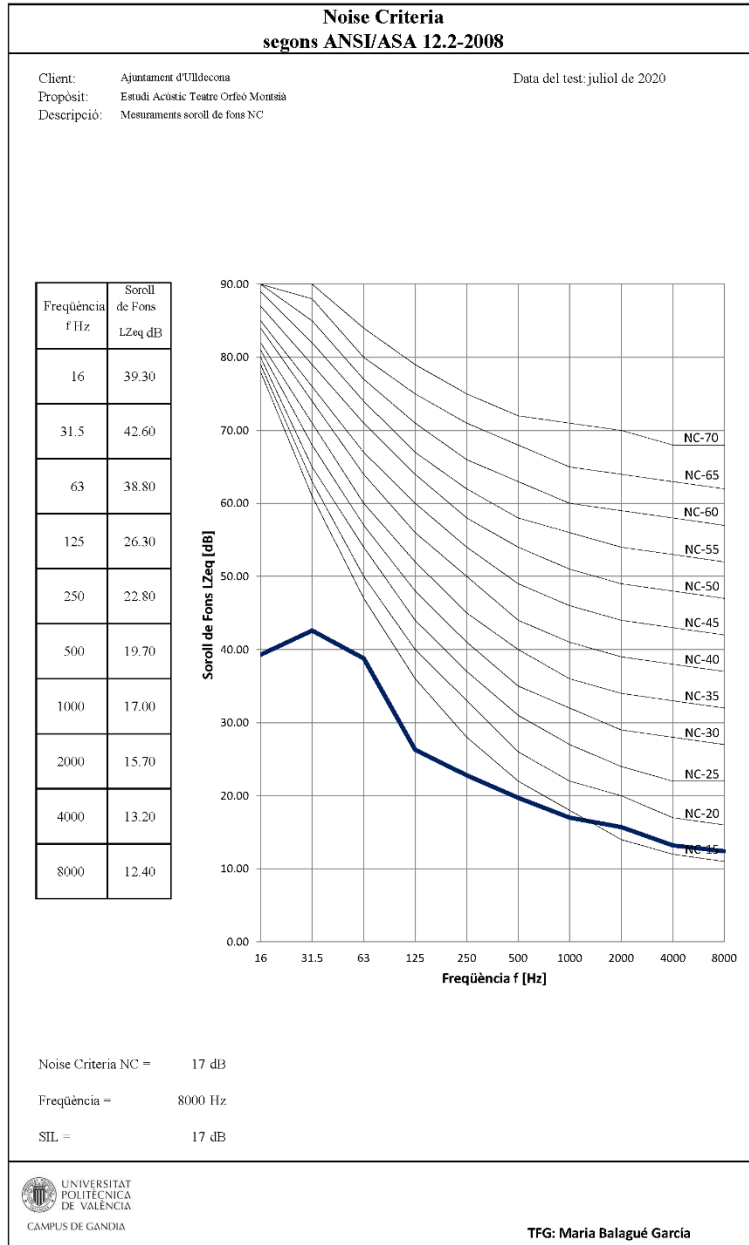
Il·lustració 21 :Temps de reverberació llotja

4.3.2 Corbes de soroll (NC) amb el sonòmetre

Es va mesurar les corbes de soroll seguint la norma ANSI/ASA 12.2-2008. Es van prendre 7 posicions a platea i 3 a llotja, en total 20 mesures. Cada mostra amb una duració de 30 segons tal com indica la normativa de referència.

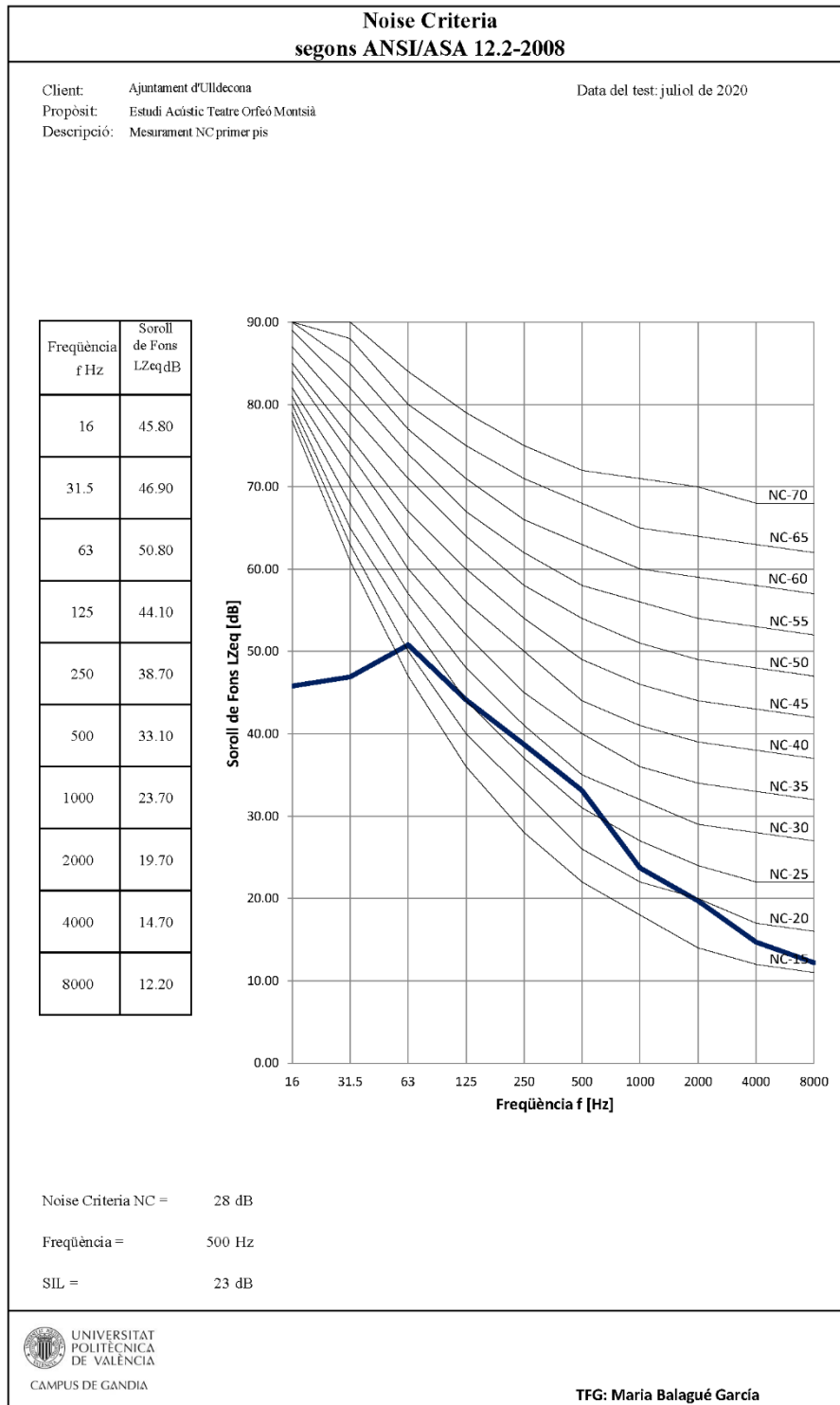
Les condicions de mesura no van comptar amb la il·luminació escènica, però sí l'aire condicionat.

PLATEA



Il·lustració 22 : Corbes de soroll platea

PLANTA PRIMERA

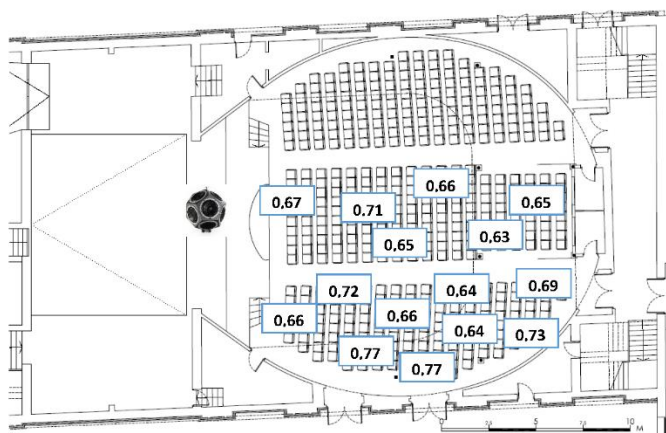


Il·lustració 23 : Corbes de soroll llotja

4.3.3 Intel·ligibilitat de la veu (STIPA)

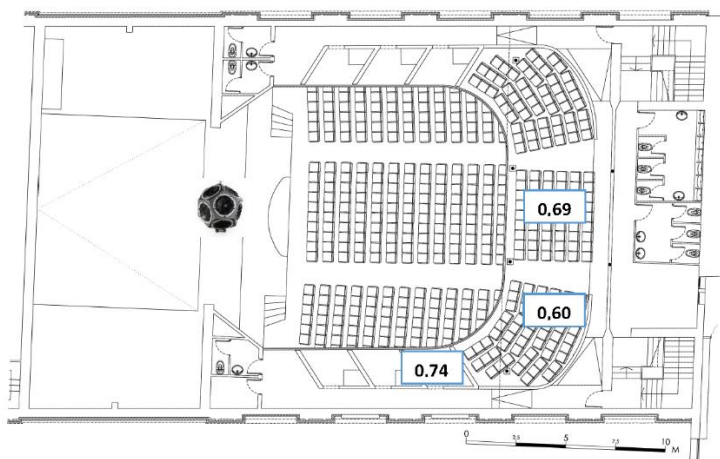
Es va poder realitzar una mesura directa de STIPA perquè l'analitzador té implementat l'algoritme per a mesurar segons la normativa IEC-60268-16:2011. Aquest procediment és recomanat per a mesurar la qualitat de sistemes electroacústics (megafonia), especialment els sistemes d'evacuació i emergència. Donada la situació de pandèmia, el sistema de megafonia del teatre no es va poder activar. Les mesures es van fer amb la mateixa font de soroll que la resta de mesures. El mostreig va ser de 15 posicions a platea i 3 a la llotja, fent un total de 18 posicions. En els annexos 1,2 i 3 està l'informe detallat de les mesures STIPA.

