

# Aproximació científica a un problema formal: contribució acústica al disseny arquitectònic

Higini Arau i Puchad \*

En record al prof. Eng. Lothar Cremer

Hom pot sospitar que no totes les formes que poden definir-se per a un recinte clos són les adequades per a una bona audició del so. Després de molts anys de recerca i de disseny encara no sé, però, quina ha de ser la forma ideal. El que sí sé és que moltes formes poden conduir a resultats molt propers a l'òptim i aquest convenciment és esperançador, perquè d'alguna manera m'assegura que és possible definir formes diverses amb criteris de disseny i estil diferents, sense que la creativitat formal entri en conflicte amb l'exigència acústica.

La proporció dimensional dels recintes, la grandària d'aquests en relació amb el nombre d'audiència i el temps de reverberació requerit per aconseguir els propòsits de destinació de la sala són les qüestions que esbrinarem en aquest treball, que s'il·lustra amb exemples constructius portats a terme en el curs de la meua activitat professional com a col·laborador acústic de diversos arquitectes.

El treball l'hem ordenat de la manera següent:

1. Les relacions dimensionals d'un recinte: la seva forma.
2. El volum i el temps de reverberació òptims en relació amb la capacitat d'audiència.
3. La corba tonal de la reverberació.
4. El fenomen de la linealitat de la corba de reverberació.
5. Anàlisi de les reflexions no desitjables degudes a les formes particulars de les superfícies; estudi de la resposta impulsiva del so i exemple de disseny.
6. Anàlisi de les magnituds de mèrit que defineixen la qualitat acústica d'un recinte.

## Les relacions dimensionals d'un recinte: la seva forma

Una qüestió que ens formulem els acústics i de la qual no hem estat capaços encara de treure tot l'entrellat és: podem parlar de geometria del so dins d'un espai

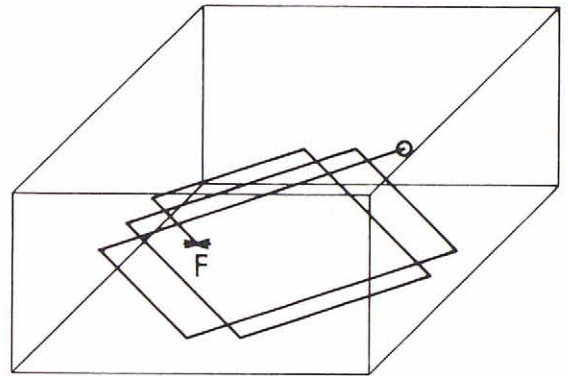


Figura 1: Recinte on es produeixen un conjunt de reflexions

clos? Quina és la bellesa de la forma arquitectònica quan s'aconsegueix l'harmonia sonora?

En aquest treball no serem capaços de contestar una qüestió tan profunda, només en veurem la superficialitat, però l'esmento per deixar constància que el so està interrelacionat amb la geometria i la matemàtica, i que les formes arquitectòniques adequades per aconseguir una bona audició possiblement han d'obeir a unes lleis formals que s'han de formular des del vessant de l'harmonia geomètrica del so i la mística dels nombres primers.

El so té un comportament dual: com una ona, que en realitat és el que és, i com un raig, que no té entitat física, però que és l'artifici conceptual que ens ajuda a entendre'l. Per això el so participa de les propietats de la difracció, i es corba davant dels obstacles, produeix reflexions difoses regulades d'acord a les lleis de Lambert i reflexions especulars quan la dimensió mínima del pla de reflexió és tres vegades superior a la longitud d'ona del so que es desitja reflectir. És a causa d'aquest comportament que sorgeix el nou concepte de les fonts imatge, situades simètricament al pla de reflexió i a igual distància de la font real. Segons les reflexions produïdes apareixen les primeres, les segones, les terceres..., les  $n$ -imatges en el camí de les trajectòries dels raigs sonors col·lionant sobre les superfícies del recinte. La figura 1 mostra un exemple de camí acústic entre una font sonora i un receptor. \*

\*Higini Arau és acústic, doctor en Ciències Físiques



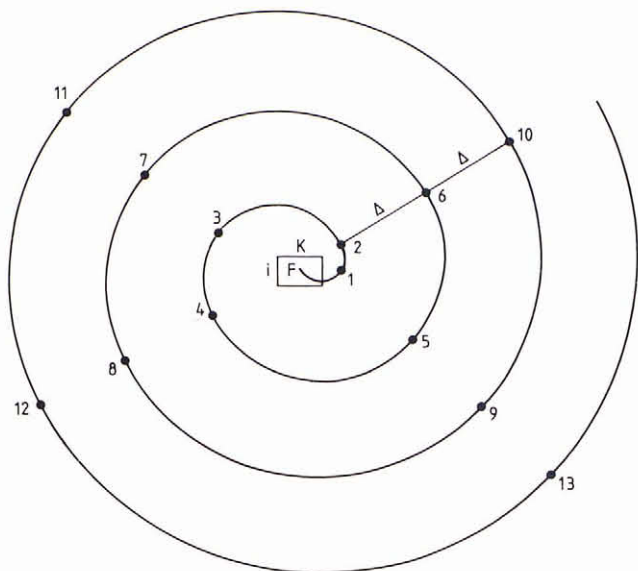


Figura 2: *Espirale d'Arquimedes de disposició de les imatges*

Però quina sorpresa la nostra —i aquest és un descobriment que hem fet, ja que no l'hem vist mai esmentat— quan constatem que les posicions de les fonts imatge se situen sobre una espiral d'Arquimedes i que les distàncies de les fonts imatge a la font sonora obeeixen a progressions aritmètiques de raó el seu pas de rosca, que depèn de les relacions dimensionals del recinte, (vegeu la figura 2):

$$\text{pas de rosca} = D = 2i\sqrt{(k/i)^2 + 1},$$

on  $k$ , i  $i$  són les relacions dimensionals de la planta del recinte respecte a l'alçària.

