

Definició dels paràmetres acústics a estudiar

Marc Franco Meca

15 Maig 2020

Qualsevol recinte disposa d'una funció principal, i cal adequar l'acústica de la sala en funció d'aquesta activitat. Un recinte destinat a la transmissió d'un missatge requereix unes determinades condicions acústiques per a que aquesta comunicació sigui adequada. D'igual manera, una sala destinada a un àmbit musical ha de garantir que l'escolta sigui adient per a la seva funció, ja sigui un estudi de gravació o de mescla.

Per a dur a terme una avaluació objectiva de les condicions acústiques, a continuació es descriuen els paràmetres acústics que s'empren. Segons l'activitat a la qual està destinada la sala, els paràmetres s'han d'ajustar per a obtenir una bona valoració subjectiva d'aquesta. Per a cada paràmetre acústic proposat es proporciona tant els valors òptims per a sales destinades a la comunicació de la paraula com per un estudi de mescla. Tot i que els valors provenen de dades objectives, estan basats en teories de diversos autors i experiments completament subjectius.

1 Soroll de fons

Definim el soroll de fons com tot aquell so que es percep en un recinte o sala quan en aquesta no es dur a terme cap activitat. La comunicació oral dins la sala es pot veure afectada per el soroll ambient produït que certa informació es vegi enmascarada, o també, pot ocasionar una pèrdua de la intel·ligibilitat de la paraula en una sala o recinte si aquest està bastant present. Tanmateix, la presència de soroll dins un estudi musical pot ocasionar tan la gravació d'aquest com la interferència en un resultat de la mescla d'una peça musical. Per tant, es podria dir que aquest és un paràmetre a minimitzar per a permetre obtenir una millor acústica de la sala.

Per a determinar el grau de malestar que provoca un determinat soroll de fons sobre un oient de la sala es dur a terme una comparació dels nivells de soroll per a cada banda entre els 63Hz i els 8kHz tenint en compte un conjunt de corbes anomenades Noise Criteria (NC).

Aquest model de corbes va ser definit inicialment per Beranek[1] amb l'objectiu

d'avaluar problemes de soroll en l'interior de sales. Les corbes originals proposades es basaven en dades les quals mostraven que l'acceptació del nivell de soroll ambient depèn tant del nivell d'interferència de la parla com el nivell. Posteriorment a la seva formulació, aquestes corbes varen ser modificades per Schultz [2] i revisades de nou per Beranek [3, 4]. Anàlogament existeix un altre tipus de corba anomenada Noise Rating (NR) reconeguda per estàndards com l'ANSI o l'ASA, però el seu ús es més comú al Estats Units, per això, en el nostre cas emprem les corbes NC.

A continuació es poden visualitzar diverses corbes NC corresponents a variis nivells en funció de la freqüència.

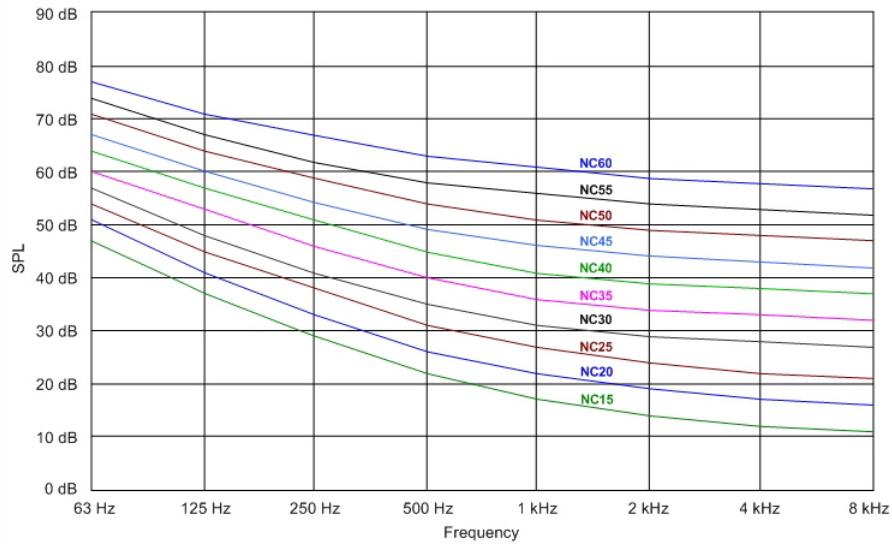


Figure 1: Corbes Noise Criteria NC [5]

Si ens fixem amb les corbes podem observar com aquestes segueixen la tendència de la sensibilitat de l'oïda humana en funció de la freqüència. De tal manera que per una mateixa corba NC, el nivell de pressió sonora SPL màxim permès a freqüències baixes són majors que a freqüències agudes degut al fet de ser més sensibles al augmentar la freqüència. Per a sales de conferències o aules educatives es considera un nivell recomanable de corba NC, segons l'article S12.60 proporcionat per l'ANSI i l'ASA [6], un valor entorn els 35dBA, el qual equival aproximadament a un valor entre 20-30 dB. En quant a un estudi de música, el valor proposat oscil·la entre els 15-25dB, essent una mica inferior al proposat per a una bona transmissió de la paraula.