PLATEA



Il·lustració 24 : Mapa de mitjana de valors de STI platea

PRIMERA PLANTA



Il·lustració 25 : Mapa de mitjana de valors de STI primera planta

4.3.4 Resposta a l'impuls de la sala

Per obtenir la resposta a l'impuls es va fer un mostreig de 25 posicions a la platea i 9 al primer pis en la primera posició de font. Per a la segona posició de la font es va fer 9 a la platea i 3 al primer pis. En l'annex 3 estan les taules de paràmetres per cada mesura de la resposta a l'impuls.

PLATEA

F (Hz)	T30 (s)	T20 (s)	T10 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	BR
63	1,35	1,31	1,35	1,21	4,35	2,28	1,39
125	1,35	1,30	1,17	1,13	5,04	2,42	
250	1,18	1,15	1,08	0,92	6,60	4,11	
500	0,99	0,94	0,93	0,78	7,62	4,47	
1000	0,82	0,82	0,90	0,69	9,15	6,32	
2000	0,83	0,84	0,94	0,74	9,04	6,17	
4000	0,74	0,75	0,84	0,63	9,29	5,98	
8000	0,64	0,67	0,75	0,57	10,24	6,50	

Il·lustració 26 : Taula de valors fets una mitjana de IR de platea

PRIMERA PLANTA

F (Hz)	T30 (s)	T20 (s)	T10 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	BR
63	1,37	1,34	1,46	1,18	1,36	-1,93	1,35
125	1,35	1,28	1,22	1,01	5,17	2,32	
250	1,10	1,04	0,99	0,86	6,04	2,61	
500	0,91	0,86	0,90	0,69	7,43	4,22	
1000	0,76	0,77	0,90	0,62	8,35	5,06	
2000	0,76	0,77	0,88	0,60	9,26	6,36	
4000	0,68	0,69	0,75	0,49	10,14	6,93	
8000	0,60	0,64	0,61	0,34	12,04	8,58	

Il·lustració 27 : Taula de valors fets una mitjana de IR de la primera planta

4.4 COMPARACIÓ DE RESULTATS

Per la obtenció de paràmetres de qualitat acústica del recinte, s'han fet ús dos procediments de captura de dades diferents. Es mostra en la següent taula els resultats del temps de reverberació T20 per octava de cada dispositiu.

Freqüències (Hz)	T20 Analitzador platea (s)	T20 IR platea(s)
125	1,37	1,30
250	1,24	1,15
500	0,94	0,94
1000	0,76	0,82
2000	0,84	0,84
4000	0,58	0,75

On troben valors més separats són a altes freqüències, però a mitjanes i baixes són molts similars.

En següent taula s'ha comparat una mostra entre la quantitat de mesures que es van realitzar de STI. En la majoria de les posicions el resultat va ser molt pròxim. En general, tan un mètode com l'altre, el paràmetre de intel·ligibilitat està al voltant de 0,70. Per tant, en condicions de mesura favorables (sense soroll de fons) STI i STIPA són similars.

Posició	STI	STIPA
1 (fitxer 110)	0,67	0,71
2 (fitxer 214)	0,72	0,60
3 (fitxer 116)	0,74	0,65
4 (fitxer 127)	0,75	0,74
5 (fitxer 18)	0,68	0,69
6 (fitxer 21)	0,69	0,67

Podem verificar que els dos procediments són vàlids dintre les condicions de mesura sense cap tipus de interferència sorollosa. Per a comparar resultats amb els demés estudis (geomètric i model simulat) s'utilitzarà els resultats de la resposta a l'impuls.

5. ESTUDI GEOMÈTRIC

L'estudi geomètric mostra el comportament de la primera reflexió que genera l'onda incident sobre la superfície. Serveix per a entendre millor els resultats dels paràmetres de qualitat: definició i claredat (C50). Ens permet analitzar la distribució del so en el recinte i detectar possibles problemes com ecos, focalitzacions o *fluters* (eco flotant). Este últim problema és inexistent pel fet que el recinte no té superfícies totalment paral·leles. Per a fer aquest estudi geomètric s'ha utilitzat el software de dibuix AutoCAD.

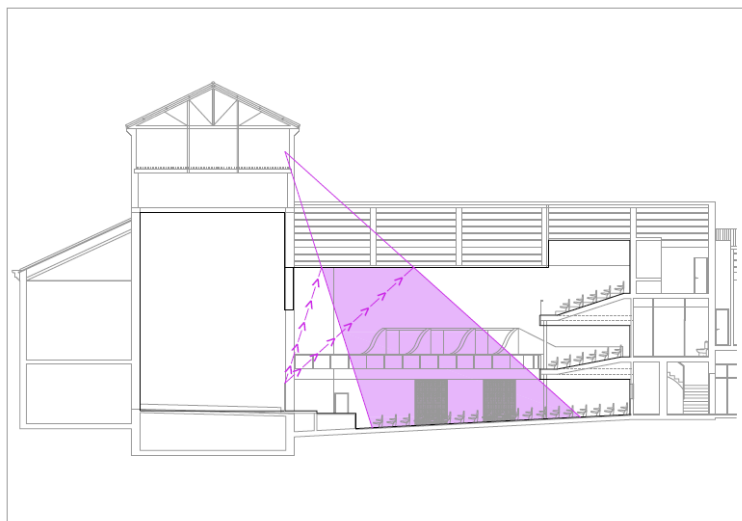
Hi han dos vistes, una des de la secció on s'avaluarà el comportament del sostre, l'altra des de planta, on s'estudiarà el comportament de les parets laterals.

Les reflexions de planta, s'han fet elaborant una perpendicular a les superfícies incident, i replicant l'angle de simetria del raig incident respecte a la perpendicular de la paret. Però a les parts corbes, s'han fet una línia tangent a la circumferència des del centre d'aquesta, i el mateix que en la paret, copiant l'angle de simetria del raig incident respecte a la recta tangent.

5.1. ESTUDI DE SECCIÓ

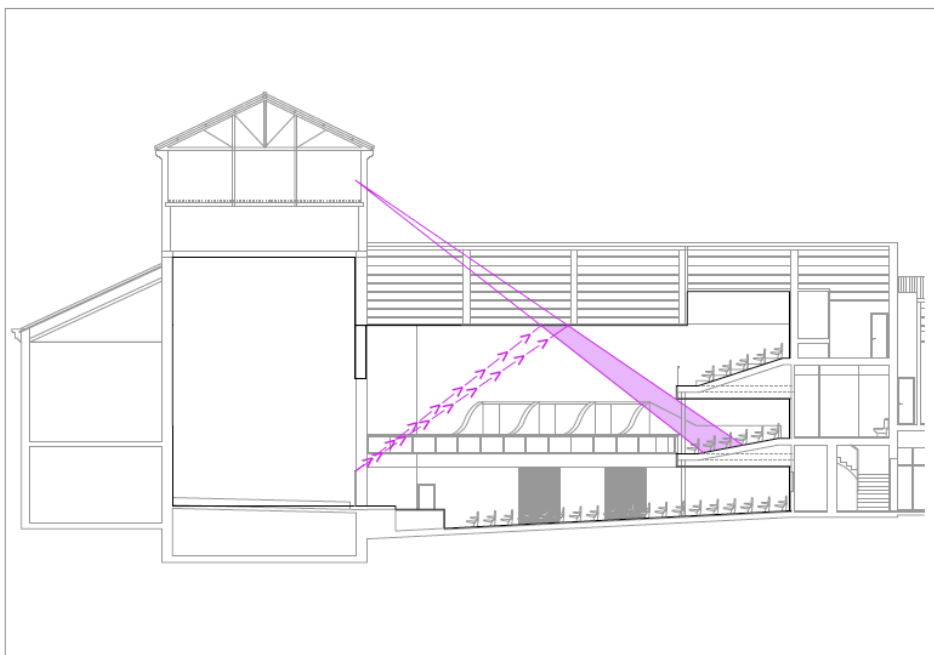
A continuació es mostra les reflexions produïdes pel sostre de la sala i originades des d'un punt de l'escenari a una alçada del terra 1,60 m (focus sonor aproximat d'una persona).

La il·lustració 28 es veu com tota la zona d'audiència de platea arriba reflexions de primer ordre del sostre menys les tres ultimes files, això es degut al forjat del primer pis que s'interposa a la trajectòria.



Il·lustració 28 :Secció longitudinal. Reflexions del sostre a platea.

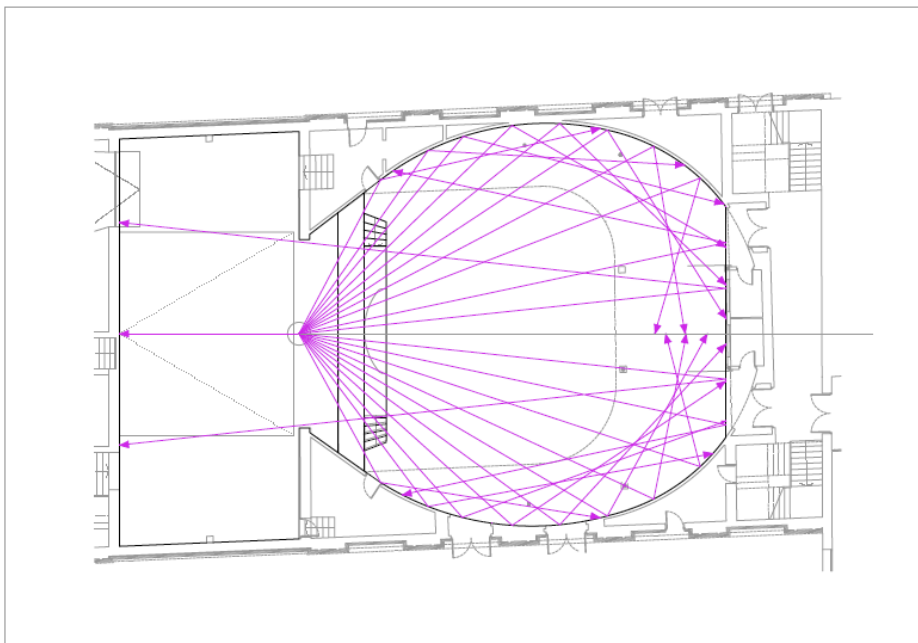
El sostre també genera primeres reflexions a tota la primera planta (inclòs llotges), excepte a les darreres tres files. Al igual que en platea, el sostre de poca alçada obstrueix la trajectòria de l'ona sonora. Tal com es pot apreciar en la il·lustració 29.