Si la relació dimensional  $g = k/i$  és el nombre de Fibonnacci o nombre auri  $1/2(1 + \sqrt{5})$ , el pas de rosca és:

$$D = 2i\sqrt{\sqrt{5}\sqrt{g}},$$

on 2 i 5 són nombres primers.

Quina relació pot tenir aquesta disposició harmònica de les fonts imatge amb el tan esmentat lliure recorregut mitjà del so a l'interior d'un recinte, que recorda el lliure recorregut de les col·lisions dels gasos d'acord amb el principi de Clausius?

Ara no estic, tampoc, en condicions de contestar aquesta profunda qüestió, però sospito que se'n pot deduir alguna cosa d'important. I si a la relació àuria  $g$  li trobem un nexa musical, entenent que puguem existir una correspondència formal entre les relacions dimensionals i els tons musicals de l'escala pitagòrica de dotze notes, veiem que gairebé existeix una coincidència entre les relacions dels acords que a continuació s'esmenten i

el nombre auri:

$$\frac{2^9/12}{2^{1/12}} = \frac{2^{10/12}}{2^{2/12}} = \frac{2^{11/12}}{2^{3/12}} = \frac{2^{12/12}}{2^{4/12}} = 2^{8/12} \approx g,$$

on 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12 són els exponents de  $2^{1/12}$  que coincideixen amb els semitons d'una octava, fet que posa en evidència que puguem existir, com a mínim, unes relacions harmòniques de les dimensions geomètriques d'un recinte:

$$\begin{aligned} (L/H, A/H, 1) \circ (k, i, 1) &= (g^2, g, 1) = \\ &= (g\sqrt{g}, \sqrt{g}, 1) \end{aligned}$$

on  $L$  (longitud),  $A$  (amplada) i  $H$  (alçària) són les dimensions màximes del recinte amb l'advertiment que  $L$  és la distància des de la paret del fons de l'escenari a la del fons de la sala.

Tot això ens fa pensar, o com a mínim sospitar, que poden existir unes relacions dimensionals de recinte més apropiades que altres per al desenvolupament musical, almenys per a un conjunt de notes que guardin una relació àuria entre elles.

I això, que és la divina proporció en arquitectura, està vinculat a les relacions freqüencials dels modes propis d'un recinte d'acord a la relació:

$$f_n = \frac{c}{2} [(n_x/L)^2 + (n_y/A)^2 + (n_z/H)^2],$$

on  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  són nombres enters des d'1 a  $\infty$  i  $c$  la velocitat del so.

Bolt i altres investigadors com Volkmann provaren que les sales amb relacions àuries presenten millor resposta a les baixes freqüències que les sales amb relacions diferents. Nosaltres, a més, volem fer notar que l'avantatge dels recintes amb proporcions àuries és que faciliten la producció de reflexions laterals immediates, que són molt beneficioses per a l'audició musical.

## El volum i el temps de reverberació òptims en relació amb la capacitat d'audiència

A part d'esbrinar quines són les relacions dimensionals òptimes, hem d'esbrinar, d'altra banda, la grandària del recinte, és a dir, el seu volum òptim en relació amb la capacitat d'audiència prevista i l'activitat per a la qual està destinat, és a dir, per a concerts, conferències, representacions teatrals o activitats polivalents.

Per determinar aquesta qüestió hem de parlar primer del temps de reverberació ( $TR$ ) d'un recinte. Intuïtivament,  $TR$  és el temps durant el qual el so es manté, comptat des de la fi de la seva emissió fins que s'extingeix i es fa inaudible. Definit tècnicament,  $TR$  és el temps que triga el so a decaure 60 dB una vegada hem apagat la font emissora. El  $TR$ , doncs, es mesura en segons i es determina per a cadascuna de les freqüències centrals d'octava o centrals de terços d'octava.

El temps de reverberació és un paràmetre important, el que ho és més, de la qualitat acústica d'una



sala. La impressió subjectiva que n'obtenim és la sensació de viva o d'amortiment del so. Tot recinte destinat a l'audiència ha de tenir a les freqüències mitjanes (500/1.000 Hz) i segons la seva dedicació i el seu volum, un temps de reverberació, *TRMID*, (mitjana del temps de reverberació a les freqüències mitjanes), que s'ajusti al que s'estima com a òptim per a l'activitat que s'hi ha de desenvolupar.

