

Principis de l'Acústica

Marc Franco Meca

15 Maig 2020

1 Física del so

En aquest capítol s'explica la física bàsica que hi ha darrera del fenomen físic del so. Es fa èmfasi en els aspectes més rellevants per a una posterior anàlisi acústica d'una sala. Primerament es defineix el concepte físic del so, explicant com es produeix i es propaga a través del medi. Després, es presenten els conceptes d'energia, intensitat i camp sonor. Posteriorment s'exposen tant fenòmens acústics relacionats amb els aspectes físics així com la noció d'interferència. A continuació s'exposen les diverses teories que es proposen en l'acústica arquitectònica. Per últim es presenten els diferents paràmetres acústics amb els quals s'avalua la condició acústica d'una sala o recinte.

1.1 Propagació del so

La música i el so són dos experiències auditives que s'experimenten a diari, i per a entendre els seus fonaments es necessari comprendre els conceptes físics de les ones.

El so és una ona creada a partir d'una pertorbació de la pressió del medi resultat d'una vibració. Per a que es generi aquesta ona de pressió sonora cal una pertorbació vibratòria i un medi elàstic, mitjançant el qual es propaga l'ona. La pertorbació que genera la vibració prové d'una font sonora d'origen, un objecte capaç de produir una vibració de la primera partícula del medi. El medi es pot entendre com una sèrie de partícules interconnectades que interactuen entre elles. Simplement, fa referència al material a través del qual la pertorbació és desplaça.

Un cop es genera la vibració es propaga a través del medi, transportant-la d'un lloc a un altre mitjançant la interacció entre partícules. Típicament, el medi més comú és l'aire, tot i que pot ser qualsevol material com l'aigua o l'acer. En el nostre cas, com l'ona de pressió sonora es propaga a través de l'aire, cada partícula d'aire es desplaça de la seva posició d'equilibri, exercint un moviment sobre les partícules adjacents, ocasionant que aquestes també es desplacin de la seva posició d'equilibri. Aquesta interacció de partícules es dona al llarg de

tot el medi, on cada partícula interactua i causa una pertorbació a les veïnes. Donat que aquesta és una pertorbació que es propaga a través d'un medi amb el mètode de la interacció entre partícules, es diu que l'ona sonora es caracteritza com una ona mecànica.

Una ona mecànica és una ona que oscil·la la matèria, i per tant, transmet energia a través del medi que es propaga en la mateixa direcció de l'ona. Existeixen dos tipus bàsics d'ones mecàniques en funció de la l'orientació de la vibració. Les primeres són les ones transversals que són aquelles en què el desplaçament de les partícules és perpendicular a la direcció de propagació de l'ona. D'altra banda, les partícules en les ones longitudinals mostren un desplaçament paral·lel a la direcció de propagació de l'ona. Les ones sonores són ones de tipus longitudinal ja que les partícules es desplacen paral·lelament amb la direcció de propagació de l'ona.

Aquesta propagació longitudinal d'energia a través del medi proporciona la creació de zones on les partícules d'aire es comprimeixen i altres on es dispersen. Aquestes dues zones s'anomenen zona de compressió i descompressió, essent la primera una regió amb una altra pressió de l'aire, i la segona amb una baixa pressió de l'aire. El fet que una ona sonora segueix un patró repetitiu de regions d'alta i baixa pressió desplaçant-se a través d'un medi, es refereix a aquestes com ones de pressió.

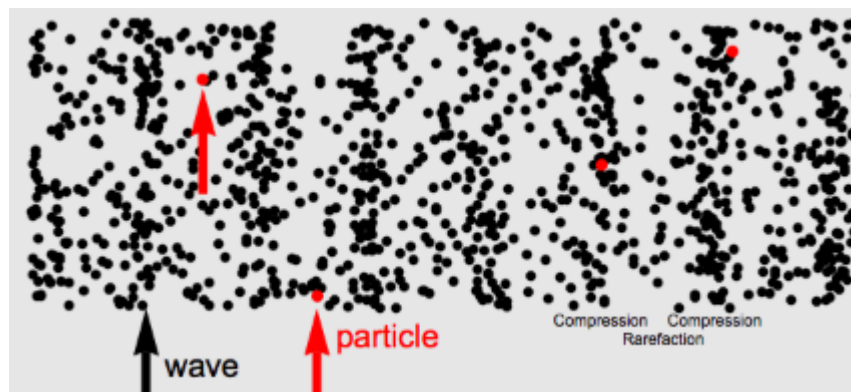


Figure 1: Representació de la propagació d'una ona sonora a través d'un medi, identificant les zones de compressió i descompressió [1]

La propagació de l'ona de pressió acústica a través d'un medi es defineix matemàticament mitjançant l'equació d'ona acústica. L'equació d'ona acústica per a la pressió sonora en una dimensió es defineix com [2],

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

on p fa referència a la pressió sonora en Pa, x és el desplaçament de la partícula en metres, c és la velocitat del so expressada en m/s i t és el temps en segons.