Il·lustració 29 :Secció longitudinal. Reflexions del sostre al primer pis.

5.2. ESTUDI DE PLANTA

La planta de platea es pot aproximar a una forma de ferradura, àmpliament utilitzada en teatres i recintes d'òpera. Com es pot comprovar en la il·lustració 30, manquen reflexions laterals en bona part de la platea i es formen focalitzacions a les files més properes de la paret. Això es degut a la concavitat de les parets laterals.

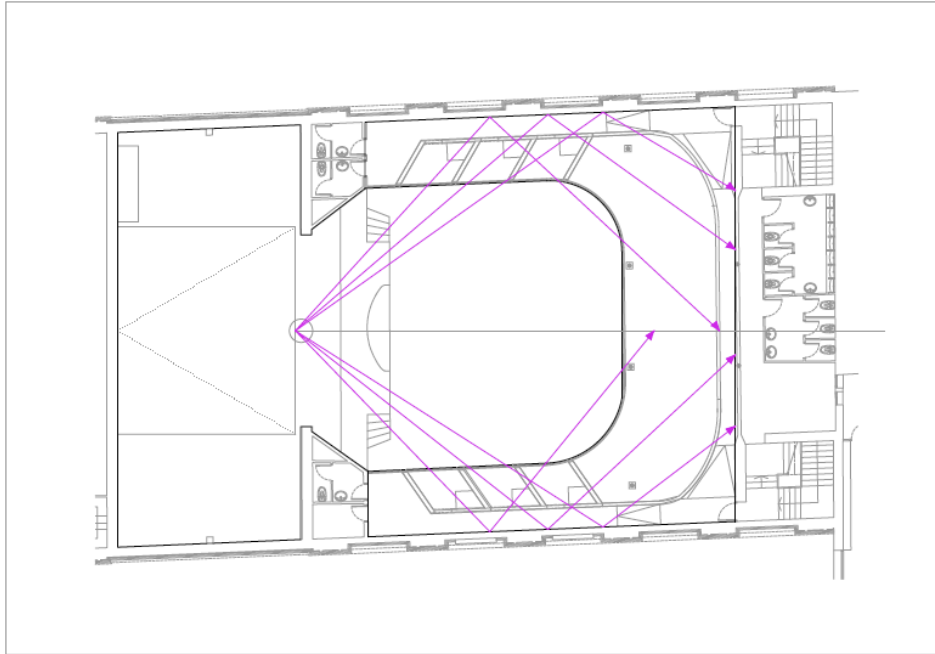


Il·lustració 30 :Planta. Reflexions laterals platea.

Es dona la circumstància que la manca de reflexions, en les files posteriors, provinents del sostre es compensa per la quantitat de reflexions laterals.

L'única superfície candidata a provocar un eco a l'escenari es la paret posterior, que està situada a més de 17 m. I per tant, capaç de generar reflexions amb més de 50 ms de retard respecte a l'ona directa.

Les reflexions de la planta primera estan representades en la il·lustració 31. A diferència de la platea mostra una distribució uniforme del camp sonor i no presenta focalitzacions, com a conseqüència de la forma de les superfícies sense curvatura.



Il·lustració 31 :Planta. Reflexions laterals primera planta.

6.MODEL ACÚSTIC SIMULAT

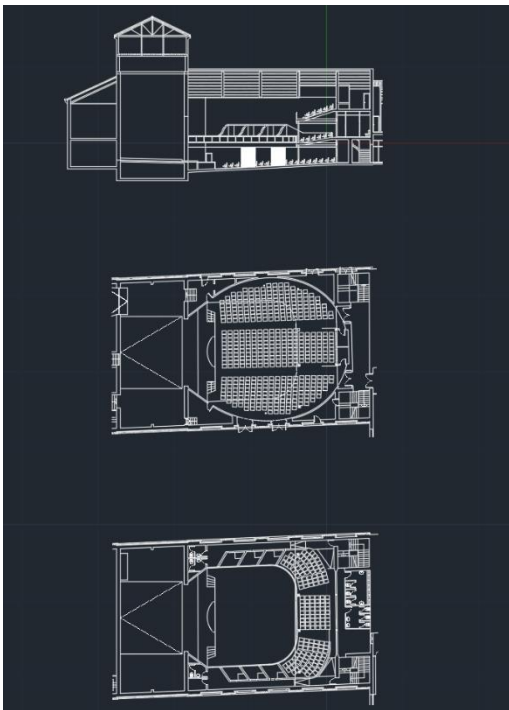
Aquest punt tracta de definir la sala mitjançant un model 3D. Es treballa amb el software de disseny acústic de sales EASE 4.3. El programa permet simular el comportament del camp sonor del recinte.

6.1 MODELAT 3D

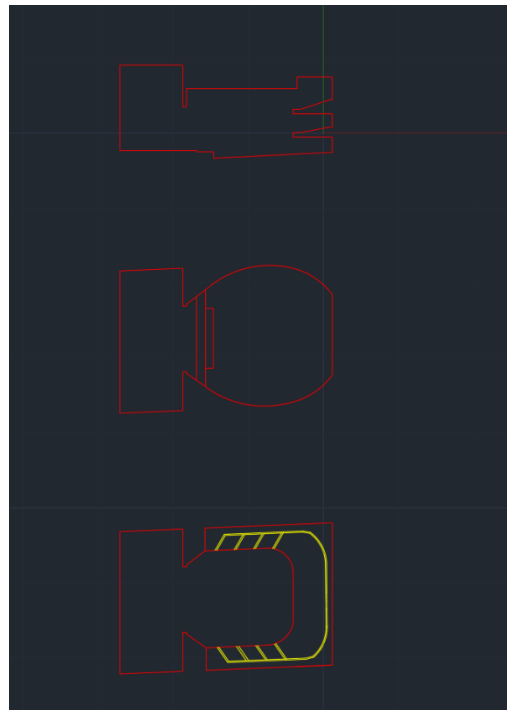
Per poder simular el recinte es necessita un arxiu on estigui representat el recinte en 3D. Es pot crear en el mateix programa, però com es disposava de plànols del teatre en pdf, es va decidir modelar el teatre en 3D amb l'AutoCAD. A continuació s'importa el arxiu creat a l'AutoCAD al EASE, però caldrà adaptar el model al programa i facilitar (simplificar) la tasca al motor de càlcul. Per últim, es procedeix a simular el model 3D del teatre.

6.1.1 AutoCAD

Per a poder simular un recinte es necessària tindre un plànol 3D del mateix. L'ajuntament d'Ulldecona en va facilitar uns arxius pdf amb indicacions de l'escala gràfica dels plànols del teatre (secció, planta platea i planta primer pis). Aquets arxius es van importar a l'AutoCAD . Després vaig simplificar el perímetre del teatre, perquè el programa de simulació no accepta corbes i dona molts errors en superfícies complicades.



Il·lustració 33 : Plànols importats de pdf a AutoCAD

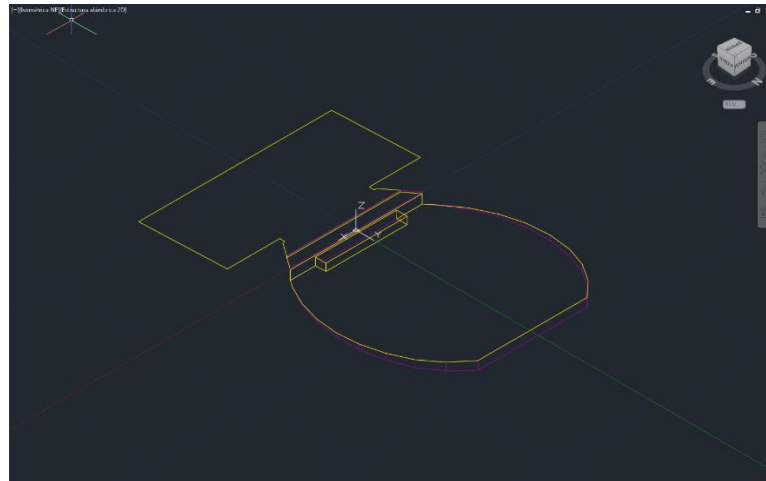


Il·lustració 32 : Plànols simplificats en AutoCAD

A continuació s'escalen els plànols a la mesura real corresponent, tenint en compte l'escala gràfica del pdf entregat per l'ajuntament d'Ulldecona.