2 Temps de reverberació (RT)

El so es transmet des d'una font sonora emisora en totes direccions. En un recinte acústic tancat aquest so emès interactua repetidament amb les superfícies reflectants del recinte causant nombroses reflexions que decauen la seva energia a mesura que el so és absorbit per la superfície dels objectes de l'espai, obtenint així una ona resultant amb menys energia. Aquesta pèrdua d'energia ve donada per la composició del material en què l'ona ha reflectit. Com s'ha explicat anteriorment, part d'aquesta energia és absorbida pel material, d'altra és transmesa a través del material, mentre que l'energia restant es reflecteix.

Quan aquestes reflexions es barregen entre elles es produeix el fenomen de la reverberació, que es defineix com un efecte acústic que consisteix en la persistència del so després que aquest sigui produït. Per a quantificar aquest fenomen acústic s'introdueix el concepte de temps de reverberació (RT). Aquest és una mesura del temps que es requereix per un so reflectit a decaure una determinada quantitat d'energia sonora respecte un nivell inicial en un recinte després que la font emissora del so el deixa d'emetre.

El temps de reverberació depèn de la freqüència, tot i que comunament s'expressa com un sol valor si es mesura mitjançant un senyal de banda ampla de 20Hz a 20kHz, i acostuma a tenir un valor major a freqüències baixes. A més, aquest valor variarà en funció de la posició en la qual es pren la mesura en el recinte. D'aquesta manera, es sol prendre un valor promig de l'espai en què es mesura.

El valor del RT depèn tant del nivell del so com del tipus de material absorbent del qual es componen les superfícies de la sala. En una sala més reflectant, el so tarda més en disminuir el seu nivell degut a que es necessiten més reflexions per a extingir-lo, i, per tant, el temps de reverberació és gran. En canvi, el temps de reverberació es redueix quan les reflexions impacten amb superfícies absorbents, ja que en cada reflexió s'absorbeix una proporció alta del so i en poques reflexions aquest disminuirà notablement el seu nivell fent que el nivell de RT sigui petit.

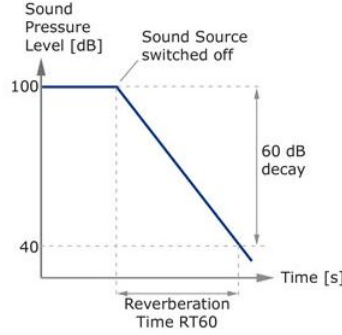


Figure 2: Representació del principi bàsic del temps de reverberació RT60 [7]

El físic americà Wallace Clement Sabine va desenvolupar una equació a finals dels 1890 per a calcular el temps de reverberació d'una sala que afirma l'existència d'una relació entre la qualitat de l'acústica, les dimensions de la sala i la quantitat de superfície absorbent present. Es defineix formalment el temps de reverberació com [8]

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S \cdot \alpha} \quad (1)$$

on V és el volum de la sala (en m^3), c és la velocitat de propagació del so a l'aire (en $\frac{m}{s}$), S és la suma de superfícies de tota la sala (en m^2), α és el coeficient d'absorció mig.

Per a fer el càlcul del coeficient d'absorció mig α en Sabins es dur a terme mitjançant la següent equació:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (2)$$

On α_i és el coeficient d'absorció de cada superfície i S_i són les àrees de la superfície de la sala (m^2).