D'acord amb el que hem dit, el *TR* òptim per a una sala de concerts és:

$$TR \text{ òptim màxim} = 0,60V^{0,1325}$$

$$TR \text{ òptim mínim} = 0,4245V^{0,1331}$$

Per a sales d'òpera tenim:

$$TR \text{ òptim màxim} = 0,509V^{0,1335}$$

$$TR \text{ òptim mínim} = 0,396V^{0,1273}$$

Per a sales de parla (teatre, sales de conferències, etc.) és:

$$TR \text{ òptim màxim} = 0,368V^{0,1505}$$

$$TR \text{ òptim mínim} = 0,264V^{0,1394}$$

A més, el temps de reverberació és un indicador del grau d'absorció del recinte, de manera que el producte del *TR* i el coeficient d'absorció mitjà és igual a una constant *k* que només depèn de les magnituds geomètriques de l'espai clos considerat:

$$TRa = k, \quad (1)$$

on  $k = 0,162V/S$ , *V* és el volum d'aire, *S* l'àrea total de superfícies i *a* el coeficient d'absorció mitjà segons Sabine (mitjana aritmètica ponderada de  $a_j$  respecte a totes les superfícies del recinte). Així ho va determinar W.C. Sabine (Sabine, 1900) de forma experimental cap a l'any 1900 per a sales vives, és a dir, de baixa absorció i repartiment uniforme de l'absorció.

Amb absorció alta i uniformement repartida Eyring (1930) deduí que

$$a = -\ln(1 - \alpha),$$

on  $\alpha$  és el coeficient d'absorció energètic mitjà (mitjana aritmètica ponderada de  $\alpha_j$  respecte de totes les superfícies del recinte) i continua sent vàlida l'expressió (1) de Sabine amb aquest nou valor de *a*.

Durant anys quedà sense solució el problema general de càlcul del *TR* per a una sala amb distribució no uniforme de material absorbent, que és el cas real. I és en aquest aspecte, precisament, que nosaltres lliurarem la teoria general de la solució del problema (Arau, 1988), d'acord amb la qual:

$$TRa = k \quad (3)$$

on:

$$a = (a_x)^{S_x/S} \cdot (a_y)^{S_y/S} \cdot (a_z)^{S_z/S}$$

$$a_x = -\ln(1 - \alpha_x) + 4mV/S$$

$$a_y = -\ln(1 - \alpha_y) + 4mV/S$$

$$a_z = -\ln(1 - \alpha_z) + 4mV/S$$

$\alpha_x$  és la mitjana aritmètica ponderada dels coeficients d'absorció energètica de les superfícies de sòl  $S_{x1}$  i de sostre  $S_{x2}$ ;  $S_x = S_{x1} + S_{x2}$ ;  $\alpha_x = (\alpha_{x1}S_{x1} + \alpha_{x2}S_{x2})/S_x$ .  $\alpha_y$  és la mitjana aritmètica ponderada dels coeficients d'absorció energètica de les superfícies de parets laterals  $S_{y1}$  i  $S_{y2}$ ;  $S_y = S_{y1} + S_{y2}$ ;  $\alpha_y = (\alpha_{y1}S_{y1} + \alpha_{y2}S_{y2})/S_y$ .  $\alpha_z$  és la mitjana aritmètica ponderada dels coeficients d'absorció energètica de les superfícies frontal  $S_{z1}$  i de fons  $S_{z2}$ ;  $S_z = S_{z1} + S_{z2}$ .

$$S = S_x + S_y + S_z; a_z = (\alpha_{z1}S_{z1} + \alpha_{z2}S_{z2})/S_z$$

*m* és el coeficient molecular d'absorció de l'aire per metre de gruix.

Tot plegat significa que el temps de reverberació mitjà d'un recinte és igual a la mitjana geomètrica ponderada dels períodes de reverberació en cadascuna de les direccions rectangulars del recinte, en relació a la proporció d'àrea de cada zona referida a la superfície total de parets, *S*.

Aquesta afirmació a partir de (3) queda expressada per:

$$TR = \left( \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right)^{S_x/S} \cdot \left( \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right)^{S_y/S} \cdot \left( \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right)^{S_z/S},$$

expressió general de la qual s'obtenen, per a una distribució uniforme de l'absorció, les expressions de Eyring i Sabine, segons quin sigui el grau d'absorció que hi ha en el recinte.

En tots els casos la realitat verifica la predicció del gran mestre de l'acústica W.C. Sabine que el temps de reverberació, *TR*, i el coeficient d'absorció mitjà, *a*, són inversament proporcionals, i en l'únic en què discrepem uns i altres és en com realitzar les mitjanes dels coeficients d'absorció i quina és la naturalesa d'aquests coeficients, cosa que a nivell pràctic pot ser important però que a nivell teòric no ho és, i que eleva la fórmula de Sabine a ser considerada com una certa llei d'Ohm de l'acústica de sales.

Definit el concepte de *TR*, els criteris i el seu càlcul, tornem a la qüestió inicial de quina ha de ser la grandària del recinte en relació amb la capacitat



d'audiència perquè el *TRMID* sigui l'adient al fi destinat, sense que sigui necessari introduir-hi gaire més absorció que la que proporciona la mateixa audiència.