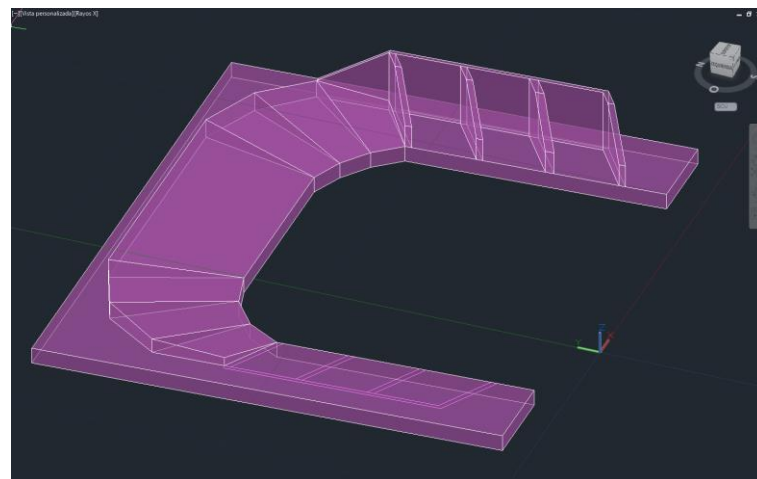
Com s'ha comentat abans, el programa de simulació no accepta corbes, per a solucionar-ho, hi ha una ferramenta de l'autoCAD que et permet dividir en segments equidistants, i d'aquesta manera ho transformem en aproximacions poligonals.

Una vegada solucionat les circumferències, ja es pot alçar les parets de platea, tenint en compte que el terra és inclinat.

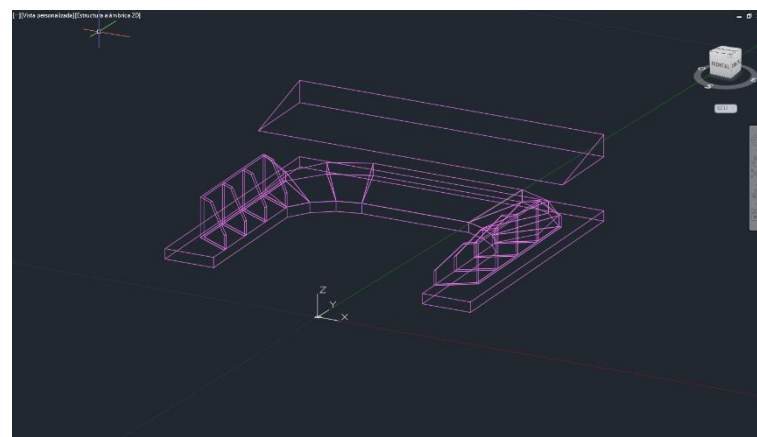


Il·lustració 34 : construcció del terra de platea en AutoCAD

L'alçada de la primera planta es va construir mitjançant sòlids, que després es van desfer.

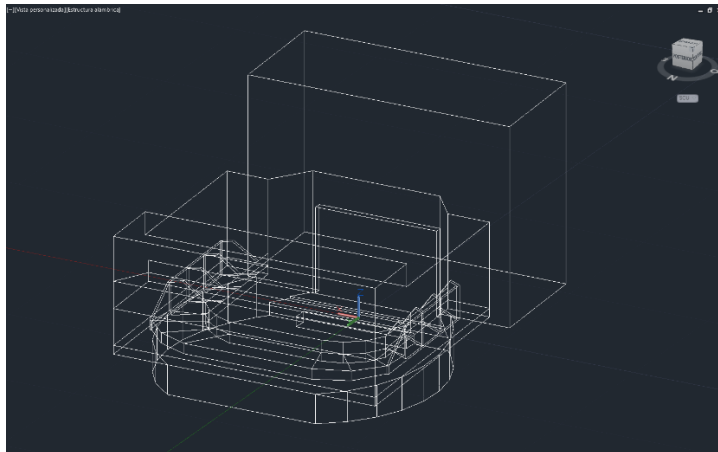


Il·lustració 36 : Primer pis amb sòlids en AutoCAD



Il·lustració 35 :Primer pis i galliner en AutoCAD

Quedant finalment el recinte en 3D preparat per al software de simulació EASE.



Il·lustració 37 : Model 3D del teatre Orfeo Montsià en AutoCAD

6.2 SIMULACIÓ EASE

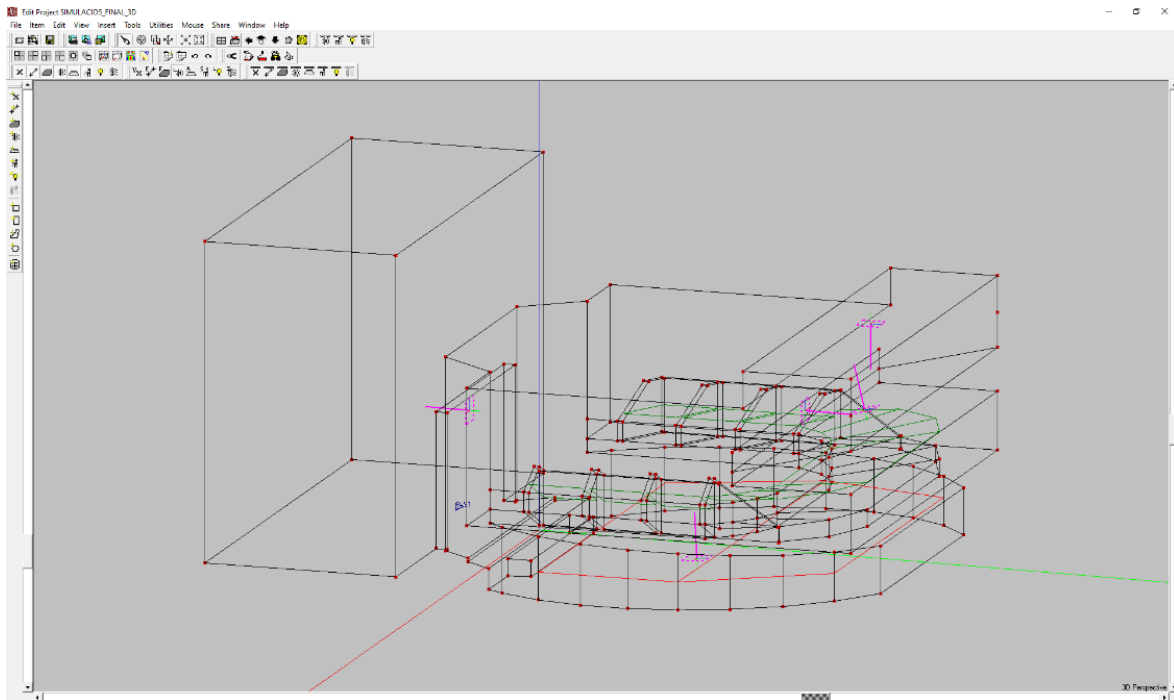
6.2.1 Introducció

EASE es un programa de disseny i simulació acústica d'origen alemany. Està format per diferents mòduls on es pot crear recintes o adequar un recinte existent, a més de realitzar càlculs de paràmetres de qualitat acústica.

Per una altra part, conté la llicència del model de càlcul AURA 3, que permet mapejos seguint la norma ISO3382 i d'altres càlculs. Aquest mòdul està desenvolupat per l'Institut d'Acústica de la Universitat Tècnica d'Aachen, Alemanya.

6.2.2 Funcionament

L'objectiu d'una simulació acústica de recintes és estudiar el comportament de la sala respecte el camp sonor generat, fent ús d'algoritmes de càlcul, i sota un model 3D importat des d'arxius DXF. Cada superfície del recinte ha d'estar caracteritzada, és a dir, s'ha de definir cada superfície amb el coeficient d'absorció corresponent i si cal afegir o no, correcció per dispersió *scattering*. Posteriorment el programa ha de validar el model o en tot cas mostrar els possibles errors. A continuació es pot mapejar el model i sortirà un altra finestra on es mostra tots els càlculs que es necessiten. Sempre tenint obertes la finestra del *project data* i la de *mapping*.



Il·lustració 38 : Model 3D amb objectes en EASE

6.2.3 Importació i adaptació en EASE

Una vegada construït el model 3D dxf format per punts i rectes, s'importa al software EASE. Seguidament es defineixen totes les superfícies sobre les que incidirà el camp sonor, amb la cara activa de la superfície corresponent. És important al acabar este últim pas comprovar que no hi han *forats* (espais no definits entre superfícies), utilitzant el *check holes*. Si detecta algun forat, s'ha de tornar a definir la superfície indicada.

Seguidament es creen objectes, és a dir, agrupar superfícies que tinguen les mateixes característiques. I per últim afegir els coeficients d'absorció a cada objecte, on s'explica en el següent apartat.

Materials

L'elecció dels coeficients d'absorció es van basar en una taula de materials [annex 9] excepte la caixa escènica, perquè hi ha nombrosos objectes (focus, taules, cortines, material d'atrezzo) que són difícil de caracteritzar. L'absorció de la caixa escènica es va calcular mitjançant els temps de reverberació obtingut in situ, sabent el volum del recinte 2212,19 m³ i amb la fórmula de Sabine es va extraure el coeficient d'absorció aproximat per bandes d'octava.

$$TR_f = \frac{0,162 * V}{A}$$

$$TR_f = \frac{0,162 * V}{\sum S_t * \alpha}$$

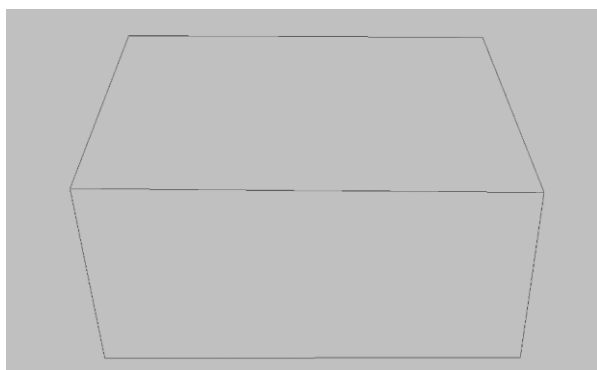
$$TR_f = \frac{0,162 * 2212,19}{1079,164 * \alpha}$$

La taula següent indica quin material i coeficients s'ha aplicat per cada superfície, amb el valor per a cada octava. Els coeficients han sigut consultats en la taules d'absorció de la *Universidad de la República Uruguay*.

