

**Adequació acústica del Menjador dels Càntirs.
Anàlisi de l'espai actual i disseny d'un nou
entorn amb les característiques sonores
optimitzades.**

Eduard Celma Garcia

Dirigit per Francesc Gomila Lluch

2n de Batxillerat A
Escola Garbí Pere Vergés de Badalona

Agraïments

Per a la realització d'aquest treball m'han ajudat i assessorat una sèrie de persones, experts o no en la matèria, sense els quals no hagués estat possible la seva realització.

En primer lloc, vull agrair al meu director de treball, el professor Francesc Gomila Lluch, tot el suport mostrat al llarg del treball. Des d'acceptar la tutela del treball el novembre passat, fins a la correcció de la memòria en el tram final. A més, agrair-li tot el temps que ha dedicat a aquest treball i l'interès que ha mostrat durant el seu desenvolupament.

En segon lloc, m'agradaria fer menció dels dos professors de dibuix, tant amb ordinador com tècnic, de l'escola: el professor Andreu Melgosa i la professora Sara Milian. Gràcies a la Sara he pogut reconèixer les formes geomètriques de la sala i cercar la manera més adequada per a dibuixar-les. Gràcies a l'Andreu sabia com utilitzar els programes de dibuix tècnic i si tenia algun dubte, tenia a qui preguntar-ho.

També ha estat molt important la implicació de l'arquitecte Pedro Ayesta i l'arquitecta tècnica Judith Daban de l'estudi Ayesta Vives Daban. Sempre que he tingut dubtes sobre aspectes tècnics i formals com presentar un plànol o bé la realització d'un pressupost d'obra, m'han facilitat tota la informació necessària i m'han rebut de braços oberts al seu estudi.

A més a més, també vull agrair-li al Gerard Guerra tota l'ajuda prestada en l'àmbit acústic. El Gerard és estudiant d'últim any d'arquitectura i s'està especialitzant en acústica de sales. Així doncs, sempre que he tingut dubtes sobre acústica, el Gerard m'ha donat totes les eines que necessitava.

També agrair l'ajut de l'enginyer acústic Miquel Domech de l'empresa Notson Acoustics per facilitar-me informació i dades per a realitzar un bon anàlisi acústic de la sala.

Finalment, agrair a totes les persones que han estat al meu costat o han vetllat pel meu Treball de Recerca: des del professor encarregat d'explicar i corregir el full de tria, Pascual Gálvez o a la meva tutora de Batxillerat, la professora Montserrat Figuera, fins als meus pares que m'han donat el suport necessari per a tirar el treball endavant.

Índex General

Resum	9
1 Introducció	10
1.1 Justificació i descripció del tema escollit	10
1.2 Hipòtesi	11
1.3 Objectius	11
2 Fonaments teòrics de l'acústica	12
2.1 Física de les ones sonores.....	12
2.1.1 Propagació del so	13
2.1.2 So directe i reflectit	17
2.1.3 Teories utilitzades en l'anàlisi acústica d'espais arquitectònics	19
2.2 Disseny acústic de les sales.....	22
2.2.1 Objectius Acústics.....	22
2.2.2 Paràmetres acústics	24
2.2.3 Defectes acústics	32
2.2.4 Paràmetres acústics òptims.....	36
2.3 Materials Fonoabsorbents.....	37
3 Descripció del Menjador dels Càntirs actual	40
3.1 Activitats realitzades.....	40
3.2 Descripció del recinte actual	41
3.2.1 Descripció de l'estructura de la sala.....	41
3.2.2 Materials.....	44
3.3 Plànols	44
3.3.1 Procés de mesura.....	45
3.3.2 Plànols 2D	47
3.3.3 Plànols 3D i renderització	51
3.4 Anàlisi de l'acústica del Menjador dels Càntirs	55
3.4.1 Càlcul dels paràmetres acústics	59
3.4.2 Avaluació dels paràmetres acústics	65
4 Projecte de la modificació de la sala.....	70
4.1 Descripció del projecte de millora	70
4.1.1 Materials seleccionats.....	79
4.2 Plànols	81

4.3	Anàlisi de l'acústica del projecte proposat.....	82
4.3.1	Paràmetres acústics calculats	82
4.3.2	Avaluació dels paràmetres i verificació de la millora	87
4.4	Cost del Projecte	94
5	Conclusions.....	95
6	Bibliografia	97
	Índex de figures.....	99
	Índex de taules	101
	Annex 1	105
	Annex 2	113

Resum

En el present treball s'ha realitzat un estudi de les condicions acústiques de la sala del Menjador dels Càntirs de l'escola Garbí Pere Vergés de Badalona amb l'objectiu de presentar una proposta de reforma per tal que tingui millors qualitats acústiques.

La sala destaca pel seu sostre format per tres voltes concatenades que conformen una de les sales més característiques de l'escola. Així doncs, la solució acústica proposada ha hagut de respectar l'estructura original. S'han confeccionat plànols bidimensionals i tridimensionals tant de la sala en l'estat actual com del nou projecte. Amb l'elaboració d'aquests plànols, a part de descriure la sala, es facilita i millora l'anàlisi acústica. Aquesta anàlisi s'ha centrat en el càlcul d'uns paràmetres concrets que quantifiquen la qualitat acústica de la sala: el temps de reverberació, la brillantor i el %ALCons. Després d'avaluar-ne els valors corresponents a la modificació proposada es demostra que l'acústica de la sala millora considerablement en tots els escenaris estudiats (sala buida, menjador ple, sala de conferències semiplena i sala de conferències plena). La millora es basa en la incorporació de materials fonoabsorbents en zones concretes de la sala i la substitució d'alguns revestiments que eren desfavorables des d'un punt de vista acústic. Per altra banda, part de la millora s'ha centrat en modernitzar l'estètica de la sala, tot i que s'ha mantingut la seva essència modernista.

Així doncs, al llarg d'aquest treball s'han descrit les diferents etapes d'un projecte arquitectònic. Per tant, el desenvolupament d'aquest projecte s'han estudiat diferents disciplines: física acústica, disseny interior de sales i avaluació econòmica.

1 Introducció

1.1 Justificació i descripció del tema escollit

Antigament l'edifici noble de l'Escola Pere Vergés fou una masia i el Menjador dels Càntirs tenia una funció completament diferent a l'actual: era utilitzat com a celler. Ara bé, quan aquesta masia esdevingué escola, aquest recinte es convertí en un menjador. Aquest menjador s'ha utilitzat en repetides ocasions com a sala d'actes i reunions en les quals un grup més o menys nombrós d'oients hi acudeixen a escoltar un discurs, una sessió musical o una xerrada. Tanmateix, no és quelcom nou que aquest espai no és el més idoni per a aquestes tasques degut a la seva mala sonoritat.

Conseqüentment, la finalitat d'aquest treball és condicionar acústicament la sala tenint en compte el seu ús polivalent. En primer lloc, reduir al màxim l'efecte del soroll que es genera dinant de manera que no sigui gaire molest. En segon lloc, condicionar adequadament la sala per a conferències o xerrades reduïdes, amb un aforament màxim d'uns 100 oients; val a dir que la funció d'auditori ha minvat notablement en els darrers anys degut a la recent creació del pavelló esportiu. Així doncs, el condicionament acústic estarà centrat en la paraula, és a dir, es buscarà que a l'hora de dur a terme els diferents actes, el discurs de l'emissor es reparteixi uniformement per tota la sala i tingui una bona intel·ligibilitat. Ara bé, hi ha una sèrie de condicionants que marquen aquest projecte. No s'ha d'oblidar que la funció principal d'aquest espai és la de ser un menjador, concretament un menjador infantil. Per tant, totes les reformes estan plenament limitades. A més, a fi de mantenir l'estètica original del menjador i ser respectuós amb l'estil modernista, no s'han eliminat les voltes. El motiu d'aquesta decisió, a part del cost econòmic de reformar l'estructura d'un sostre i la complexitat que això comporta, és de ser completament respectuós amb l'estil modernista d'aquest bell edifici, ple d'història i de bons records pels milers d'alumnes que hi han passat. Pere Vergés és una Escola que es caracteritza per estar ubicada dins d'un edifici antic i majestuós el cor del qual és el menjador. Pedagògicament, hi ha dos espais centrals a l'escola: el menjador, com a espai de convivència i cooperació i la biblioteca, com a espai simbòlic i pràctic de relació amb la cultura impresa. Per tant, el Menjador dels Càntirs és

un espai que marca a tots els alumnes que passen per l'Escola i l'estètica arquejada d'aquest menjador és un dels seus atractius principals, per tant, les voltes s'han de conservar.

1.2 Hipòtesi

La hipòtesi que intentaré verificar fent aquest treball és la següent:

És possible millorar l'acústica del Menjador dels Càntirs, sense que perdi la seva essència estètica, per tal que pugui mantenir la seva funció polivalent de menjador i de sala d'actes d'aforament reduït.

1.3 Objectius

Aquest treball té una sèrie d'objectius: uns de generals, aplicables a qualsevol treball, i uns d'específics, propis d'aquest treball en concret.

Els objectius generals són:

- Aprendre a raonar d'una manera científica.
- Cercar i obtenir informació adequada al tema del treball.
- Analitzar la informació obtinguda, desenvolupar-la i contrastar-la.
- Emetre una hipòtesi; demostrar-la o refutar-la segons els resultats de la investigació.
- Redactar una memòria científica.
- Defensar els resultats obtinguts en una exposició oral.
- Desenvolupar una planificació idònia que permeti realitzar el treball en els terminis previstos.

En canvi, els objectius específics són:

- Estudiar els fonaments físics de l'acústica.
- Estudiar les bases arquitectòniques de l'acústica dels edificis.
- Cercar un mètode per analitzar l'acústica del Menjador dels Càntirs.
- Definir les modificacions necessàries al Menjador dels Càntirs per millorar l'acústica.
- Fer una valoració de la viabilitat de l'execució del projecte.
- Realitzar un disseny digital del projecte del nou Menjador dels Càntirs

2 Fonaments teòrics de l'acústica

2.1 Física de les ones sonores

El so es pot definir des d'un punt de vista físic com una successió de canvis de pressió (compressions i dilatacions) en un medi (sòlid, líquid o gas), produïts per una vibració que es transmet en forma d'ones sonores. La vibració causa oscil·lacions en les partícules constituents del medi creant canvis de pressió que es propaguen en totes direccions a partir del punt on s'ha originat la vibració. El humans percebem el so a través del sentit de l'oïda.

Perquè es generi un so cal que vibri alguna font, per exemple les cordes bucals d'una persona quan està parlant. Les vibracions poden ser transmeses a través de diversos mitjans elàstics, sent l'aire el més comú.

A diferència d'altres magnituds de caràcter ondulatori com la calor o la llum que es poden transmetre a través del buit, les ones sonores necessiten d'un medi per a la seva transmissió i les seves propietats dependran de les característiques d'aquest medi.

A continuació es defineixen els paràmetres més importants per caracteritzar el so i que s'utilitzaran en aquest treball:

- **Velocitat de l'ona:** definim velocitat d'on com la distància recorreguda per l'ona per unitat de temps.
- **Longitud d'ona:** definim longitud d'ona com la distància que hi ha entre dos punts consecutius de l'ona que estan en el mateix estat de vibració.
- **Freqüència:** és una mesura del nombre de vegades que ocorre un esdeveniment en un temps determinat. En el cas del so indica el nombre d'oscil·lacions completes per unitat de temps que fa l'aire. La unitat de mesura es l'hertz (Hz), que es defineix com una oscil·lació completa per segon.
- **To:** és la qualitat del so que ens permet distingir dos sons. El to depèn de la freqüència de l'ona. Els tons es classifiquen en:
 - Tons greus, freqüències baixes de 20 a 300 Hz

- Tons mitjans, freqüències mitjanes de 300 a 2.000 Hz
- Tons aguts, freqüències altes de 2.000 a 20.000 Hz
- **Energia sonora:** és l'energia que transmeten o transporten les ones sonores. Procedeix de l'energia vibracional del focus sonor i es propaga a les partícules del medi en forma d'energia cinètica (moviment de les partícules) i energia potencial (canvis de pressió produïts en el medi o pressió sonora). La seva unitat de mesura és el joule (J).
- **Intensitat sonora:** és la quantitat d'energia sonora que travessa per una superfície perpendicular a la direcció de propagació en una unitat de temps. La seva unitat de mesura és el watt per metre quadrat (W/m^2)
- **Sonoritat:** és una mesura subjectiva de la intensitat sonora amb la que un so es percebut per l'oïda humana. És a dir, la sonoritat és un atribut que ens permet ordenar els sons en una escala de major intensitat a menor intensitat. Com a unitat de mesura s'utilitza el foni o el bar (unitat per mesurar la pressió). Degut a que la percepció dels sons per part de l'oïda humana no es lineal resulta més pràctic utilitzar com a escala de mesura el decibel (dB). Aquesta escala de mesura és logarítmica i es defineix el 0 com al nivell sonor inaudible i 130 com a nivell sonor que causa sensació de dolor.
- **Pressió sonora:** és la variació de la pressió en un punt respecte a la posició de repòs com a conseqüència de la propagació d'una ona sonora a través del medi. Aquesta magnitud que es mesura en pascals, està molt relacionada amb la sonoritat i moltes vegades s'assimila a aquest paràmetre. Llavors es mesura en decibels.

2.1.1 Propagació del so

A l'hora de fer una reforma en una sala, s'ha d'observar l'espai en el qual es realitzarà la millora. Hi ha nombrosos factors que influeixen en la qualitat final del so, i per tant és necessari estudiar una sèrie de fenòmens associats a la propagació del so per poder actuar correctament en conseqüència.

És important saber com es propaga l'ona sonora en un recinte i saber com actua en funció de l'estructura en la qual es propaga. Així doncs, en aquest

capítol es descriuran les característiques de la propagació del so a l'interior d'un recinte i les diferents teories aplicades en l'anàlisi acústica de les sales.

Propagació del so en un recinte tancat

Per analitzar el comportament del so a l'interior d'una sala, es parteix d'una font puntual omnidireccional (radia per igual en totes les direccions) situada a l'interior del recinte que emet un impuls (considerem un impuls com un so intens de curta durada). Aleshores, un oient situat en un punt qualsevol de la sala rep dos tipus de so: el so directe i el so reflectit. Per una banda, el so directe és aquell que arriba al receptor directament de la font sense cap mena d'interferència, mentre que el so reflectit o indirecte s'origina com a conseqüència de les diferents reflexions que experimenta l'ona a l'incidir sobre les superfícies límit del recinte (parets, finestres, sostre, terra...). A partir d'aquí, es diferencien els següents fenòmens acústics:

a) Atenuació

L'atenuació és la pèrdua d'energia de les ones sonores que es produeix en qualsevol propagació i depèn de la distància que recorre l'ona. És a dir, quan més distància recorre l'ona sonora, menys intensitat hi haurà en un punt de l'espai. De fet la intensitat rebuda en un punt és inversament proporcional al quadrat de la distància a la font.

b) Absorció

L'absorció es defineix com la transformació de l'energia sonora en qualsevol altra forma d'energia, principalment calorífica, produïda tant en la seva propagació a través de l'aire com en incidir sobre les superfícies límit del recinte.

Aquesta variació d'energia dependrà de la intensitat de l'ona sonora, la distància recorreguda i les característiques del medi de propagació. L'efecte d'aquesta magnitud en el camp sonor és una disminució de la intensitat sonora.

Aquesta reducció energètica és bàsicament deguda al públic, mobiliari, materials que cobreixen la sala, les superfícies límit del recinte susceptibles a

vibracions (portes, finestres, parets fines), l'aire i els materials rígids no porosos (elements constructius com el ciment o el formigó).

El grau d'absorció ve donat pel coeficient d'absorció (α) de cadascun dels materials que conformen la sala i és imprescindible per a qualsevol estudi acústic. Aquest coeficient s'obté a partir del següent quocient:

$$\alpha = \frac{\text{Energia Absorbida}}{\text{Energia Incident}}$$

Observem que el quocient mai serà més gran que 1, ja que una superfície no aporta energia a l'ona sonora i que, a més, el coeficient dependrà de la freqüència de l'ona.

c) Reflexió

S'anomena reflexió al fenomen que es produeix quan una ona sonora incideix sobre una superfície que no pot rodejar ni traspasar. És a dir, quan una ona sonora arriba a la superfície de separació de dos medis, una part canvia la direcció de propagació i continua propagant-se en el mateix medi i una altra part penetra en el medi o és absorbida per ell. La reflexió depèn de com sigui la superfície sobre la qual incideix l'ona, distingint-se dos tipus de reflexions:

Reflexió Especular

Es produeix quan l'ona sonora incideix sobre una superfície llisa i poc absorbent (Figura 1), verificant-se dues condicions:

- L'ona incident, la recta normal a la superfície reflectora i l'ona reflectida es troben al mateix pla respecte a la superfície de reflexió en el punt d'incidència.
- L'angle que es forma entre el raig incident i la recta normal és igual a l'angle format entre la recta normal i el raig reflectit.

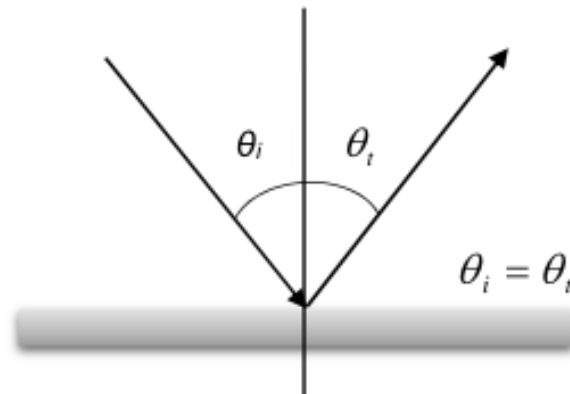


Figura 1. Reflexió especular.

Reflexió Difusa

Si la superfície reflectora no és una superfície llisa, sinó que presenta irregularitats, la reflexió produïda tindrà llocs en múltiples direccions, produint-se la difusió del so i repartint-se la energia en diverses direccions de manera uniforme (Figura 2).

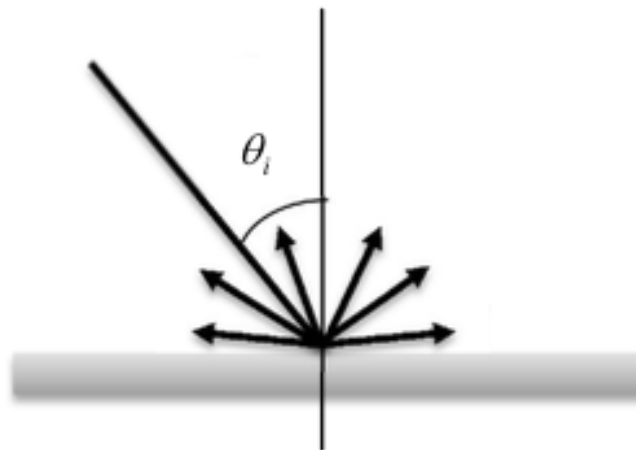


Figura 2. Reflexió difusa.

d) Difracció

Definim difracció com l'alteració que experimenten les ones quan travessen una escletxa estreta, xoquen amb un objecte petit o freguen la vora d'un obstacle. Aquest fenomen succeeix quan l'obstacle té una mida comparable a la longitud d'ona del so incident.

e) Refracció

Desviació en la direcció de propagació que sofreix una ona quan passa d'un medi a un altre diferent. A diferència de la reflexió, l'angle de refracció no és igual al d'incidència degut al canvi de la velocitat de propagació del so d'un medi a l'altre.

f) Interferències

Fenomen físic que es produeix quan en un punt coincideixen dues ones. Segons la relació que s'estableix entre les dues ones l'ona resultant serà reforçada (interferència constructiva) o atenuada (interferència destructiva).

2.1.2 So directe i reflectit

Com a conseqüència d'aquests fenòmens acústics, el so es veu reforçat per múltiples reflexions, procedents de totes les superfícies del recinte. Tanmateix, en un punt qualsevol de la sala, el total de l'energia sonora, consta de dos components: el so directe i el so reflectit.

a) So directe

Definim so directe com el so transmès en línia recta entre el receptor i l'emissor, per tant, aquest so emès per la font coincidiria amb el so que es rebria en un espai lliure. En un punt qualsevol del recinte, l'energia corresponent al so directe depèn exclusivament de la distància entre el punt i la font sonora.

b) So reflectit

Definim so reflectit com el so procedent dels successius xocs de les ones sonores amb les diverses superfícies del recinte. L'energia associada a cada reflexió dependrà del camí recorregut per l'ona sonora i el grau d'absorció acústica dels materials utilitzats com a revestiment de les superfícies implicades.

En un punt qualsevol del recinte, es distingeixen dues zones de característiques diferenciades:

Primeres reflexions

Primer període temporal que engloba totes aquelles reflexions que arriben immediatament després del so. Sol equivaldre a aproximadament 100 ms des de l'arribada del so directe, tot i que aquest valor pot variar en funció del volum del recinte.

D'aquesta manera, mentre que en una sala destinada a la paraula, els primers 50 ms seran determinants, en una sala dedicada a l'audició musical, seran fonamentals els primers 80 ms. Aquestes primeres reflexions són pròpies de cada punt de la sala i a partir d'aquestes s'obté la informació necessària per descriure les característiques acústiques d'un receptor situat en aquesta posició.

Camp reverberant o reflexions tardanes

Segon període temporal format per reflexions més tardanes que constitueixen una cua reverberant. Tot i que la seva densitat és major que les primeres reflexions, el seu nivell sonor és inferior. Aquestes reflexions tardanes determinen com és la reverberació de la sala, en altres paraules, en funció d'aquestes reflexions es determinarà quan temps perdura el so en el recinte. Així doncs, aquest temps dependrà totalment de les característiques absorbents de les superfícies, tot i que el volum i la forma del recinte també tindran certa rellevància.

A la Figura 3 es pot observar la relació entre el nivell de pressió sonora i el temps en el que es succeeix el so directe, les primeres reflexions i la cua reverberant.

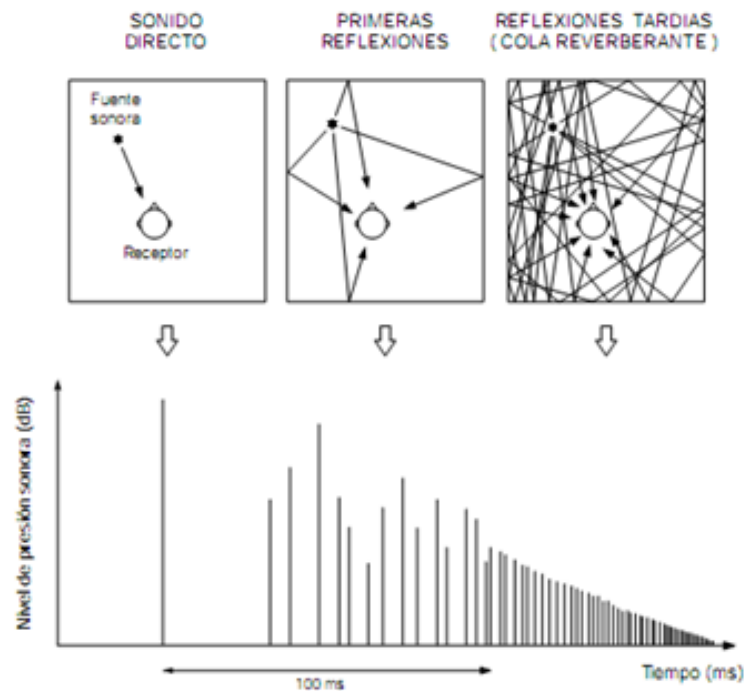


Figura 3. Nivell de pressió sonora (en dB) de les ones sonores en el receptor.