Les ones mecàniques només es poden propagar en medis que continguin una certa inèrcia i elasticitat. Aquestes dues propietats del medi tenen una repercussió en la velocitat del so c , i anàlogament en la propagació del so. Un medi sòlid proporciona una major velocitat de propagació donada la proximitat de les molècules. Anàlogament, en un medi gasós les ones viatgen més lentament degut a la dispersió de les molècules entre elles. A més de l'estat del medi, altres factors com la densitat o la temperatura del medi afecten a la velocitat a la qual les ones acústiques es propaguen. L'equació general per a determinar la velocitat acústica de propagació c en qualsevol medi es descriu com [2],

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (2)$$

on p es correspon amb la pressió sonora i ρ la densitat del medi.

També es pot expressar la velocitat mitjançant l'equació Newton-Laplace obtenint així [3],

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (3)$$

on C és el coeficient de rigidesa i ρ és la densitat del medi expressada en kg/m^3

En el cas de l'aire que és el medi en què nosaltres realitzem el nostre estudi, de l'equació anterior proporcionada per Newton-Laplace podem definir la velocitat del so a l'aire expressada en m/s com [2],

$$c_{aire} = 331,3 + 0,606T \quad (4)$$

on T és la temperatura en graus Celsius $^{\circ}C$.

1.2 Nivell de pressió sonora (SPL)

La pressió sonora p és el resultat de les variacions a l'aire produïdes per la propagació de l'ona sonora. Es defineix aquesta com la diferència entre la pressió instantània i la pressió atmosfèrica estàtica. Aquesta darrera es correspon amb la força per unitat de superfície que exerceix l'aire sobre la superfície terrestre quan es produeix una pertorbació. Dit d'una altra manera, la pressió sonora és la pressió mesurada entre l'ona sonora i la pressió de l'aire que l'envolta. Per tant, és la força del so que actua sobre la superfície perpendicular a la direcció en la qual es propaga el so. Un so sorollós produeix una ona sonora amb una pressió sonora relativament elevada, mentre que un so flux produeix una ona

sonora amb una pressió sonora baixa. Aquesta magnitud s'expressa en Pascals (Pa).

El rang audible de pressió sonora en éssers humans és molt ampli, anant des de la mínima pressió sonora audible de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa [4] fins la màxima pressió sonora sense causar danys al sistema auditiu que es correspon amb 20Pa. No obstant, el sistema auditiu no respon de manera lineal als estímuls acústics i l'ampli rang de valors faciliten l'ús d'una escala decibèlica logarítmica. La pressió sonora expressada en aquesta escala s'anomena nivell de pressió sonora SPL i es correlaciona bé amb la percepció humana de la sonoritat.

Com l'energia de l'ona sonora és proporcional al quadrat de la pressió, el nivell de pressió sonora L_p i mesurat en dB es defineix matemàticament com [5],

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (5)$$

on L_p és el nivell de pressió en dB, p és la pressió sonora en Pa i p_{ref} és la pressió de referència mínima audible.

1.3 Energia i Intensitat del so

L'energia sonora es defineix com el moviment d'energia a través d'un medi en forma d'ona produït per una vibració. Com bé s'ha dit anteriorment, el so és una ona mecànica que per consegüent conté zones de compressió i descompressió oscil·ladores. Per tant, el medi emmagatzema tant energia cinètica com energia potencial degut a aquestes regions.

L'energia cinètica és l'energia que té un objecte degut al moviment [6]. Aquesta es defineix com el treball necessari per accelerar un cos del seu estat de repòs a una certa velocitat. A l'aplicar un treball, una certa energia es transfereix al objecte durant el temps d'acceleració fins a obtenir una velocitat constant. Aquesta transferència d'energia es coneix com energia cinètica, i es proporcional al quadrat de la magnitud de la velocitat de la partícula. L'energia cinètica per unitat de volum V s'expressa matemàticament com [7],

$$E_c = \int_V \frac{\rho v^2}{2} dV \quad (6)$$

on V és el volum d'interès, ρ és la densitat local del medi, i v és la velocitat de la partícula.

En quant a l'energia potencial aquesta es defineix com l'energia emmagatzemada per un objecte deguda la seva posició respecte altres objectes. Aquesta energia es relaciona amb les forces que actuen en un objecte de tal manera que

el treball total d'aquest objecte depèn únicament de la seva posició inicial i final. L'energia potencial és proporcional al quadrat de la pressió sonora i es defineix per unitat de volum com [7],

$$E_p = \int_V \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} dV \quad (7)$$

on V és el volum d'interés, ρ_0 és la densitat del medi sense la presència de so, p és la pressió sonora en Pa i c la velocitat del so.