Anys després el físic acústic mexicà Carl Ferdinand Eyring afina l'equació proposada per Sabine per a casos on el valor del coeficient d'absorció és major a 0.2, obtenint la següent equació [9]

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S(-\ln(1 - \alpha))} \quad (3)$$

El temps de reverberació s'expressa com a un temps de decaïment i es mesura en segons. En el cas del RT60, com hem dit anteriorment, el temps

es correspon amb què tarda el senyal en disminuir 60dB per sota el senyal original. Generalment és difícil generar un so suficient a la sala per a mesurar una caiguda de 60dB, especialment a baixes freqüències. Aleshores, si es té en compte l'assumpció que enuncia que el decaïment es produeix de manera exponencial, és a dir, que el nivell del so disminueix regularment amb un ratio de tants dB per segon, és suficient amb mesurar una caiguda de decibels menor i factoritzar per obtenir la caiguda corresponent a 60dB. Per exemple, es pot fer ús del RT20, que es correspon amb el temps que el so tardarà en decaure 20 dB, i aleshores multiplicar per 3, o bé utilitzar el RT30, que és el temps que el so tardarà en disminuir 30 dB, i multiplicar per 2. També, existeix el EDT10 (early decay time), que representa l'interval de temps que es requereix per obtenir una caiguda de 10dB, i es pot extrapolar d'igual manera que els anteriors multiplicant per 6 el seu valor i obtenir el RT60 [10].

$$RT60 = RT30 \cdot 2 = RT20 \cdot 3 = EDT10 \cdot 6 \quad (4)$$

Si ens fixem en l'expressió proposada pel càlcul del RT60 podem observar com el temps de reverberació depèn del volum de la sala però, també, existeix una forta influència els coeficients d'absorció de les superfícies.

2.1 Coeficient d'Absorció

Quan una ona sonora impacta amb una de les superfícies de la sala, una certa fracció d'ella es absorbida, mentre que una altra es transmesa a la superfície. Ambdues quantitats es caracteritzen per un coeficient i mantenen una relació entre elles.

El coeficient d'absorció α d'un material indica la proporció de so que es absorbit per la superfície en comparació amb el que es reflecteix a la sala. Aquest valor pren valors entre 0 i 1, essent 1 un material absorbent perfecte. Aquest coeficient s'expressa com el resultat de la relació entre l'energia absorbida E_{abs} i l'energia incident E_i , obtenint així la següent expressió [11]

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_i} \quad (5)$$

Aquesta expressió, tanmateix, no és la que s'utilitza en el disseny acústic ni en l'estudi de recintes. Per a aquests àmbits es té en compte la informació sobre els coeficients d'absorció proporcionats pels fabricants dels propis materials. La gran importància del coeficient d'absorció α en l'acústica d'una sala ha ocasionat l'existència de taules i referències per a diversos materials comuns sense la necessitat d'haver de cercar el material específic per a cada un dels fabricants. Aquestes taules de coeficients d'absorció per als diferents materials es faciliten per bandes d'octava, generalment entre 125Hz fins a 4000Hz. Com a norma general, el coeficient d'absorció augmenta a mesura que s'incrementa

la freqüència. Això es degut al fet que la petita dimensió de la longitud d'ona a freqüències altes provoqui una major interacció material, tant en funció del gruix o l'estructura. En certs casos l'absorció pot ser major a freqüències baixes degut a alguna mena de ressonància entre el material i la superfície. A continuació es mostra una taula d'exemple dels coeficients d'absorció d'alguns dels materials més utilitzats en l'acústica.

	Octave-Band Center Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Brick, unglazed	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick, unglazed, painted	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Carpet on foam rubber	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
Carpet on concrete	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
Concrete block, coarse	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Floors, concrete or terrazzo	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Floors, resilient flooring on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Floors, hardwood	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Glass, heavy plate	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass, standard window	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Gypsum, board 0.5 in.	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Panels, fiberglass, 1.5 in. thick	0.86	0.91	0.80	0.89	0.62	0.47
Panels, perforated metal, 4 in. thick	0.70	0.99	0.99	0.99	0.94	0.83
Panels, perforated metal with fiberglass insulation, 2 in. thick	0.21	0.87	1.52	1.37	1.34	1.22
Panels, perforated metal with mineral fiber insulation, 4 in. thick	0.89	1.20	1.16	1.09	1.01	1.03
Panels, plywood, 3/8 in.	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Plaster, gypsum or lime, rough finish on lath	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Plaster, gypsum or lime, smooth finish on lath	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03
Polyurethane foam, 1 in. thick	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87
Tile, ceiling, mineral fiber	0.18	0.45	0.81	0.97	0.93	0.82
Tile, marble or glazed	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Wood, solid, 2 in. thick	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Water surface	nil	nil	nil	0.003	0.007	0.02
One person	0.18	0.4	0.46	0.46	0.51	0.46
Air	nil	nil	nil	0.003	0.007	0.03

Figure 3: Taula dels coeficients d'absorció de certs materials expressats en bandes d'octaves d'entre 125Hz i 4kHz [12]