2.1.3 Teories utilitzades en l'anàlisi acústica d'espais arquitectònics

A l'hora d'estudiar un recinte, existeixen diferents magnituds i paràmetres acústics¹ que determinen la qualitat acústica d'una sala. Aquests paràmetres es centren en quatre teories: la teoria estadística, la teoria geomètrica, la teoria ondulatòria i la teoria psicoacústica. En aquest treball tan sols s'explicaran les dues primeres teories, ja que tant l'ondulatòria com la psicoacústica s'allunyen dels marges de Batxillerat i les aproximacions de les altres dues teories són suficients per a fer l'anàlisi acústica de l'espai objecte del present treball.

a) Teoria estadística

Aquesta teoria s'empra per analitzar la reverberació d'una sala, és a dir, la persistència del so que es percep en un recinte després que la fon sonora deixi d'emetre. Es mesura mitjançant el temps de reverberació² (RT) que és el temps que triga en atenuar-se l'energia sonora dins un recinte.

¹ Els diferents paràmetres acústics estan detallats a l'apartat 3.2 Disseny acústic de sales.

² Temps de reverberació, '*Reverberation time*': Paràmetre acústic detallat a l'apartat 3.2.2 Paràmetres acústics.

Totes les expressions per calcular el RT se sustenten en el modelat estadístic de la resposta sonora d'una sala, és a dir, totes les reflexions són tractades per igual, sense diferenciar-ne les primeres de les tardanes, i se suposen condicions de camp difús, aquestes condicions són:

- Les ones reflectides es propaguen en totes les direccions amb igual probabilitat
- La densitat d'energia sonora en un instant és la mateixa independentment de la posició dins la sala.
- L'energia sonora en un punt s'obté com la suma de les mitjanes de totes les reflexions que passen per aquest.

Aquests supòsits generen uns resultats només aproximats però faciliten la comprensió i caracterització del camp sonor a l'interior d'un recinte.

b) Teoria Geomètrica

Segons la teoria geomètrica, habitualment les primeres reflexions presenten un nivell energètic major que les corresponents a la cua reverberant. A més, en dependre directament de les formes geomètriques del recinte, són específiques per cada punt i, per tant, conjuntament amb el so directe determinen les característiques acústiques pròpies del recinte.

La teoria geomètrica, tal com s'observa a la Figura 4, considera les ones de so com a raigs de llum, és a dir, considera que les reflexions dels raigs sonors sobre diferents superfícies són totalment especulars.

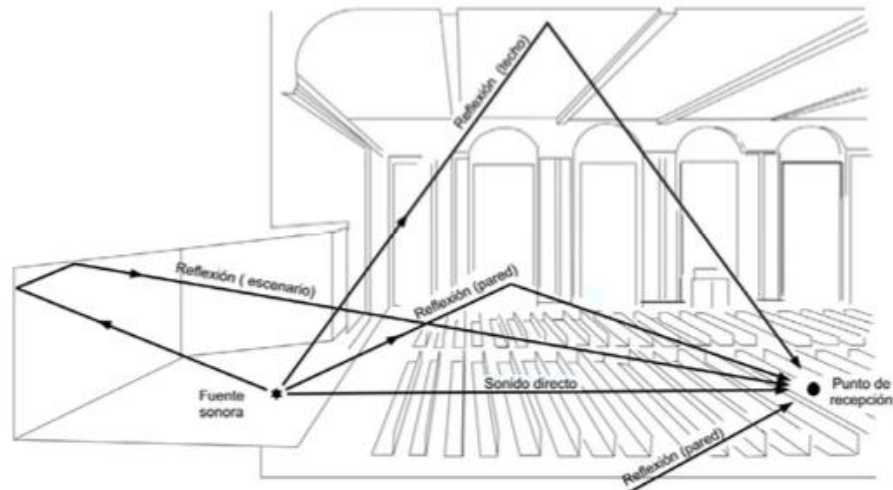


Figura 4. Teoria Geomètrica.

L'anàlisi acústica resultant d'aquesta hipòtesi constitueix la base de l'acústica geomètrica. Així com la teoria estadística, aquesta teoria és una aproximació a la realitat, ja que tan sols és totalment vertadera en determinades circumstàncies. Perquè a nivell pràctic es produeixi una reflexió especular és necessari que la superfície de reflexió compleixi els següents requisits:

- Dimensions grans en comparació a la longitud d'ona del so considerat.
- Superfície llisa i reflectant.

D'altra banda, aquesta teoria té una sèrie de limitacions:

- Homogeneïtat del medi: el medi de propagació, és a dir, l'aire no és homogeni, i al considerar les ones sonores com a raigs sonors, hi haurà una aproximació de la direcció real del raig sonor.
- Reflexió difusa: pràcticament no existeix una superfície de reflexió totalment llisa i el raig sonor mai tindrà una reflexió especular.
- Difracció: quan un raig incideix sobre una obstacle que no és de grandària considerable, l'ona es propagaria sobrepasant-lo en la direcció original. Ara bé, al aplicar el mètode de traçat de raigs, la difracció desapareix.
- Interferència: amb la teoria del traçat de raigs no es contemplen les coincidències de les ones en un punt desestimant-se el fenomen de la interferència acústica.

En conseqüència, la utilització de la teoria implica una sèrie de simplificacions amb les que es limita la seva validesa en determinats casos (sobretot a baixes freqüències). No obstant això, la teoria geomètrica aporta bons resultats en l'estudi de les primeres reflexions.

2.2 Disseny acústic de les sales

2.2.1 Objectius Acústics

El principal objectiu acústic en les sales destinades a la paraula és disposar d'una bona intel·ligibilitat, és a dir, que en qualsevol punt d'una sala on es pugui situar un oient, sigui capaç no tan sols d'escoltar el missatge sinó d'entendre'l.

Hi ha varis factors que influeixen en la intel·ligibilitat de la paraula:

a) El so de fons

Per a una correcta comprensió del missatge vocal és necessari que el nivell de senyal útil (el so directe i les primeres reflexions) superi el nivell de so de fons. Distingim dos elements en el so de fons:

- So generat a l'interior del recinte: sorolls dels sistemes d'aclimatació, il·luminació, calefacció...
- So procedent de l'exterior: tràfic, so de sales adjacents...

b) Nivell de reverberació

Per aconseguir una bona intel·ligibilitat de la paraula és necessari que el nivell de senyal sigui superior al nivell de so reverberant. És a dir, a la zona pròxima de la font sonora (camp directe) la intel·ligibilitat és bona, però en superar aquesta distància crítica (coneguda com a camp reverberant) la intel·ligibilitat empitjora.

El nivell de reverberació depèn dels materials utilitzats en les diferents superfícies, disminuint a major absorció i augmentant amb el volum del recinte.

Quant major sigui el nivell del camp reverberant, menor serà la distància crítica i, per tant, es reduirà la superfície on l'orient té una bona intel·ligibilitat.

c) Anomalies acústiques

Hi ha una sèrie d'efectes³ (ecos, focalitzacions del so, etc.) que dificulten la comprensió del missatge i resulten molt molestos per al oient.

Tant el so de fons, el nivell de reverberació i les anomalies acústiques són tres factors corregibles amb el disseny i condicionament acústic de la sala. Ara bé, existeixen altres factors que influeixen en la intel·ligibilitat de la paraula que són inherents a la veu humana.

d) La directivitat de la veu

La direcció de la veu és intrínseca al sistema fònic humà i es caracteritza per concentrar la màxima potència en la direcció frontal i la mínima en la direcció posterior. A més, a major freqüència, més s'accentua aquesta característica.

e) Característiques del missatge oral

El discurs oral té una sèrie de característiques concretes; una paraula consta de vocals i consonants i cadascuna té unes propietats acústiques diferents:

- Una vocal posseeix components en baixa freqüència, un nivell sonor 12 dB superior al d'una consonant i té una major durada (90 ms). Per tant, aporten nivell sonor a la veu i la freqüència a la qual ofereixen una major contribució és la banda de 500 Hz.
- Una consonant presenta una major aportació a les altes freqüències però té una duració inferior (20 ms) i un nivell sonor també inferior.

Per consegüent, com que la intel·ligibilitat de la paraula radica en la correcta percepció de les consonants, és imprescindible percebre correctament les altes freqüències.

A la Taula 1 apareix una classificació per bandes d'octava de la contribució de la intel·ligibilitat de la paraula i el nivell sonor. Observem com el nivell sonor

³ Aquests efectes o defectes acústics s'expliquen amb detall a l'apartat 3.2.3 Defectes acústics.

depèn quasi bé en la seva totalitat de les freqüències baixes (les vocals) i la intel·ligibilitat depèn de les freqüències altes (les consonants).

Taula 1. Contribució per bandes d'octava a la intel·ligibilitat i al nivell sonor.

Freqüències (Hz)	250	500	1000	2000	4000
Nivell Sonor	22%	46%	20%	3%	2%
Intel·ligibilitat	5%	13%	20%	31%	26%

Per examinar si un recinte compleix els objectius acústics necessaris per al desenvolupament de la seva funció, existeixen dos mètodes complementaris: l'anàlisi objectiu (paràmetres acústics) i l'anàlisi subjectiu (l'auralització).

En el present treball s'analitzarà la sala mitjançant els paràmetres acústics, ja que l'auralització és un procés complex que requereix de programes informàtics especialitzats i queda fora de l'abast d'aquest treball.

2.2.2 Paràmetres acústics

Hi ha dos paràmetres acústics fonamentals que durant molt de temps han servit per a determinar la qualitat acústica d'un recinte: el nivell de pressió sonora i el temps de reverberació.

D'altra banda, hi ha una sèrie de paràmetres acústics derivats d'aquests dos que permeten analitzar la intel·ligibilitat de la sala. A continuació es descriuen els paràmetres acústics més comuns que permeten avaluar l'acústica d'una sala dedicada a la paraula.

a) Nivell de pressió sonora (SPL)

És el paràmetre utilitzat per mesurar la magnitud del camp sonor en un punt concret. Es defineix com:

$$SLP = 2 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (dB)$$

On:

p_{rms} : pressió eficaç del so en el punt considerat

p_0 : pressió eficaç de referència. S'escull la franja d'audició a 1000 Hz, el valor del qual és $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Per mesurar la SPL no s'utilitza el pascal, per l'ampli marge que hi ha entre la sonoritat més intensa i la més feble que es capaç de detectar l'oïda humana (entre 200 Pa i 2×10^5 Pa). Normalment s'adopta una escala logarítmica i s'utilitza com a unitat el decibel.

b) Temps de reverberació (RT)

Definim el temps de reverberació com el temps que transcorre des que la font deixa d'emetre soroll, fins que la intensitat sonora present a l'interior de la sala cau 60 dB.

El RT se sol calcular mitjançant fórmules basades en la teoria estadística. El principal inconvenient és que el seu valor és independent de la posició del receptor i tan sols és vàlid en condicions de camp difús.

El RT òptim dependrà de la funció de la sala. Cada freqüència tindrà un RT diferent, per tant, per saber el RT mitjà de la sala es calcula la mitjana aritmètica dels temps de reverberació en les bandes d'octava centrades en 500 i 1000Hz quan la sala és ocupada.

A la Taula 2, es poden observar alguns dels valors òptims del RT mitjà en funció de la finalitat de la sala. Aquests valors es varen obtenir després d'analitzar diverses sales dedicades a funcions diferents.

Taula 2. RT mitjà segons el tipus de sala.

TIPUS DE SALA	RT _{mit} , sala ocupada (s)
Sala de conferències o Aula	0.7 - 1.0
Sala polivalent	1.2 - 1.5
Locutori de ràdio	0.2 - 0.4

A més a més, el temps de reverberació està plenament relacionat amb la intel·ligibilitat de la paraula:

En una sala viva o reverberant (RT elevat), la persistència de les vocals en el temps és encara major que en l'aire lliure (on ja s'ha comentat que era elevada, 90ms). Aquesta major duració sumat al seu major nivell sonor pot comportar un solapament de les vocals i les consonants. Com a conseqüència d'això, degut a que les consonants aporten claredat al missatge, si són emmascarades parcial o totalment, la intel·ligibilitat de la paraula disminuirà.

Així doncs, en funció de la necessitat de major intel·ligibilitat de la paraula, menor serà el temps de reverberació òptim. A més, és necessari que el RT sigui el màxim constant possible en les diferents freqüències, especialment en les baixes (125 i 250 Hz)

Paral·lelament, també és plenament aconsellable que la variació del RT amb el grau d'ocupació de la sala sigui petit per tal que les condicions acústiques siguin òptimes sota qualsevol circumstància.

Hi ha diferents maneres de mesurar el temps de reverberació, però les fórmules més usuals són la fórmula de Sabine i la fórmula d'Eyring.

Fórmula de Sabine:

Tot i donar un valor bastant aproximat, és la fórmula més utilitzada per a calcular el RT degut a la seva simplicitat. Tot i així, quan el coeficient d'absorció mitjà és major a 0.15, sol tenir força error.

$$RT = \frac{V \cdot 0.161}{A} \text{ (s)}$$

on,

RT = Temps de reverberació, 'reverberation time'

V = Volum del local en m³

S = Extensió de superfície total del local en m²

A = Àrea total d'absorció

$$A = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot S_k \text{ en } n \text{ superfícies}$$

on,

S_k = Suma de superfícies amb un coeficient d'absorció α_k

α_k = Coeficient d'absorció

Fórmula de C. F. Eyring:

És més generalitzada per a càlculs precisos, on la mitjana dels coeficients d'absorció és major a 0.15 i existeix una distribució uniforme dels materials absorbents.

$$RT = \frac{V \cdot 0.161}{S \cdot [-2.3 \cdot \log_{10}(1 - \bar{\alpha})]} \text{ (s)}$$

on,

RT = Temps de reverberació, 'reverberation time'

V = Volum del local en m^3

S = Extensió de superfície total del local en m^2

α = coeficient d'absorció de superfícies del local en m^2 ,

coses i persones,

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + S_3 \cdot \alpha_3 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots} \text{ coeficient mitjà d'absorció}$$

c) Calidesa Acústica (BR)

La BR és la relació entre els temps de reverberació de les baixes freqüències (125 i 250 Hz) i els de les freqüències mitjanes (500 i 1000 Hz)

$$BR = \frac{RT(125) + RT(250)}{RT(500) + RT(1000)}$$

La calidesa expressa la riquesa en freqüències baixes (sons greus) d'una sala. És precisament d'aquí d'on surt el nom de calidesa acústica; aquest paràmetre s'utilitza únicament per a sales dedicades a la música i en termes musicals, els sons greus tenen la sensació subjectiva de calidesa i suavitat.

Així doncs, durant la fase de disseny s'haurà de vigilar amb els materials usats, a fi d'evitar l'absorció excessiva en les freqüències baixes.

d) Brillantor (Br)

La Br és la relació entre els temps de reverberació de les altes freqüències (2000 i 4000 Hz) i els de les freqüències mitjanes (500 i 1000 Hz)

$$Br = \frac{RT(2000) + RT(4000)}{RT(500) + RT(1000)}$$

La brillantor mesura la riquesa de les altes freqüències (sons aguts) de la sala els quals tenen una percepció subjectiva com a clars i brillants.

A diferència de la BR, la brillantor no és pròpia de sales dedicades a la música, s'utilitza per a sales dedicades a la paraula.

A l'hora del disseny de la sala, cal vigilar que el valor de Br no sigui gaire elevat, ja que una excessiva brillantor origina un so artificial molest; per això és aconsellable que Br no superi la unitat.

e) Early Decay Time (EDT)

És un paràmetre molt relacionat amb el RT, amb la diferència de que l'EDT mesura la reverberació percebuda (subjectiva), mentre que el RT mesura la reverberació real (objectiva). Així doncs, l'EDT variarà en funció del punt on es trobi l'emissor. Per calcular-lo, es multiplica per sis el temps que transcorre en caure 10 dB el nivell de pressió sonora des de que la font deixa d'emetre.

El valor òptim de l'EDT variarà en funció de la finalitat de la sala, però el valor òptim sempre ha de ser el més semblant possible al temps de reverberació.

f) Sonoritat

Distingim dos paràmetres, anomenats ambdós sonoritat tot i que són excloents:

- '*Speech sound level*' (S): utilitzat per a sales destinades a la paraula.

- '*Strength factor*' (G): utilitzat per a recintes orientats a l'audició musical.

Els dos paràmetres s'utilitzen per a mesurar el grau d'amplificació que una sala produeix sobre el missatge de veu (S) o sobre la música (G). Així que, en vista a la finalitat de la sala estudiada en el present treball, es detallarà només el paràmetre dedicat a les sales destinades a la paraula (S).

El paràmetre S es defineix com la diferència entre el nivell mitjà de pressió sonora en un punt de la sala i el nivell de referència quan la font és una persona situada sobre l'escenari. El nivell de referència es considera 39 dB que és el nivell mitjà de pressió sonora que existiria a 10m de la font en condicions d'espai lliure.

$$S_{receptor} = SPL_{receptor} - 39 \text{ (dB)}$$

A nivell pràctic, la sonoritat es calcula mitjançant la mitjana aritmètica de les bandes d'octava de 500Hz, 1000Hz i 2000Hz; s'avalua quan la sala està ocupada i se sol expressar com a S_{mit} .

Segons estudis realitzats, en teatres de condicions acústiques òptimes, el marge de valors recomanats per a S_{mit} és:

Quan el receptor se situa frontal a l'emissor:

$$4 \leq S_{mit} \leq 8 \text{ (dB)}$$

Quan el receptor se situa lateralment a l'emissor:

$$2 \leq S_{mit} \leq 6 \text{ (dB)}$$

En qualsevol cas, S_{mit} sempre haurà de ser positiu, per tant, en qualsevol punt de la sala, l'SPL haurà de ser superior als 39 dB.

g) Intel·ligibilitat

En sales destinades a la paraula, la intel·ligibilitat és molt important i per tant és convenient quantificar-la. Així doncs, existeixen els següents paràmetres centrats en mesurar la intel·ligibilitat de la paraula:

- Pèrdua d'articulació de consonants (%ALCons)
- Índex de transmissió de la paraula (STI)
- Índex ràpid de transmissió de la paraula (RASTI)

Malgrat que s'expliquin els tres paràmetres, a nivell pràctic tan sols es calcularà el %ALCons, ja que els altres dos són d'una complexitat fora de l'abast d'aquest treball.

Pèrdua d'articulació de consonants (%ALCons)

El %ALCons correspon a les sigles de '*Articulation Loss of Consonants*', és a dir, aquest paràmetre correspon al percentatge de pèrdua de l'articulació de les consonants. Per tant, quan major sigui, menor serà la intel·ligibilitat de la paraula.

Aquest paràmetre fou definit per l'investigador holandès V. M. A. Peutz, que va enquestar a una sèrie d'espectadors en diferents sales fent-los escoltar una sèrie de "logatoms" (consonant-vocal-consonant) i aquests havien d'escriure el que havien entès.

D'aquesta forma, va poder deduir el percentatge d'errors i encerts i determinar com era la intel·ligibilitat de la paraula en cada sala. Tot i així, Peutz volia obtenir una expressió matemàtica per a mesurar-la. Així doncs, a partir de la teoria estadística, va obtenir una relació entre el %ALCons i el temps de reverberació:

$$\%ALCons = \frac{200 \cdot r^2 \cdot RT^2}{V \cdot Q} \quad \text{si } r \leq 3.16 \cdot D_c$$

$$\%ALCons = 9 \cdot RT \quad \text{si } r > 3.16 \cdot D_c$$

on,

r = distància a la font sonora en metres

V = volum de la sala en metres cúbics

Q = directivitat de la font. En el cas de la veu humana per a una posició frontal, $Q = 2$

RT = temps de reverberació en segons

D_c = distància crítica que limita quina equació s'ha d'utilitzar.

Es calcula mitjançant la següent fórmula:

$$D_c = 0.14 \cdot \sqrt{Q \cdot R}$$

on,

R = constant característica de la sala, definida com:

$$R = \frac{S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}{(1 - \bar{\alpha})}$$

on,

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + S_3 \cdot \alpha_3 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots} \text{ coeficient mitjà d'absorció}$$

A nivell pràctic, se sol escollir la banda d'octava centrada en els 2000Hz, ja que és la que més influeix en la intel·ligibilitat de la paraula ja que és la banda on es distingeixen les consonants.

Índex de transmissió de la paraula (STI) i Índex ràpid de transmissió de la paraula (RASTI)

Aquests dos paràmetres estan plenament relacionats i el valor dels dos es comprèn entre el 0 (intel·ligibilitat nul·la) i l'1 (intel·ligibilitat òptima). La diferència es troba a l'hora del càlcul; malgrat que els dos siguin molt complicats de calcular, el càlcul del STI és molt llarg i laboriós, mentre que el RASTI és una simplificació d'aquest per a reduir el temps de càlcul. Tot i així, aquests dos paràmetres solen calcular-se mitjançant simuladors acústics.

h) Claredat de veu (C_{50})

Existeixen dos paràmetres diferents per mesurar la claredat en funció del tipus de sales: la claredat de veu (C_{50}) per a sales de paraula i la claredat musical (C_{80}) per a sales de música.

La claredat de la veu, C_{50} és un paràmetre relacionat amb la intel·ligibilitat del missatge oral. Compara l'energia que arriba del so en les primeres reflexions

amb les que arriben més tard i mostra el grau de separació entre els diferents sons d'un missatge oral. Els valors recomanats en enginyeria acústica per al paràmetre C_{50} estan per sobre dels 2 dB. Si el valor calculat d'aquest paràmetre està per sota dels 2 dB, el missatge oral emès resultaria confús.

i) Definició (D_{50})

La definició (D_{50}) es defineix com la relació entre l'energia que arriba a l'oient durant els primers 50 ms des de l'arribada del so directe i l'energia total rebuda.

Com més elevat sigui aquest valor, millor serà la intel·ligibilitat de la paraula i la sonoritat en el punt considerat de la sala. El valor de D varia en funció de la posició de qui parla respecte a la sala. La situació òptima es dona quan es situa frontalment, i va empitjorant a mesura que realitza una rotació. El disseny d'un recinte destinat a la paraula ha d'anar cap a l'obtenció de la màxima invariabilitat d'aquest paràmetre amb independència de la posició de l'orador.