Finalment, l'energia sonora en un volum es defineix com la suma de densitats d'energia de l'energia potencial i l'energia cinètica integrada en el volum d'interés [7],

$$E_T = E_p + E_c \quad (8)$$

D'altra banda, la intensitat sonora I , o també coneguda com intensitat acústica, es defineix com la quantitat d'energia sonora per unitat de temps en una unitat d'àrea perpendicular a la direcció de propagació de l'ona sonora. Aquesta magnitud s'expressa en unitats del sistema internacional com watts per metre quadrat (W/m^2) i es defineix matemàticament com [8],

$$I = p \cdot v \quad (9)$$

on p és la pressió sonora i v la velocitat de la partícula.

De la mateixa manera que la pressió sonora, el nivell d'intensitat sonora s'utilitza en una escala logarítmica per ajustar-se més acuradament a la percepció humana. El nivell d'intensitat sonora β en decibels SIL d'un so amb una intensitat sonora I en watts per metre quadrat es defineix com [8],

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (10)$$

on $I_0 = 10^{-12}$ és el valor de referència d'intensitat sonora que es correspon amb el mínim llindar d'intensitat sonora que una persona en condicions normals pot percebre a la freqüència de 1kHz.

1.4 Camp lliure i camp reverberant

Quan una font sonora emet un so, el receptor pot rebre el so directe que viatja en línia recta, o el so indirecte provinent de les reflexions produïdes per l'ambient que envolta aquesta font sonora. Normalment, es percep el so de les dues maneres, tant el so directe de la font sonora com les reflexions. Sota unes certes condicions es poden experimentar ambdues idees recreant els extrems. Primerament, es pot crear un camp acústic on no hi hagi presència de reflexions i només es propaga el so directe. A l'altre extrem existeix el cas oposat on es

crea un camp acústic que només té present el so reflectit i no s'observa el so directe. Aquestes dues circumstàncies extremes reben el nom de camp lliure i camp reverberant o difús.

El camp lliure es defineix com una situació acústica on tot el so que rep un oient és a través del so directe de la font sonora sense cap influència de les reflexions. Aquesta situació es dona a la natura en espais a l'aire lliure suficientment elevats que eviten l'efecte de les reflexions del terra. També, es pot crear un espai artificial utilitzant material absorbent en les parets, sostre i sòl, el qual es coneix com una cambra anecoica. En diversos camps de la medicació acústica aquesta situació és molt usada degut a que els resultats només son influenciats pel so de la font sonora emissora, i no per les reflexions de la sala que poden provocar distorsions en les mesures.

En canvi, el camp reverberant o camp difús es considera un camp acústic on l'energia acústica és uniforme en l'espai, és a dir, el camp sonor es considera homogeni. En qualsevol punt d'aquest espai es percep el so provinent de totes les direccions amb la mateixa magnitud i probabilitat. Aquesta situació es pot aproximar amb una cambra de reverberació que consisteix en un espai tancat dissenyat amb parets obliqües reflectants. Aquesta obliquïtat provoca que les ones sonores es reflecteixin el màxim nombre de vegades i d'aquesta manera es crea el camp difús. El camp reverberant és un concepte molt útil que permet fer simplificacions en certes mesures acústiques i fer prediccions en l'aïllament de sales.

Aquests dos camps acústics introdueixen el concepte de distància crítica d_c . Aquest paràmetre mesura la distància de la font sonora on l'energia del camp lliure i el camp reverberant són iguals. Com més reverberant sigui el recinte o sala, més propera és la distància crítica de la font emissora. Anàlogament, com més absorbent sigui la sala, la distància crítica s'allunya de la font sonora. Aquesta distància depèn tant de la geometria com l'absorció de la sala on es propaga l'ona sonora, així com de la dimensió i la forma de la font sonora emissora. En l'apartat de paràmetres acústics s'expliquen els conceptes matemàtics.

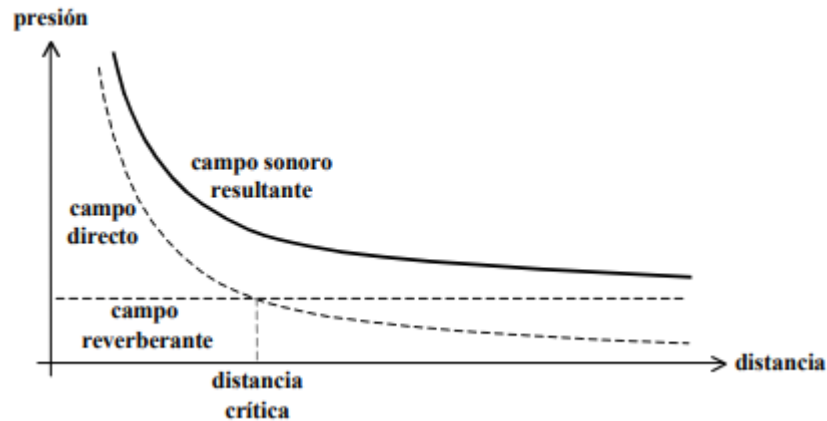


Figure 2: Gràfic que mostra el camp lliure i el camp reverberant, identificant la distància crítica que delimita la zona a partir de la qual predomina un dels dos camps [9]

1.5 Fenòmens acústics

1.5.1 Reflexió

La reflexió és un fenomen físic que fa referència al canvi de la direcció de propagació de l'ona quan aquesta entra en contacte amb una superfície de separació llisa (o de rugositats de dimensions molt menor a la longitud d'ona) entre dos medis, tornant al medi del qual prové. Per tant, es poden definir tres elements essencials que són l'ona incident, la normal o perpendicular a la superfície i l'ona reflexada. Es defineix l'angle d'incidència a l'angle que forma la normal amb l'ona incident i l'angle de reflexió a l'angle format per la normal i l'ona reflexada.