Aquesta ha estat una qüestió que, durant anys, cada especialista ha resolt confiant en relacions experimentals que els no acústics han considerat gairebé mítiques. Es diu que per a sales de concert convé que la relació entre el volum i el nombre d'audiència,  $V/N$ , en  $m^3$ /seient sigui, segons uns, 9, segons altres, 10 i, segons uns altres, 11, etc. Per a teatres es diu que ha de ser 3, 4, 5, o 6, etc. No cal insistir més per fer entendre que aquest coneixement no té cap base teòrica i per això el tema ens ha preocupat profundament, fins que fa uns anys, vàrem adoptar un tractament matemàtic del problema que ens el va resoldre (Arau, 1990).

El resultat fou que la relació entre el volum de la sala i la capacitat d'audiència s'ha d'expressar en funció de l'àrea d'ocupació,  $SA$ , i no en funció del nombre d'audiència, i així vam obtenir aquest resultat:

$$V/SA = 6,75(\alpha_s/\varepsilon)TRMID$$

o

$$V/SA = 7,36TRMID,$$

considerant que  $(\alpha_s/\varepsilon) = 1,0905$  (valor mitjà experimental de 30 sales), i on  $\alpha_s$  és la relació entre l'increment de l'absorció que introdueix l'audiència asseguda respecte a la sala buida i  $\varepsilon$  l'increment relatiu del temps de reverberació que es desitja obtenir.

### La corba tonal de la reverberació

Un altre punt molt important referent al temps de reverberació,  $TR$ , és el compliment de la corba tonal segons el criteri acústic que diu:

$$TRLOW/TRMID = 1,2 \pm 0,1;$$

$TRLOW$  és la mitjana del temps de reverberació a les baixes freqüències per a la sala plena d'audiència (el  $TRMID$  ja s'ha definit abans).

L'observança d'aquesta relació és fonamental per aconseguir que l'audició del so tingui la qualitat definida en termes musicals amb el concepte denominat "calor de so" (*warmth*). Per exemple, el Palau de la Música Catalana de volum d'aire  $11.500 m^3$  i  $TRMID = 1,6$  s, valor actual sense audiència (abans de la reforma ens vàrem trobar, entre altres qüestions, un incompliment clar d'aquest concepte, que provocava un excés d'absorció acústica a les baixes freqüències, i fins i tot a les freqüències mitjanes, per causa de la gran extensió de vitralls de les superfícies laterals del recinte).

On aquest problema també fou important va ser al Palau Sant Jordi, i a la gran Sala Oval del Palau Nacional de Montjuïc.

En el primer, els càlculs de l'avantprojecte japonès predien un  $TR$  de 2,1 s a 500 Hz amb la sala buida i un

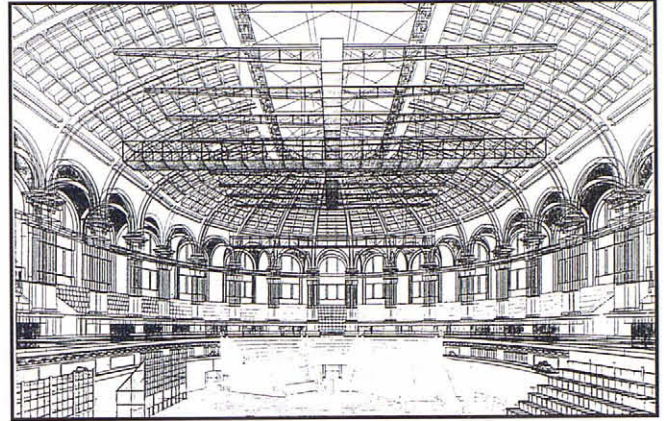


Figura 3: Sala Oval del Palau Nacional. Arquitectes: Gae Aulenti-Eric Steegmann

sostre absorbent. Res més lluny de poder aconseguir, com comprovarem en la nostra intervenció. No podia ser que una sala 31,65 vegades més gran que el Palau de la Música Catalana tingués un  $TR$  similar al d'aquesta, quan ni tan sols hi havia seients absorbents. El resultat estimat era molt sospitos. La realitat del nostre disseny fou molt diferent. El  $TRMID$  (sala sense audiència) va quedar a 4,9 s, mentre que per a la sala amb audiència amb la pista central ocupada va quedar en  $TRMID = 3$  s, valor molt aproximat al que s'estima com a òptim per a un local dedicat a l'òpera. Mitjançant la creació de ressonadors lineals en tot el perímetre per desalineament de les plaques absorbents del sostre en àrees compreses entre 12 i  $16 m^2$ , per formar ranures lineals desfasades 2 cm en altura, s'aconseguí un  $TRLOW$  de 3,92 s, que també està d'acord amb el criteri acústic.

La Sala Oval del Palau Nacional presenta també un volum immens:  $103\ 000 m^3$ . És la sala d'audició més gran d'Europa i només té una audiència de 3 000 persones assegudes en pista i en les grades frontals.

El  $TRMID$  és de 2,8 s i el  $TRLOW$  és de 3,69 s, i compleixen molt satisfactòriament el criteri acústic per a una sala d'audició de concerts amb gran orquestra i gran coral, col·locant l'orquestra allà on està previst i sota un baldaquí. En aquest cas, l'absorció acústica s'obtingué, com es diu col·loquialment, de les mateixes pedres, amb un tractament molt acurat de tot el sostre i amb la creació, sota dels seients de les grades, de ressonadors lineals de gran absorció a les baixes freqüències.