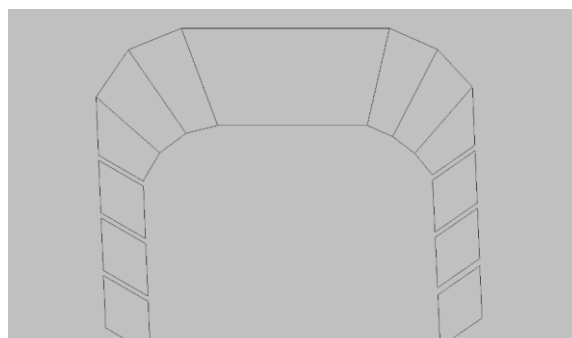
Material	Superfície	Descripció	Coeficients					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Audiència	Llotja terra	Àrea d'audiència entapissada gruixut, desocupada	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
	Platea i Primer pis	Públic en butaques entapissades	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85
Cortina	Paret posterior de platea	Vellut arrufat	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,44
Formigó	Sostre gran	Formigó revocat	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Lambriz	Barana	Revestiment de fusta	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,06
Pis de taules	Terra d'escenari	Plataforma de fusta damunt d'un espai d'aire	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Tarima	Ampliació d'escenari	Entarimat de fusta	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07
Moqueta	Parets i terra del recinte	Catifa prima pegada al contrapis	0,04	0,04	0,15	0,30	0,50	0,60
	Parets de les llotges	Catifa mitjana damunt d'una base esponjosa	0,03	0,09	0,20	0,54	0,70	0,72
Algeps	Sostres menuts	Plaques d'algeps 13 mm més espai d'aire	0,20	0,12	0,09	0,03	0,02	0,02

Zona d'audiència

l'últim pas abans de simular és definir les àrees d'audiència. El programa EASE solament permet 4 punts a cada zona d'audiència, per aquesta raó, la platea hi ha dos zones d'audiència. Les àrees d'audiència afegeixen un nou tipus de superfície, i per aquest motiu s'ha de tornar a executar *check holes* per a comprovar errors.



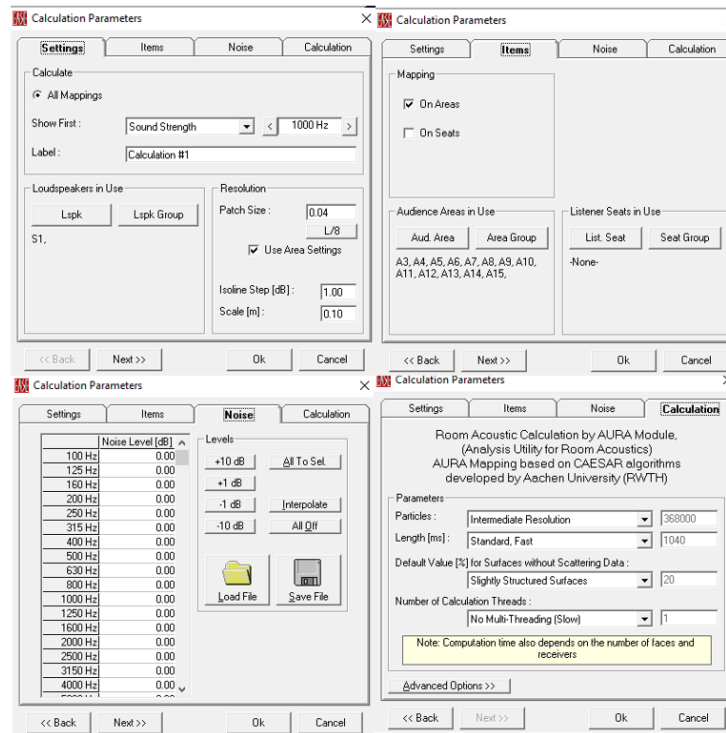
Il·lustració 40 :Zona d'audiència platea EASE



Il·lustració 39 :Zona d'audiència primer pis

6.2.4 Càlculs de paràmetres

Amb tots els passos anteriors completats, s'ha de situar la font omnidireccional que simula un dodecaedre, definit com S1.



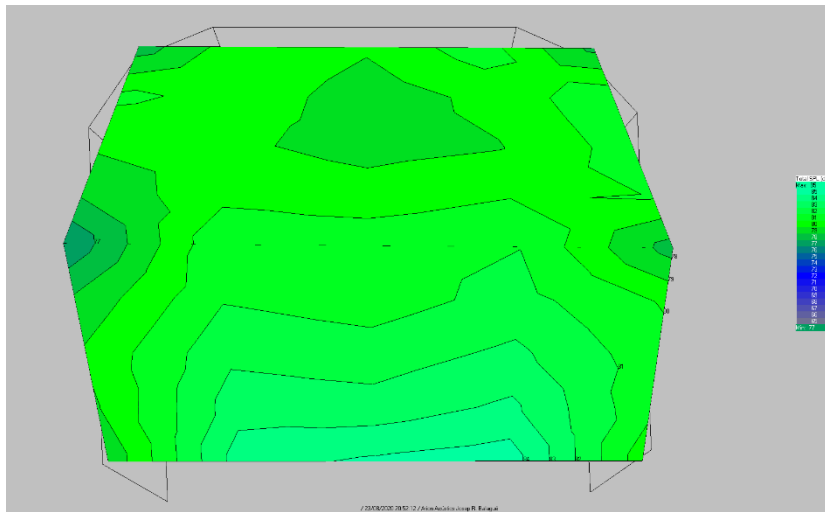
Il·lustració 41 : Quadre de paràmetres de càlcul

6.2.4.1 TOTAL SPL

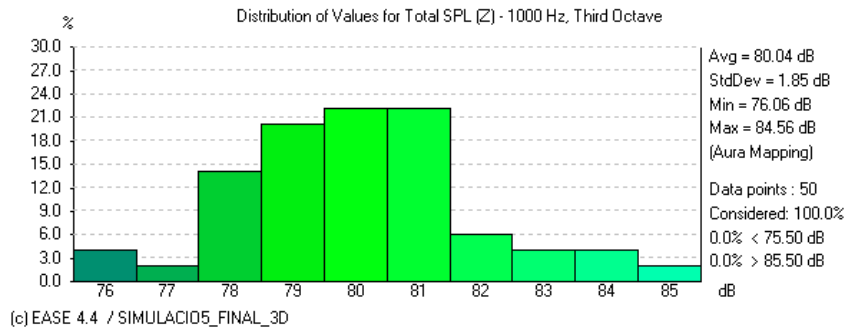
El paràmetre Total SPL dona el nivell del camp sonor directe més el reflectit, i ens mostra com d'uniforme és la cobertura per tota l'àrea d'audiència. Com a objectiu de qualitat acústica no hauria de superar els 3 dB de diferència dintre de la sala.

Com es pot comprovar en el resultat de la simulació, bona part de l'audiència de platea compleix el requisit de qualitat (a 1kHz).

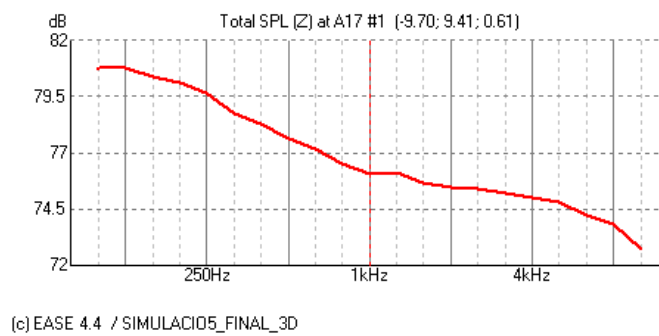
Degut la gran absorció a altes freqüències que conté tot el recinte, on hi ha gran quantitat de moqueta, el camp sonor s'atenua en aquesta part de l'espectre.



Il·lustració 42 : Mapa de nivell de total SPL platea

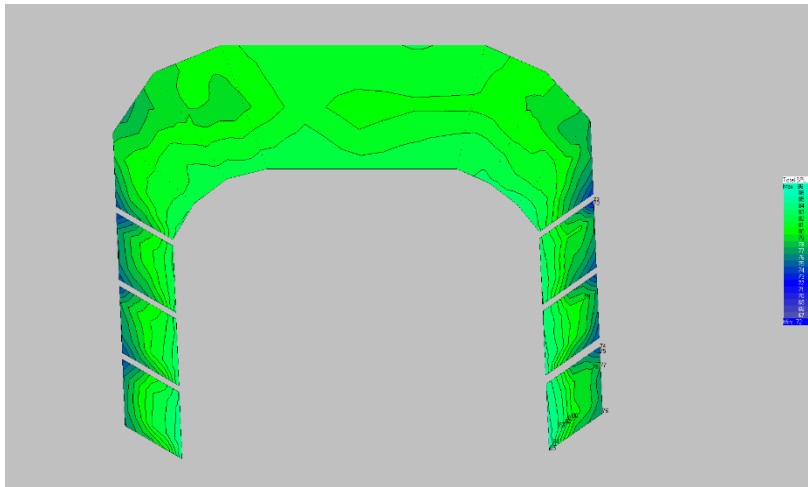


Il·lustració 43 : Distribució estadística de valors de total SPL a platea

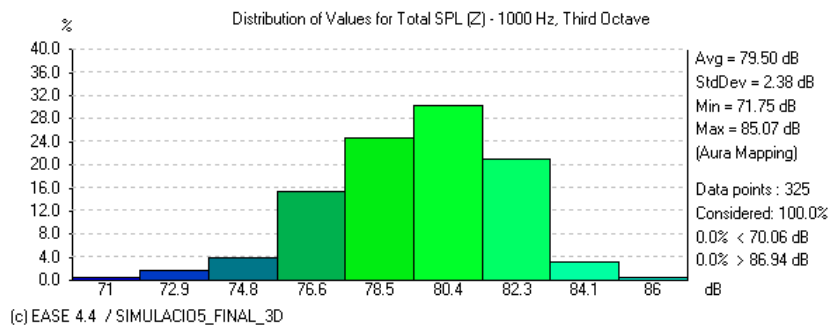


Il·lustració 44 : Resposta freqüencial de total SPL a platea

La primera planta mostra una distribució menys uniforme que en platea, degut a l'acció de les parets de les llotges que fan ombra a les zones laterals.

