Introducció a l'acústica

Marta Ruiz Costa-jussà
Helenca Duxans Barrobés

PID_00188050

UOC
Universitat Oberta de Catalunya

Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca

Índex

Introducció 5

Objectius 6

1. Definició i caracterització del so i del soroll 7
1.1. Propagació del so, pressió sonora, amplitud del so, potència i intensitat 7
1.2. La longitud d'ona, la freqüència, el període i la velocitat de propagació 8
1.3. Espectre del so i densitat espectral 9
1.4. Caracterització d'una sala mitjançant la resposta impulsional. Auralització 13

2. Percepció humana del so. Fenòmens sonors 15
2.1. Estructura de l'orella humana 15
2.2. Percepció del so 16
2.2.1. Nivells audibles segons la freqüència. Corbes isofòniques 17
2.2.2. Emmascarament del so 19
2.3. Mesurament del so. Sonòmetre i filtres de ponderació 20

3. Fonts sonores i propagació del so 22
3.1. Exemple de font sonora: el mecanisme de fonació humana 22
3.2. Propagació del so en recintes oberts i tancats. Reflexió i absorció 23
3.3. Reverberació 24
3.4. Eco 26

Introducció

D'una banda, sentir és un dels mitjans més importants de la supervivència en el món animal. D'altra banda, la parla és una de les característiques més distintives del desenvolupament humà. Així, doncs, l'objectiu d'aprendre acústica pot ser motivat des de l'àmbit musical (per exemple, aprendre a afinar un instrument) fins a l'àmbit arquitectònic (per exemple, aprendre a dissenyar un bloc de pisos on els veïns no se sentin els uns als altres), passant pel mateix àmbit sociològic (per exemple, saber com afecta el soroll ambiental d'una ciutat i a quins nivells s'ha de reduir idealment).

Per a obtenir un coneixement correcte del món de l'acústica en qualsevol de les branques que té (per exemple, bioacústica, psicoacústica o electroacústica), hem de conèixer els conceptes principals relacionats amb el so, que és el que veurem en aquest mòdul.

Exemple

Escoltem, durant uns segons, en Gaspar Hernández en el seu programa radiofònic "L'ofici de viure" des dels estudis de Catalunya Ràdio. Ara bé, què passaria si la sala des d'on parla en Gaspar estigués condicionada d'una altra manera? Si això fos així, ho sentiríem ben diferent. El condicionament de sales és un dels exemples de l'aplicació de l'acústica.

Objectius

En aquest mòdul veurem els conceptes bàsics relacionats amb el so que ens permetran tenir una base sòlida d'acústica. Abans de tot, definim l'acústica com la ciència que estudia el so. Així, doncs, veurem què és el so, com el percebem, com el mesurem, com es genera i com es propaga. Concretament, en haver acabat aquest mòdul heu de ser capaços del següent:

1. Explicar i aplicar els conceptes bàsics que defineixen el so: velocitat de propagació, longitud d'ona i nivell de pressió sonora.

2. Comprendre bàsicament com funciona l'acústica fisiològica, és a dir, com percep el so l'orella humana, com emet el so el sistema de fonació humana i quina directivitat té la veu humana.

3. Conèixer les eines de percepció del so (corbes isofòniques, filtres de ponderació, nivell de soroll de fons) i de mesurament del so (sonòmetre).

4. Saber quina tipologia de fonts sonores hi ha i també el comportament que tenen en diferents tipus de recintes. Així mateix, aprendre com es propaga el so i què és la reverberació i la intel·ligibilitat del so.

5. Conèixer de manera bàsica eines que faciliten el processament d'àudio, com l'Audacity i el Matlab.

1. Definició i caracterització del so i del soroll

El **so** es pot definir com una ona de pressió que transporta informació i que, perquè n'hi hagi, necessita com a mínim una font que l'origini i un medi físic per mitjà del qual es propagui. Una definició més extensa del so també requereix un receptor, entre altres coses, perquè pugui jutjar si l'ona en qüestió transporta informació o no.

El **soroll** es pot definir com a so sense informació.

Per a diferenciar entre so i soroll, necessitem fixar-nos en la definició extensa de *so* perquè la informació és relativa al receptor que percep la sensació audible. Per això, a la pràctica, és aquest receptor qui diferencia què és so i soroll.