Aquest fenomen es regeix per dues lleis que enuncien que, per una reflexió especular, l'angle d'incidència α_i equival a l'angle de reflexió α_r i que tant l'ona incident, com la reflexada i la normal estan en el mateix pla.

Quan una ona sonora interactua amb una superfície plana, l'ona sonora es reflectada degut a que la superfície és suficientment gran en comparació a la longitud d'ona. Ara bé, el rang sonor audible per un humà conté un rang de freqüències molt ampli (de 20Hz a 20kHz). Per tant, la reflexió no actua de la mateixa manera en baixes que en altes freqüències. Les longituds d'ones a baixes freqüències són molt grans i són capaces d'envoltar els objectes, en canvi, les longituds d'ones d'altres freqüències no envolten els objectes i produeixen ombres acústiques a la part posterior i rebots a la part frontal.

En acústica aquesta propietat física de les ones sonores s'utilitza àmpliament

tant per aïllar acústicament una sala, així com per dirigir el so cap a una certa direcció.

1.5.2 Refracció

La refracció consisteix en un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora quan aquesta passa d'un medi a un altre. Aquesta fenomen acústic només es produeix quan l'ona sonora incideix de manera obliqua sobre la superfície que separa els dos medis, tenint aquests índexs de refracció diferents. Es defineix aquest índex de refracció n com un nombre adimensional que expressa la relació entre la velocitat de l'ona en un medi de referència i la velocitat en el propi medi. Aquest valor es pot expressar matemàticament amb la següent expressió [2],

$$n = \frac{c}{v} \quad (11)$$

on c és la velocitat de la llum en el buit i v és la velocitat de la llum en el medi.

A diferència del fenomen físic de la reflexió, en la refracció, la relació d'igualtat entre l'angle de refracció i l'angle d'incidència no es manté.

La refracció es deu a què al canviar de medi, la velocitat de propagació de l'ona sonora canvia. Ara bé, aquest fenomen pot produir-se dins d'un mateix medi quan les característiques dins d'aquest no son homogènees, per exemple, quan dins un mateix medi hi ha diverses zones amb diferent temperatura.

De forma similar a la reflexió, la refracció es regeix per dues lleis. La primera enuncia que tant l'ona incident com l'ona refractada i la normal a la superfície estan al mateix pla. La segona consisteix en una fórmula matemàtica que s'utilitza per a calcular l'angle de refracció. Aquesta expressió afirma que el producte entre l'índex de refracció i el sinus de l'angle d'incidència és constant per a qualsevol raig o ona que incideix en una superfície entre dos medis. Considerem dos medis amb els seus corresponent índexs de refracció n_1 i n_2 separats per una superfície S . Per una ona de pressió sonora amb un angle d'incidència θ_1 sobre el primer medi, tindrem que el raig es propaga al segon medi amb un angle de refracció θ_2 , el valor del qual s'obté per mitjà de la llei de Snell, proposada pel matemàtic holandès Willebrord Snel van Royen [10]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (12)$$

1.5.3 Difracció

La difracció és similar a la reflexió i la refracció en el fet que totes tres afecten a la propagació del so, comportant un canvi de direcció en l'ona acústica quan aquesta experimenta un canvi de medi. La difracció descriu tant un canvi de direcció en la propagació de l'ona sonora com una dispersió del so quan es troba amb un obstacle que no li és transparent per a la longitud d'ona. Per tant, per

a què es doni el fenomen de la difracció, la longitud d'ona del front sonor ha de ser com a mínim del mateix tamany o superior al de l'objecte.

L'explicació d'aquest fenomen sonor ve descrit pel principi de Huygens-Fresnel. Aquest és un mètode proposat pels físics Christiaan Huygens i Augustin-Jean Fresnel el qual enuncia que [11]

"Tot punt d'un front d'ona inicial es pot considerar com una font d'ones esfèriques secundàries que s'estenen en totes les direccions amb la mateixa velocitat, freqüència i longitud d'ona que el front d'ona que el precedeix."

D'acord amb aquest principi, quan una ona sonora incideix sobre un obstacle o obertura que impedeix la seva propagació, tots els punts del pla es converteixen en fonts d'ones secundàries que emeten noves ones, les quals es denominen ones difractades.