### El fenomen de la linealitat de la corba de reverberació.

Amb referència al temps de reverberació també hem de dir que la corba de decaïment del so convé que en escala semilogarítmica presenti un únic pendent, en senyal que el so té el comportament exponencial desitjable.

Molt freqüentment, però, no és possible complir aquesta prescripció, atès que si en una sala hi ha volums



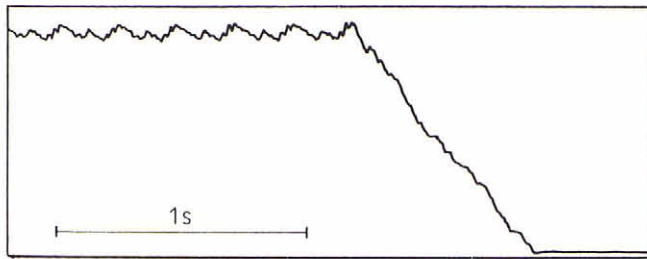


Figura 4: Comportament lineal en el procés d'excitació del so

acobllats, o bé distribució no uniforme del material absorbent, cosa que passa sovint, la corba de decaïment del so pot presentar fins i tot tres pendents (figura 5). Aquesta qüestió no és possible tractar-la des de la visió de les teories clàssiques (Sabine, 1900 i Eyring, 1930) i s'ha de tractar amb la teoria general (Arau, 1988). Quan, pel que sigui, la distribució de l'absorció tendeix a la uniformitat, tots els pendents conjuntament es confonen en un de sol.

El primer pendent del  $TR$  és molt important, i s'anomena "temps de reverberació immediat" o  $EDT$  (*Early Decay Time*).

El temps de reverberació lligat al pendent de l' $EDT$  és el que dona la impressió subjectiva. Aquest primer pendent depèn fortament de la influència de les àrees de màxima absorció de la sala. El segon pendent es vincula al valor mitjà de l'absorció de les parets de tot el recinte i el tercer, es correlaciona amb les àrees de mínima absorció.

El criteri acústic fixa que l' $EDT$  no sigui inferior al 90 % del valor del  $TRMID$ , la qual cosa significa que el disseny ha de tendir a aproximar o confondre els dos primers pendents.

### Anàlisi de les reflexions no desitjables degudes a les formes particulars de les superfícies; estudi de la resposta impulsiva del so i exemple de disseny

Un aspecte molt important de tractar en una sala és el de les formes particulars de les parets o dels plans de reflexió. El so ha d'arribar des de la font sonora a cada punt de recepció per la via directa i, a més, per les reflexions que es produeixen en les diverses superfícies de la sala. La trajectòria del camí reflectit entre una font d'emissió sonora i un punt receptor defineix un camí acústic que pot ser o no convenient. Per captar la informació sonora que ens arriba a l'oïda, cal que hi hagi un lapse de temps entre la recepció del so directe i la recepció del so reflectit format pel conjunt de reflexions immediates i allunyades. Cal evitar les reflexions massa retardades respecte al so directe, que fan la sensació d'un doble so produït a destemps (eco). També cal evitar les focalitzacions causades per formes preferentment

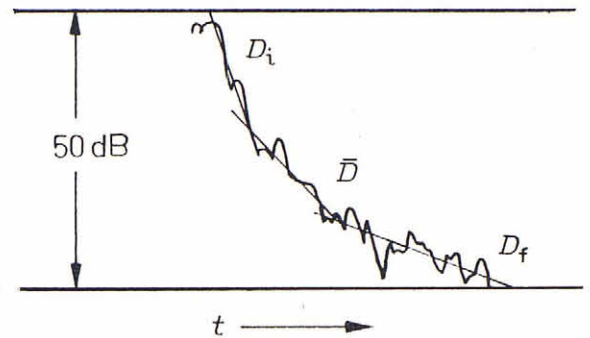


Figura 5: Decaïment del so en un cas real

còncaves. Per a la parla humana el retard entre el so directe i el reflectit no ha de ser superior a 50 ms, mentre que per a la música és més adequat un retard de 80 ms.

L'anàlisi dels camins sonors és bàsica per al disseny, a fi d'obtenir les inclinacions adequades de cadascuna de les superfícies que defineixen el recinte.

Les inclinacions de les parets i de vegades també l'esquema difractori d'algunes superfícies, trencant les ones sonores i produint reflexió difosa, tindran cura que el so reflectit arribi a temps per donar a l'audiència la informació de l'espectacle que s'escolta amb la brillantor, la intel·ligibilitat i la claredat que són exigibles des de qualsevol punt de la sala.

Per aconseguir el compliment d'aquesta exigència s'ha d'estudiar amb tota cura en els punts de recepció de l'audiència, la resposta impulsiva del so emès des de la font sonora fins a l'ordre de reflexió  $N$  que es vulgui analitzar.

L'anàlisi del traçat dels raigs o l'anàlisi de la trajectòria del so és un estudi que es realitza després d'obtenir un coneixement aprofundit de la resposta impulsiva (figura 6). En aquest estudi no és només important determinar l'existència de reflexions no desitjables, sinó també calcular-ne el nivell energètic a fi d'esbrinar si poden ser auditivament perilloses o no.