2.2.3 Defectes acústics

Hi ha una sèrie d'efectes acústics que són realment perjudicials i molestos si no es tenen en compte. Per eliminar-los, s'hauran d'utilitzar materials condicionants adequats i, a vegades si és possible, serà fins i tot necessari variar la geometria de la sala. Entre aquests defectes acústics destaquen:

a) Ecos

S'anomena eco a qualsevol reflexió que arriba a l'emissor amb un retard superior als 50 ms en les sales destinades a la paraula i als 80 ms en les sales dedicades a la música, respecte al so directe i amb un nivell sonor perceptible. Si es compleixen aquestes dues condicions, l'oïda ho percep com una repetició del so directe. Totes les reflexions rebudes dins els primers 50-80 ms són integrades per l'oïda amb el so directe i es perceben com un únic so. Per altra banda, les reflexions posteriors que tenen un nivell sonor baix, són considerades part de la cua reverberant.

L'aparició d'ecos en una sala quasi bé sempre anirà relacionat a la geometria de la sala. Així doncs, solen aparèixer ecos:

- Si es troba una paret posterior altament reflectant a una distància superior als 8.5 m.
- Es sol formar un reflector entre la intersecció del sostre i la paret posterior sempre i quan se situí a més de 8.5 metres de la font.

Tanmateix, per prevenir l'eco se sol:

- Col·locar material absorbent sobre les superfícies conflictives. Tot i així cal vigilar amb el material absorbent, ja que un excés d'aquest pot reduir el temps de reverberació i la sonoritat de manera inadequada i perdre intel·ligibilitat de la paraula.
- Incorporar elements inclinats per a que generin reflexions cap a altres zones menys problemàtiques.
- Superposar elements convexos a les superfícies generadors d'eco o variar-ne la forma per a que siguin convexes. No obstant això, és important que la curvatura d'aquestes superfícies sigui elevada ja que sinó funcionarien com a difusors.

b) Eco flotant

L'eco flotant està format per un conjunt de reflexions consecutives, de nivell significatiu, tot i que cada una és lleugerament més dèbil a l'anterior i són molt pròximes entre sí.

Es percep com la repetició continuada d'un mateix soroll durant un breu interval de temps. S'origina quan la font sonora es col·loca entre dues parets paral·leles, llises i molt reflectants.

Per prevenir-lo es pot:

- Per una banda, eliminar l'origen d'aquests ecos, és a dir, procurar que no existeixin parts llises i reflectants que a la vegada siguin paral·leles. Generalment, una inclinació d'uns 5° sol resoldre el problema
- Per altra banda, si l'anterior solució no és possible, existeix una de més eficient que consisteix en reduir el nivell de les reflexions consecutives

per evitar la seva percepció. Això s'aconsegueix afegint materials fonoabsorbents o difusors almenys a una de les superfícies.

c) Focalització del so

Consisteix en l'agrupació de reflexions en una zona limitada de la sala, arribant en ocasions a un nivell superior al del so directe.

Aquest efecte trenca la uniformitat de la difusió a la sala i a més, és molt molest per als oients situats en el focus, ja que aquestes reflexions desvirtuen la localització del so, observem la Figura 5:

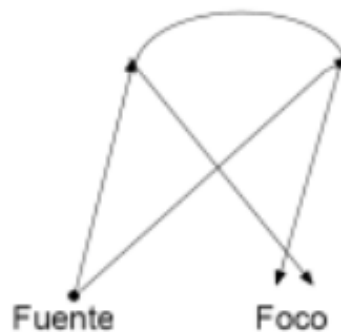


Figura 5. Focalització del so en una superfície còncaua.

La causa que es produeixi és la presència de qualsevol superfície còncaua a la sala: voltes, cúpules, parets semicirculars, etc. Per a solucionar aquest efecte, s'apliquen els mateixos mètodes que per als ecos.

d) Coloració del so

La coloració del so consisteix en la major intensificació o atenuació d'unes freqüències respecte a altres al combinar-se el so directe i el reflectit que deformen l'espectre sonor. Aquest efecte és especialment molest ja que dóna certa tonalitat metàl·lica al so.

Aquest problema és característic de recintes de dimensions reduïdes, com un estudi de gravació. Per tant, la solució a aquest problema consisteix en escollir

adequadament les dimensions del recinte per a aconseguir una distribució uniforme del so.

En recintes grans (teatres o sales de concerts) és bastant inapreciable i no es té en compte a l'hora del disseny. Tot i així, és possible que es produeixin coloracions per la presència de superfícies planes, llises i de grans dimensions col·locades en parets laterals o falsos sostres que tenen per objectiu crear primeres reflexions cap a l'audiència. Una solució sol ser donar certa convexitat a aquestes superfícies problemàtiques.

e) Falsa localització de la font sonora

En ocasions, el sistema auditiu humà pot veure's enganyat en determinar la localització de la font sonora; això es degut a la presència d'alguna reflexió de nivell considerable rebuda dins els primers 50-80 ms. Aleshores, enlloc de percebre que el so procedeix de la font sonora, l'emissor considera que procedeix de la superfície reflectora.

Qualsevol solució adaptada per eliminar ecos i coloracions és viable per eliminar aquest fenomen.

f) Efecte "Cocktail party"

És un fenomen molt típic a les sales d'ús públic molt sorolloses, com cafeteries, restaurants, etc., que estan mal condicionades acústicament.

Aquests locals se solen caracteritzar per tenir nivells de camp reverberant alts sumats a moltes fonts sonores les quals constitueixen focus de soroll les unes de les altres. Aquesta mala combinació genera un efecte en cadena conegut com a 'Cocktail Party', que consisteix en:

Considerant una persona parlant, el camp sonor directe que l'envolta és relativament petit degut a les característiques de la sala i la interferència d'altres converses. Conseqüentment, el seu oient haurà d'estar molt a prop per rebre el missatge. Si l'orient no es troba a una distància suficientment propera, la solució que adopta l'emissor és parlar més fort, generant més soroll en el

local. Aquest procés és repetit per totes les persones de la sala que es troben en la mateixa situació. Així doncs, el soroll es va incrementant i fent-se realment molest i fins i tot disminueix molt la intel·ligibilitat de la paraula.

Per a solucionar aquest problema, s'ha de col·locar material absorbent tant a les parets com al sostre per disminuir la reverberació. Aleshores, com que la gent es podrà escoltar correctament, no haurà d'eleva la veu i s'elimina l'efecte 'Cocktail Party'.

2.2.4 Paràmetres acústics òptims

Per aconseguir una bona intel·ligibilitat de la paraula en una sala, després de considerar i solucionar tots els defectes acústics, s'ha de complir que:

- El temps de reverberació (TR_{mit}) tingui uns valors compresos entre 0.7 i 1 s
- La brillantor (Br) estigui compresa entre 0.87 i 1 s
- L'Early Decay Time (EDT_{mit}) sigui el més semblant al TR_{mit}
- La sonoritat (G) estigui compresa entre 4 i 5.5
- La claredat de veu (C_{50}) estigui per sota 2dB
- La definició (D_{50}) sigui com a mínim del 50%
- Tant el RASTI com el STI siguin majors de 0.64
- El percentatge de pèrdua de l'articulació de les consonants (%ALCons) sigui menor a 11,4%

En el present treball per millorar l'acústica del Menjador del Càntirs ens centrarem en l'estudi d'alguns d'aquests paràmetres acústics que permeten establir la intel·ligibilitat de la paraula i com es pot millorar amb la introducció d'elements fonoabsorbents; els calcularem abans i després d'incloure totes les millores acústiques proposades.

En concret de tots aquests paràmetres es calcularan: el temps de reverberació (TR), la brillantor (Br) i el %ALCons. Per una banda, constitueixen els paràmetres més significatius, que donen una mesura molt fidedigna de la

intel·ligibilitat, i d'altra banda, són els que podem calcular amb les eines que disposem. No es calcularan l'EDT, la claredat (C_{50}), la definició (D_{50}), el RASTI ni el STI, ja que requereixen d'unes mesures molt específiques i alguns són paràmetres extremadament difícils de calcular i que s'escapen de l'abast del present treball.

2.3 Materials Fonoabsorbents

L'absorció que pateixen les ones sonores quan incideixen sobre els diferents materials absorbents utilitzats com revestiments de les superfícies límit d'un recinte, així com la seva dependència en funció de la freqüència, varien considerablement d'un material a l'altre. En conseqüència, la correcta elecció dels mateixos permetrà obtenir, en cada cas, l'absorció més adequada en totes les bandes de freqüències d'interès.

Existeixen dos tipus genèrics de materials específicament dissenyats per a produir una determinada absorció:

- els pròpiament anomenats materials fonoabsorbents, i
- els anomenats absorbents selectius o ressonadors de determinades freqüències.

En tots dos casos, quan l'absorció en una o més bandes de freqüències és molt elevada, pot ocórrer que el coeficient d'absorció mesurat sigui superior a 1. Això no ha de conduir a la interpretació totalment errònia i mancada de sentit des d'un punt de vista físic que l'energia absorbida en aquestes bandes és més gran que l'energia incident. La justificació prové de l'existència d'un efecte de difracció que fa que la superfície efectiva de la mostra de material utilitzada per a la mesura sigui més gran que la superfície real.

Els materials fonoabsorbents s'utilitzen generalment per aconseguir algun dels següents objectius:

1. Obtenció dels temps de reverberació més adequats en funció de l'activitat (o activitats) a la qual s'hagi previst destinar l'espai objecte de disseny.

2. Prevenció o eliminació d'ecos.
3. Reducció del nivell de camp reverberant en espais sorollosos (restaurants, fàbriques, estacions, etc.)

Aquests materials presenten un gran nombre de canals a través dels quals l'ona sonora pot penetrar. La dissipació d'energia en forma de calor es produeix quan l'ona entra en contacte amb les parets d'aquests canals. Com més gran sigui el nombre de canals, més gran serà l'absorció produïda. El corresponent coeficient d'absorció α és assignat a la superfície del material.

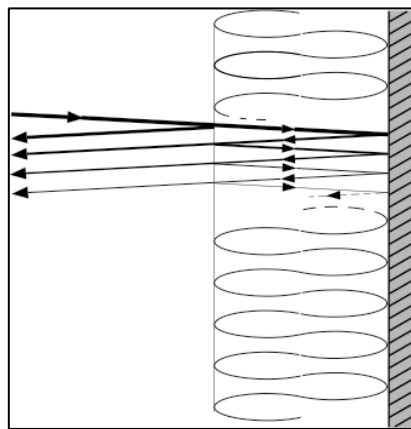


Figura 6. Procés de dissipació de l'energia a l'interior d'un material porós situat davant d'una paret rígida.

A la Figura 6 es representa aquest procés de forma gràfica i simplificada. Es parteix d'un material porós i homogeni, situat davant d'una paret rígida. L'ona sonora incident és parcialment reflectida. L'energia sonora no reflectida penetra en el material, s'atenua i aconsegueix de nou la seva superfície després de reflectir-se en la paret rígida posterior. L'energia romanent es divideix, novament, en una part que travessa la superfície del material i una altra que torna a la paret posterior a través del material. Des d'un punt de vista teòric, aquest procés continua indefinidament. Aquesta explicació qualitativa serveix per demostrar que l'ona sonora reflectida pel material pot imaginar-se com composta per un nombre il·limitat de components successives, cadascuna més feble que la precedent a causa de les refraccions i reflexions que tenen lloc a l'interior del material.

L'esmentat mecanisme d'absorció del so és propi de tots els materials porosos, sempre que els porus siguin accessibles des de l'exterior. Normalment aquests materials estan formats per substàncies fibroses o granulars a les quals se'ls confereix un grau suficient de compacitat a través d'un procés de premsa o de teixit. Els materials absorbents comercials d'aquest tipus es manufacturen bàsicament a partir de:

- Llana de vidre
- Llana mineral
- Escuma a força de resina de melamina
- Escuma de poliuretà

Els materials fonoabsorbents proposats en el condicionament del Menjador dels Càntirs, estan fabricats amb llana de vidre, pel que fa referència als panells penjats al sostre i les portes dels armaris alts de revestiment (Ecophon soloTM baffle); i amb escuma de poliuretà barrejada amb teixit, pel que fa referència als panells quadrats que es col·locaran a les parets (Vicoustic cinema round premium). A l'apartat 5.1.1 es descriuen les característiques i coeficients d'absorció acústica d'aquests materials.

3 Descripció del Menjador dels Càntirs actual

3.1 Activitats realitzades

El Menjador dels Càntirs és un recinte que com el seu nom indica, és un espai la funció principal del qual és la de ser un menjador. Particularment, un menjador escolar per l'etapa de primària i primer cicle de secundària, per tant s'ha de tenir present que seran nens (d'entre 6 i 14 anys) qui l'utilitzen. A més, el fet de ser menjador escolar fa que es busqui la utilitat abans que l'estètica: el terra ha de ser fàcil de netejar, s'hi han de poder desplaçar carros de menjar sense problemes i els materials de les parets han de ser resistents per tal de suportar els fregaments inevitables de cadires i taules.

Per altra banda, malgrat que sigui un menjador, aquest recinte també destaca per a ser una sala polivalent, és a dir, destinada a activitats diverses. El Menjador dels Càntirs s'havia utilitzat per a quasi bé tots els actes multitudinaris de l'escola: la representació dels Pastorets, concert de Nadal, Santa Cecília, presentacions de càrrecs, etc. Recentment, amb la construcció del pavelló esportiu, el menjador de secundària i la futura construcció del nou edifici, han anat minvant les seves funcions. Així, per exemple, els actes que requereixen de bastants alumnes o participants (com el concert de Nadal o la representació dels Pastorets) s'han traslladat al pavelló. D'aquesta manera, la funció de sala d'actes del Menjador dels Càntirs ha quedat reduïda a conferències o reunions d'un nombre limitat de públic: presentacions de càrrecs, reunions de l'AMPA, etc.

Així doncs, com que la major part d'actes que s'hi celebraran són conferències, reunions o actes de petit format, el Menjador dels Càntirs s'avaluarà com a una sala destinada a la paraula i no pas a la música.

3.2 Descripció del recinte actual

3.2.1 Descripció de l'estructura de la sala

El Menjador dels Càntirs és una sala de 160 m² que se situa al centre de l'escola. Aquesta sala pertany a la part antiga de l'edifici, el qual fou dissenyat per l'arquitecte modernista Enric Sagnier i Villavecchia (Figura 7), i per tant, com tot l'edifici original de l'escola, té característiques del modernisme català.

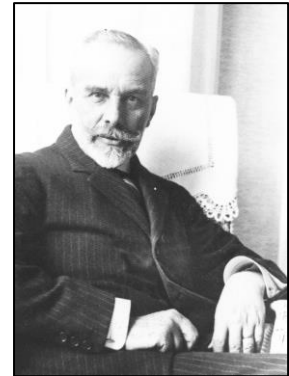


Figura 7. Enric Sagnier i Villavecchia.

Com es pot comprovar a la Figura 8, actualment la sala té dos accessos, un des de l'edifici de primària i l'altra des de l'edifici de secundària. Entrant per la porta que dóna a l'edifici de Primària, a mà dreta hi ha un accés al *office* de la cuina i a mà esquerra dues portes donen accés a sales que s'utilitzen com a magatzem. A la paret contrària de l'accés al *office*, trobem una finestra tocant al sostre, aquesta finestra és l'única entrada de llum natural de la sala.



Figura 8. Fotografia general del Menjador dels Càntirs.

La capacitat de la sala és de 20 taules i 150 alumnes si s'utilitza com a menjador; mentre que si s'utilitza com a sala de conferències hi ha espai per a unes 160 persones i un escenari d'uns 15 m². Val a dir que aquests valors poden variar en funció de la distribució del públic i la mida de la tarima.

L'estructura de la sala és rectangular, a dues de les parets hi trobem unes parets auxiliars de 2,10 m d'alçada (Figura 9) que recobreixen part de les antigues parets del menjador (aquestes parets auxiliars no es troben a la paret de la finestra ni a la paret que dona accés als magatzems). El gruix d'aquestes parets varia en funció d'on es localitzen.



Figura 9. Fotografia d'una de les parets auxiliars.

L'element arquitectònic més característic d'aquesta sala és el sostre (Figura 10), format per tres voltes catalanes de doble curvatura concatenades que imprimeixen un gran caràcter i constitueixen el principal element estètic de la sala.



Figura 10. Sostre arquejat del Menjador dels Càntirs.

La volta catalana ha estat un recurs arquitectònic molt utilitzat en el modernisme català. És una tècnica tradicional catalana de construcció, que consisteix en cobrir l'espai del sostre disposant els maons per la part plana, és a dir, per la cara de superfície més gran del maó, la qual cosa fa que sigui molt més lleugera que les voltes construïdes amb altres sistemes constructius. Fou àmpliament utilitzada ja que permetia construir molt de pressa amb una gran estabilitat. Els orígens de la volta catalana es troben al segle XIV quan es va començar a utilitzar a Catalunya per mestres d'obres anònims. No obstant, va ser fins a finals del segle XIX i començament del segle XX quan els arquitectes modernistes la varen utilitzar àmpliament, donant-li una nova vida. Antoni Gaudí va ser qui va dur més lluny aquesta tècnica. També va tenir una gran influència en la divulgació d'aquesta tècnica en Rafel Gustavino, que va implantar aquest sistema de construcció a Nova York a començament del segle XX.

Com ja s'ha mencionat, el sostre del menjador es compon de tres voltes de doble curvatura concatenades, les quals tot i tenir la mateixa amplada, varien en la llargada. Observant el menjador des de l'accés de secundària, les voltes fan, d'esquerra a dreta: 5,84 m, 6,5 m i 4,67 m, respectivament. Entre cadascuna d'aquestes voltes s'hi troba un arc de 0,65 m de llargada que descansa sobre un pilar que queda amagat dins la paret del menjador. A més, mirant la planta de la sala es pot observar que la part esquerra de la sala

(encara mirant des de l'accés de secundària) és més ampla que la resta del menjador, això es deu a que es troba un arc perpendicular als altres que li dona 0,6 m més d'amplitud que la resta de la sala.

Malgrat no sigui quelcom de rellevància estructural, més aviat fa referència a la part estètica de la sala, a la paret esquerra de la sala, hi ha una calaixera que va de banda a banda de la sala i a sobre d'aquesta s'hi troba una lleixa on es disposen una sèrie de càn timers, els quals, entre d'altres, donen nom a la sala. A l'altra banda, també hi ha una lleixa que comença a la sortida de l'arc sobre la qual hi trobem més càn timers.

Finalment, fent referència al sistema de calefacció i fontaneria, el menjador consta de quatre radiadors situats cada un a un extrem del menjador.

3.2.2 Materials

Pel que fa als materials de la sala, el terra és de rajola de terratzo de color gris verdós seguint amb l'estètica de l'entrada de l'escola i l'edifici de Secundària. Continuant per les parets auxiliars, distingim dos materials: en primera instància, trobem un panell de 1,10 m de rajola ceràmica que cobreix tot el menjador (aquestes rajoles tenen un senzill dibuix geomètric triangular de dos colors, verd i groc); quan acaben les rajoles, la paret restant està recoberta de guix. Entre la paret auxiliar i el sostre encara hi resten 0,58 m de paret mestre que estan recoberts de guix, així com tots els arcs i voltes del sostre.

Fent referència a la fusteria, la porta d'accés des de primària és pràcticament de fusta i els altres accessos són també de fusta malgrat que siguin més petits i més moderns. La calaixera que ja s'ha anomenat prèviament també és feta de fusta, així com les diferents lleixes i uns detalls que hi ha als accessos als magatzems.

3.3 Plànols

En el present treball una tasca que ha comportat molta feina per la seva gran laboriositat ha estat l'elaboració dels plànols digitals de la sala, per tal que

poguessin reproduir de la forma més fidedigna possible l'estat actual de la sala i després l'aspecte final amb les millores acústiques proposades. Així doncs, en aquest apartat es detallarà com ha estat aquest procés de creació dels plànols, començant pels amidaments i acabant per la confecció dels diferents plànols en dos i tres dimensions.

3.3.1 Procés de mesura

El primer pas a fer per realitzar els plànols ha estat fer els amidaments corresponents de la sala. Per fer-ho s'han seguit dos procediments diferents. El primer ha estat la mesura de la sala amb una cinta mètrica (cinta de 20m que em va proporcionar l'escola) amb una precisió de ± 1 cm. Tot i així, aquestes mesures no van ser suficients ja que es necessitaven les alçades dels arcs i la longitud d'elements als que no s'hi podia accedir, ja que es trobaven a una alçada bastant elevada (alguns tubs de fontaneria, per exemple).

Així doncs, es va aplicar la següent solució:

Mitjançant una foto el màxim centrada d'una part del menjador, s'establia una proporció entre la mesura d'un segment de la fotografia en cm del qual es coneixia la mesura real i la mesura real en qüestió en metres. A partir d'aquesta constant de proporció, es pot calcular qualsevol segment desconegut de la imatge.

Fixem-nos en un exemple. Donada la següent fotografia i sabent que la distància $\overline{AB}$ correspon a 7,0 m i que una vegada impresa, mesurava 16,8 cm sobre el paper, haviem de calcular l'alçada màxima de l'arc, és a dir, el segment $\overline{CD}$ sabent que mesura 10,7 cm sobre el paper, observem l'esquema d'aquest cas a la Figura 11:

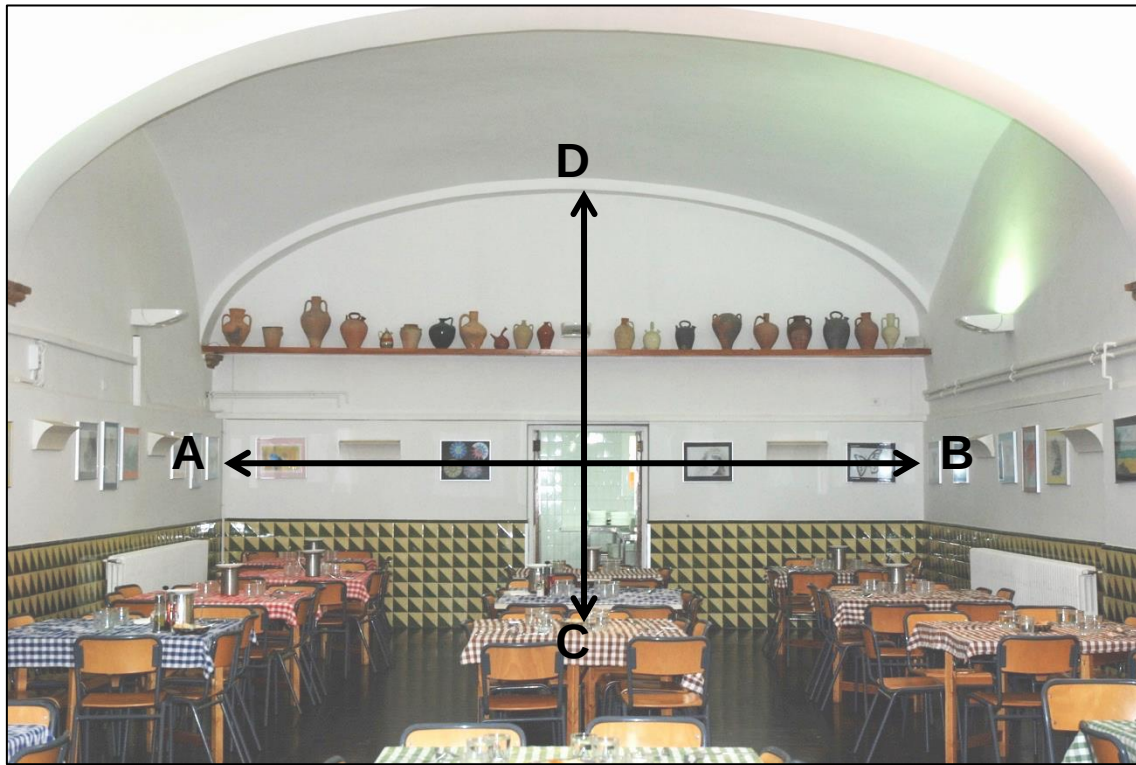


Figura 11. Representació de les distàncies a una de les parets.