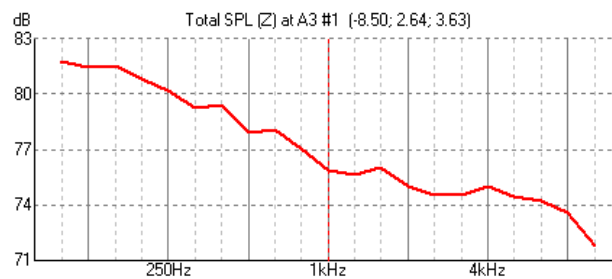


Il·lustració 45 :Mapa de nivell de total SPL primer pis



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 46 :Distribució estadística de valors de total SPL a primer pis

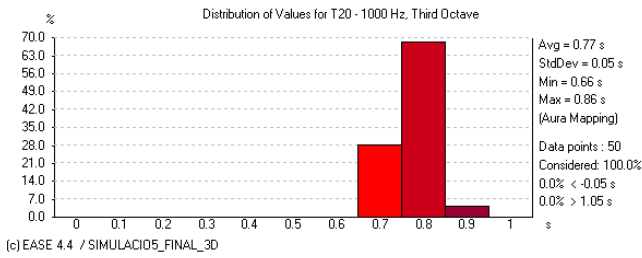


(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

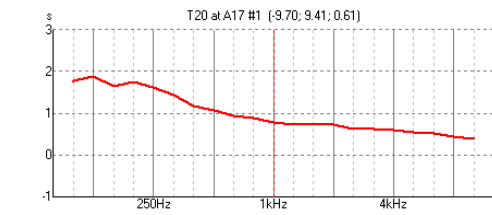
Il·lustració 47 :Resposta freqüencial de total SPL a platea

6.2.4.2 Temps de reverberació

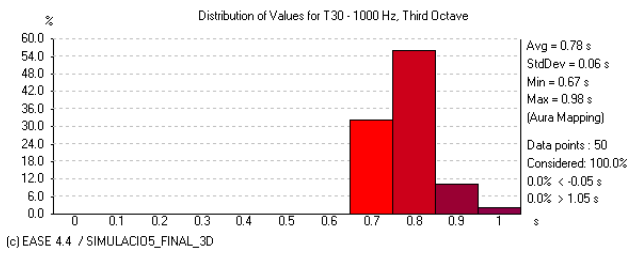
El temps de reverberació de platea, calculat tant en la corba T20 com en T30, mostra una mitjana de 0,8 seg. La corba tonal indica temps superior a 1,5 seg., conseqüència de la manca de dispositius absorbents a baixes freqüències.



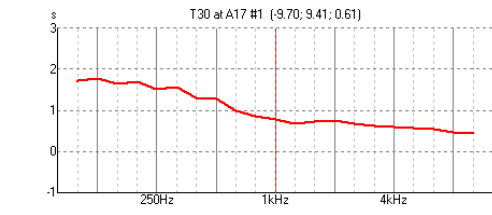
Il·lustració 49 :Distribució de valors de T20 a platea



Il·lustració 48 :Resposta freqüencial de T20 a platea

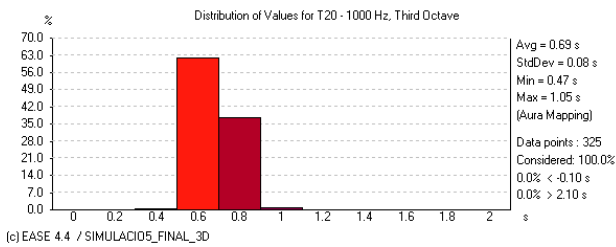


Il·lustració 51:Distribució de valors de T30 a platea

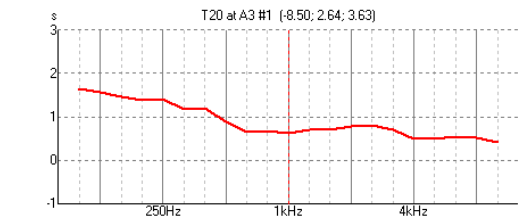


Il·lustració 50 :Resposta freqüencial de T30 a platea

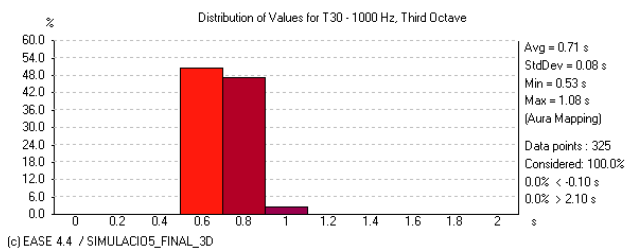
El temps de reverberació en la primera planta és lleugerament inferior degut a l'alt coeficient d'absorció de les parets de les llotges.



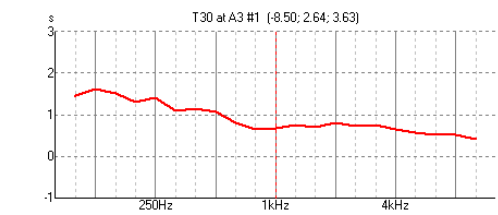
Il·lustració 52 :Distribució de valors de T20 al primer pis



Il·lustració 53 :Resposta freqüencial de T20 al primer pis



Il·lustració 55 :Distribució de valors de T30 al primera planta

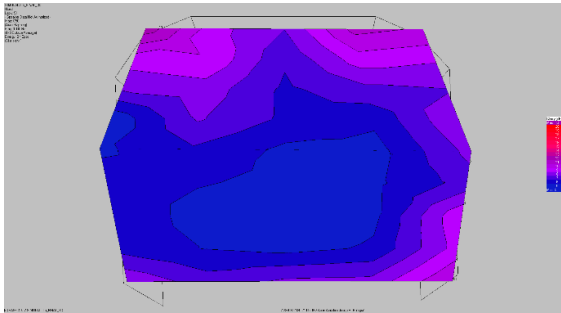


Il·lustració 54 :Resposta freqüencial de T30 al primer pis

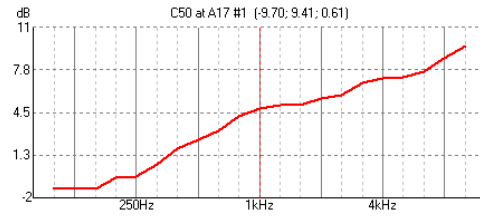
6.2.4.3 Claredat

Platea C₅₀

El paràmetre C₅₀, *Claredat de la Veu*, és recomanable que supera els 2 dB en totes les places de públic. La simulació mostra que aquest valor és superat àmpliament.

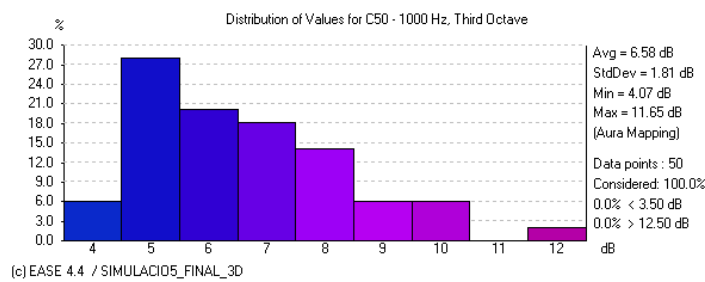


Il·lustració 56 :Mapeig de platea de C₅₀



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 57 :Resposta freqüencial de platea de C₅₀

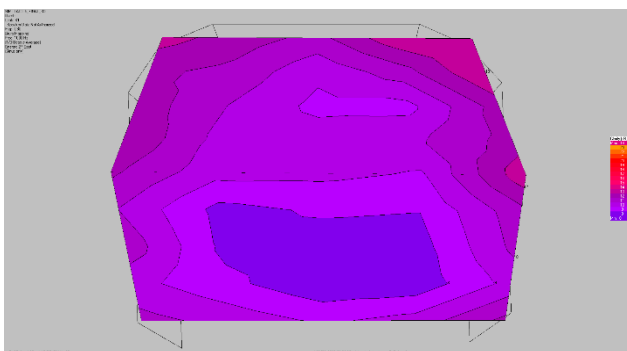


(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

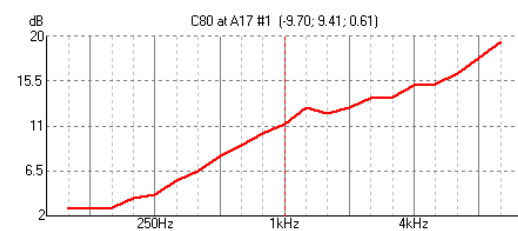
Il·lustració 58 : Distribució de valors de platea C₅₀

Platea C₈₀

La claredat musical C₈₀, calculada en la banda de 125 Hz a 4kHz és recomanable valors entre 0 i -4 dB. Donat la carència de reflexions en bona part de la platea, motiu pel qual resulten uns valors no òptims de qualitat per aquest paràmetre. Els resultats de la simulació mostren la dificultat en percebre una bona separació entre diferents sons individuals d'una formació musical.