Com en la reflexió, les freqüències baixes tenen una major capacitat per envoltar l'obstacle que no pas freqüències altes, degut al tamany de les seves longitud d'ones. Per tant, la quantitat de difracció es directament proporcional a la longitud d'ona, augmentant aquesta quan la longitud d'ona augmenta, i disminuint quan la longitud d'ona es redueix. En quant a l'obertura, la quantitat de difracció varia en funció del tamany de la pròpia obertura i de la longitud d'ona, essent aquesta inversament proporcional entre el tamany de l'obertura i la quantitat de difracció. Com major és l'obertura en comparació amb la longitud d'ona, l'efecte de difracció disminueix, mentre que a menor tamany d'obertura en comparació amb la longitud d'ona, la quantitat de difracció és major.

1.5.4 Absorció

La propagació de les ones sonores en recintes tancats es veu influenciada tant per la delimitació física de superfícies així com la interacció amb objectes dins la sala. Quan una ona de pressió sonora interactua amb una superfície, part de l'energia del so es reflexa cap a l'interior de la sala i una altra incideix en la superfície. Aquesta energia incident o bé es refractada i transmesa, o bé es absorbida pel material, la qual ens presenta el fenomen de l'absorció.

Es defineix l'absorció com un fenomen físic que consisteix en la transformació de l'energia sonora en altres formes d'energia. Per tant, aquesta és un tipus de pèrdua que experimenta el so en la seva transmissió i es produeix quan una ona sonora incideix sobre una superfície amb un medi diferent del qual prové. La principal causa d'absorció de les ones sonores és la dissipació en forma d'energia calorífica degut al fregament d'aquestes ones mecàniques. La quantitat d'energia calorífica varia en funció de les propietats absorbents del material del qual està composta la superfície.

Es refereix a l'absorció acústica com la capacitat que posseeixen certs materials per absorbir una quantitat d'energia de les ones sonores que incideixen sobre ells. En un cas on els materials que formen les superfícies amb les quals l'ona sonora interactua són totalment absorbents, no es produeix cap mena de reflexió ja que l'absorció seria total, i la propagació seria similar a la presentada en camp lliure o en una sala anecoica. En canvi, si les superfícies són reflectants, les ones sonores no pateixen absorció i el fenomen de la reflexió està més present, simulant un camp més reverberant.

1.5.5 Difusió

La difusió és l'efecte de disseminar l'energia acústica que incideix sobre una superfície en l'espai i en el temps [12]. Aquest fenomen es produeix quan l'ona sonora interactua amb una superfície que presenta alguna mena de rugositat, produint-se així una ona reflexada en totes les direccions.

La difusió sonora contribueix a la creació d'un so envoltant i, per tant, incrementa la sensació d'espacialitat de la sala, degut a que la dispersió d'energia arriba a l'oient des de totes les direccions. Aquest fenomen físic no succeeix només en el domini freqüencial, sino també en el domini temporal.

Per al tractament de sales, la difusió és un fenomen acústic que influeix directament sobre la qualitat del so que percep l'oient. Quan el so directe emès per una font sonora interactua amb les reflexions especulars es produeixen una sèrie d'interferències, que s'expliquen en l'apartat posterior, les quals generen unes diferències de temps entre regions de màxima i mínima pressió sonora causant irregularitats en el so. Ara bé, quan aquest so directe i les reflexions especulars es combinen amb les reflexions difuses es redueix la variació entre aquests nivells extrems. La disseminació de l'energia acústica en el temps corregeix tant aquesta absència de reflexions en alguns instants de temps com l'excés de reflexions, contribuint a l'homogeneïtzació o distribució uniforme de l'energia dins la sala o recinte.

1.5.6 Interferències

Quan dues o varies ones sonores es propaguen en un mateix espai o medi ocasionen una interacció entre elles. Quan aquestes ones viatgen en un medi lineal, homogeni i isòtrop, és a dir, les seves propietats no depenen de la direcció, s'aplica el principi de superposició d'ones. El principi de superposició d'ones enuncia que quan dues o més ones del mateix tipus es propaguen i incideixen en un mateix punt de l'espai, l'amplitud resultant en aquest punt és igual al vector suma de les amplituds de cada ona individual [13]. Si es superposen dues ones harmòniques d'igual freqüència però amb diferents amplituds i fases, obtindrem una altra ona harmònica amb la mateixa freqüència, però amb una amplitud i fase diferent, la qual s'anomena ona resultant. Per tant, siguin ψ_1 i ψ_2 dues ones sonores la seva suma ens proporciona l'ona resultant $\psi = \psi_1 + \psi_2$.

La superposició de dues o més ones de freqüència igual o propera proporcionen un patró d'intensitat observable que es denomina interferència. Es defineix aquest fenomen com la interacció de dues ones sonores que resulten en una altra ona amb una major, menor o igual amplitud.