En el curs del meu treball vinculat amb arquitectes, hem aconseguit diferents formes que condueixen a resultats prou satisfactoris. Les figures de la 7 a la 10 corresponen a projectes en els quals s'ha portat a terme aquest acurat estudi de les reflexions i de la resposta impulsiva del so.

### Anàlisi de les magnituds de mèrit que defineixen la qualitat acústica d'un recinte

La claredat, la definició i la intel·ligibilitat són magnituds de mèrit de la qualitat acústica d'un recinte i són els objectius primordials d'un disseny acurat.

La transmissió del so en un recinte ha de ser tal que el nivell de pressió sonora,  $L$ , (dB) que s'estableix en qual-

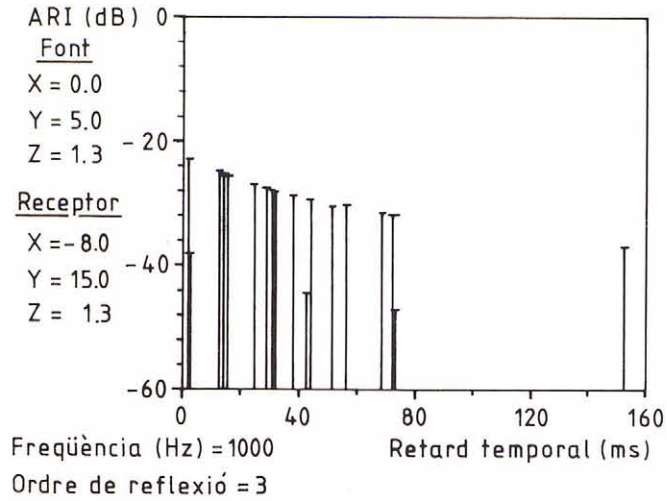


Figura 6: Ecograma. Resposta impulsiva del so

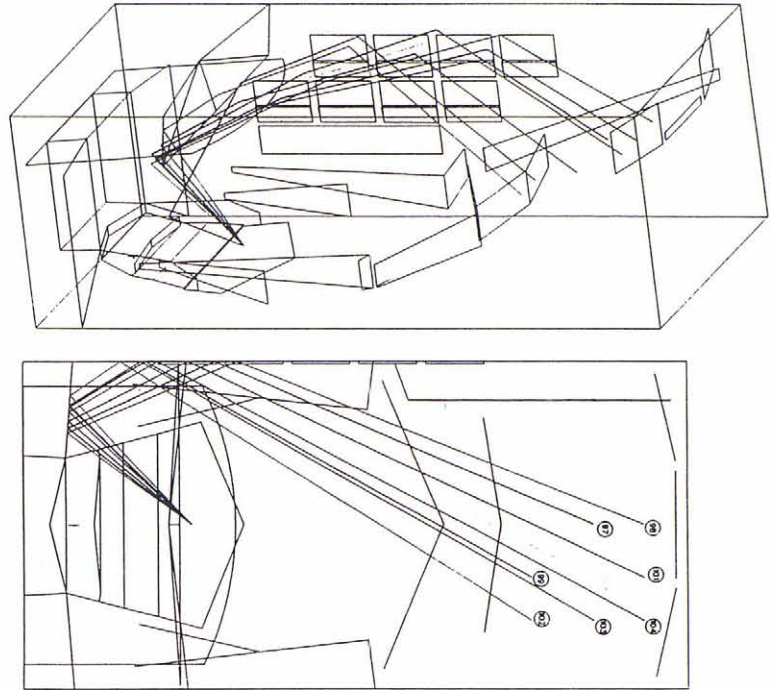


Figura 8: Auditori de Barcelona. Sala Simfònica. Arquitecte: R. Moneo.  $V = 28.100 \text{ m}^3$ ,  $N = 2.600$  seients. TRMID = 2,1 s

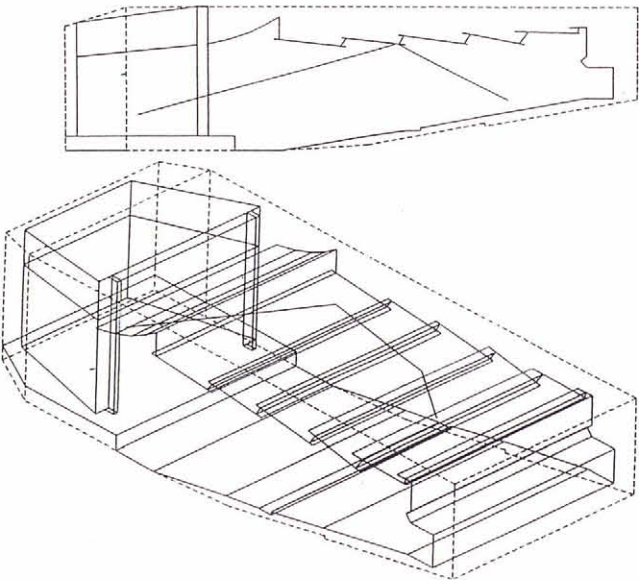


Figura 7: Auditori de Sant Julià de Lòria (Andorra). Arquitectes: P. Riera i J.M. Gutiérrez. Apte per a música simfònica i teatre  $V = 3.095 \text{ m}^3$ ,  $N = 625$  seients. TRMID (simfònica) = 1,44 s. TRMID (teatre) = 0,78 s