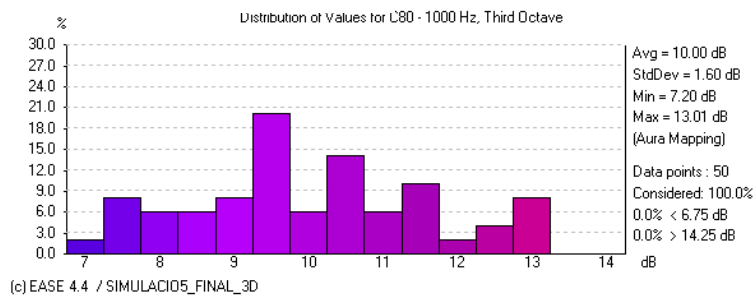


Il·lustració 60 :Mapeig de platea de C₈₀



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 59 :Resposta freqüencial de platea C₈₀

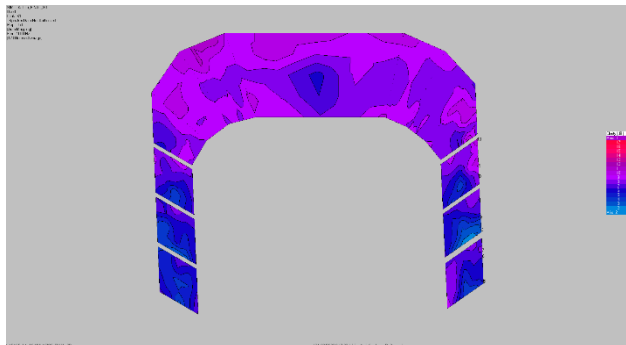


(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

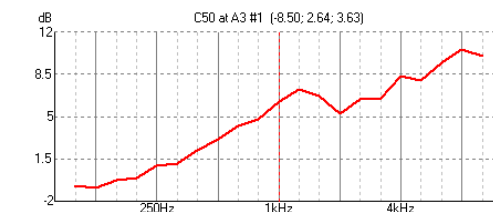
Il·lustració 61 :Distribució de valors de platea C₈₀

Primera Planta C₅₀

En el primer pis, el paràmetre C₅₀ és millor que en platea degut a les reflexions uniformes que provoca la paret lateral recta, en platea la paret és corba. Els pitjors valors d'aquest paràmetre es mostren en les llotges, a causa de les parets de les llotges que intercepten les reflexions laterals.

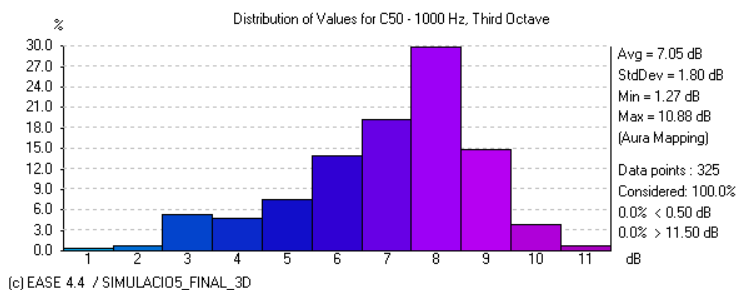


Il·lustració 62 :Mapeig del primer pis de C₅₀



(c) EASE 4.4 / SIMULACIÓ5_FINAL_3D

Il·lustració 63 :Resposta freqüencial del primer pis C₅₀

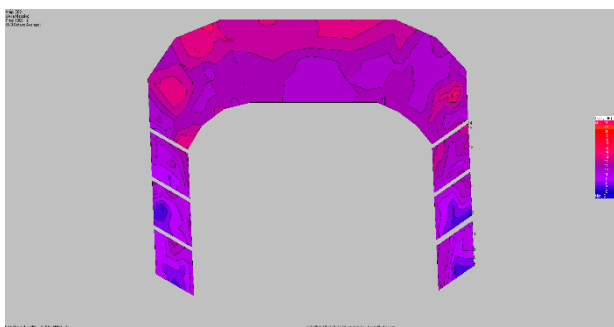


(c) EASE 4.4 / SIMULACIÓ5_FINAL_3D

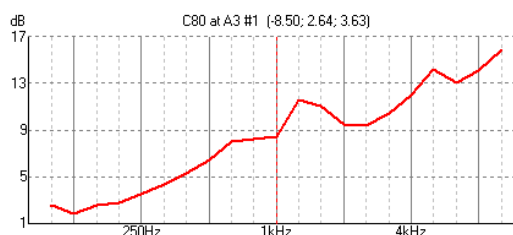
Il·lustració 64 : Distribució dels valors del primer pis C₅₀

Primer pis C₈₀

Tampoc en la primera planta, com en platea, s'aconsegueixen els desitjats valors negatius d'aquest paràmetre.

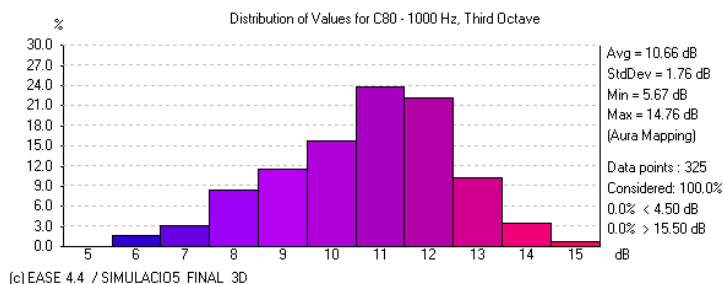


Il·lustració 65 :Mapeig del primer pis de C₈₀



(c) EASE 4.4 / SIMULACIÓ5_FINAL_3D

Il·lustració 66 :Resposta freqüencial del primer pis C₈₀



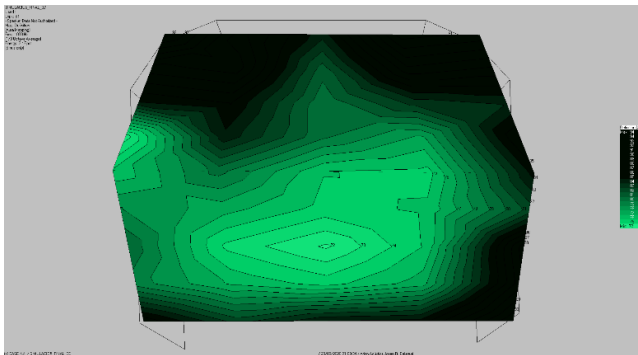
(c) EASE 4.4 / SIMULACIÓ5_FINAL_3D

Il·lustració 67 :Distribució dels valors del primer pis C₈₀

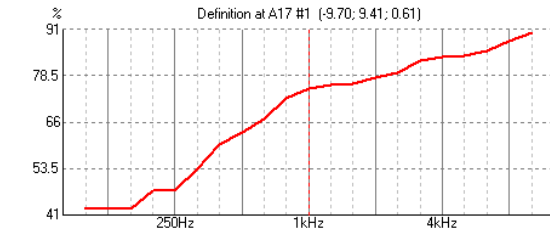
6.2.4.4 Definició D₅₀

Platea

L'objectiu de qualitat acústica per a la *Definició* és superar el 50%. Aquest percentatge és superat en tota l'àrea d'audiència de platea. Resultat que va en concordança amb el paràmetre C₅₀.

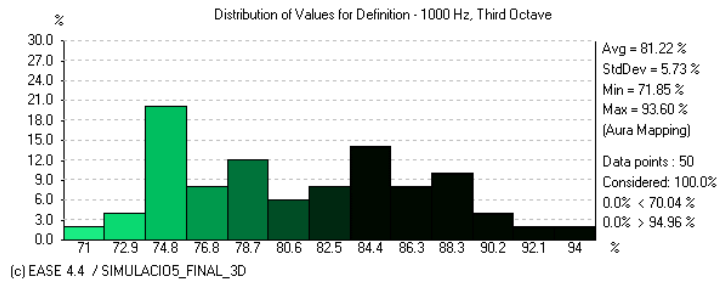


Il·lustració 68: Mapeig de D₅₀ de platea



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 69: Resposta freqüencial de platea D₅₀

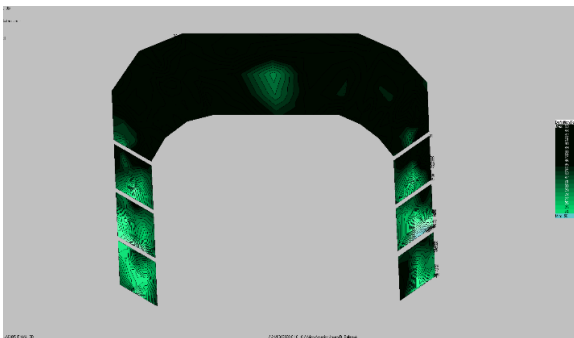


(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

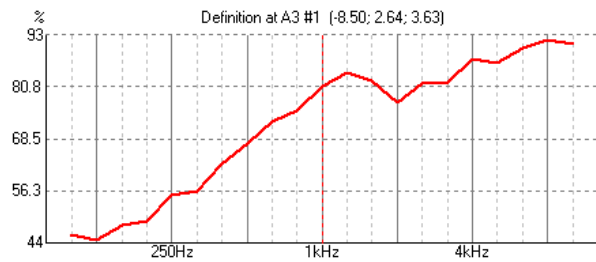
Il·lustració 70: Distribució de valors de platea D₅₀

Primer Pis

Els valors de *Definició* milloren lleugerament respecte a platea. Les reflexions rebudes des de parets rectes és un factor significatiu.

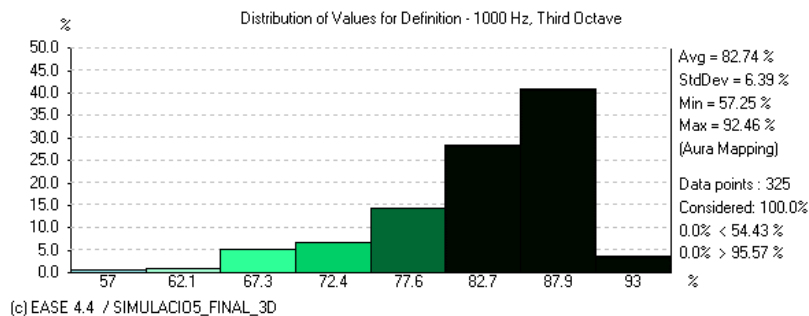


Il·lustració 72: Mapeig de D₅₀ del primera planta



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 71: Resposta freqüencial del primera planta D₅₀



(c) EASE 4.4 / SIMULACI05_FINAL_3D

Il·lustració 73: Distribució de D₅₀ al primera planta

7.INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

Cal recordar que el teatre Orfeó Montsià d'Ulldecona té un ús polivalent, encara que amb predomini de representacions teatrals. A continuació es mostren els resultats dels paràmetres de qualitat comparats als criteris de referència. Un anàlisi per cada tipus d'ús.