Recordem que les ones sonores contenen patrons de regions on la pressió sonora es comprimeix i altres on es descomprimeix. Si dues ones de la mateixa freqüència interactuen i estan en fase, aleshores l'amplitud resultant és la suma de les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de major amplitud que les inicials. Dit d'una altra manera, quan dues ones estan en fase les zones de compressió i descompressió coincideixen, i per tant es reformen entre elles. El màxim valor d'amplitud de l'ona resultant és el doble de l'amplitud quan ambdues ones tenen la mateixa amplitud, degut a que la intensitat es proporcional al quadrat de l'amplitud. Aquesta interacció es denomina interferència constructiva i es pot expressar matemàticament com [14],

$$kr_2 - kr_1 = 2n\pi \quad (13)$$

Tenint en compte que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ aquesta expressió es pot visualitzar com [14]

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad (14)$$

Per altra banda si es troben dues ones amb la mateixa freqüència però amb una diferència de fase de π , aleshores l'amplitud de l'ona resultant és igual a la diferència entre les amplituds individuals, obtenint així una ona resultant de menor amplitud que les inicials. Quan aquestes estan desfasades, una regió de compressió coincideix amb una regió de descompressió de l'altra ona o viceversa, produint-se una atenuació o cancel·lació entre elles. Aquesta interacció es denomina interferència destructiva i el mínim valor que pot obtenir l'ona resultant és nul. Matemàticament es pot expressar la interferència destructiva com [14],

$$kr_2 - kr_1 = (2n + 1)\pi \quad (15)$$

D'igual manera que la interferència constructiva, coneixent que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ aquesta expressió es pot visualitzar com [14],

$$kr_2 - kr_1 = (n + \frac{1}{2})\pi \quad (16)$$

Si les dues ones que interfereixen tenen una fase diferent a aquest dos extrems, la amplitud resultant serà un valor que oscil·la entre el mínim i el màxim expressat anteriorment.

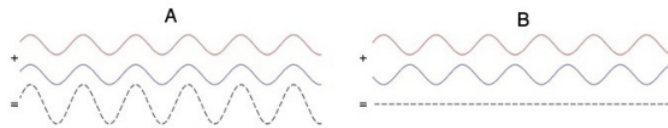


Figure 3: La imatge de l'esquerra mostra dos ones idèntiques interferint constructivament, mentre que la imatge de la dreta fa referència a una interferència destructiva [15]

2 Acústica Arquitectònica

El camp relacionat amb l'acústica és un terreny força ampli que inclou varies àrees, com per exemple l'acústica musical, la acústica ambiental o l'acústica arquitectònica entre d'altres. La darrera és l'àmbit que ens interessa en el nostre cas ja que l'acústica arquitectònica estudia els fenòmens relacionats amb una propagació adequada i adient segons la funció del recinte o sala.

Aquest camp tracta dos temes diferents que es corresponen amb l'aïllament acústic i l'acondicionament acústic. Cal diferenciar aquests dos, essent l'objectiu del primer l'eliminació o atenuació tant de sons indesitjables produïts dins del recinte com la intrusió de sorolls aliens al local. En canvi, l'acondicionament acústic consisteix en distribuir el so de tal manera que es garanteix la qualitat i la intel·ligibilitat de la paraula evitant problemes acústics. Les sales o recintes que tenen una aplicació determinada han d'assegurar unes certes qualitats acústiques per a desenvolupar la seva funció principal.

Existeixen tres teories diferents que ens permeten estudiar l'acústica arquitectònica, que són la teoria estadística, la teoria geomètrica i la teoria ondulatoria.

2.1 Teoria geomètrica

La teoria geomètrica es basa en la hipòtesi que si les dimensions del recinte o sala són molt grans en comparació amb la longitud d'ona de l'ona sonora, aleshores es pot tractar la qüestió d'igual manera amb què s'analitza la llum, és a dir, mitjançant raigs. Aquesta teoria utilitza el concepte de raig sonor, el qual es defineix com una porció d'una ona esfèrica amb un angle d'obertura infinitesimal que té com a origen el centre de l'esfera [16]. El raig sonor determina la trajectòria de l'ona des de la seva emissió de la font sonora fins a la recepció per part de l'oient, variant el seu recorregut en funció dels fenòmens físics que s'han explicat anteriorment. El fet d'assumir la propagació de l'ona com a un raig sonor, considera que les reflexions que aquests tenen sobre les diverses superfícies són especulars, i per tant, verifiquen la llei de reflexió explicada anteriorment.

Les primeres reflexions exhibeixen un nivell d'energia sonor major que les reflexions tardies, que es corresponen amb la cua reverberant. Es defineix una reflexió d'ordre n com la incidència n vegades del raig sonor sobre les diferents superfícies de l'espai abans d'arribar al receptor. Generalment, es consideren reflexions tardies aquelles que son superiors a l'ordre 3. Aquestes reflexions presenten una gran concentració en qualsevol punt d'un recinte tancat, essent les seves característiques similars independentment del punt de la sala. Això es degut a que la densitat temporal d'aquestes reflexions en qualsevol punt d'un recinte tancat augmenta quadràticament amb el temps. Aquesta és la raó per la qual la cua reverberant s'estudia amb la teoria estadística que s'explicarà posteriorment.