2.2 Coeficient de Reflexió

El coeficient de reflexió ρ indica la proporció del so que es reflexa quan l'ona sonora impacta amb la superfície del material de la sala. De la mateixa manera que el coeficient d'absorció, el seu valor oscila entre 0 i 1, essent 1 una reflexió

perfecte. Aquest coeficient es mesura mitjançant la relació entre l'energia reflexada del so E_{ref} i l'energia incident E_i , obtenint de manera similar a l'anterior la següent expressió [11]

$$\rho = \frac{E_{ref}}{E_i} \quad (6)$$

Tal i com s'ha mencionat anteriorment, existeix una relació lineal entre ambdós coeficients degut a que l'energia del so es proporcional al quadrat de l'amplitud. [11]

$$\alpha + \rho = 1 \quad (7)$$

2.3 Coeficient de l'Aire

Les propietats termodinàmiques de l'aire tenen una influència en la fracció de l'energia del so que es absorbida per l'aire. Aquesta absorció és sensible tant a la temperatura de l'aire com a la seva composició, especialment a la concentració de vapor d'aigua, així com a la freqüència del propi so. Una quantitat significativa d'energia acústica pot ser absorbida pel volum de l'aire de recintes de grans dimensions. Si la sala és de dimensions petites, el nombre de reflexions és gran i la quantitat de temps que el so està present a la sala es corresponentment petit. En aquest cas l'absorció d'energia acústica no és de gran importància. Ara bé, per a recintes grans el temps corresponent a l'ona sonora de les reflexions és major produint que l'absorció de l'aire no sigui negligible. Es considera que aquest coeficient d'absorció s'ha de tenir en compte per a volums d'una dimensió major a 500 m^3 . Aquest s'expressa amb el símbol m que fa referència a la constant d'atenuació del so en l'aire i es defineix mitjançant la següent formulació [11]

$$m = 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{50}{h} \left(\frac{f}{1000} \right)^{1.7} \quad (8)$$

on h és la humitat relativa de l'aire (en %) i f és la freqüència (en Hz).

La constant m s'expressa amb unitats de m^{-1} . A mesura que la freqüència augmenta el valor de m també incrementa essent més significant a freqüències altes (superiors a 1kHz) que a freqüències baixes. A continuació es pot visualitzar un gràfic que mostra els valors de la constant m en funció de la humitat a diferents freqüències en una sala amb una temperatura de 20°C . En aquest gràfic es pot apreciar com l'efecte de la humitat té la seva màxima afectació en les freqüències proporcionades entre el 5-25% d'humitat i posteriorment disminueix per a humitats majors.

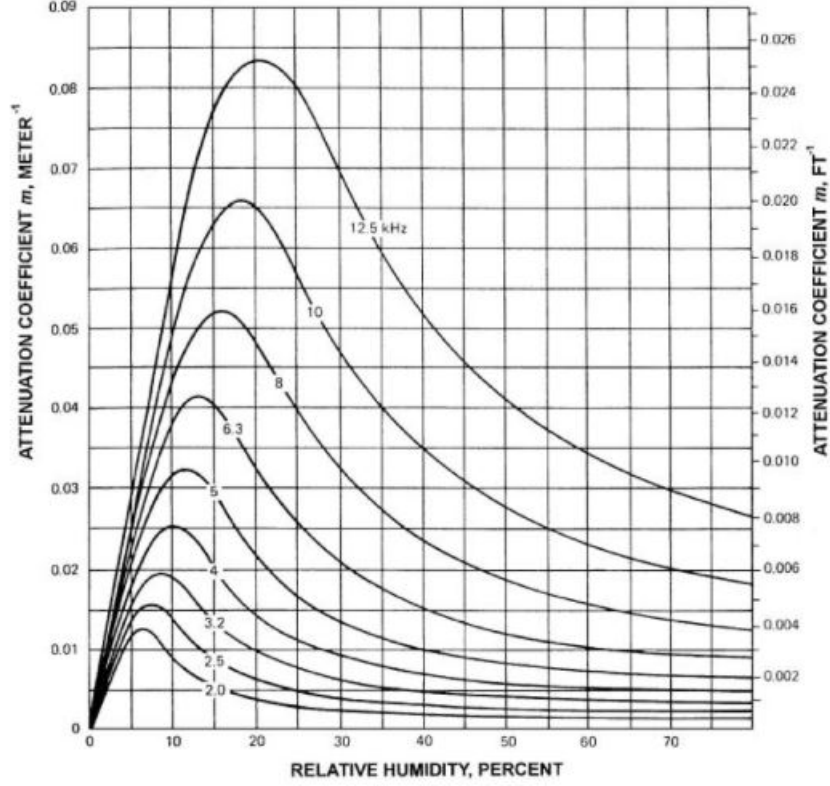


Figure 4: Valors de l'atenuació total del coeficient de l'aire m en funció de la humitat relativa de l'aire a 20°C i una pressió atmosfèrica normal per a freqüències entre 2kHz i 12.5kHz expressat en unitats del sistema internacional i en unitats del sistema americà. [12]