Establim la constant de proporció (Q) que resulta del quocient entre la distància real i la distància impresa:

$$Q = \frac{\text{distància real (m)}}{\text{distància impresa (cm)}} = \frac{7,0}{16,8} = 0,4$$

Una vegada coneixem la constant de proporció (Q), ja podem calcular qualsevol mesura del dibuix en aquest cas el segment $\overline{CD}$ multiplicant la distància impresa en cm per Q :

$$\overline{CD} = \text{distància impresa (cm)} \cdot Q = 10,7 \cdot 0,4 = 4,3 \text{ m}$$

Val a dir que aquest sistema ofereix cert error, però és un mètode bastant fiable i senzill per realitzar mesures relativament complicades. A més, cert error en l'alçada del sostre és assumible, ja que en no haver de fer ni reformes estructurals ni haver d'alterar les voltes o els arcs, no és un problema no conèixer la mesura exacte del sostre.

Així doncs, mitjançant aquests dos sistemes s'han mesurat totes les distàncies necessàries per a confeccionar els plànols, tant bidimensionals com tridimensionals, de la sala.

3.3.2 Plànols 2D

Els plànols 2D s'han realitzat amb el programa *AutoCAD*, un programa especialitzat de dibuix tècnic amb ordinador molt utilitzat en el món de l'arquitectura. Malgrat que el programa ofereixi l'opció de dibuixar en 3D, destaca pel dibuix en 2D i és per al que s'ha utilitzat en aquest treball. La versió concreta del programa que s'ha utilitzat és la versió *AutoCAD 2014* per a Mac.

A l'hora de realitzar el dibuix, s'han utilitzat diferents capes per a cadascuna de les parts del menjador (parets mestres, auxiliars, fusteria, etc.) i s'han dibuixat cinc vistes de la sala: planta, dos alçats i els perfils (la visió inferior no s'ha dibuixat ja que no aportava cap informació important i era completament prescindible).

Acte seguit es mostrarà (mitjançant un alçat) el procés que s'ha seguit per a dibuixar la sala i com s'hi han anat afegint els diferents elements que la conformaven. Aquest procés s'ha dut a terme a partir dels amidaments obtinguts i s'ha repetit en cadascuna de les vistes.

S'ha començat per la capa de les parets mestres (color vermell) dibuixant l'estructura general del menjador (Figura 12).

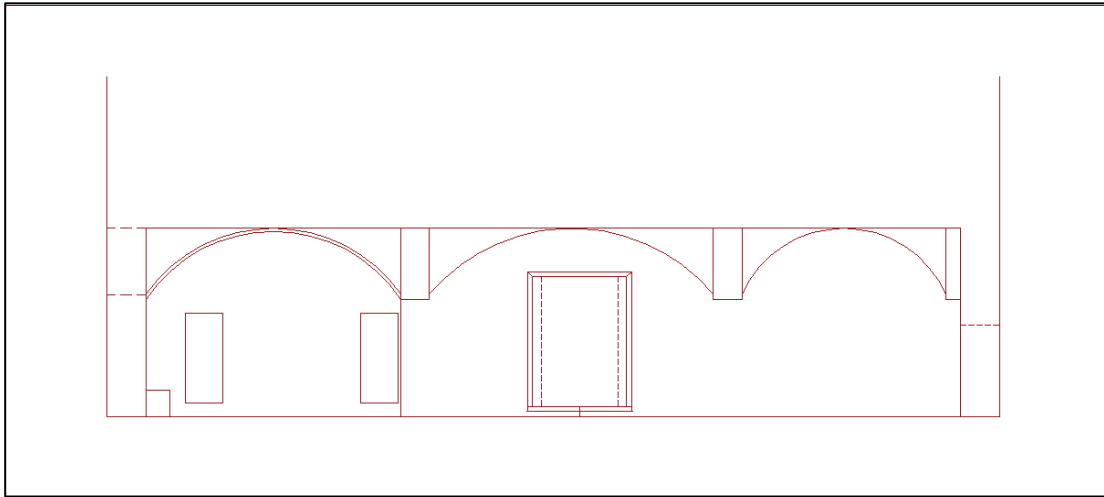


Figura 12. Alçat del Menjador dels Càntirs (parets mestres).

Acte seguit s'han afegit les parets auxiliars en color blau a la capa corresponent (Figura 13).

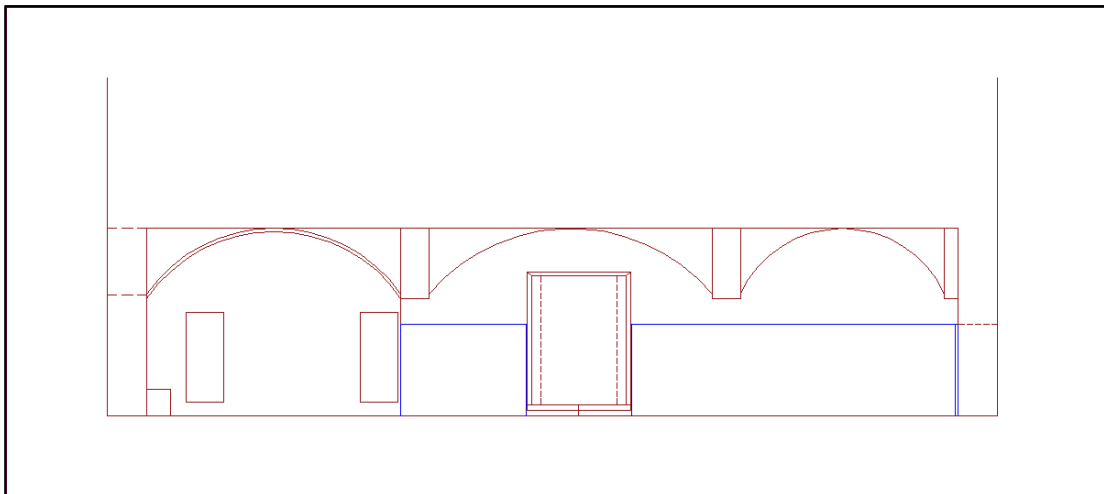


Figura 13. Alçat del Menjador dels Càntirs (parets auxiliars).

El següent pas ha estat afegir la fusteria, és a dir, les portes, les lleixes, els calaixos i qualsevol detall de fusta que hi hagués a la sala (Figura 14). El color d'aquesta capa és el blau turquesa.

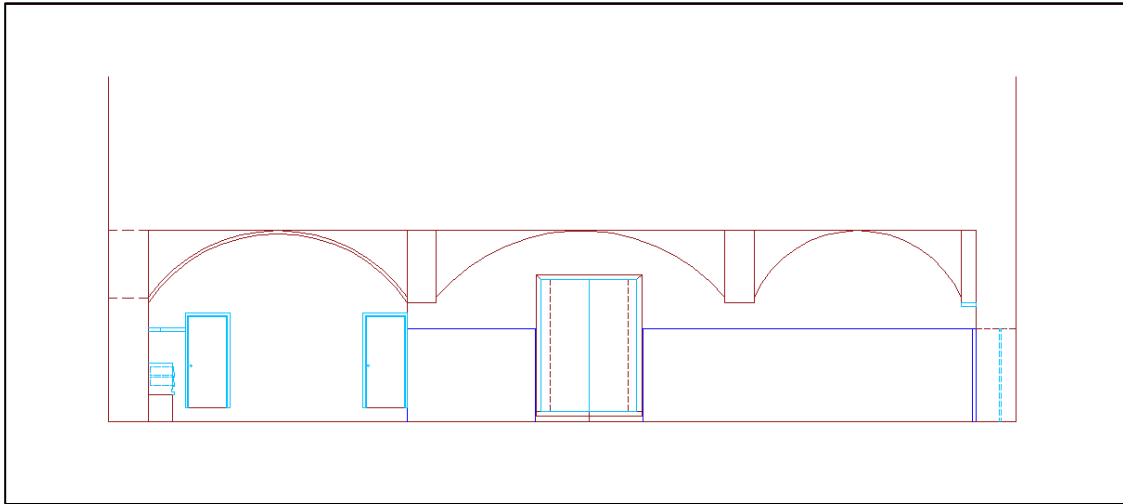


Figura 14. Alçat del Menjador dels Càntirs (fusteria).

Una vegada acabada la fusteria, s'ha afegit l'enrajolat a una capa de color verd (figura 15).

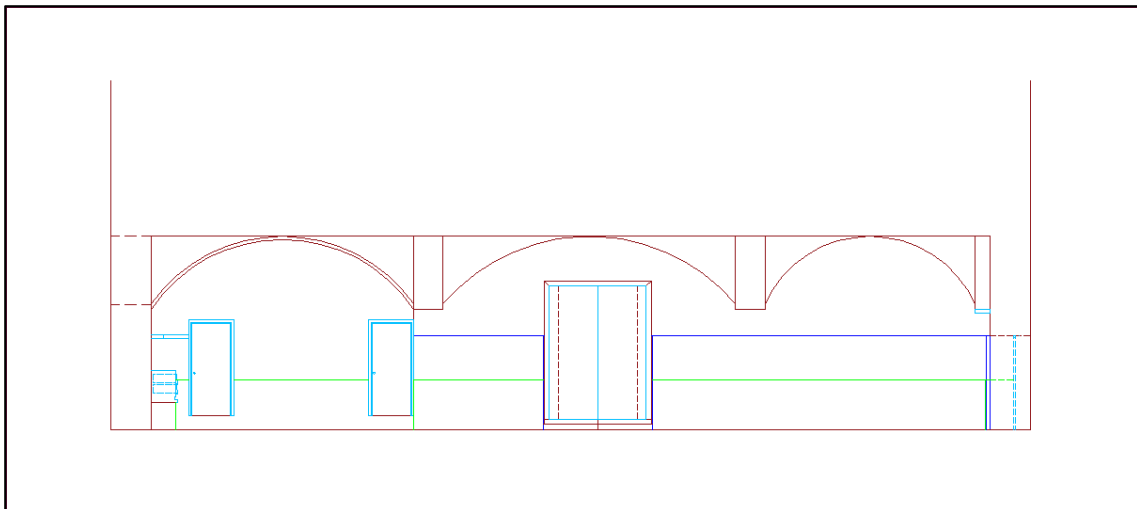


Figura 15. Alçat del Menjador dels Càntirs (enrajolat).

A continuació, de color rosa s'han afegit els cables i les regletes de l'electricitat (Figura 16).

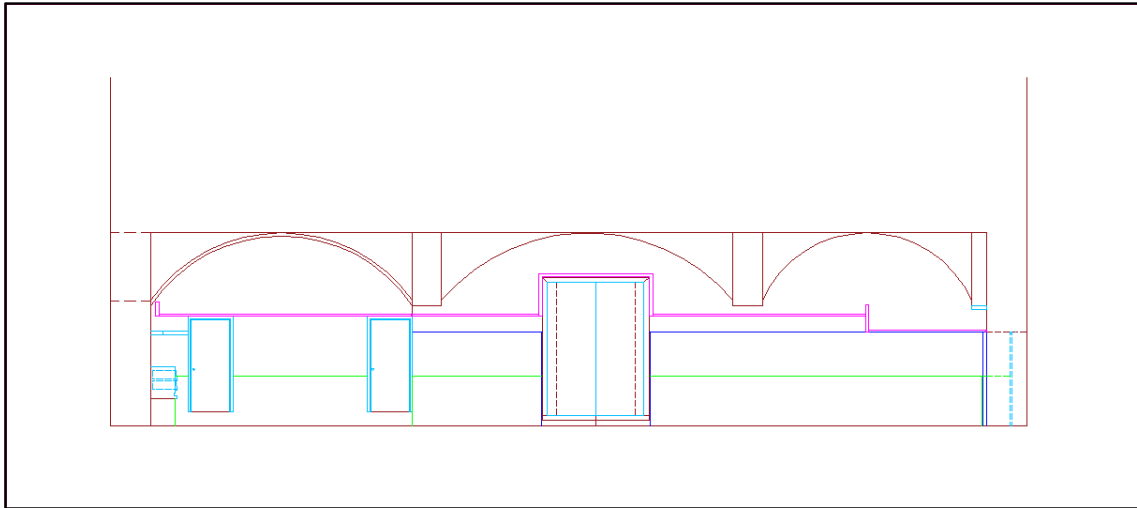


Figura 16. Alçat del Menjador dels Càntirs (electricitat).

Finalment, de color marró s'han afegit els tubs de calefacció i fontaneria (Figura 17).

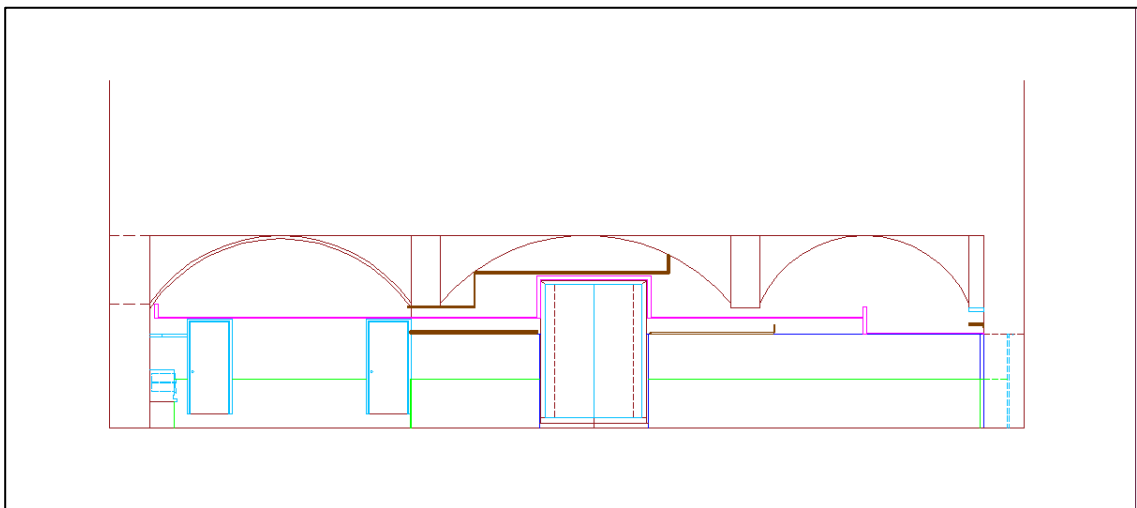


Figura 17. Alçat del Menjador dels Càntirs (fontaneria).

D'aquesta forma s'aconseguia dibuixar cadascuna de les vistes del menjador d'una forma clara i esquemàtica. Tot i així, a l'hora d'imprimir els plànols no se solen imprimir amb aquests colors, sinó que aquests colors serveixen per a facilitar-ne el dibuix.

A la Figura 18 podem veure la planta de la sala. Com s'ha dit anteriorment és de forma rectangular malgrat que tingui una amplada diferent en una zona. En aquest dibuix de la planta, hi ha especificades les capes de parets mestres,

parets auxiliars i fusteria. Els plànols complets del menjador i la resta de les vistes es troben a l'annex 1.

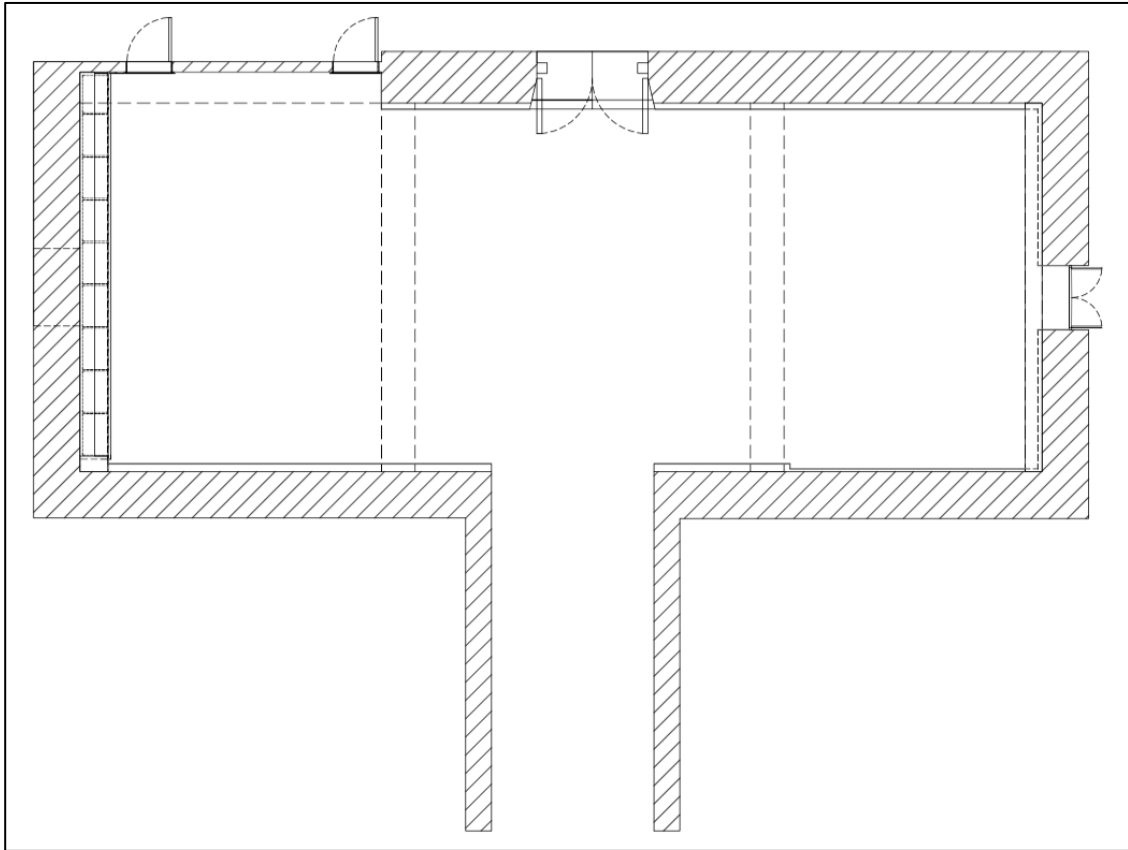


Figura 18. Planta del Menjador dels Càntirs.

3.3.3 Plànols 3D i renderització

Per a la confecció dels plànols 3D s'ha utilitzat el programa *Google SketchUp*, que és un programa de modelat tridimensional molt intuïtiu i relativament senzill d'utilitzar. Concretament s'ha utilitzat la versió 14.1 de *Google SketchUp Make* 2014.

Normalment no se sol utilitzar el modelat 3D per a l'arquitectura ja que és més efectiu i descriptiu el sistema dièdric. Tot i així, a l'hora de presentar un projecte la visió tridimensional sol ajudar a entendre la idea de l'arquitecte. És per aquest motiu que s'ha decidit reproduir la sala de forma tridimensional a part de la reproducció ordinària bidimensional. A la Figura 19 podem veure una visió tridimensional del Menjador dels Càntirs utilitzant aquest sistema 3D, si la

comparem amb la fotografia mostrada a la Figura 7 podrem observar la seva similitud amb l'espai real. Val a dir que és quan tenim el model a l'ordinador quan aquest sistema esdevé més potent i permet treballar amb els espais que volem condicionar en tot el seu conjunt,

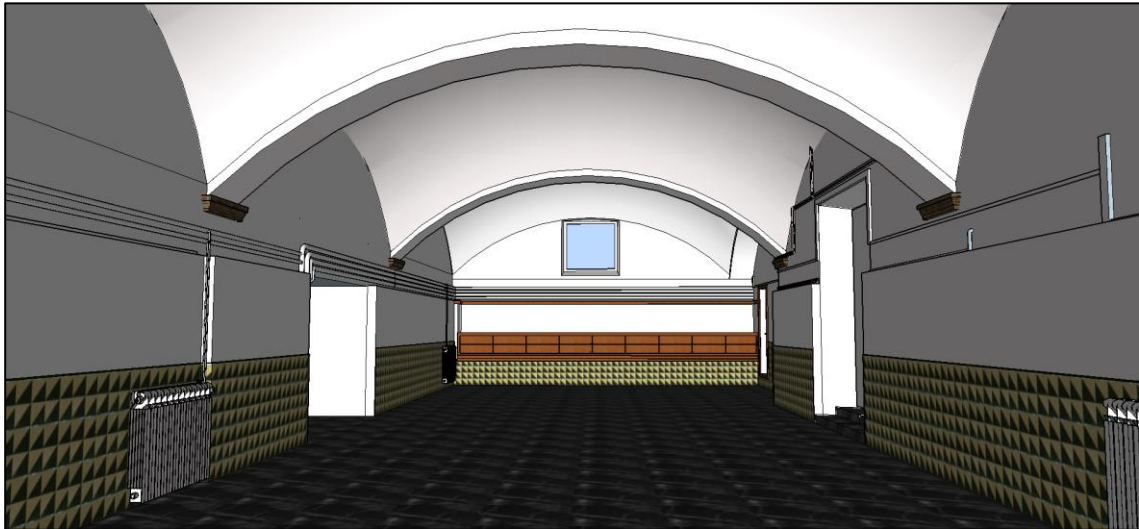


Figura 19. Modelat tridimensional (visió general).

Una altra avantatge de realitzar aquesta simulació és el fet de fer talls seccionals, és a dir, que una vegada s'ha dibuixat la sala completament, es poden fer talls en el dibuix per mostrar una part concreta, ometre una part que no interessa o mostrar l'interior del dibuix.