Entenent el so com una ona, podem utilitzar diferents paràmetres que caracteritzin aquesta ona (vegeu la figura 1). A continuació definim breument els paràmetres més importants.

1.1. Propagació del so, pressió sonora, amplitud del so, potència i intensitat

La **propagació del so** es fa per compressió i dilatació del medi. Així, doncs, quan es fa un cop sobre un tambor, la tapa del tambor es desplaça cap a dins, es dilaten les partícules d'aire properes a la superfície del tambor i, quan la tapa del tambor es desplaça cap a fora, es contrauen les partícules d'aire. Així mateix, les partícules d'aire més properes al tambor van contraent i dilatant les partícules (també d'aire) properes a elles mateixes.

La **pressió sonora (P)** és la magnitud que descriu la variació de la força de l'ona ondulatòria exercida sobre el medi (per unitat de superfície). Així, doncs, la pressió sonora és causada per la propagació de la pertorbació sonora. Es mesura en pascals (Pa) o, dit d'una altra manera, força per unitat d'àrea. L'orella humana pot percebre des de 20×10^{-6} Pa (20 µPa) fins a 200 Pa (200.000.000 µPa) i no és operatiu parlar, per exemple, de 232.121 µPa. Per això, sovint es parla de **nivell de pressió sonora (L)**, element que permet definir la quantitat de pressió sonora en termes relatius:

$$L = 10 log \frac{P}{P_{ref}}$$

en què P_{ref} és la pressió sonora de referència i L es mesura en decibels (dB).

Per a saber-ne més

En aplicacions acústiques, una de les magnituds de referència són els dB SPL, en què un so de 20 µPa (20×10^{-6} Pa) són 0 dB SPL. Les sigles *SPL* volen dir *nivell de pressió sonora* o *sound pressure level* i normalment no s'especifiquen perquè per convenció, si no es diu res, els decibels són dB SPL. Per tant, si volem calcular el nivell de pressió sonora d'un medi concret en dB SPL, la pressió sonora de referència (P_{ref}) és de 20 µPa.

L'**amplitud (A)** és la quantitat màxima (en termes absoluts) de pressió sonora que exerceix l'ona sobre el medi. El valor màxim (en termes absoluts) que pot adquirir l'ona es coneix com a *cresta* si és positiu i com a *vall* si és negatiu. El punt on l'ona s'anul·la es coneix com a *node*. L'amplitud es defineix en decibels.

La **potència sonora** és la quantitat d'energia emesa per unitat de temps. Es mesura en watts (W). Igual que passava amb la pressió sonora (P) sovint es parla de nivell de potència. Aquest permet definir la potència sonora en termes relatius a una potència de referència, es mesura en decibels i també es coneix com a **volum**.

La **intensitat sonora** és la quantitat d'energia emesa per unitat de temps i per superfície. Per tant, és la quantitat de potència sonora per superfície. Es mesura en $\frac{W}{m^2}$. Sovint també es parla de nivell d'intensitat sonora, que es mesura en decibels.

Nota

No s'ha de confondre pressió sonora, amplitud, potència sonora i intensitat sonora. Ara bé, noteu que totes aquestes magnituds són directament proporcionals: quan en creix una, creixen també totes les altres i a l'inrevés.

1.2. La longitud d'ona, la freqüència, el període i la velocitat de propagació

La **longitud d'ona** (λ) es defineix com la distància, mesurada en la direcció de propagació de l'ona, entre dos punts idèntics. És una mesura de longitud, com diu el nom, i es mesura en metres.

La **freqüència (f)** té una relació inversa amb el concepte de longitud d'ona i, com sabem, és el nombre de repeticions per unitat de temps. O, dit d'una altra manera, el nombre d'oscil·lacions per unitat de temps. Es mesura en hertz (Hz) o cicles per segon (c/s).

Exemple

En aquest exemple mirarem com es fa per a generar diferents tons purs (com observem en la figura 1) amb l'Audacity.

Obriu l'Audacity. Aneu al menú *Genera*, seleccioneu *To*, seleccioneu la freqüència i premeu *Genera un to*.