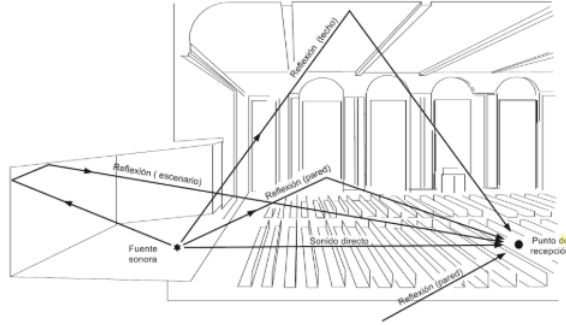


Figure 4: Representació gràfica del so directe i les primeres reflexions que arriben a un oient [17]

Ara bé, les primeres reflexions depenen directament de les formes geomètriques que presenta el recinte, essent aquestes específiques per a cada punt de la sala, i per tant, determinen tant les característiques acústiques com el so directe.

D'aquestes primeres reflexions cal tenir en compte aquelles que l'oient percep com a un únic so, que es corresponen amb les reflexions que arriben al receptor en els primers 50ms des de l'arribada del so directe. Quan el so emès és un missatge oral, aquestes primeres reflexions contribueixen tant a la intel·ligibilitat de la paraula com a la comprensió del missatge. Contràriament, l'arribada de reflexions amb un retard temporal superior a 50ms dificulta la comprensió, degut a que la percepció per part de l'oient és una repetició del so directe. Aquest efecte de diferenciació entre dos sons que arriben amb una diferència de temps Δt superior a 50ms s'anomena eco. El retard de 50ms es correspon amb la diferència de camins entre el so directe i la primera reflexió d'aproximadament 17m, el qual es pot obtenir mitjançant la següent expressió [2],

$$\Delta x = c \cdot \Delta t = 340 \cdot 0,05 = 17m \quad (17)$$

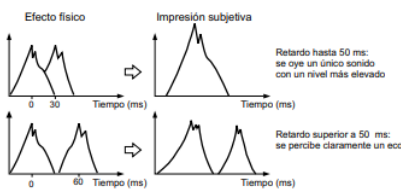


Figure 5: Superposició de sons amb diferents retards de temps associats a la percepció subjectiva que provoquen [17]

Per la pròpia definició, la teoria geomètrica es pot utilitzar per a estudiar i analitzar acústicament recintes a freqüències on la longitud d'ona és petita en comparació a les dimensions del local, mentre que per a longitud d'ones d'una magnitud semblant a les dimensions del local s'ha d'utilitzar el concepte de mode de ressonància, el qual ens porta a la definició de la següent teoria de l'acústica arquitectònica, que és la teoria ondulatoria.

2.2 Teoria ondulatoria

La teoria ondulatoria es basa en una sèrie de mètodes que permeten estudiar la naturalesa ondulatoria del so a partir de la resolució numèrica de l'equació d'ona general. Aquesta teoria es fonamenta en el fet que el volum d'aire a l'interior d'una sala s'estima com un sistema vibratori amb una certa complexitat, format per un conjunt de subsistemes de menor complexitat.

En l'anàlisi del camp sonor d'un recinte, existeixen diversos processos associats al seu caràcter ondulatori, com l'establiment d'ones estacionàries, que no poden ser analitzats ni amb l'acústica estadística ni amb la geomètrica. La teoria ondulatoria és adient per a estudiar aquest procés ja que estudia l'acústica de la sala en quant al fenomen de propagació d'ones acústiques, descrivint les baixes freqüències com a models d'ona.

Qualsevol sistema vibratori, separat de la seva posició d'equilibri, vibra d'una determinada manera que es correspon amb els modes naturals de vibració. Així, un volum d'aire a l'interior d'un recinte tancat, si s'excita, constitueix un sistema vibratori, ja que cada molècula d'aire transmet, degut a les variacions de pressió, la vibració a les que es troben al seu voltant. Aquesta vibració es propaga en forma d'ona sonora portant uns modes de vibració propis de la vibració que depenen, entre d'altres, tant de la geometria com de les dimensions de la sala i les condicions de l'entorn. [18].

Quan una font emissora emet una ona sonora dins un recinte tancat, si la distància entre dos superfícies paral·leles és igual a la longitud d'ona d'una determinada freqüència es crea una ona estacionària. Es defineix el concepte d'ona estacionària com una ona formada pel fenomen d'interferència de dues

ones amb la mateixa amplitud i longitud d'ona o freqüència que es propaguen en oposadament a través d'un medi. Aquesta ona, també coneguda com a mode propi, roman estacionària reflexant-se entre les dos superfícies paral·leles, disminuint lentament la seva energia acústica a cada interacció amb la superfície.