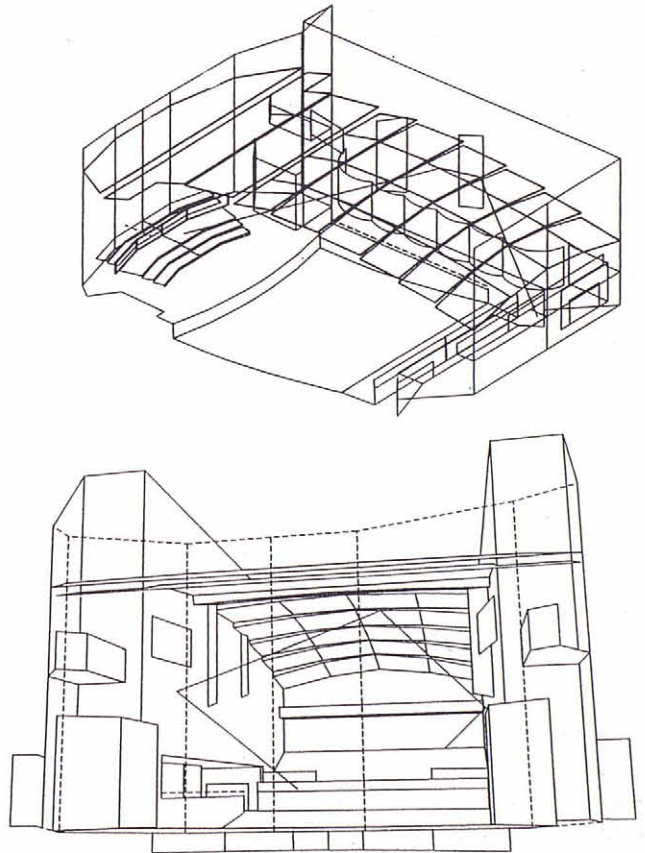


Figura 9: Auditori de Lleida. Arquitectes: Artigues-Sanabria.  $V = 8.000 \text{ m}^3$ ,  $N = 750$  seients. TRMID = 1,7 s



sevol punt de recepció del recinte respecte al so directe que s'obté a 10 m de la font sonora sigui:  $L - L_0 \approx 0$ . Això voldrà dir que el nivell de pressió sonora a qual-sevol punt de la sala serà aproximadament el mateix que s'obté a la primera fila del pati de butaques. Per acon-



Figura 10: Sala de conferències. Auditori del Laboratori General d'Assaig i Investigacions. Cerdanyola del Vallès. Arquitecte: J.M. Jordà-CAST.  $V = 623 \text{ m}^3$ ,  $N = 126$  seients. TRMID = 1,08 s

seguir això, a més de tenir cura del que ja hem dit, el sòl de l'audiència s'haurà de dissenyar d'acord a les bases de les espirals logarítmiques, de forma que els raigs sonors emesos des de la font tallin la superfície d'audició sempre amb un angle constant, i no qualsevol espiral serà adient.

D'altra banda, l'índex de claredat  $C_{80}$  del so, especialment aplicable a recintes on es faci música simfònica, serà la relació expressada en dB de l'energia sonora que arriba a l'audiència dins dels primers 80 ms respecte a la que arriba a partir dels 80 ms fins que el procés d'establiment del so es fa estacionari. Matemàticament s'expressa així:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2 dt}{\int_{80}^{\infty} p^2 dt}, \quad (5)$$

on  $p$  és la pressió sonora. Per això és convenient que en un recinte i d'acord amb el criteri acústic, el  $C_{80}$  estigui comprès entre -2 i 2 dB.

La definició,  $D$ , del so és una magnitud més secundària que el  $C_{80}$ . Ens indica la relació percentual que existeix entre les reflexions produïdes dins del lapse temporal dels primers 50 ms respecte a les que es produeixen des de l'inici de l'establiment del so fins que es

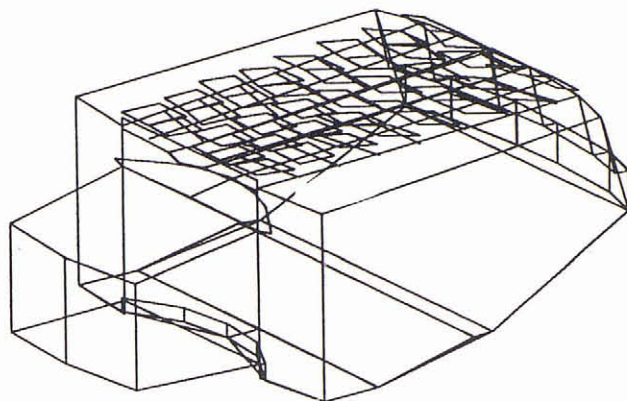


Figura 11: Auditori Kursaal. Sant Sebastià. Sala de Cambra. Arquitecte: R. Moneo.  $V = 4\,546 \text{ m}^3$ ,  $N = 650$  seients. TRMID = 1,40 s

fa estacionari. Finalment, tenim l'índex d'intelligibilitat del so, o índex de transmissió del llenguatge STI (*Sound Transmission Index*), de gran interès per a sales dedicades a la parla. Aquest índex d'alguna manera ens indica una proporció entre les reflexions immediates, que es classifiquen com a beneficioses, respecte a les allunyades, que estímem perjudicials per a la comprensió de la parla.