Anteriorment, al fer el plantejament del temps de reverberació no hem considerat l'efecte d'absorció de l'aire ni de la humitat que produeix al so. Aleshores, es lògic introduir l'efecte de l'absorció de l'aire a les equacions tant de Sabine com d'Eyring, obtenint així les següents expressions. [11]

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot (S \cdot \alpha + 4mV)} \quad (9)$$

$$RT60 = \frac{60V}{1.086 \cdot c \cdot S(-\ln(1 - \alpha) + \frac{4mV}{S})} \quad (10)$$

El temps de reverberació és un paràmetre amb una gran importància per a definir la resposta acústica d'una sala. Un gran efecte de reverberació té un impacte negatiu sobre la intel·ligibilitat de la paraula. Per altra banda una sala

amb poca reverberació reduirà la riquesa del so. A continuació a mostra un gràfic que representa la acumulació del temps de reverberació òptima en funció de l'ús que es vulgui donar al recinte.

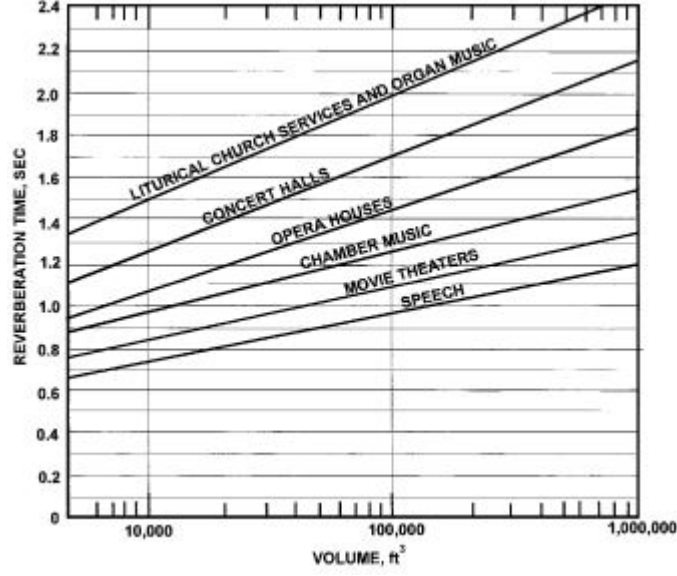


Figure 5: Valors típics dels temps de reverberació segons la funció principal de la sala [12]

Existeixen dos paràmetres acústics que es poden definir a partir del temps de reverberació que es corresponen amb la calidesa acústica i la brillantor.

3 Calidesa acústica (BR)

La calidesa acústica (BR) representa tant la riquesa a freqüències baixes com la sensació subjectiva de calidesa i suavitat del so d'una sala. Aquesta s'expressa com la relació entre els temps de reverberació a baixes freqüències (125-250Hz) i els temps de reverberació a freqüències mitjanes (500-1000Hz), obtenint així la següent formulació matemàtica [13]

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} \quad (11)$$

Un valor adequat de calidesa acústica per a sales on la principal activitat és la parla oscila entre 0,9 i 1, i per a sales musicals entre 1 i 1,3 [14]. Per incrementar la calidesa en una sala s'ha d'incrementar el temps de reverberació a freqüències baixes mentre que el temps de les freqüències mitjanes i altes es

mantinguin. Això es pot aconseguir afegint material en la sala per tal que aquest absorbeixi l'energia a altes freqüències. Però, hem de tenir en compte que una absorció massa elevada a freqüències altes pot ocasionar que la sala tingui una manca de resposta a freqüències altes, la qual ens introdueix un nou paràmetre acústic que és la brillantor.