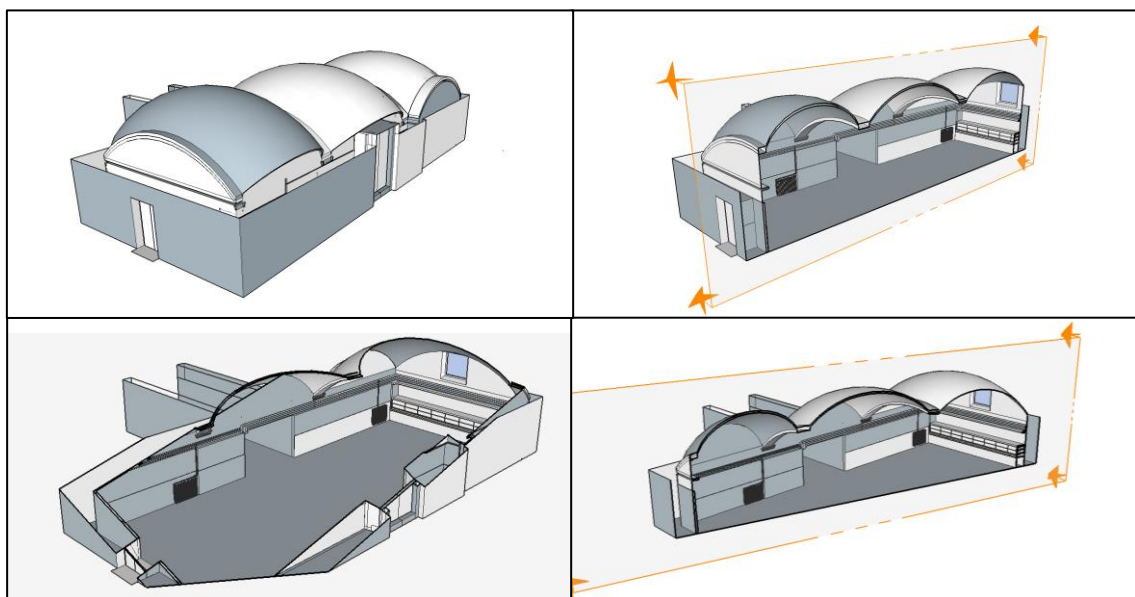


Figura 20. Talls seccionals amb SketchUp.

D'altra banda, la finalitat d'aquesta representació no és altra que intentar ser el màxim de similar possible a la realitat, així doncs, s'ha intentat buscar la màxima similitud entre la sala real i el model simulat: dibuixant amb detall cadascuna de les parts, intentant recrear els detalls o inserint-hi textures.

Una altra utilització que té el modelat en 3D és la simulació acústica. Hi ha una sèrie de programes (Odeon, EASE, Aura...) que permeten fer una simulació de l'acústica de les sales, és a dir estudiar el comportament acústic dels diferents recintes. A partir de la geometria introduïda amb SketchUp i el coeficient d'absorció i difusió de les diferents superfícies, aquests programes calculen els diferents paràmetres acústics de la sala analitzada. Gràcies a aquests programes, es poden anar inserint modificacions a la sala i verificar-ne l'acústica de forma molt ràpida, així doncs, es poden realitzar variacions diferents i analitzar-ne l'impacte de forma gairebé immediata. La utilització d'aquests programes queda fora de l'abast present treball ja no ha sigut possible utilitzar de forma regular d'un software d'aquestes característiques només disponible en centres molt especialitzats en aquest àmbit.

Pel que fa al renderitzat, el procés de renderització consisteix en generar una imatge o vídeo a través d'un model en 3D buscant el màxim realisme possible. Per a la renderització hem utilitzat una programa extensió del SketchUp conegut com a Shaderlight. Gràcies a aquest programa el model tridimensional dibuixat amb l'SketchUp adquireix un caràcter molt més realista i detallista. Aquest programa permet doncs fer-se una idea molt propera a la realitat de com serà el resultat final del projecte (Figures 20 i 21).

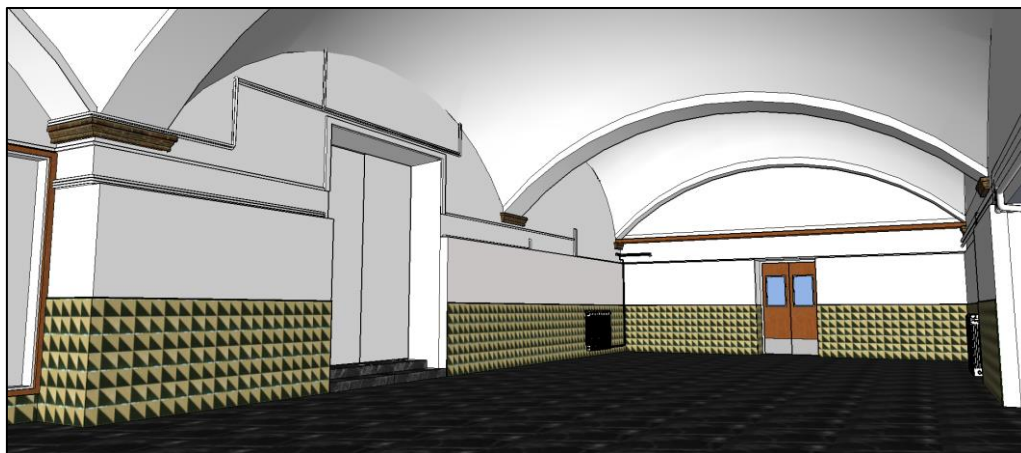


Figura 22. Procés de renderització (visió general).



Figura 21. Procés de renderització (detall).

3.4 Anàlisi de l'acústica del Menjador dels Càntirs

En aquest apartat s'analitzarà l'acústica del Menjador dels Càntirs per comprovar en quin estat es troba actualment i, per tant, veure cap a on haurà d'estar enfocada la millora. Com ja s'ha detallat anteriorment, per establir la qualitat acústica d'una sala destinada a la paraula s'utilitzen una sèrie de paràmetres acústics que determinen com és acústicament una sala.

En aquest treball es calcularan el temps de reverberació (RT), la Brillantor (Br) i el %ALCons. S'han triat aquests tres paràmetres ja que eren els tres paràmetres en que els càlculs requerits se situaven dins els límits del treball i a més, permeten mesurar correctament el grau de qualitat acústica de la sala.

En primer lloc, el temps de reverberació es calcularà mitjançant la fórmula d'Eyring i la de Sabine per limitar l'error que aquest pugui tenir. Plenament relacionat amb el temps de reverberació, la brillantor és important ja que descriu com percebem les freqüències altes; recordem que les consonants tenen aquestes freqüències i són les que determinen la intel·ligibilitat del missatge.

En segon lloc, per mesurar la intel·ligibilitat de la paraula a la sala es calcularà el %ALCons en tres posicions diferents de la sala (distància curta, mitjana i llarga). Les posicions concretes des d'on s'ha calculat aquest paràmetre es poden observar en les Figures 23, 24, 25 i 26 (en color vermell s'ha representat la font i en blau els receptors). La mitjana aritmètica del %ALCons en les tres posicions determinarà el percentatge de consonants que no s'entenen a la sala. Per calcular-ho s'emprarà la fórmula esmentada prèviament.

D'altra banda, s'ha parlat prèviament de les diferents funcions de la sala, així doncs es consideraran quatre possibles escenaris en els quals es calcularan aquests tres paràmetres:

- **Sala buida** (Figura 23): en aquest escenari es contempla la sala sense mobiliari ni persones, així doncs, aquest càlcul és quelcom una mica abstracte ja que difícilment mai no estarà la sala buida.

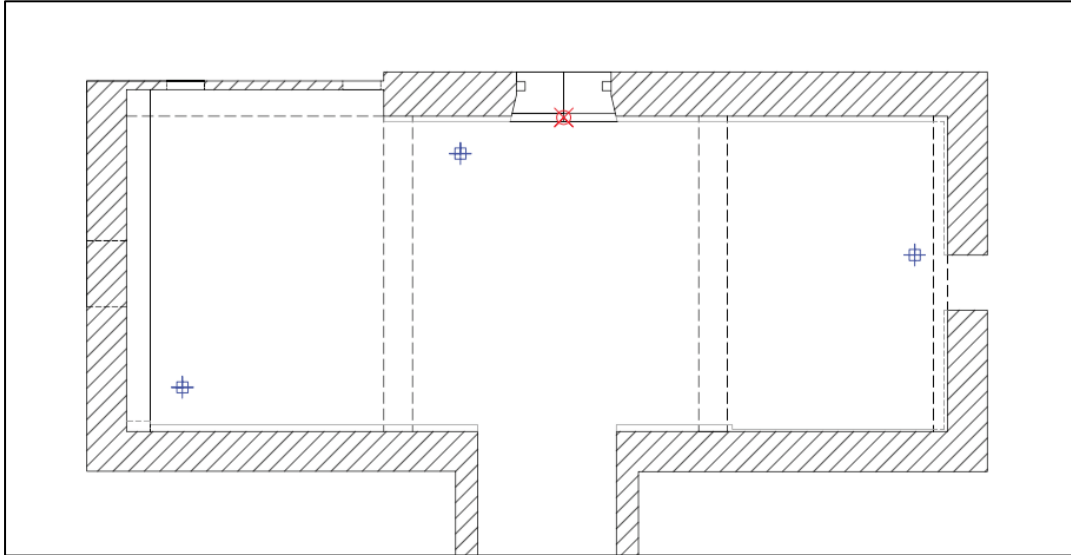


Figura 23. Escenari acústic: sala buida.

- **Menjador ple** (Figura 24): en aquest escenari es contempla un menjador de 144 places amb 18 taules de 8 alumnes a cada taula, aquest seria l'ús més habitual de la sala.

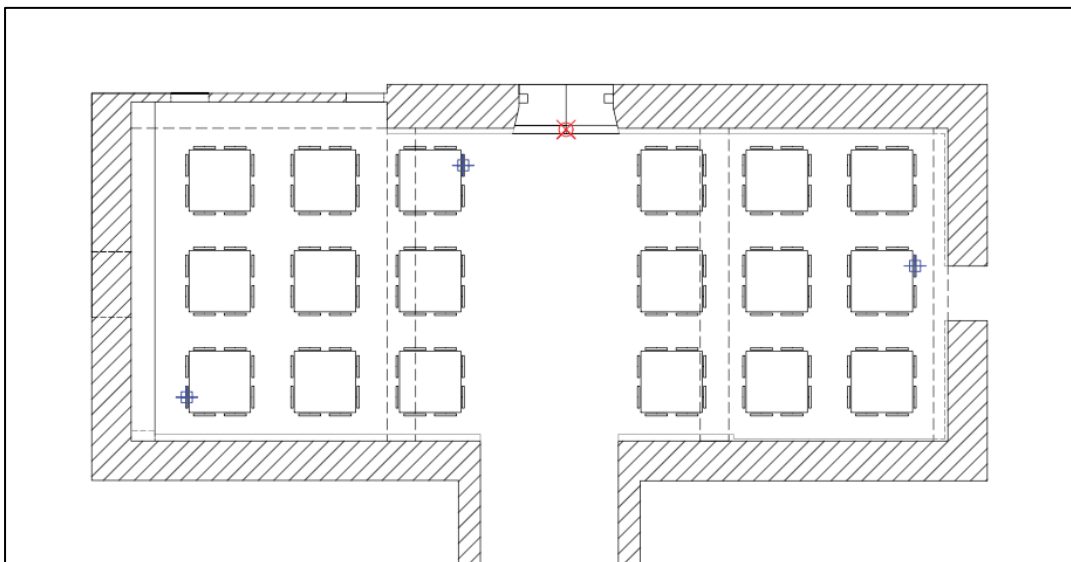


Figura 24. Escenari acústic: menjador ple.

- **Sala de Conferències semiplena** (Figura 25): en aquest escenari es contempla una sala d'actes de 70 places, en aquest espai s'inclou una tarima i el públic omple la meitat de la sala separat per un passadís que arriba a la tarima. Pel que fa a l'ús de sala destinada a la paraula, aquest seria l'ús més significatiu ja que per a actes de major públic, s'utilitzen altres espais.

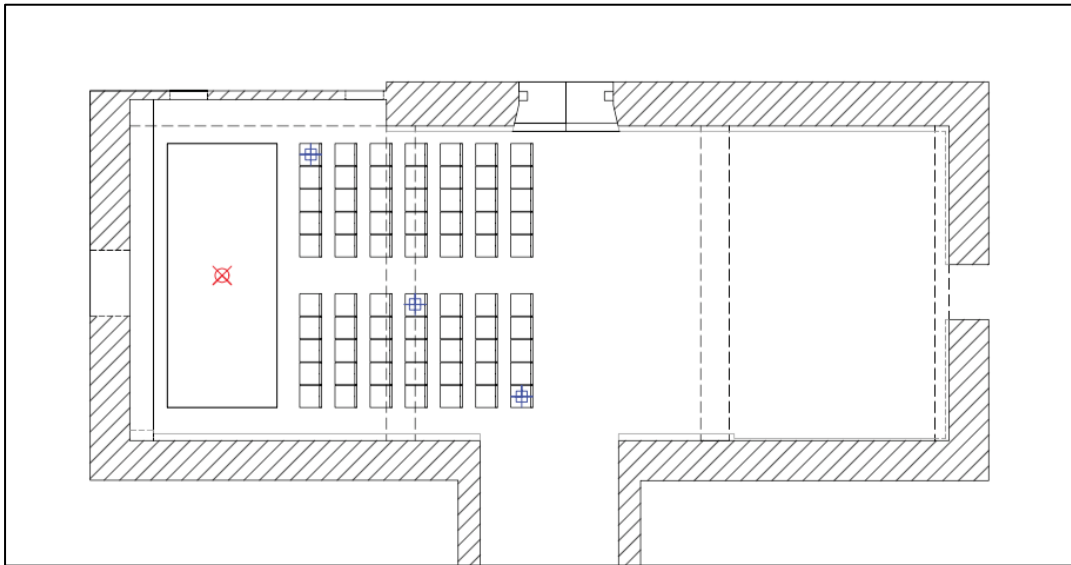


Figura 25. Escenari acústic: sala de conferències semiplena.

- **Sala de conferències plena** (Figura 26): en aquest escenari es contempla una sala d'actes de 160 places; també s'inclou una tarima però el públic omple la totalitat de la sala, el públic se separa per dos passadissos perpendiculars, un d'ells que arriba fins a la tarima i l'altra que separa el menjador pels seus dos accessos.

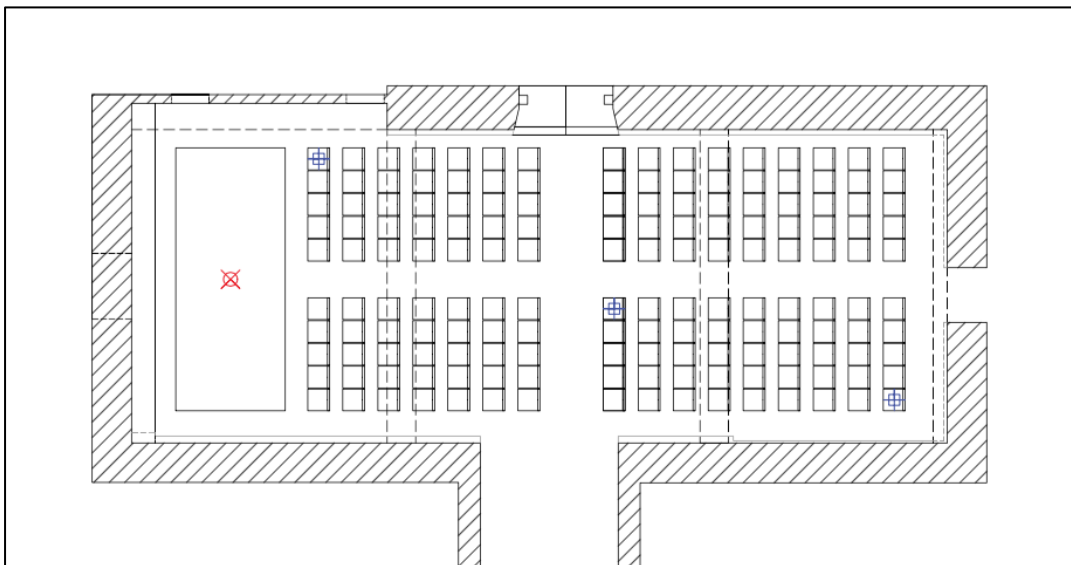


Figura 26. Escenari acústic: sala de conferències plena.

Un altre aspecte a destacar a l'hora de fer l'anàlisi acústica són les aproximacions que s'han realitzat, les quals s'han consultat amb un professional en acústica de sales. Tal com es veu a la Figura 27, aquestes simplificacions consisteixen, per una banda, en eliminar les voltes considerant un sostre arquejat i considerar la planta de la sala com a rectangular, sense les irregularitats que hi existeixen. A més, s'han eliminat els diferents accessos, l'entrada a l'office i la finestra. Totes aquestes aproximacions de l'estructura de la sala no tenen impacte sobre l'anàlisi acústica de la sala, que eliminen detalls que complicaríem molt el càlcul i que no reportarien uns millors resultats finals.

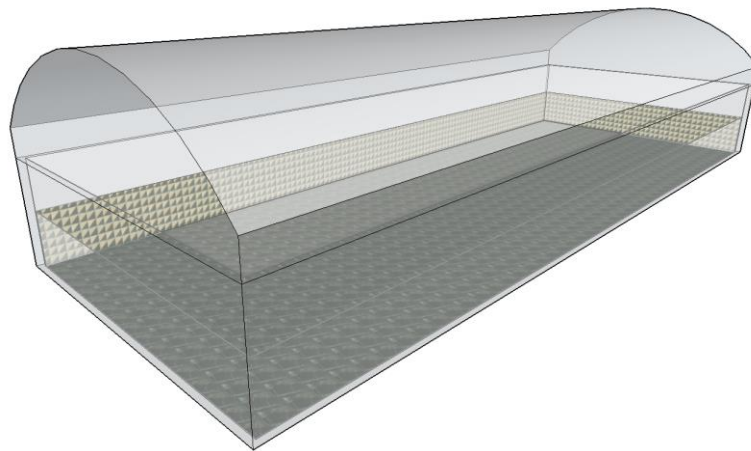


Figura 27. Visió 3D de la simplificació de la sala.



Figura 28. Plànol acotat de la simplificació de la sala.

Abans de procedir amb els càlculs, s'han de calcular tant l'àrea de les diferents superfícies, així com el volum total de la sala. Les àrees s'han calculat amb l'AutoCAD ja que té una eina per calcular les diferents àrees de manera ràpida i precisa a partir dels plànols 2D dibuixats (Figura 28). Així doncs, s'han delimitat les següents superfícies de les quals es mostren les seves àrees a la Taula 3: sostre, part central (espai que va del sostre a les parets auxiliars), parets auxiliars (restant-hi l'enrajolat) enrajolat i terra. Aquestes superfícies s'han delimitat en funció dels seus materials.

Taula 3. Superfícies i àrees de la sala.

Superfície	Àrea (m²)
Sostre	164,91
Part central	27,56
Paret auxiliar	51,04
Enrajolat	56,14
Terra	128,24
Volum de la sala (m³): 487,25	

3.4.1 Càlcul dels paràmetres acústics

Per fer el càlcul dels diferents paràmetres de forma ràpida i eficaç s'ha programat un full d'Excel per a cadascuna de les situacions prèviament esmentades. En aquest apartat, es detallarà com s'han realitzat els diferents càlculs i quins valors s'han obtingut.

Sala buida

Primerament, necessitem els coeficients d'absorció dels diferents materials⁴ de la sala per a cada banda d'octava de freqüència i les diferents àrees de les superfícies de diferents materials de la sala, és a dir, les que s'han detallat a la Taula 4.

⁴ El diferents coeficients d'absorció acústica s'obtenen a partir dels valors proporcionats pel Cimec (Centre d'Investigació de Mètodes Computacionals), o en el cas dels panells acústics, del proveïdor del producte.

Taula 4. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Coeficients d'absorció.

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Centre	27,56	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Auxiliars	51,04	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Enrajolat	56,14	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Superfície total (m²)	427,89						

Partint d'aquestes dades, comencem calculant el temps de reverberació. Com ja s'ha mencionat, el temps de reverberació es calcularà mitjançant dues fórmules, la de Sabine i la d'Eyring (Taula 5). El temps de Reverberació mitjà es calcula a partir de la mitjana aritmètica de les bandes d'octava de freqüència de 500 i 1000Hz.

Taula 5. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Temps de reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coeficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	72,462	0,17	1,08	0,99
250 Hz	26,195	0,06	2,99	2,91
500 Hz	14,019	0,03	5,60	5,51
1000 Hz	11,584	0,03	6,77	6,69
2000 Hz	20,733	0,05	3,78	3,70
4000 Hz	25,604	0,06	3,06	2,97
RT Mitjà			6,18	6,10

Una vegada ja tenim els diferents temps de reverberació, es calculen els paràmetres derivats, és a dir, Calidesa Acústica (BR) i la Brillantor (Br) (Taula 6); la Calidesa acústica no és determinant ja que tan sols s'utilitza per a espais dedicats a la música.

Taula 6. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,33	0,55
Eyring	0,32	0,55

Finalment, es calcula el %ALCons en les tres posicions detallades a l'apartat anterior aplicant la fórmula corresponent. Per a saber el %ALCons mitjà, es calcula la mitjana aritmètica dels tres valors obtinguts (Taula 7).

Taula 7. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. %ALCons.

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	22,33	0,94	2,96
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	2,5	73,5	70,1
Posició 2	6,5	34,1	33,3
Posició 3	10,6	34,1	33,3
% ALCONS Mitjà		47,2	45,5

Menjador ple

Així com en l'apartat anterior, es parteix dels coeficients d'absorció i les àrees, però aquesta vegada s'hi han de sumar les cadires plenes (s'ha considerat que un alumne assegut té una superfície de 0,8 m²) i les taules, ja que tenen un fort impacte acústic (Taula 8)

Taula 8. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Coeficients d'absorció.

Paràmetres de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Centre	27,56	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Auxiliars	51,04	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Enrajolat	56,14	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Taules	35,28	0,2	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	115,2	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Superfície total (m²)	578,37						

A partir d'aquí, el procés de càlcul és idèntic a l'aplicat anteriorment. A les Taules 9, 10 i 11 es mostren els diferents paràmetres acústics obtinguts.

Taula 9. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Temps de reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coefficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	118,686	0,21	0,66	0,59
250 Hz	72,887	0,13	1,08	1,01
500 Hz	65,413	0,11	1,20	1,13
1000 Hz	74,498	0,13	1,05	0,98
2000 Hz	85,951	0,15	0,91	0,84
4000 Hz	90,821	0,16	0,86	0,79
RT Mitjà			1,13	1,06

Taula 10. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,77	0,79
Eyring	0,76	0,77

Taula 11. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. %ALCons.