Totes aquestes magnituds són de molt difícil càlcul i juntament amb d'altres de les quals no hem parlat, les determinem (Arau, 1990-1993) mitjançant taules numèriques en relació amb la distància a la font sonora i també en mapes de color, com el que s'indica a la figura 11, on es calcula per a cada punt del recinte les magnituds següents:

$L_p$ DI:	Nivell de so directe
$L_p$ DIR + REV:	Nivell de so directe + reverberat
$L_p$ DIR + REF:	Nivell de so directe + reflectit fins a un ordre $N$ escollit que saturi el camp sonor

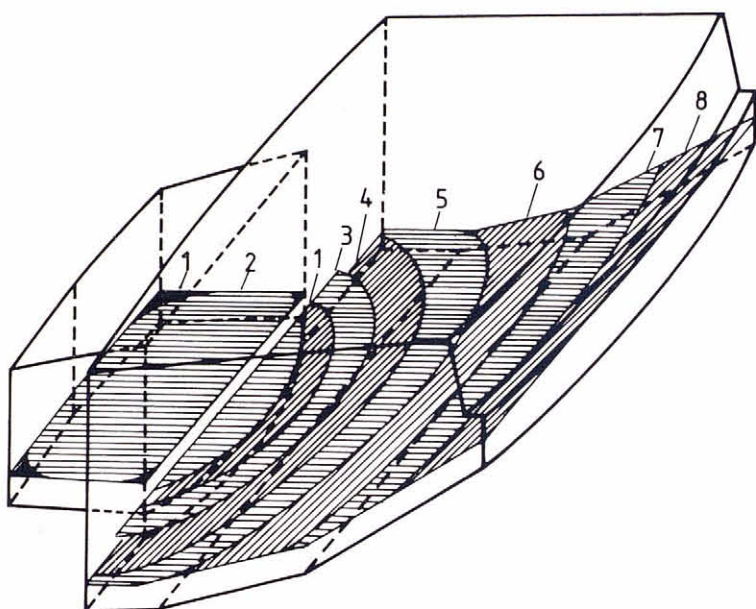
$C_{80}$ :	índex de claredat
STI:	índex de transmissió sonora (intelligibilitat)
STI ANSI:	índex d'intelligibilitat ANSI
ALCONS (%):	Pèrdua de l'articulació de consonants

També hem elaborat tres tècniques diferents de càlcul dels temps de reverberació,  $TR$ , mitjançant el traçament de raigs, que ens són útils per validar els mètodes estadístics del que hem parlat anteriorment i per determinar en cada punt el  $TR$  i el  $EDT$ .

Per finalitzar, m'acomio dels lectors atret per

la recerca de l'essència del so, que dóna forma a les pedres, estableix la dimensió perfecta i l'harmonia de les notes, cisellant la forma en l'arquitectura, en l'explicació de la bellesa estètica envers la geometria i els nombres, intentant trobar-li una justificació formal, com qui busca el fons d'un pou molt profund i recargolat, fascinat pel mateix epitafi de la tomba de Bernouilli que fa referència a les espirals:

*Eadem mutata resurgo*, que vol dir: encara que canvia sempre resorgeix. Harmoniosament dilatada, esplèndida com una cargola de llum que participa d'obscuritat i de color, com la mateixa vida dels grans homes que ens sembla no conèixer quan viuen, però que una vegada morts ens adonem que encara són entre nosaltres regalant-nos sentit a la vida amb el seu profund coneixement de la naturalesa.



Frq.:125 Hz Func.:Lp DIR

Escala de colors

8	Verd fosc	71.50	73.32
7	Blau	73.32	75.14
6	Vermell	75.14	76.96
5	Blau fosc	76.96	78.78
4	Porpra	78.78	80.60
3	Verd	80.60	82.42
2	Cobalt	82.42	84.24
1	Groc	84.24	86.06

Figura 12: Exemple de mapa de colors d'una magnitud sonora

## Referències

- SABINE, W.C., *Collected Papers on acoustics* (1922), (1900).  
 EYRING, C.F., *Reverberation Time in "dead" rooms*, J. Acoust, Soc. Amer. 1, 217 (1930).  
 ARAU, H., *An Improved Reverberation Formula*, *Acustica (Hirzel - Verlag) Vol.*, **65**, 163-179, (1988).  
 ARAU, H., *Dependencia del Tiempo de Reverberación con el tamaño de audiencia en salas de pública concurrencia*, Dep. Legal B.34536. Ed.AEE. Ag. Barcelona, 1990.  
 ARAU, H., *Teoria de disseny informatitzat de sales mitjançant la utilització d'imatges especulars: resposta impulsiva, traçat de raigs, temps de reverberació i anàlisi de les magnituds de qualitat acústica*, No publicat. (1990-1993).