Ara generarem dos tons d'octaves diferents. Entenem per *octava* l'interval de freqüències en què la freqüència màxima és el doble de la freqüència mínima (exemples d'octava: 300 Hz i 600 Hz, d'1 kHz a 2 kHz).

Generem un to d'1 kHz i un to de 2 kHz.

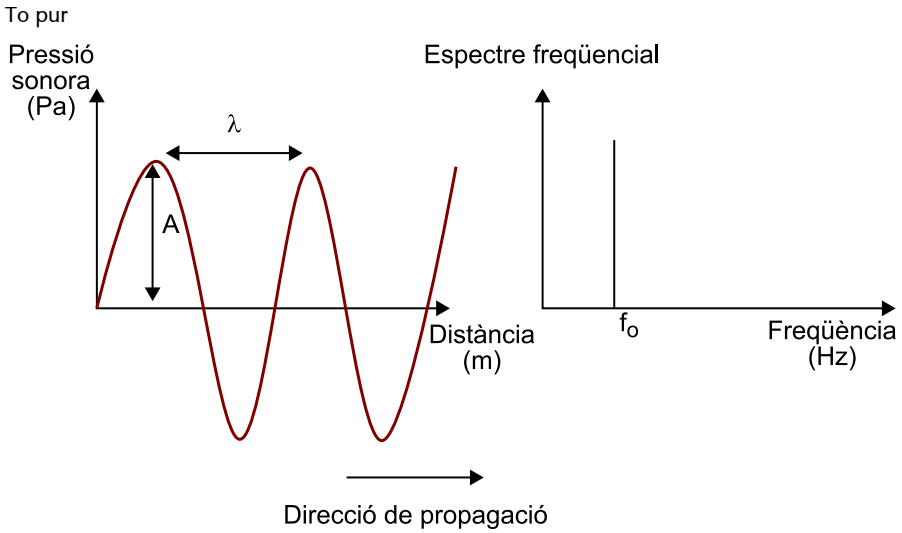

Figura 1. Representació gràfica d'un to pur, tot indicant alguns dels paràmetres o elements bàsics d'aquest to

El **període (T)** d'una ona periòdica és l'interval de temps que hi ha entre dos punts idèntics de l'ona en qüestió. Per tant, el període d'una ona no periòdica és infinit. El període es mesura en segons i és la inversa de la freqüència.

La **velocitat de propagació (c)** és el ritme al qual es propaga l'ona i depèn del medi físic en el qual sigui. Es mesura en metres per segon (m/s). Es relaciona amb la longitud d'ona i la freqüència:

$$c = \lambda f$$

Per definició sabem que el so, com que és una ona de pressió, no es propaga en el buit. La velocitat de propagació varia segons el medi físic on es propagui el so. Així, doncs, la velocitat de propagació és més gran en els sòlids, més petita en els líquids i encara més petita en els gasos. Vegem alguns exemples de velocitat de propagació[1]:

- A l'aire (a una temperatura de 20 ºC) és de 340 m/s.
- A l'aigua (a 35 ºC) és de 1.493 m/s.
- A la fusta (a 25 ºC) és de 3.900 m/s.

(1)La velocitat de propagació del so depèn del medi físic on es doni la propagació, no de les característiques del so ni de l'emissor. Per tant, tots els sons es propaguen a la mateixa velocitat en un mateix medi. Si no fos així, seria molt difícil, per exemple, coordinar les orquestres: els sons emesos per un violí i un tambor no coincidirien en el temps, ja que tenen característiques diferents (com, per exemple, l'amplitud i la forma).

1.3. Espectre del so i densitat espectral

Una ona periòdica està formada per un conjunt de senyals sinusoïdals, cadascun amb una freqüència múltiple de la freqüència fonamental. Així, quan sentim un so de 100 Hz, sentim ones sinusoïdals de freqüències 100 Hz, 200 Hz, etc., que són els harmònics de la freqüència original. Només en cas que el so estigui format pròpiament per una ona sinusoïdal tindrem un to pur, és a dir, una única freqüència. Així, doncs, un so pot tenir associada una freqüència

o unes quantes freqüències. **La representació gràfica de les freqüències que formen el so s'anomena *espectre*.** En la figura 1 es mostra la forma d'ona d'un to pur i l'espectre que té.