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	109,29	2,07	6,54
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	2,5	4,3	3,7
Posició 2	6,5	28,9	24,7
Posició 3	10,6	8,2	7,6
% ALCONS Mitjà		13,8	12,0

Sala de conferències semiplena

Es segueix el mateix mètode aplicat en els altres apartats, únicament s'eliminen les taules, es recompten les cadires i s'inclou una tarima de 15 m². Així doncs, partint de les àrees i els coeficients d'absorció acústics que es mostren a la

Taula 12 es calculen tots els paràmetres acústics, els valors dels quals es mostren a les Taules 13, 14 i 15.

Taula 12. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.
Coeficients d'absorció.

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Centre	27,56	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Auxiliars	51,04	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Enrajolat	56,14	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Tarima	15,00	0,20	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	56,00	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Superfície total (m²)	498,89						

Taula 13. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.
Temps de reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coeficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	94,502	0,19	0,83	0,75
250 Hz	48,785	0,10	1,61	1,53
500 Hz	38,959	0,08	2,01	1,94
1000 Hz	42,124	0,08	1,86	1,78
2000 Hz	52,393	0,11	1,50	1,42
4000 Hz	57,264	0,11	1,37	1,29
RT Mitjà			1,94	1,86

Taula 14. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.
Paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,63	0,74
Eyring	0,61	0,73

**Taula 15. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.
%ALCons.**

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	61,85	1,56	4,92
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	3,4	21,3	19,1
Posició 2	4,4	35,6	32,0
Posició 3	7,3	13,5	12,8
% ALCONS Mitjà		23,5	21,3

Sala de conferències plena

El procés és el mateix seguit en l'anterior apartat, únicament s'afegeix més públic. D'aquesta manera amb les àrees i els coeficients d'absorció de la Taula 16 es calculen tots els paràmetres acústics que es mostren a les Taules 17, 18 i 19.

**Taula 16. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.
Coeficients d'absorció.**

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Centre	27,56	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Auxiliars	51,04	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Enrajolat	56,14	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Tarima	15	0,2	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	128	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Superfície total (m²)	570,89						

**Taula 17. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.
Temps de Reverberació.**

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coefficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	118,982	0,21	0,66	0,59
250 Hz	76,865	0,13	1,02	0,95
500 Hz	70,639	0,12	1,11	1,04
1000 Hz	81,004	0,14	0,97	0,90
2000 Hz	92,713	0,16	0,85	0,78
4000 Hz	97,584	0,17	0,80	0,73
RT Mitjà			1,04	0,97

**Taula 18. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.
Paràmetres derivats del RT.**

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,81	0,79
Eyring	0,79	0,78

**Taula 19. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.
%ALCons.**

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	120,79	2,18	6,88
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	3,4	6,8	5,7
Posició 2	6,7	26,4	22,2
Posició 3	15,4	7,6	7,0
% ALCONS Mitjà		13,6	11,6

3.4.2 Avaluació dels paràmetres acústics

Una vegada s'han calculat els diferents paràmetres, és hora d'avaluar-los i detallar les mancances de la sala. Comencem doncs pel temps de reverberació.

El temps de reverberació és un paràmetre que varia en cadascuna de les freqüències, així doncs és interessant fer un gràfic expressant aquests valors en cadascun dels diferents escenaris (Figures 29 i 30).

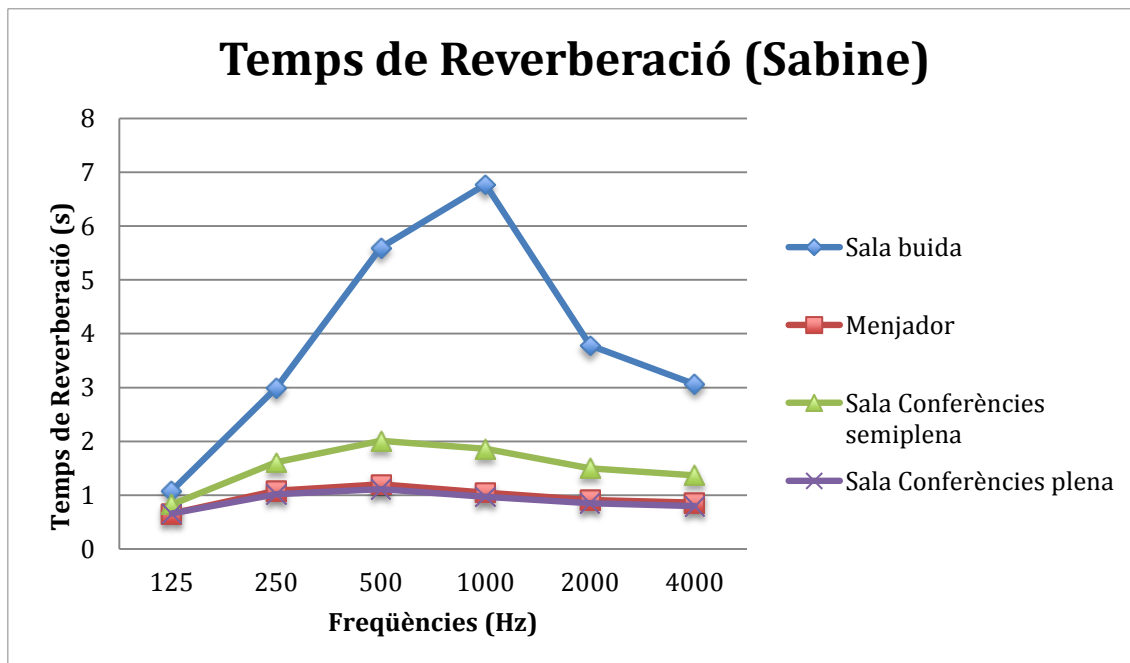


Figura 29. Temps de reverberació en funció de les bandes d'octava de freqüència segons la fórmula de Sabine.

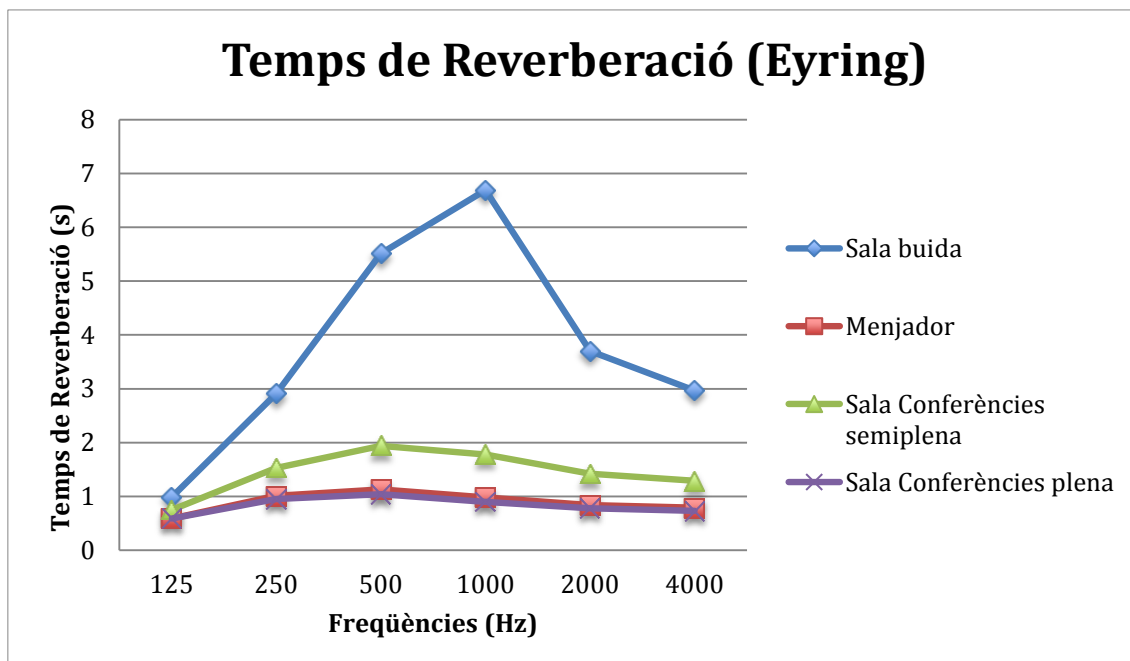


Figura 30. Temps de reverberació en funció de les bandes d'octava de freqüència segons la fórmula d'Eyring.

Abans de descriure el gràfic en sí, fer menció de que la fórmula de Sabine i la fórmula d'Eyring donen uns resultats molt similars, tan sols varien unes xifres els decimals però els valors solen ser molt pròxims. De fet, en les Figures 29 i 30 la variació és mínima ja que l'escala és bastant gran i no s'aprecia la diferència.

Com es pot observar, el temps de reverberació és molt irregular a les diferents freqüències i és lluny de la constància. Aquest fet es dona sobretot quan la sala és buida (hi ha 5,7s de diferència entre el valor màxim i el mínim), quelcom lògic ja que no hi ha res que absorbeixi el so. Així doncs, a mesura que s'omple la sala, els temps de reverberació milloren tant en magnitud com en uniformitat. Tot i així, encara hi ha marge de millora i quan es redissenyi la sala s'avaluarà la variació d'aquest paràmetre.

A continuació es mostra una taula resum dels paràmetres actuals i els òptims (Taula 20). A mode de simplificació, per aquesta taula i posteriors comparacions tan sols s'utilitzen els valors obtinguts mitjançant la fórmula d'Eyring. S'ha triat aquesta ja que és més precisa que la de Sabine.

Taula 20. Paràmetres acústics del Menjador dels Càntirs en l'estat actual.

	Sala buida	Menjador	Sala de conferències semiplena	Sala de conferències plena	Valors òptims
RT (Eyring)	6,10	1,06	1,86	0,97	0,7 - 1 (sala conferències) 0,5 - 0,7 (menjador)
Brillantor	0,55	0,77	0,73	0,78	0,87 - 1
Calidesa acústica	0,32	0,76	0,61	0,79	-
%ALCons	45,5%	12,0%	21,3%	11,6%	< 11,4%

Es pot observar que la calidesa acústica no té cap valor òptim, això és degut a que és un paràmetre lligat a sales dedicades a la música i, per tant, en sales dedicades a la paraula no té gaire rellevància.

Comencem doncs per la sala buida. Tot i ser un càlcul de baixa utilitat ja que és quelcom irreal mesurar una sala sense gent i sense mobiliari, ens dóna una primera aproximació de la situació acústica de la sala. Es pot veure que el temps de reverberació és extraordinàriament elevat; això es degut a que no hi ha res que absorbeixi el so a la sala. Conseqüentment, la brillantor dóna també un valor insatisfactori així com el %ALCons.

Fent referència a la funció de menjador, es podria considerar només el temps de reverberació ja que els altres paràmetres són únicament utilitzats per a sales destinades a la paraula. Tot i així, durant els dinars de primària, constantment s'estan donant missatges i cada dia hi ha una sèrie de parlaments, així que no és quelcom incoherent considerar la brillantor i el %ALCons a l'hora d'avaluar la funció de menjador. Pel que fa al temps de reverberació, s'ha reduït molt respecte a la sala buida, tot i així, encara és massa elevat per a la funció de menjador; es necessita encara més absorció per evitar una acumulació excessiva de soroll. Ara bé, la brillantor és fora dels valors ideals però no és exageradament dolenta així com el %ALCons que malgrat que estigui al límit, se situa lleugerament per sobre dels valors acceptables.

Respecte a la sala de conferències semiplena, els valors se situen bastant lluny dels valors òptims i recordem que aquesta funció és la més utilitzada, ja que les conferències de petit format són les més habituals en aquesta sala. Podem veure que el temps de reverberació s'hauria de reduir ben bé a la meitat. A més, la brillantor hauria d'augmentar i una intel·ligibilitat nul·la d'un 21,3% de les consonants és inadmissible per a una correcta comprensió de la paraula. Aquests resultats es tradueixen en problemes a l'hora d'escoltar una conferència, una manca de comprensió del missatge i una reverberació exagerada.

Finalment, com a sala de conferències plena els valors surten dins el marge acceptat. Això és degut a que quan la sala és plena, hi ha molta gent i les persones són molt absorbents acústicament parlant. No obstant això, aquesta funció és gairebé inexistent ja que per a actes d'aquest aforament se solen utilitzar altres espais.

4 Projecte de la modificació de la sala

Una vegada s'ha analitzat la sala tal i com és actualment i considerant les seves mancances acústiques, s'ha realitzat la proposta de millora que es descriu en el present apartat. Val a dir que aquesta proposta ha estat marcada clarament per l'estructura original de la sala, la qual no s'ha alterat gens i s'han preservat els seus elements estètics. Per tant, la millora ha consistit en afegir elements fonoabsorbents que ajudin a millorar l'acústica o bé eliminar-ne d'altres que l'empitjoraven notablement.

4.1 Descripció del projecte de millora

En aquest apartat es detallaran les modificacions que s'han pensat per a la sala, tant a fi de millorar l'acústica com a fi de conservar o inclús millorar l'estètica. Cadascun dels canvis s'ha dissenyat pensant en preservar en tot moment l'origen i entitat de la sala ja que, al cap i a la fi, és una de les parts més característiques de l'escola.

En primer lloc, quelcom realment problemàtic, acústicament parlant, i de fàcil solució és l'enrajolat de les parets. La rajola de ceràmica és un material amb molta capacitat reflectora i per tant la seva absorció és mínima. A més, a part de cobrir una superfície notable del menjador, s'eleva fins a 1,10 m que ve a ser el que ocupa un nen assegut. Per tant, el so, en tocar amb la paret, és reflectit quasi bé en tota la seva totalitat creant una sensació de soroll molt incòmode. Així doncs, s'ha optat per substituir l'enrajolat per un recobriment de llistons de fusta d'auró, de 8 cm cada llistó i que també s'eleva fins als 1,10 m (Figura 31). S'ha optat per aquest material ja que, a part de ser visualment atractiu, és força absorbent i resistent; recordem que els materials han de resistir el dia a dia d'un menjador escolar.



Figura 31. Proposta de millora. Revestiment.

En segon lloc, a fi de millorar tant l'estètica com l'acústica, s'han afegit uns armaris d'estructura de fusta pintada de color blanc al voltant de tot el menjador a 2,10 m d'alçada, reposant sobre les parets auxiliars. Per una banda, aquests armaris tenen una funció acústica, ja que les portes no són de fusta sinó que són panells fonoabsorbents (Figura 32). D'altra banda, tenen una funció estètica ja que tapen gran part dels tubs de fontaneria i regletes d'electricitat, donant a la sala una sensació de claredat i pulcritud, a més permetrien recobrir els tubs amb espuma aïllant, de manera que la pèrdua de calor es disminuiria radicalment. Pel que fa a les dimensions d'aquests armaris, fan 21,5 cm d'amplada i 40 cm d'alçada, a més a l'interior tenen un travesser situat cada 1,20 m. Val a dir que en ocasions el moble té alguns talls, no es veuen ja que queden amagats, per a que passin els diferents conductes.



Figura 32. Proposta de millora. Armaris superiors.

Continuant pels panells fonoabsorbents de les parets, aquests panells es troben entre l'armari mencionat prèviament i el recobriment de fusta (Figura 33). Aquests panells tenen una forma quadrangular i tenen certa curvatura per una banda; intercalant aquestes curvatures, s'han col·locat agrupats en grups d'un, dos i tres panells distribuïts i alineats de forma aleatòria. A més, s'han triat tres colors molt específics per a aquests panells: verd, blanc i blau, els tres colors de l'escola. El to triat per aquests tres colors és pastel, ja que un to més intens podria crear un efecte massa cridaner, ressaltant excessivament, mentre que amb tons pastel encara que estan disposats de forma aleatòria, s'aconsegueix una sensació d'harmonia. Pel que fa a les dimensions, cadascun dels panells fa 60 cm per banda.



Figura 33. Proposta de millora. Panells fonoabsorbents de les parets.

Respecte al sostre, com ja s'ha mencionat, s'ha intentat mantenir-ne l'essència malgrat els problemes que això comporta. Un dels principals problemes dels sostres arquejats de formes còncaues són les focalitzacions del so, que recordem que són agrupacions de reflexions en una zona limitada de la sala, arribant en ocasions a un nivell superior al del so directe. Per a solucionar aquest problema, es recomana col·locar materials absorbents en aquestes zones conflictives o incorporar elements inclinats per a generar reflexions cap a altres zones. Així doncs, hem optat per a penjar panells absorbents pentagonals que simulin els nervis de les voltes: des de cada extrem de la volta hi ha un panell allargat enfocat en direcció cap al centre de la volta, havent-hi doncs 4 panells per volta (Figura 34). Aquests panells estan penjats per uns fils d'acer que aguanten aquesta estructura que a més delimiten un perfil triangular i donen lleugeresa al conjunt. Pel que fa a les dimensions d'aquests panells,

n'hi ha de tres tipus ja que cada volta té una mida diferent; mirant cap a l'accés a primària, la del mig és la major i la de la dreta és la menor. Així doncs, hi ha tres mides diferents de panells.



Figura 34. Proposta de millora. Panells fonoabsorbents del sostre.

Finalment, s'han fet una sèrie de consideracions i canvis que tan sols afecten a l'estètica de la sala per tal de preservar la seva identitat com a Menjador dels Càntirs.

Primerament, s'ha refet la calaixera que se situa a la paret de la finestra. Val a dir que aquest moble es troba actualment en molt males condicions. A la reforma s'ha mantingut el nombre de calaixos (18 en total, dues files de 9), però s'ha simplificat la forma i s'ha canviat de color. La nova calaixera és de formes rectes, completament plana per la part frontal, d'on tan sols sobresurten els

tiradors metàl·lics dels calaixos. L'estructura del calaix és de fusta d'auró (la mateixa que s'ha utilitzat en el revestiment de les parets) mentre que els calaixos són de fusta lacada.

Entre aquesta calaixera i l'armari superior, hi ha un metre de separació. En aquest espai s'ha aprofitat per crear una estanteria. Aquesta estanteria és de fusta lacada blanca, de formes rectes, però amb els estants completament irregulars (Figura 35). L'objectiu d'aquesta estanteria és crear un espai en el qual s'hi puguin posar els cànirs que li donen nom a la sala, ja que les lleixes on es troben actualment han estat eliminades. La irregularitat d'aquest moble omple un espai que en un principi quedava una mica desconnectat de la sala, creant un racó diferent, atrevit i modern.



Figura 35. Proposta de millora. Calaixera i estanteria.

En segon lloc, s'han agregat alguns detalls com, per exemple, les tapetes de les portes d'accés als magatzems. Prèviament aquestes portes tenien una tapeta de fusta però tal i com s'ha plantejat la reforma quedava fora de lloc. Així doncs, s'han afegit uns tapetes de fusta lacades de color blanc al voltant d'aquests accessos que acaben de donar una completa uniformitat a la sala (Figura 36).



Figura 36. Proposta de millora. Portes d'accés als magatzems.

Per acabar, un suggeriment plenament estètic és canviar el terra. Una vegada considerada aquesta reforma, el terra no acaba d'afavorir i fer ressaltar l'encant de la sala. Així doncs, com a detall extra es proposa un canvi d'aquest terratzó verd grisós per un terra de ceràmica porcellànica de color gris clar (Figura 37). Val a dir que el impacte d'aquest canvi és plenament visual i no millora l'acústica de la sala. Tot i que hi han recobriments pel terra que podrien ajudar

a millorar l'acústica de la sala, com terres de fusta, moqueta o suro, no s'han considerat donada la funció del menjador, que necessita de materials resistents tal com s'ha mencionat en diferents parts d'aquesta memòria.



Figura 37. Proposta de millora. Terra.

Finalment, a la Figura 38 es poden veure dues visions generals del conjunt de la sala amb totes les modificacions proposades.

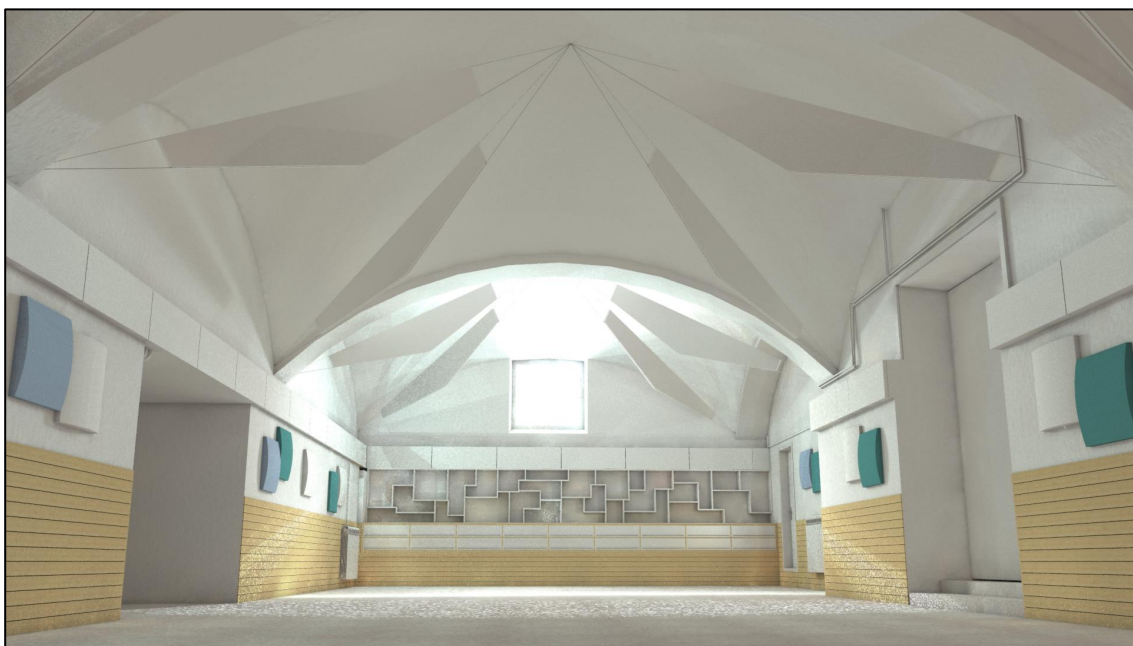


Figura 38. Proposta de millora. Visió general.

4.1.1 Materials seleccionats

Les característiques tècniques de cadascun dels materials seleccionats per a la reforma es descriuen a continuació.

Recobriments de fusta parets



Figura 39. Revestiment de fusta

El recobriments de fusta d'auró té una superfície total de 56,14 m². Està format per llistons de 8 cm d'alçada i 1,5 m de longitud. Entre llistó i llistó hi ha una separació de 0,5 cm. Els coeficients d'absorció acústica per bandes de freqüència són:

Taula 21. Coeficients d'absorció del recobriments de fusta.