4 Brillantor (Br)

El paràmetre de la brillantor (Br) fa referència al comportament de les freqüències agudes d'una sala. De la mateixa manera que la calidesa acústica (BR), aquest paràmetre acústic s'obté a partir del temps de reverberació i serveix com un indicatiu en base a que el so dins la sala és clar i ric amb harmònics. La brillantor (Br) d'una sala es defineix com la relació entre la suma dels temps de reverberació corresponents a freqüències altes (2kHz-4kHz) i el temps de reverberació a freqüències mitjanes (500Hz-1kHz), obtenint la següent expressió matemàtica [13]

$$BR = \frac{RT(2kHz) + RT(4kHz)}{RT(500Hz) + RT(1kHz)} \quad (12)$$

Existeixen diverses opinions sobre els valors òptims de la brillantor (Br). L.L. Beranek considera una sala amb valor de brillantor adequat si aquest és superior a 0,88 [13]. En canvi, H.Arau menciona que un valor considera un valor correcte si aquest és major a 0,80 [15]. Destacar que ambdós valors es referencien amb mesures realitzades amb la sala totalment ocupada.

El temps de reverberació és un descriptor intuïtiu per a determinar les condicions acústiques d'un recinte o d'una sala. Aquest treball es centra tant en un recinte destinat a la comunicació educativa d'una universitat com en una sala per a la mescla de música. Típicament, les sales concentren la major part de l'absorció al sostre de la sala, causant un decaïment no lineal del temps de reverberació, i per això, la resposta acústica no es descriu complementament amb el temps de reverberació. Per aquesta raó emprarem també altres índexs de qualificació acústica que són rellevants per a l'estudi i l'anàlisi del comportament acústic d'un espai.

5 Índex de Claredat de la veu (C50)

L'índex de claredat (C50) és un paràmetre acústic relacionat amb la claredat de la intel·ligibilitat de la paraula. Com bé s'ha esmentat anteriorment, un dels marcs en què s'ubica aquest treball és l'estudi d'un recinte destinat a l'educació, i per tant, és imprescindible la comprensió correcta dels missatges orals i d'aquí la importància d'aquest indicador.

El principi en el que es basa l'índex de claredat C50 és el fet que a partir d'un cert límit de temps les reflexions contribueixen negativament a la comprensió de la parla. Això es degut a que causen una interacció amb la parla fent que aquesta no sigui clara per al receptor. Malgrat això, si les reflexions no excedeixen aquest límit, aquestes produeixen una contribució positiva a la intel·ligibilitat. Aquest límit de temps que separa les reflexions que contribueixen de manera positiva de les negatives és aproximadament 50ms.

Aquest paràmetre es deriva de la resposta impulsional de la sala quan es fan les medicions acústiques. El C50 es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. Es considera que un valor adequat per a garantir una bona intel·ligibilitat de la paraula ha de ser major a 2dB [16]. Per a dur a terme la quantificació de l'índex de claredat es mesura la relació de l'energia del so que arriba abans del límit de temps i l'energia del so que arriba posterior a aquest, obtenint matemàticament la següent expressió [17]

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (13)$$

6 Índex de Claredat Musical (C80)

La claredat musical (C80) és un paràmetre rellevant per a mantenir una certa intel·ligibilitat de la música, especialment quan aquesta mostra passatges musicals ràpids. Un dels objectius d'aquest treball consisteix en l'estudi d'un recinte on la principal activitat és la mescla musical, per tant, és essencial la comprensió correcta dels diversos sons que componen la peça musical.

Aquest paràmetre de la claredat musical C80 s'utilitza per a valorar el grau de separació entre els sons individuals que integren una composició musical. D'una manera similar al paràmetre explicat anteriorment, aquest paràmetre es deriva de la resposta impulsional, es calcula per bandes de freqüències, generalment entre 125Hz i 4kHz, i s'expressa en dB. L'índex de claredat musical C80 es defineix com 10 vegades el logaritme del quocient entre l'energia sonora que rep l'oient dins la sala durant els primers 80ms des de l'arribada del so directe i l'energia que arriba posteriorment. Matemàticament es pot expressar l'índex de claredat musical C80 com [18]

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (14)$$

Existeixen diversos valors recomanats per a aquest paràmetre a partir dels quals es considera un bon indicador de l'acústica musical d'una sala. L. L. Beranek [13] proposa un valor entre -4 i 0, mentre que M. Barron [19] proposa un valor entre -2 i 2, i H. Arau [15] especifica un valor entre el rang de -2 o superior a 6 en funció de l'activitat del recinte. L. Gerald Marshall [20], en

funció del tipus de música, recomana diferents valors en l'índex de claredat musical, essent d'un valor de -8 a -2 per a música amb òrgans, de -2 a 2 per a música sinfònica, de 2 a 6 en quant a opera, i major a 6 per a instruments electrònics, la qual es correspon amb l'activitat majoritària que es desenvolupa en el nostre cas.