MÚSICA			
Paràmetre	Criteri de qualitat	Valor mesurat	Compliment
T_{mid}	$1,2 \leq T_{MID} \leq 1,6$ s	0,88	No
Lluntor, Br(s)	$Br \geq 0,87$	1,35	Si
Calidesa (BR)	$1,10 \leq BR \leq 1,35$	1,39	Si
C_{80} (dB) a (1kHz)	$-2 \leq C_{80} \leq 2$	8,38	No
C_{50} (dB) a (1kHz)	-	-	-
Definició (D_{50})	-	-	-
STI	$STI \geq 0,50$	0,7	Si
NC	NC-15	NC-17	No

TEATRE			
Paràmetre	Criteri de qualitat	Valor mesurat	Compliment
T_{mid}	$0,85 \leq T_{MID} \leq 1,2$ seg.	0,88	Si
Lluntor, Br(s)	$Br \geq 0,8$	1,35	Si
Calidesa (BR)	$0,9 \leq BR \leq 1,3$	1,39	Si
C_{80} (dB) a (1kHz)	-	-	-
C_{50} (dB) a (1kHz)	$C_{50} \geq 2$	5,06	Si
Definició (D_{50})	$D_{50} > 0,50$	0,81	Si
STI	$STI \geq 0,65$	0,7	Si
NC	NC-15	NC-17	No

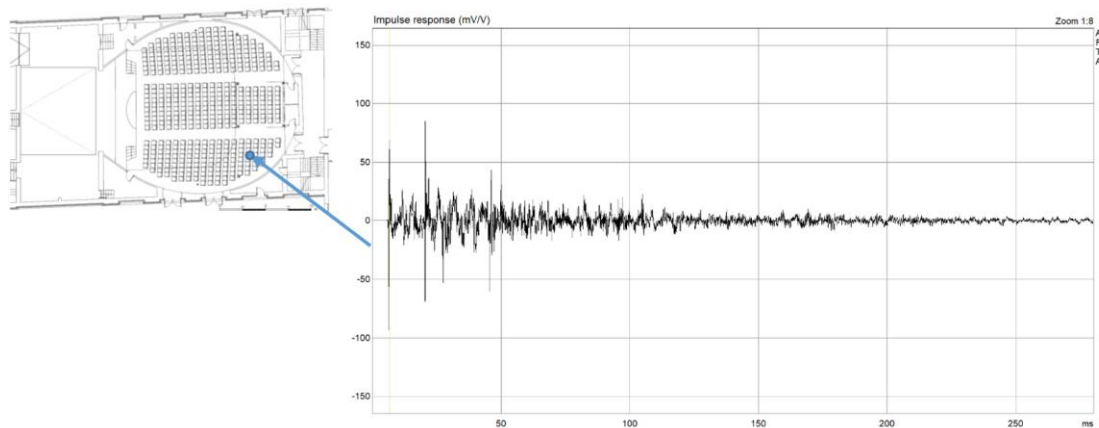
Els paràmetres objectius i subjectius associats a teatre es compleixen, cal destacar que una de les posicions de soroll està situat en boca d'escenari, i per tant, a mesura que la font de soroll (l'actor) es va desplaçant cap l'interior de l'escenari els criteris de qualitat deixen de complir-se també per a un ús de teatre, això és degut al gran volum de la caixa escènica $1800m^3$, on absorbeix gran part del camp sonor generat des de les posicions enrederides de l'escenari.

Respecte l'objectiu de qualitat acústica per a concerts, es recomana un temps de reverberació (T_{mid}) per damunt d'1 segon. Aquest ítem no es compleix degut a l'alta absorció en la majoria de superfícies del recinte, tot i tenint un volum considerable ($3092m^3$).

D'altra banda la geometria de les parets laterals de platea no facilita la recepció de primeres reflexions, com es pot veure en la il·lustració 30 de l'estudi geomètric. La curvatura orienta el so a les butaques laterals i posteriors de la sala, deixant sense aquesta important aportació de reflexions de primer ordre a gran part de la zona central d'audiència, mostrat en la il·lustració 60 del model simulat. Conseqüentment el valor del paràmetre C_{80} està fora del rang recomanat.

Respecte la llotja, aquesta sí té bona cobertura de reflexions, visualitzat en la il·lustració 31, perquè les parets són rectes i generen reflexions uniformes. Encara que geomètricament es correcta, els coeficients d'absorció de les parets de les llotges són molt elevades, cobertes de moqueta gruixuda i embuatada, reduint l'efecte positiu de les reflexions a la primera planta.

La il·lustració 74 mostra una resposta a l'impuls mesurada a les últimes files laterals. Tal com es preveia per l'estudi geomètric efectuat, és detecta una focalització significativa a 16ms del so directe. Tots els punts mesurats en les butaques posteriors mostren una IR similar.



8.CONCLUSIONS

Els principals factors que afecten de manera negativa les prestacions acústiques de la sala són:

- **Excessiva absorció.** Pràcticament totes les superfícies de la sala, excepte el sostre, estan cobertes per moqueta, això provoca un camp reverberant molt atenuat que afecta principalment als paràmetres de qualitat associats a l'ús musical de la sala.
- **La geometria en forma de ferradura.** Certament aquest disseny permet un gran nombre de butaques, però com a quedat demostrat, apareixen focalitzacions perjudicials en determinades zones de l'audiència quedant una cobertura poc uniforme.
- **Manca d'elements difusors.** Facilitarien la uniformitat del camp sonor per tota la sala.
- **Caixa escènica.** Actua com un gran absorbent, donat que gran part de l'energia que ix de l'escenari es perd. Això es poc funcional per a concerts o activitats musicals.
- **Sistema electroacústic.** Tot i que no es va poder analitzar el comportament del sistema, la gran absorció de la sala afavoreix l'ús de la megafonia. Qualsevol representació teatral que incorpora reforç electroacústic, no tindrà gaires problemes per arribar a un grau d'intel·ligibilitat de la paula òptim.
- **Soroll de fons.** S'ha de tenir especial cura en les instal·lacions d'aire, ventilacions i motors, imprescindible per a tenir una bona relació senyal/soroll, de manera que es puguin gaudir de passatges musicals *piano* sense percebre interferències sorolloses.

I per a concloure s'aporten possibles solucions als factors negatius citats.

- Substituir la moqueta de terra per materials vinílics. Això conjuntament amb un canvi de butaques, facilitaria la difusió del camp acústic en tota l'àrea d'audiència i augmentaria el temps de reverberació.
- Instal·lar una superfície reflectora a la boca d'escenari, preferiblement corba, per a orientar primeres reflexions a tota la sala. Ajudaria a projectar la veu dels actors des de qualsevol part de l'escenari.
- Trencar la geometria corba de platea, instal·lant a les parets laterals un revestiment difusor que oriente les reflexions de manera uniforme a tota l'audiència.
- Construcció d'una conxa acústica modular que evite la pèrdua d'energia en la caixa escènica, projecte el so a l'audiència i facilite un camp difús dintre de l'escenari per als músics, podent ser un escenari certament polivalent.
- En cas d'una possible rehabilitació profunda en l'estructura i distribució de la sala, eliminar les llotges, la planta primera i *el galliner*, quedant una nova i única planta inclinada.

Totes les solucions citades requereixen un projecte específic, fora de l'abast d'aquest TFG. Les properes línies de treball deuriem d'estar encaminades a definir un projecte detallat de rehabilitació acústica de la sala del Teatre Orfeo Montsià.

València, a 7 de setembre de 2020

9. BIBLIOGRAFIA

Llibres i articles

- [1] Antoni Carrión Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ed.UPC, 1998.
- [2] Higiní Arau. *Estudio acústico del centro cultural Rambleta*. ESTUDI ACÚSTIC H. ARAU, 2006
- [3] Barba.A i Gimenez.A. *El Teatro Principal de Valencia. Acústica y arquitectura escénica*. Ed. Teatres de la Generalitat, Universitat Politècnica de València y Ministerio de Ciencia e Innovación. 2011
- [4] Farina A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. Audio Engineering Society Convention Paper Presented at the 122nd Convention 2007 May 5–8 Vienna, Austria.
- [5] Palafox. L. *Caracterización y Optimización acústica del Teatro Auditorio Buero Vallejo*. Ed.UPM, 2013
- [6] Karl M. Slavik.VDT-Speech-intelligibility-in-PA-systems. NTI Audio, 2018
- [7] Masip L'Orfeo Montsià, Revista: Raïls, 1993.
- [8] Josep M. Millán Roca.*El teatre al S. XX a Ulldecona.*,

Manuais

- [9] NTI AUDIO XL2 User Manual. 2020.
- [10] UA-25 EX USB AudioCapture Owner's Manual, cakewalk by Roland, 2009
- [11] NTi-Audio-AppNote-STIPA-Measurement, NTI Audio,2011
- [12] Manual del usuario. Autodesk AutoCAD Architecture 2011
- [13] EASE Version 4.3 User's Guide & tutorial, 2009
- [14] Mantelijan. I. ARTA User Manual v.1.2.0, 2007
- [15] Apunts de classe de la assignatura d'Acústica per a l'Edificació Curs 2017-2018
- [16] Tablas de absorción,2010 www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf

Normes

- [17] UNE-EN ISO 3382-1:2010. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- [18] STIPA IEC60268-16: 2011