125 Hz	250 Hz	1500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,05	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10

Cinema Round Premium

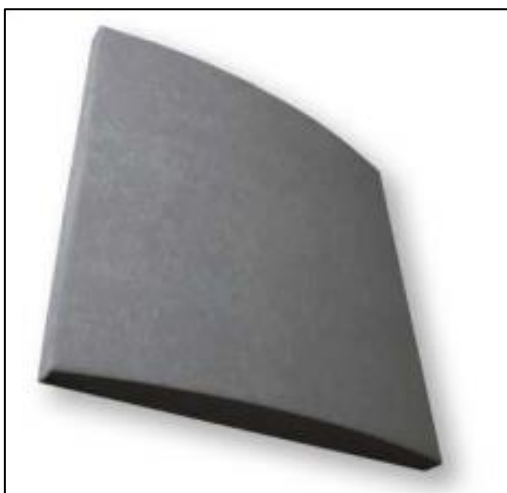


Figura 40. Cinema Round Premium.

Aquests panells fonoabsorbents de 60x60 cm són de la marca Vicoustic. Combinen un disseny modern amb una eficiència acústica molt elevada. Se solen utilitzar per a controlar les reflexions sonores i un excés de reverberació. Destaquen per actuar sobretot en les freqüències elevades i mitjanes. Com es pot observar a la Taula 22, els coeficients d'absorció són molt elevats.

Taula 22. Coeficients d'absorció del Cinema Round Premium.

125 Hz	250 Hz	1500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,23	0,74	1,00	1,00	0,98	0,94

Cadascuna d'aquestes peces té una superfície total de $0,46 \text{ m}^2$ i els 26 panells que s'han distribuït per la sala ocupen una superfície total d' $11,96 \text{ m}^2$.

Ecophon Solo Baffle



Figura 41. Ecophon Solo Baffle.

Proporcionats per la marca Ecophon, aquests panells són utilitzats per les portes dels armaris superiors i per als panells penjats al sostre (tallant-los a la mida corresponent). Aquest producte no és tant absorbent com l'anterior però segueix sent molt absorbent. Els coeficients d'absorció es poden observar a la Taula 23.

Taula 23. Coeficients d'absorció de l'Ecophon Solo Baffle

125 Hz	250 Hz	1500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,35	0,3	0,65	0,85	0,85	0,75

La superfície total d'aquests producte penjada als armaris és de $18,18 \text{ m}^2$ i la superfície total dels panells penjats al sostre és de $32,24 \text{ m}^2$.

Rodano Caliza



Figura 42. Rodano Caliza

Aquest tipus de rajola és un paviment ceràmic proporcionat per la marca Porcelanosa. S'ha triat aquesta rajola perquè té un color molt clar i és molt resistent i s'adapta a les nostres necessitats. Tot i així, els coeficients d'absorció són els mateixos que el terratzo que hi havia anteriorment a la sala (Taula 24).

Taula 24. Coeficients d'absorció de la rajola Rodano Caliza.

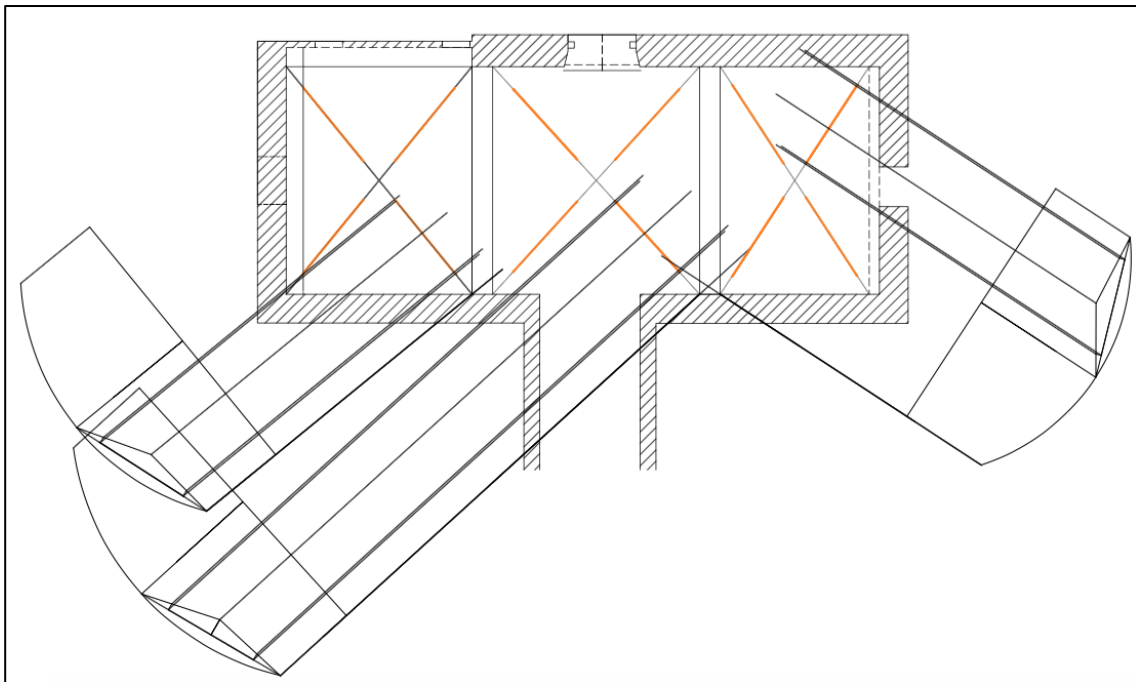
125 Hz	250 Hz	1500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Cadascuna d'aquestes rajoles tenen unes dimensions de 80x80 cm i ocupen una superfície de 129,24 m².

4.2 Plànols

Tant per a la realització dels plànols bidimensionals com tridimensionals de la reforma s'ha seguit el mateix procediment que per la confecció de l'estat actual: als plànols 2D, separant els elements per capes, s'han realitzat totes les vistes del menjador i als 3D, s'ha buscat la màxima similitud amb la realitat.

Ara bé, a l'hora de realitzar les vistes en dièdric dels panells fonoabsorbents del sostre, degut a que tenen certa inclinació, no hi ha cap vista on l'àrea d'aquests panells tingui veritable magnitud. Així doncs, com es pot observar a la Figura 43, per a confeccionar el plànol s'ha hagut de realitzar un canvi de pla a cada volta: s'han utilitzat línies auxiliars per a crear els nous plans a on inserir el panells en veritable magnitud i traslladar-ho a la planta.

**Figura 43. Canvi de pla mitjançant AutoCAD.**

4.3 Anàlisi de l'acústica del projecte proposat

Per a fer l'anàlisi acústica de la nova sala es procedirà de la mateixa forma que s'ha fet per analitzar la sala actual. Es calcularan el temps de reverberació (TR), la brillantor (Br) i el %ALCons com a paràmetres acústics i es calcularan en els quatre escenaris proposats anteriorment: sala buida, menjador, sala de conferències semiplena i sala de conferències plena. Finalment, una vegada calculats aquests paràmetres es compararan amb els valors originals i s'avaluarà la millora. Pel que fa a les aproximacions, es realitza la mateixa aproximació de la sala actual que s'ha fet anteriorment.

4.3.1 Paràmetres acústics calculats

Per a calcular els paràmetres acústics es segueixen els mateixos càlculs i procediments realitzats per a calcular prèviament els diferents paràmetres en els diferents escenaris.

Sala buida

Partim de les diferents superfícies de la sala i els coeficients d'absorció corresponents. Observem a la Taula 25 com s'han afegit els nous materials incorporats a la sala i alguns d'altres han variat respecte a la situació original. Per exemple, la paret de guix, s'ha reduït perquè s'hi ha restat la part tapada per panells fonoabsorbents i pels armaris. A les Taules 26, 27 i 28 es mostren els diferents paràmetres acústics calculats.

Taula 25. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Coeficients d'absorció acústica.

Superfície de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m ²)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paret guix	59,22	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Recobriments	56,14	0,05	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10
panells fonoabsorbents paret	11,96	0,23	0,74	1,00	1,00	0,98	0,94
Panells fonoabsorbents armaris	18,18	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
Panells fonoabsorbents sostre	32,24	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Superfície total (m ²)	470,89						

Taula 26. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul del temps de Reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coeficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	89,485	0,19	0,88	0,79
250 Hz	51,040	0,11	1,54	1,45
500 Hz	62,836	0,13	1,25	1,16
1000 Hz	70,679	0,15	1,11	1,03
2000 Hz	78,446	0,17	1,00	0,92
4000 Hz	77,408	0,16	1,01	0,93
RT Mitjà			1,18	1,09

Taula 27. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	1,02	0,85
Eyring	1,03	0,84

Taula 28. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul del %ALCons

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	102,96	2,01	6,35
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	2,5	5,1	4,3
Posició 2	6,5	9,0	8,2
Posició 3	10,6	9,0	8,2
% ALCONS Mitjà		7,7	6,9

Menjador ple

Apliquem el mateix mètode però aquesta vegada considerant les taules i els alumnes que ocupen el menjador. La Taula 29 mostra els coeficients d'absorció utilitzats i les Taules 30, 31 i 32 mostren els paràmetres acústics calculats.

Taula 29. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Coeficients d'absorció acústica.

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m ²)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
paret guix	59,22	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
Recobrint	56,14	0,05	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1
panells fonoabsorbents paret	11,96	0,23	0,74	1	1	0,98	0,94
Panells fonoabsorbents armaris	18,18	0,35	0,3	0,65	0,85	0,85	0,75
Panells fonoabsorbents sostre	32,24	0,35	0,3	0,65	0,85	0,85	0,75
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Taules	35,28	0,2	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	115,2	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Superfície total (m ²)	470,89						

Taula 30. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul del temps de Reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coeficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	135,71	0,29	0,58	0,49
250 Hz	97,73	0,21	0,80	0,72
500 Hz	114,23	0,24	0,69	0,60
1000 Hz	133,59	0,28	0,59	0,50
2000 Hz	143,66	0,31	0,55	0,46
4000 Hz	142,63	0,30	0,55	0,46
RT Mitjà			0,64	0,55

Taula 31. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	1,08	0,86
Eyring	1,10	0,84

Taula 32. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul del %ALCons.

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	212,51	2,89	9,12
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	2,5	1,5	1,2
Posició 2	6,5	10,3	8,0
Posició 3	10,6	4,9	4,3
% ALCONS Mitjà		5,6	4,5

Sala de conferències semiplena

Partint dels coeficients d'absorció i les àrees de les superfícies de la sala (Taula 33), calculem els diferents paràmetres acústics (Taules 34, 35 i 36).

Taula 33. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala conferències semiplena. Coeficients d'absorció acústica.

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Paret guix	59,22	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Recobrint	56,14	0,05	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10
Panells fonoabsorbents paret	11,96	0,23	0,74	1,00	1,00	0,98	0,94
Panells fonoabsorbents armaris	18,18	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
Panells fonoabsorbents sostre	32,24	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Tarima	15,00	0,20	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	56,00	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56

Taula 34. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena. Càlcul del Temps de Reverberació.

Freqüència	Àrea total d'absorció	Coeficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	111,525	0,21	0,70	0,63
250 Hz	73,630	0,14	1,07	0,99
500 Hz	87,776	0,16	0,89	0,82
1000 Hz	72,532	0,13	1,08	1,01
2000 Hz	110,106	0,20	0,71	0,64
4000 Hz	109,068	0,20	0,72	0,64
RT Mitjà			0,99	0,91

Taula 35. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,90	0,72
Eyring	0,89	0,70

Taula 36. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena. Càlcul del %ALCons.

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	154,47	2,46	7,78
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	3,4	4,8	3,9
Posició 2	4,4	8,1	6,5
Posició 3	7,3	22,2	17,8
% ALCONS Mitjà		11,7	9,4

Sala de conferències plena

A partir dels coeficients d'absorció i de les diferents àrees (Taula 37), es calculen el temps de reverberació, brillantor i calidesa acústica i el %ALCons (Taules 38, 39 i 40).

Taula 37. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena. Coeficients d'absorció acústica.

Superfícies de la sala	Superfícies parcials de mateix coeficient (m2)	Coeficient d'absorció (125Hz)	Coeficient d'absorció (250Hz)	Coeficient d'absorció (500Hz)	Coeficient d'absorció (1000Hz)	Coeficient d'absorció (2000Hz)	Coeficient d'absorció (4000Hz)
Sostre	164,91	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
paret guix	59,22	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Recobrint	56,14	0,05	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10
panells fonoabsorbents paret	11,96	0,23	0,74	1,00	1,00	0,98	0,94
panells fonoabsorbents armaris	18,18	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
panells fonoabsorbents sostre	32,24	0,35	0,30	0,65	0,85	0,85	0,75
Terra	128,24	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Tarima	15,00	0,20	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
Cadires plenes	128,00	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Superfície total (m²)	613,89						

**Taula 38. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.
Càlcul del temps de reverberació.**

Frecuencia	Àrea total d'absorció	Coefficient d'absorció mitjà	RT(Sabine)	RT (Eyring)
125 Hz	136,005	0,22	0,58	0,51
250 Hz	101,710	0,17	0,77	0,71
500 Hz	97,218	0,16	0,81	0,74
1000 Hz	140,099	0,23	0,56	0,49
2000 Hz	150,426	0,25	0,52	0,46
4000 Hz	149,388	0,24	0,53	0,46
RT Mitjà			0,68	0,62

**Taula 39. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.
Càlcul dels paràmetres derivats del RT.**

	Calidesa Acústica (BR)	Brillantor (Br)
Sabine	0,99	0,77
Eyring	0,98	0,74

**Taula 40. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.
Càlcul del %ALCons.**

	R(constant de la sala)	Dc	Distància crítica (m)
	228,56	2,99	9,46
	Distància font	%ALCons (Sabine)	%ALCons (Eyring)
Posició 1	3,4	2,6	2,0
Posició 2	6,7	10,0	7,6
Posició 3	15,4	4,7	4,1
% ALCONS Mitjà		5,8	4,6

4.3.2 Avaluació dels paràmetres i verificació de la millora

Una vegada s'han realitzat els diferents càlculs, hem pogut observar que realment hi ha una millora acústica notable respecte la sala inicial. En aquest apartat es descriurà com ha estat aquesta millora i es compararan els paràmetres nous amb els paràmetres originals.

En primer lloc es fa referència al temps de reverberació. Recordem que és un dels paràmetres acústics més destacats i que millor descriuen l'estat acústic de

la sala, així doncs, es farà una comparació del canvi del temps de reverberació per a cada escenari.

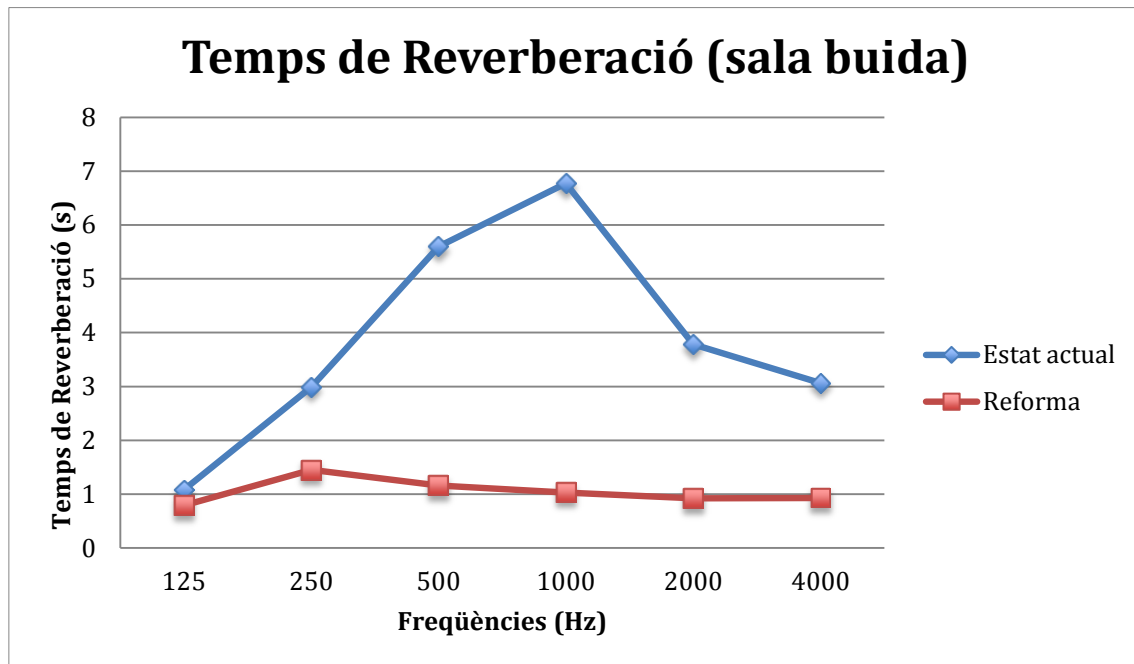


Figura 44. Comparativa entre els temps de reverberació (Sala buida).

Tal i com es pot veure a la Figura 44, hi ha un canvi molt important dels temps de reverberació respecte a la sala buida. En primer lloc, el valor del temps de reverberació s'ha reduït moltíssim. En segon lloc, el temps de reverberació de la reforma són molt més uniformes i constants, observem que malgrat comenci ascendint i després decaigui lentament, la tendència és constant, a diferència del temps de reverberació de la sala original. Això és degut a que els objectes que s'han introduït eren absorbents en unes freqüències concretes i així s'igualaven tots els temps de reverberació.

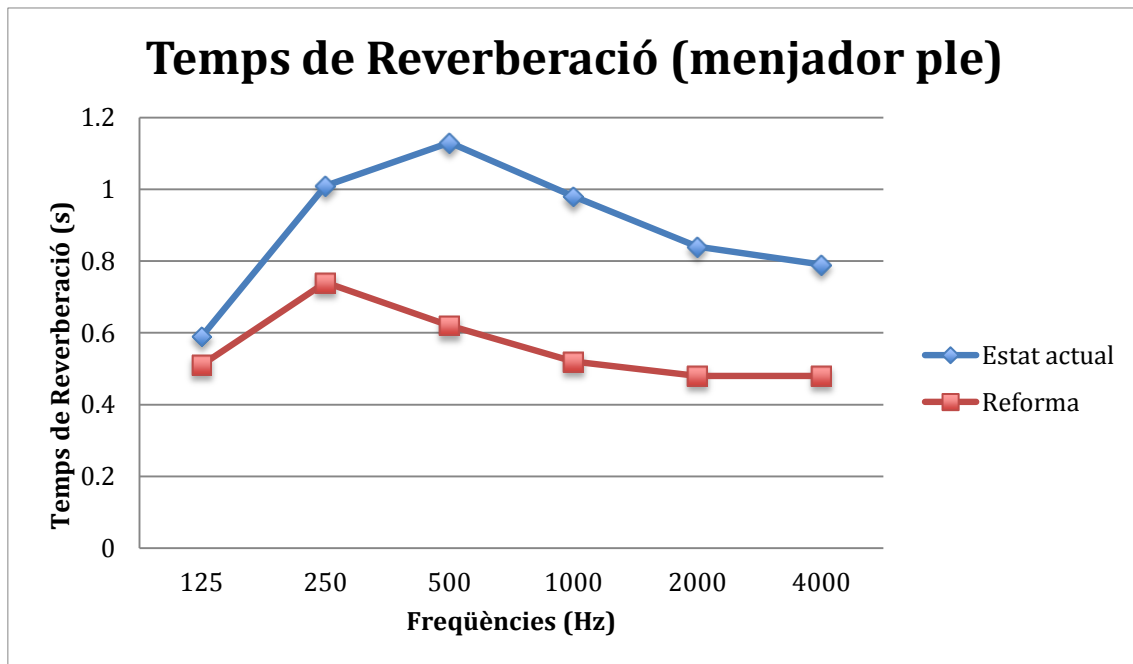


Figura 45. Comparativa entre els temps de reverberació (menjador ple).

La Figura 45 fa referència als diferents temps de reverberació quan la sala pren la funció de menjador. En una primera instància es pot veure que el temps de reverberació ha disminuït adequant-se a la funció d'un menjador, recordem que un menjador requereix de molta absorció per evitar l'acumulació de soroll. Per altra banda, malgrat en l'estat actual el temps de reverberació era bastant uniforme, en la reforma encara és més constant i més semblant al dibuix d'una funció constant.

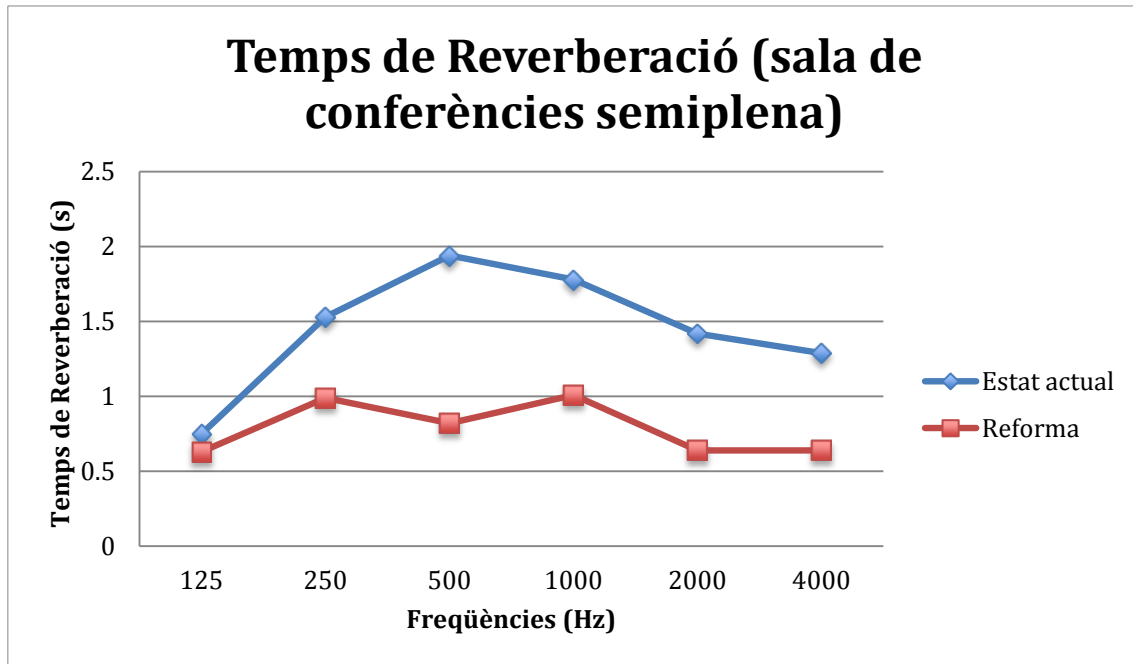


Figura 46. Comparativa entre els temps de reverberació (sala de conferències semiplena).

A la Figura 46 es poden veure els temps de reverberació en l'escenari de sala de conferències semiplena. Es pot veure que segueix la tendència marcada per les altres sales: s'ha reduït notablement el valor del temps de reverberació i els diferents valors cada vegada són més similars i uniformes.