7 Definició de la veu (D50)

La definició de la veu (D50) és una mesura semblant a l'índex de claredat C50 que indica la intel·ligibilitat i la sonoritat de la paraula. Aquesta s'expressa amb % i es mesura per cada banda de freqüències entre 125Hz i 4kHz. Es defineix la definició de la veu D50 com la relació entre l'energia dels primers 50ms i el total d'energia de la resposta a l'impuls, i d'aquesta manera s'obté la següent expressió [17]

$$D50 = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (15)$$

on $p(t)$ és la pressió sonora respecte al temps.

Un valor que es considera adequat per a la definició de la veu D50 en una sala, la qual la seva principal activitat és la comunicació oral, ha de ser superior a 0.5 [14]. Ara bé, H. Arau [15], per a sales ocupades, proposa un valor de 0,5 per a una sala de concerts, de 0,65 per a teatres i entre aquests dos per a operas.

A més, existeix una relació entre el paràmetre acústic de l'índex de claredat C50 i la definició de la veu D50 que facilita el càlcul d'un dels paràmetres si es coneix la informació de l'altre. Aquesta relació és fàcil d'establir i es descriu com [21]

$$D50 = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-C50}{10}}} \quad (16)$$

8 Sonoritat o Speech Sound Level (S_{mid})

La sonoritat és un altre paràmetre acústic de gran importància per a determinar la qualitat acústica d'una sala. Aquest paràmetre de sonoritat reb dos noms diferents en funció de l'activitat de la sala. Per a recintes musicals s'anomena Força i es denota amb la lletra G, mentre que per a sales on la principal activitat és la comunicació de la paraula es denomina Speech Sound Level (S) i defineix el grau d'amplificació produït per la sala. Aquest paràmetre permet determinar tant la distribució del so com la manca d'energia en alguna banda freqüencial i s'expressa en dB. La força G o Speech Sound Level S es defineixen com la relació entre el nivell total de pressió sonora produït per una font sonora omnidireccional en una posició r d'una sala i el nivell de pressió sonora de la mateixa

font omnidireccional situada en camp lliure a una distància de 10m, el qual s'anomena nivell de referència. Per tant, podem expressar aquest paràmetre S_{mid} com [22],

$$S_{mid} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t)dt} \quad (17)$$

Per a dur a terme el càlcul d'aquest paràmetre acústic els valors que s'utilitzen s'obtenen fent el promig dels valors corresponent a les bandes de freqüències centrades de 500Hz a 2kHz. També, cal tenir present que l'Speech Sound Level S_{mid} depèn principalment tant de la distància de la posició del receptor com de l'energia associada a les primeres reflexions i la superfície ocupada pel públic, així com les condicions acústiques del camp sonor llunyà. Aquestes últimes depenen, fonamentalment, del coeficient d'absorció de les superfícies de la sala i de les dimensions i l'estructura del recinte.

Segons Barron [19], es defineixen uns intervals per a aquest paràmetre acústic dins dels quals es consideren adients,

$$\begin{aligned} 4 &\leq S_{mid}(0^\circ) \leq 8 \\ 2 &\leq S_{mid}(90^\circ) \leq 6 \end{aligned} \quad (18)$$

A més, es recomana que els valors de l'Speech Sound Level S_{mid} en tots els punts de la sala sigui superior a 0dB [14], i d'aquesta manera, assegurar que en cap punt de la sala el nivell de pressió sonora no serà inferior a l'obtingut a una distància de 10m.

9 Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%AL-Cons)

Un dels factors més importants per a la intel·ligibilitat de la paraula és l'energia acústica que rep el receptor. Generalment, les consonants tenen menor energia que les vocals, fent que les consonants exerceixin un paper més important en la intel·ligibilitat d'un missatge que no pas els símbols vocal.

Existeix un paràmetre acústic que mesura el percentatge de consonants que no són enteses pels oients d'una sala anomenat Pèrdua de l'Articulació de les Consonants (%ALCons). Aquest paràmetre es basa en l'estudi de la pèrdua de les consonants per part d'un grup de persones realitzades en diferents tipus de sales i, relacionant aquesta pèrdua amb les característiques de la sala.

La Pèrdua de l'Articulació de les Consonants %ALCons està directament relacionat amb el temps de reverberació RT i de la diferència entre els nivells de pressió sonora del camp directe i del camp reverberant. Aquest paràmetre s'expressa en % i, normalment, es calcula a la banda dels 2kHz al ser la més important per a la intel·ligibilitat. El %ALCons es defineix matemàticament com [23]

$$\begin{aligned} \%ALCons &= \frac{200r^2 RT^2}{VQ}, \text{ per a } r \leq 3.16D_c \\ \%ALCons &= 9RT \text{ per a } r > 3.16D_c \end{aligned} \quad (19)$$

on r és la distància entre l'emisor i el receptor (en m), RT és el temps de reverberació de la sala (en s), V fa referència al volum de la sala (en m^3), Q és el factor de directivitat de la font emisora i D_c és la distància crítica.