Cal tenir en compte que la representació de la figura 1 és totalment teòrica. Si generem un to pur amb el Matlab, per exemple, un a 1.000 Hz mostrejat a 44,1 kHz $[t = 0:1/44100:10;\ s = \sin(2 \times pi \times 1000 \times t)]$ i en dibuixem l'espectre[2] en decibels (`easyspec(s, 44100)`) no obtenim una delta ideal:

[(2)] Aquesta funció la teniu a l'apèndix (easyspec.m)

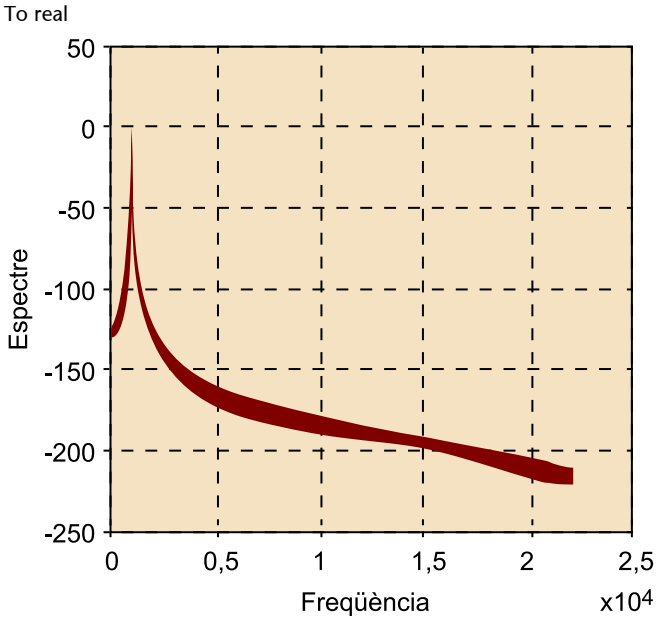

Figura 2. Representació real d'un to utilitzant el Matlab

La delta és el valor teòric de l'espectre, i el valor real es pot representar mitjançant una funció sinc o una funció gaussiana.

La delta és la representació d'un to pur de duració infinita, però com que analitzem sons reals, aquests sons tenen duració finita i, per tant, la resposta freqüencial queda afectada.

Nota

La sinc és una funció infinita: $\sin x / x$, i en el límit és una delta:

$$\lim_{a \to o} \frac{1}{a} \operatorname{sinc}\left(\frac{x}{a}\right) = \delta(x)$$

Per a saber-ne més

També és una delta una gaussiana en el límit:

$$\lim_{a \to 0} \frac{1}{a\sqrt{\pi}} e{-}x2/a$$

Per tant, a la pràctica, els analitzadors espectrals no ens donen respostes com la mostrada en la figura 1, és a dir, una delta ideal, sinó que ens donen respostes com la de figura de sobre aquestes línies, una delta no ideal.

En el cas del soroll, les freqüències que el constitueixen tenen valors imprevisibles. Per aquest motiu, no és pràctic representar-ne l'espectre freqüencial (perquè genèricament hi ha una gran varietat de freqüències i no es distingeixen correctament). En lloc seu, s'utilitza la densitat espectral de potència, que és la potència sonora per unitat de freqüència. Precisament, s'utilitza la

densitat espectral de potència perquè **ens informa de la manera com està distribuïda la potència del senyal sobre les diferents freqüències que componen el senyal** (és a dir, l'espectre que tenen).

Nota

Des del punt de vista teòric, el so i el soroll s'analitzen de manera diferent: el primer, amb l'espectre i el segon, amb la densitat espectral. Ara bé, des del punt de vista pràctic, el so i el soroll s'analitzen tots dos amb la densitat espectral, perquè un analitzador d'espectres no pot mostrar, per exemple, una delta.

En acústica hi ha dos sorolls especialment interessants (vegeu les figures 3 i 4). Un és el **soroll blanc, que es caracteritza pel fet de tenir una densitat espectral de potència plana**, que vol dir que el soroll en qüestió conté totes les freqüències i que totes tenen la mateixa potència. El soroll blanc s'utilitza molt en processament del senyal; per exemple, com hem vist a les assignatures de Senyals i sistemes I i II, s'utilitza per a determinar la funció de transferència de qualsevol sistema lineal i invariant en el temps. Noteu que si fem l'antitransformada del soroll blanc (és una constant en freqüència) és la funció delta de Dirac. I a la vegada, aquesta funció de transferència, en acústica arquitectònica, s'utilitza per a mesurar el comportament de la sala.