El nombre de nodes propis és il·limitat i per a cada un d'aquest s'associa una determinada freqüència pròpia que es caracteritza per un nivell de pressió sonora. La presència de tots provoca en cada punt de la sala una concentració d'energia al voltant de la freqüència pròpia, la qual proporciona un so característic a la sala anomenat coloració. Si l'oient es situa en un punt de màxima pressió sonora percep aquesta determinada freqüència amb una intensitat sonora major de la que s'hauria de percebre. Anàlogament, si l'oient s'ubica en un mínim de pressió sonora percep la freqüència pròpia amb una menor intensitat sonora.

Aquestes freqüències pròpies associades als modes propis depenen de la geometria i de les dimensions del recinte, i generalment, el seu càlcul resulta complex. Ara bé, quan es tracta de sales o recintes paral·lelepípedes es poden calcular mitjançant la fórmula de Rayleigh expressada com [19],

$$f_{k,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (18)$$

on L_x, L_y, L_z fan referència a les dimensions de la sala en metres, k, m, n poden prendre qualsevol valor enter i c és la velocitat del so en el medi.

2.3 Teoria estadística

La última teoria de l'acústica arquitectònica es correspon amb la teoria estadística. Aquesta teoria estudia el comportament de l'energia acústica en un recinte o sala, proporcionant mesures qualitatives per a detectar problemes acústics que aquesta ocasioni. La teoria estadística fa ús de models matemàtics que plantegen l'extinció del so en un recinte des d'un punt de vista estadístic, els quals per a que aquests tinguin validesa han de garantir uns determinats criteris i assumpcions.

El primer criteri que requereix la teoria estadística és disposar d'un camp acústic uniforme en la sala. D'aquesta manera l'arribada de les ones sonores a cada punt és equiprobable, i per tant, es pot assumir un camp difús sonor com s'ha explicat en apartats anteriors. L'assumpció d'un camp sonor difús converteix aquesta teoria com una aproximació, ja que aquesta situació es dona en poques ocasions. També enuncia que les dimensions de la sala han de ser superiors a la longitud d'ona, fent-la una teoria adient per a freqüències mitjanes i altes. Un altra premisa és el fet que els coeficients d'absorció de les superfícies i objectes que conformen el recinte han de tenir valors semblants. Per últim, es

destaca que els resultats obtinguts han de ser considerats una aproximació de valors promig, i no instantànis, del comportament acústic de la sala en punts situats suficientment allunyats de les parets que delimiten l'espai.

Tot i que la teoria estadística no té en compte ni la geometria de la sala, i per consegüent els modes propis i ressonàncies d'aquestes, aquesta proporciona la predicció de certs paràmetres acústics amb els quals s'obté una simulació acústica de l'espai.

References

- [1] Daniel A. Russell. Acoustics and vibration animations. <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>. Accedido 15-05-2020.
- [2] Paul Allen Tipler and Gene Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología. II*, volume 2. Reverté, 2004.
- [3] T Jackets. The newton-laplace equation & speed of sound. *Thermaxx Jackets*.
- [4] Ross J Roeser, Michael Valente, and Holly Hosford-Dunn. Diagnostic procedures in audiology. *Audiology: diagnosis*, pages 1–16, 2007.
- [5] Engineering ToolBox. Sound pressure. <https://www.engineeringtoolbox.com>. Accedido 15-05-2020.
- [6] Mahesh C Jain. Textbook of engineering physics (part i). *PHI Learning Private Limited, New Delhi*, 2009.
- [7] Gerhard Müller and Michael Möser. *Handbook of engineering acoustics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [8] Frank J Fahy and Vincent Salmon. Sound intensity, 1990.
- [9] Federico Miyara. *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- [10] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson Education India, 2012.
- [11] Bevan B Baker and Edward Thomas Copson. *The mathematical theory of Huygens' principle*, volume 329. American Mathematical Soc., 2003.
- [12] Lic. Haroldo O. Da Riva. Acústica arquitectónica: Difusión y acondicionamiento acústico. <http://www.acustec.com.ar>. Accedido 15-05-2020.
- [13] Wymke Ockenga. Phase contrast. 2011.

- [14] Dick CH Poon. How good is the approximation $d \sin \theta$? *The Physics Teacher*, 40(8):460–462, 2002.
- [15] University of Waikato Science Learning Hub – Pokapū Akoranga Pūtaiao. Constructive and destructive interference. www.sciencelearn.org.nz. Accessed 15-05-2020.
- [16] Leo L Beranek and David T Blackstock. *Acoustics*, 1986 edition by leo l. beranek, 1988.
- [17] Antoni Carrión Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, volume 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.
- [18] Daniel Tarrazó-Serrano, Sergio Castiñeira-Ibáñez, Antonio Uris, and Constanza Rubio Michavila. Modelización de los modos propios de un recinto paralelepípedo con superficies rígidas mediante el método de elementos finitos. *Modelling in Science Education and Learning*, 11(2):29–38, 2018.
- [19] Oscar J Bonello. Acoustical evaluation and control of normal room modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 66(S1):S52–S52, 1979.