Aquesta distància crítica fa referència al punt respecte la font sonora on en què el nivell de pressió sonora del camp directe s'iguali amb el nivell de pressió del camp reverberant, la qual s'ha esmentat en l'apartat de fenòmens acústics. Aquesta distància es pot calcular mitjançant la següent expressió [11]

$$D_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}} \quad (20)$$

on Q és el factor de directivitat i $R = \frac{S_{tot} \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$ és la constant de la sala (en m^2)

A continuació es mostren els valors del paràmetre %ALCons per a valorar la intel·ligibilitat de la paraula en una sala [24],

%ALCons	100-33%	33-15%	15-7%	7-3%	3-0%
Intel·ligibilitat	Incomprensible	Pobre	Mediocre	Bona	Excel·lent

Aquest paràmetre al ser indicatiu de pèrdua, a major valor pitjor serà la intel·ligibilitat, i viceversa. A més, hem vist que està relacionat amb el temps de reverberació RT i amb la distància entre l'emisor i el receptor. Aquesta darrera dependència es comporta de tal manera que a menor distància entre ells, menor serà el valor %ALCons, i per tant, major serà la intel·ligibilitat. En quant al temps de reverberació RT, a menor RT, menor serà la Pèrdua de l'Articulació de les Consonants %ALCons, és a dir, es tindrà una major intel·ligibilitat.

References

- [1] L.L. Beranek. Revised criteria for noise in buildings. *Noise Control*, 3(1), 1957.
- [2] T.J. Schultz. Noise-criterion curves for use with the usasi preferred frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 43(3), 1968.
- [3] L.L. Beranek. Building noise-criterion (ncb) curves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 1989.
- [4] L.L. Beranek. Application of ncb noise criterion curves. *Noise Control Engineering Journal*, 33(2), 1989.
- [5] Ecoacustika. Curva nc. <https://ecoacustika.com/criterios-objetivos-para-la-insonorizacion-de-un-recinto/curva-nc/>. Accedido 14-05-2020.
- [6] Acoustical Society of America. Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, part 1: Permanent schools. *S12.60*, 2010.
- [7] NTI Audio. Reverberation time rt60 measurement. <https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/reverberation-time-rt60-measurement>. Accedido 14-05-2020.
- [8] Wallace Clement Sabine and M David Egan. Collected papers on acoustics, 1994.
- [9] Carl F Eyring. Reverberation time in “dead” rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1(2A):217–241, 1930.
- [10] Enric Guaus Termens. Teoria estadística. *Enginyeria Acústica*, page 3, 2018-11-27.
- [11] Enric Guaus Termens. Teoria estadística. *Enginyeria Acústica*, page 3, 2018-11-27.
- [12] Daniel R Raichel. *The science and applications of acoustics*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [13] Leo Beranek and Daniel W Martin. Concert & opera halls: how they sound, 1996.
- [14] Wolfgang Ahnert and Wolfgang Schmidt. Fundamentals to perform acoustical measurements. *Appendix to EASERA*, 2005.
- [15] Higiní Arau. *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Ceac Barcelona, 1999.
- [16] Antoni Carrión Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, volume 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.

- [17] Rolf Thiele. Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen. *Acta Acustica United with Acustica*, 3(4):291–302, 1953.
- [18] W Reichardt, O Abdel Alim, and W Schmidt. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances. *Acta Acustica united with Acustica*, 32(3):126–137, 1975.
- [19] Michael Barron. *Auditorium acoustics and architectural design*. Routledge, 2009.
- [20] L Gerald Marshall. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4):2251–2261, 1994.
- [21] Rubén Onieva Onieva. Diseño acústico de una sala multifunción mediante empleo de paneles móviles.
- [22] AC Gade. Objective measurements in danish concert halls. *Proc. Inst. Acoust.*, 7:96, 1985.
- [23] VMA Peutz and W Klein. Articulation loss of consonants influenced by noise, reverberation and echo. In *Proc. FASE Symposium on Speech intelligibility, Luik (B)*, 1973.
- [24] Juan Manuel Millán Esteller. *Instalaciones de megafonía y sonorización*. Editorial Paraninfo, 2012.