Finalment a la Figura 47 es pot veure que quan la sala de conferències és plena, el canvi és molt similar, ara bé, com els valors del temps de reverberació ja eren bastant correctes, el temps de reverberació no ha disminuït tant com en altres escenaris.

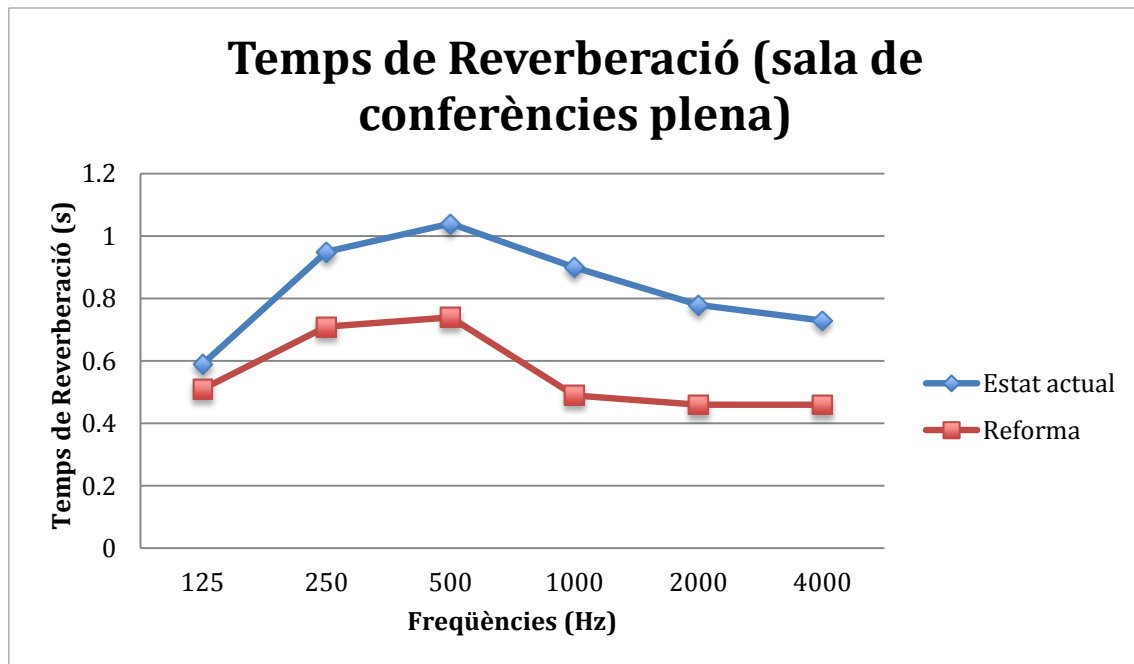


Figura 47. Comparativa entre els temps de reverberació (sala de conferències plena).

A la Taula 41 es pot observar un resum de tots els paràmetres acústics calculats: els paràmetres originals (abreviat amb una O), els paràmetres després de la reforma (abreviat amb una R) i els valors òptims.

Taula 41. Resum dels paràmetres acústics totals. Comparativa entre els paràmetres originals (O) i els paràmetres després de la reforma (R)

	Sala buida		Menjador		Sala de conferències semiplena		Sala de conferències plena		Valors òptims
	O	R	O	R	O	R	O	R	
RT (Eyring)	6,10	1,09	1,06	0,57	1,86	0,91	0,97	0,62	0,7 - 1 (sala conferències) 0,5 - 0,7 (menjador)
Brillantor	0,55	0,84	0,77	0,84	0,73	0,72	0,78	0,74	0,87 - 1
Calidesa acústica	0,32	1,03	0,76	1,08	0,61	0,89	0,79	0,98	-
%ALCons	45,5 %	6,9 %	12,0 %	4,5 %	21,3 %	9,4 %	11,6 %	4,6 %	< 11,4%

Recordem que la calidesa acústica és un paràmetre utilitzat per a l'anàlisi de sales destinades a la música i per tant no té incidència en aquest cas.

En línies generals, es pot observar que hi ha hagut una millora dels valors dels paràmetres acústics. Val a dir que hi ha escenaris on el canvi és molt més notable que en altres, sobretot en el cas de la sala buida on la millora és més notable pel que fa a la sala antiga.

Començant per l'escenari de la sala buida, amb la reforma els paràmetres han variat de forma molt positiva i són molt propers als paràmetres òptims. Tot i així, recordem que aquest càlcul és quelcom orientatiu ja que en escasses ocasions estarà la sala sense gent i sense mobiliari. En primer lloc, el temps de reverberació millora de forma molt notable amb la reforma. Observem que el valor ha disminuït 5,01s eliminant qualsevol tipus de reverberació que es pogués originar. En segon lloc la brillantor s'ha incrementat bastant i queda a prop dels valors ideals. Finalment, el %ALCons, el qual tenia una xifra molt elevada, s'ha rebaixat fins el 6,9%, entrant dins el marge estipulat com a òptim. Tots aquests canvis es reflecteixen en una millor acústica de la sala: la reverberació hauria de ser l'adequada; les focalitzacions haurien d'estar més controlades i un discurs s'hauria d'entendre correctament i clarament des de qualsevol punt de la sala.

Pel que fa a la funció de menjador, s'observa també una millora. És cert que a la sala original el temps de reverberació no era extraordinàriament elevat, de fet, entrava dins els marges d'una sala destinada a la paraula. No obstant això, recordem que en l'escenari de menjador, la funció de sala d'actes passa a un segon pla i interessa un grau elevat d'absorció per reduir el soroll que es genera en un àpat (quan els alumnes parlen, soroll de coberts i carros, etc.). Conseqüentment, a la reforma el temps de reverberació és bastant més baix que a la sala original: s'ha passat d'un RT de 1,06 s a 0,57 s. A més, com a sala per a la paraula els altres paràmetres no són pas dolents, la brillantor és de 0,84 (molt proper al valor òptim) i el %ALCons és d'un 4,5%, també dins el marge corresponent. Així doncs, aquests valors es reflecteixen un menjador amb les característiques òptimes sonores. El grau elevat d'absorció elimina

l'acumulació i increment del soroll (és a dir, l'efecte "Cocktail party") i a més, si en algun moment s'ha de transmetre algun missatge als alumnes, es pot fer sense cap problema ja que l'acústica també és bona.

Fent referència a la funció de sala de conferències semiplena, també es pot observar que amb la reforma s'aconsegueix una millora notable. Recordem que aquesta és una de les funcions més destacades ja que a l'hora de celebrar actes i reunions en aquest espai un públic de seixanta oients és el més habitual. Pel que fa al canvi dels paràmetres acústics, podem veure que hi ha hagut una millora notable: en l'estat actual de la sala, tots els paràmetres són bastant lluny dels límits òptims, no obstant això, amb la reforma tots els paràmetres milloren i alguns s'ajusten al marge òptim. Mentre que el temps de reverberació original era de 1,86 s, en la sala reformada aquest valor es corregeix fins als 0,91s. Per altra banda, la brillantor no es manté igual a 0,72 però, malgrat sigui fora del valor recomanat, no és té un nivell adequat. Finalment, la intel·ligibilitat també ha millorat força; observem que el %ALCons s'ha reduït a més de la meitat, ha passat del 21,3% a 9,4%. Aquests resultats a nivell pràctic es tradueixen amb un increment de la intel·ligibilitat de la paraula i una distribució més uniforme del so. A més, el fet de reduir el temps de reverberació comporta que el so s'extingeix abans i per tant a l'hora de fer una conferència, no es superposaran les paraules degut a les reflexions secundàries.

Finalment, fent referència a l'escenari de la sala de conferències plena, hi ha un canvi però no és necessàriament millor. Recordem que els valors originals d'aquest escenari ja eren prou bons, potser el %ALCons era unes dècimes per sobre el valor ideal però gairebé inapreciable. Així doncs, amb la millora s'ha reduït el temps de reverberació però encara és bo. La brillantor és lleugerament més baixa però tan poca diferència és gairebé inapreciable a nivell pràctic. Ara bé, el %ALCons s'ha reduït i és quelcom positiu ja que malgrat ja fos gairebé dins el marge, quan més s'apropi a 0 millor. Així doncs, en aquest escenari hi ha certa millora però molt menor que en els escenaris anteriors.

4.4 Cost del Projecte

En aquest darrer capítol es discuteixen els aspectes econòmics del projecte de reforma del Menjador dels Càntirs. A la Taula 42 es desglossa el cost per capítols de les diferents activitats necessàries per l'adequació acústica de la sala. Els preus per metre quadrat especificats per a cada concepte inclouen els materials i la ma d'obra i s'han obtinguin d'un estudi d'arquitectura.

El cost total estimat de la reforma és de 37.867,50 € (IVA a part), que equival a un preu de 236,67 €/m² (IVA a part). Cal destacar que al contrari del que es podria pensar, el pes del cost dels elements específics incorporats per millorar l'acústica de la sala (revestiments acústics fonoabsorbents i l'arrambador de fusta) representa només el 37,51% del cost total de la reforma (aquest xifra inclou l'enderroc de l'enrajolat, el revestiment de fusta, el total dels revestiments acústics i la fusteria necessària per instal·lar els panells). La resta del cost és degut als elements que s'incorporen per tal de rehabilitar i modernitzar la sala. Hi ha partides com el canvi de paviment, que representa un 29,58% del cost total i que no intervé en la millora de l'acústica de sala, només té un objectiu estètic, i podria, per tant, considerar-se opcional.

Taula 42. Pressupost de la reforma desglossat per capítols.

Capítol	Concepte	Superfície (m ²)	Preu €/ m ²	Cost	Percentatge
Enderrocs	Paviment	160	15,00 €	2.400,00 €	6,34%
	Enrajolat arrambador	45	18,00 €	810,00 €	2,14%
Total enderrocs				3.210,00 €	8,48%
Paviments	Nou paviment porcellànic	160	70,00 €	11.200,00 €	
Total paviments				11.200,00 €	29,58%
Revestiments	Revestiment arrambador	45	65,00 €	2.925,00 €	7,72%
	Pintura parets i sostre	350	10,00 €	3.500,00 €	9,24%
Total revestiments				6.425,00 €	16,97%
Revestiments acústics	Panells sostre	15	130,00 €	1.950,00 €	5,15%
	Panells registres superiors	20	70,00 €	1.400,00 €	3,70%
	Panells paret	12	60,00 €	720,00 €	1,90%
Total revestiments acústics				4.070,00 €	10,75%
Fusteria	Panells registres superiors	20	320,00 €	6.400,00 €	16,90%
	Tapetes portes		1.500,00 €	1.500,00 €	3,96%
	Moble zona paret	11,25	450,00 €	5.062,50 €	13,37%
Total fusteria				12.962,50 €	34,23%
Total cost estimat per l'execució projecte				37.867,50 €	100,00%
Cost estimat €/m2				236,67 €	

5 Conclusions

La hipòtesi formulada en aquest treball plantejava:

És possible millorar l'acústica del Menjador dels Càntirs, sense que perdi la seva essència estètica, per tal que pugui mantenir la seva funció polivalent de menjador i de sala d'actes d'aforament reduït.

Al llarg d'aquest treball s'ha demostrat que les dues parts de la hipòtesi són certes: per una banda, s'ha millorat l'acústica de la sala aplicant solucions pròpies de l'enginyeria acústica que permeten mantenir la seva polivalència; i d'altra banda, s'han ajustat les modificacions arquitectòniques de manera que s'ha conservat l'essència estètica i funcional de la sala.

Per a quantificar la qualitat acústica de la sala, de tots els paràmetres acústics existents, s'han calculat els que estan a l'abast d'aquest treball: el temps de reverberació, la brillantor i el %ALCons. L'estimació d'aquests paràmetres ha permès realitzar una avaluació força acurada de les característiques sonores de la sala abans i després de la seva modificació.

El càlcul d'aquests paràmetres en quatre escenaris diferents de la sala (sala buida, menjador, sala de conferències semiplena i sala de conferències plena) han confirmat que aplicant les modificacions proposades hi ha una millora de l'acústica en tots els escenaris. No obstant això, on aquesta millora és més notable és a l'escenari de la sala buida; a mida que s'omple les diferències disminueixen donada a la pròpia absorció del mobiliari i a les persones.

La confecció acurada dels plànols bidimensionals i tridimensionals ha permès representar de manera fidedigna l'estat actual de la sala i l'aspecte final del projecte de millora. A més, han facilitat el càlcul dels paràmetres acústics.

La incorporació de panells fonoabsorbents a les parets i al sostre, així com la substitució del revestiment de rajoles per fusta, han estat claus per a la millora dels paràmetres acústics. A més a més, els panells situats al sostre permeten

corregir els diferents defectes acústics, com els ecos i les focalitzacions, que es donen en sostres arquejats de formes còncaues.

En el procés de remodelació de la sala s'han respectat els elements arquitectònics més característics, que són les voltes, intentant minimitzar l'impacte visual produït pels panells fonoabsorbents. Tanmateix, s'ha modernitzat la sala per a donar-li més lluminositat i sensació d'espai, renovant el revestiment de les parets, fusteria i paviment. S'han triat els colors dels panells en base als tres colors de l'escola, blau, verd i blanc; i per mantenir la identitat del menjador, s'ha incorporat una estanteria de disseny irregular per a la col·locació dels cànirs.

S'ha confeccionat un pressupost econòmic aproximat dels costos que suposaria la remodelació d'aquest espai. L'import d'aquest pressupost inclou l'enderrocament, els materials i la mà d'obra.

Respecte els objectius generals que es plantegen al inici del treball, es pot concloure que he après a raonar d'una manera científica; a analitzar i contrastar informació relacionada amb el tema; a emetre una hipòtesi i, en aquest cas demostrar-la; a redactar una memòria científica i a desenvolupar i seguir una planificació adequada a l'execució del treball.

Respecte als objectius específics, s'han estudiat els fonaments físics i les bases arquitectòniques de l'acústica d'edificis; s'ha trobat un mètode per analitzar l'acústica del Menjador dels Cànirs; s'han definit les modificacions necessàries per a la seva millora acústica realitzant una valoració de la viabilitat i s'ha realitzat un disseny digital del nou projecte de la sala.

Finalment, la realització d'aquest Treball de Recerca m'ha permès obtenir la visió complerta d'un projecte arquitectònic partint d'una idea inicial i desenvolupar-la tractant diferents àmbits: física acústica, disseny d'espais arquitectònics i avaluació econòmica.

6 Bibliografia

- ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. *Física*. Madrid. Fondo Educativo Interamericano, S.A. 0280. 1976¹. Volúmen II: Campos y ondas.
- BUECHE, Frederick. *Física para estudiantes de ciencias e ingeniería*. Naucalpan de Juárez. McGraw Hill. 1976¹. Tomo I.
- CARRIÓN, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona. Edicions UPC. 1998¹.
- CASACUBERTA, Xavier; COROMINA, Eusebi; QUINTANA, Dolors. *El Treball de Recerca*. Vic. Eumo Editorial. 2012³
- MARIN, Fernando. *Cerca de la Física*. Madrid. Alhambra. Proyecto mt62. 1975¹.
- MARIN, Joan; PFEIFFER, Norberto; TRAVESSET, Antoni. *Física 2 batxillerat*. Barcelona. Editorial Casals. 2009¹
- ABAD, Marta. *Estudio Acústico y electroacústico de la sala de conciertos Ritmo Compàs (Madrid)*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 2013. [En línea]
<http://oa.upm.es/21507/1/TESIS_MASTER_MARTA_ABAD_SORBET.pdf>
- ARAU, Higini. *Auditorios del siglo XXI*. [En línea]
<http://www.arauacustica.com/files/publicaciones/pdf_esp_21.pdf>
- CIMEC. *Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales*. 2013. [En línea]
<<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4527/4456>>

- CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. *Documento Básico HR. Protección frente al ruido*. 2009.

<<http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/proteccionRuido/DBHR.pdf>>

- ECOPHON. *Ecophon Solo Baffle*. [En línea]

<<http://www.ecophon.com/PIM/Solo%20Baffle-PRODUCT-ES.pdf>>

- INGENIEROS ACÚSTICOS iA. *Distribución de materiales acústicos*. [En línea]

<<http://www.ingenierosacusticos.com/ingenieros-acusticos-catalogo-de-materiales-acusticos-vicoustic.pdf>>

- INGENIEROS ACÚSTICOSi A. *Introducción a la acústica de salas*. [En línea]

<<http://www.ingenierosacusticos.com/ingenieros-acusticos-manual-sobre-acustica-de-salas.pdf>>

- MAÑÓ, Javier. *Aislamiento y Acondicionamiento Acústico de un Auditorio para actuaciones en Directo de Bandas de Música*. Gandia. 2010. [En línea]

<<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11614/Tesina%20Fco.%20Javier%20Ma%C3%B1%C3%B3%20Frasquet.pdf?sequence=1>>

Índex de figures

Figura 1. Reflexió especular.....	16
Figura 2. Reflexió difusa.....	16
Figura 3. Nivell de pressió sonora (en dB) de les ones sonores en el receptor.	19
Figura 4. Teoria Geomètrica.....	21
Figura 5. Focalització del so en una superfície cònca.	34
Figura 6. Procés de dissipació de l'energia a l'interior d'un	38
Figura 7. Enric Sagnier i Villavecchia.	41
Figura 8. Fotografia general del Menjador dels Càntirs.....	41
Figura 9. Fotografia d'una de les parets auxiliars.	42
Figura 10. Sostre arquejat del Menjador dels Càntirs.	43
Figura 11. Representació de les distàncies a una de les parets.	46
Figura 12. Alçat del Menjador dels Càntirs (parets mestres).....	48
Figura 13. Alçat del Menjador dels Càntirs (parets auxiliars).	48
Figura 14. Alçat del Menjador dels Càntirs (fusteria).....	49
Figura 15. Alçat del Menjador dels Càntirs (enrajolat).....	49
Figura 16. Alçat del Menjador dels Càntirs (electricitat).	50
Figura 17. Alçat del Menjador dels Càntirs (fontaneria).	50
Figura 18. Planta del Menjador dels Càntirs.	51
Figura 19. Modelat tridimensional (visió general).	52
Figura 20. Talls seccionals amb SketchUp.....	52
Figura 22. Procés de renderització (detall).....	54
Figura 21. Procés de renderització (visió general).	54
Figura 23. Escenari acústic: sala buida.....	56
Figura 24. Escenari acústic: menjador ple.	56
Figura 25. Escenari acústic: sala de conferències semiplena.	57
Figura 26. Escenari acústic: sala de conferències plena.....	57
Figura 27. Visió 3D de la simplificació de la sala.....	58
Figura 28. Plànol acotat de la simplificació de la sala.	58
Figura 29. Temps de reverberació en funció de les bandes d'octava de freqüència segons la fórmula de Sabine.	66

Figura 30. Temps de reverberació en funció de les bandes d'octava de freqüència segons la fórmula d'Eyring.....	66
Figura 31. Proposta de millora. Revestiment.....	71
Figura 32. Proposta de millora. Armaris superiors.	72
Figura 33. Proposta de millora. Panells fonoabsorbents de les parets.....	73
Figura 34. Proposta de millora. Panells fonoabsorbents del sostre.....	74
Figura 35. Proposta de millora. Calaixera i estanteria.....	75
Figura 36. Proposta de millora. Portes d'accés als magatzems.	76
Figura 37. Proposta de millora. Terra.....	77
Figura 38. Proposta de millora. Visió general.....	78
Figura 39. Revestiment de fusta.....	79
Figura 40. Cinema Round Premium.....	79
Figura 41. Ecophon Solo Baffle.....	80
Figura 42. Rodano Caliza.....	80
Figura 43. Canvi de pla mitjançant AutoCAD.	81
Figura 44. Comparativa entre els temps de reverberació (Sala buida).	88
Figura 45. Comparativa entre els temps de reverberació (menjador ple).....	89
Figura 46. Comparativa entre els temps de reverberació (sala de conferències semiplena).....	90
Figura 47. Comparativa entre els temps de reverberació (sala de conferències plena).	91

Índex de taules

Taula 1. Contribució per bandes d'octava a la intel·ligibilitat i al nivell sonor. ..	24
Taula 2. RT mitjà segons el tipus de sala.....	25
Taula 3. Superfícies i àrees de la sala.	59
Taula 4. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Coeficients d'absorció.	60
Taula 5. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Temps de reverberació.	60
Taula 6. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. Paràmetres derivats del RT.	61
Taula 7. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala buida. %ALCons. .	61
Taula 8. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Coeficients d'absorció.	61
Taula 9. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Temps de reverberació.	62
Taula 10. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. Paràmetres derivats del RT.....	62
Taula 11. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Menjador ple. %ALCons.	62
Taula 12. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.....	63
Taula 13. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.....	63
Taula 14. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.....	63
Taula 15. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències semiplena.....	64
Taula 16. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.	64
Taula 17. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.	65

Taula 18. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.	65
Taula 19. Càlcul de paràmetres acústics. Estat actual. Sala de conferències plena.	65
Taula 20. Paràmetres acústics del Menjador dels Càntirs en l'estat actual.	67
Taula 21. Coeficients d'absorció del recobriment de fusta.	79
Taula 22. Coeficients d'absorció del Cinema Round Premium.	79
Taula 23. Coeficients d'absorció de l'Ecophon Solo Baffle.	80
Taula 24. Coeficients d'absorció de la rajola Rodano Caliza.	81
Taula 25. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Coeficients d'absorció acústica.	83
Taula 26. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul del temps de Reverberació.	83
Taula 27. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.	83
Taula 28. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Sala buida. Càlcul del %ALCons.	83
Taula 29. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Coeficients d'absorció acústica.	84
Taula 30. Càlcul de paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul del temps de Reverberació.	84
Taula 31. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.	84
Taula 32. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Menjador ple. Càlcul del %ALCons.	85
Taula 33. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala conferències semiplena.	85
Taula 34. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena.	85
Taula 35. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena. Càlcul dels paràmetres derivats del RT.	86
Taula 36. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències semiplena.	86

Taula 37. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena. Coeficients d'absorció acústica.....	86
Taula 38. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.	87
Taula 39. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.	87
Taula 40. Càlcul dels paràmetres acústics. Reforma. Sala de conferències plena.	87
Taula 41. Resum dels paràmetres acústics totals. Comparativa entre els paràmetres originals (O) i els paràmetres després de la reforma (R).....	91
Taula 42. Pressupost de la reforma desglossat per capítols.	94

Annex 1

Comparació fotogràfica:

Estat actual - Proposta de millora



Fotografia de l'estat actual del Menjador dels Càntirs



SketchUp (renderitzat) de l'estat actual del Menjador dels Càntirs



SketchUp (renderitzat) de la proposta de millora del Menjador dels Càntirs



Fotografia de l'estat actual del Menjador dels Càntirs



SketchUp (renderitzat) de l'estat actual del Menjador dels Càntirs



SketchUp (renderitzat) de la proposta de millora del Menjador dels Càntirs

Annex 2

Plànols