L'altre és el **soroll rosa, que és aquell en què la densitat de potència és inversament proporcional a la freqüència**. És a dir, el soroll rosa disminueix a la meitat cada octava. Per tant, també es pot definir com aquell que té densitat de potència constant per amplada de banda (per octava, per terç d'octava, etc.). D'aquesta manera el perfil de l'espectre d'un soroll rosa és pla quan l'eix de freqüències segueix una escala logarítmica (graduada en octaves). Si l'eix de freqüències segueix una escala lineal, el perfil de l'espectre és una línia recta que baixa amb un pendent de 3 dB/octava. El soroll rosa s'utilitza en acústica per a equalitzar[3] sales i equips d'enregistrament, entre altres coses. El procediment és el següent: es genera un soroll rosa entre 20 Hz i 20 kHz (l'amplada de banda audible per a l'orella humana) i s'utilitza un micròfon que recull el so de la sala. Aquest so es passa per un analitzador d'espectres i s'equalitza fins que totes les bandes es troben al mateix nivell. D'aquesta manera, **es garanteix que no hi ha cap pèrdua ni guany per a cap freqüència**.

(3) Equalitzar vol dir modificar les diferents amplituds de les freqüències que componen un senyal. Generalment, s'equalitza per a compensar la resposta dels equips d'àudio i així recuperar el so original.

Soroll blanc i soroll rosa

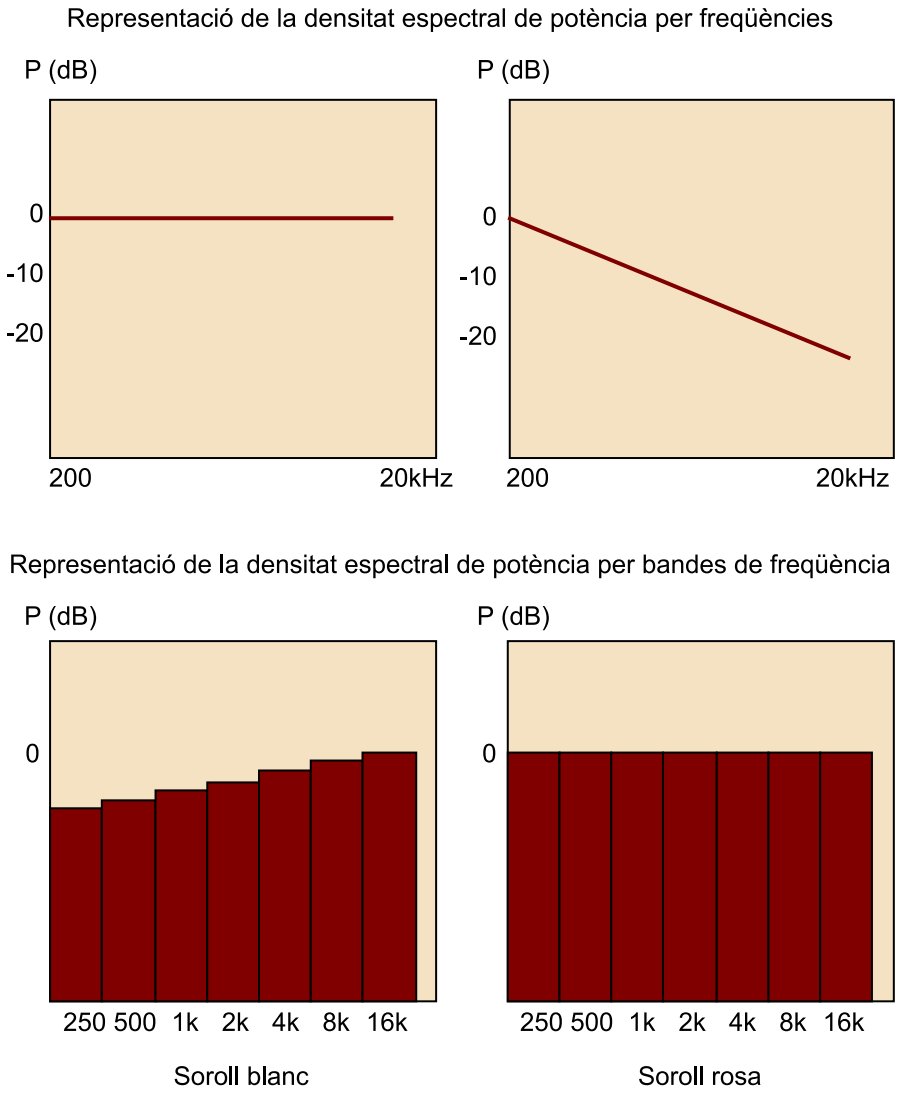

Figura 3. Representació del soroll blanc i el soroll rosa

Generació de soroll blanc en el Matlab

Podem generar soroll blanc a partir de l'ordre següent en el Matlab:

```
w=randn(1,100000); %wgn with a variance of 1
```

Podem sentir el soroll blanc si fem *sound(w)*.

Noteu que a la natura sí que hi trobem sorolls que generen aquest so; per exemple, un salt d'aigua.

Nota

Quan es fa *sound(x)* la freqüència de mostreig per defecte és de 8 kHz.

Generació de soroll rosa en el Matlab

Podem generar soroll rosa en el Matlab si generem soroll blanc i el filtrem. Això és el que fa el programa següent:

```
Nx = 100000; % nombre de mostres que s&#8217;han de sintetitzar
B = [0.049922035 -0.095993537 0.050612699 -0.004408786];
A = [1  -2.494956002 2.017265875 -0.522189400];
%A i B són els coeficients del filtre 1/f
nT60 = round(log(1000)/(1-max(abs(roots(A)))));
% estimació del període transitori
```

```
v = randn(1,Nx+nT60);
% generació del soroll blanc
p = filter(B,A,v); % s&#8217;aplica el filtre 1/f
p = p(nT60+1:end); % saltem el transitori
```

Podem sentir el soroll rosa si fem *sound(p)*.

Si volem veure la densitat espectral de cadascun dels sorolls, podem utilitzar el programa següent en el Matlab:

```
H = spectrum.periodogram(&#8216;kaiser&#8217;);
plot(psd(H,w)) % la densitat espectral del soroll blanc és plana en f
plot(psd(H,p)) % la densitat espectral del soroll rosa disminueix
                 com 1/f
```

Soroll blanc i rosa

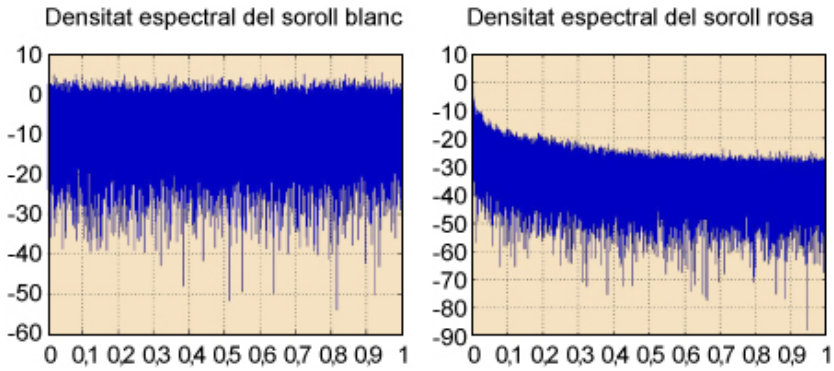

Figura 4. Potència sonora segons la freqüència del soroll blanc i rosa. En l'eix d'abscisses veiem la freqüència normalitzada. El rang 0-1 es correspon amb 0-(F_m/2) (Hz).

1.4. Caracterització d'una sala mitjançant la resposta impulsional. Auralització

Com ja hem comentat en l'apartat "Definició de sistema" del mòdul 2, la resposta impulsional permet caracteritzar un sistema lineal i invariant en el temps (SLTI). Per tant, si suposem que una sala es pot modelar acústicament com un SLTI, tindrem una funció $h(t)$ que serà la resposta impulsional de la sala. Aquesta funció permet modelar el que percep l'oient en un punt determinat de la sala i segons el so que s'emet. Concretament, aquesta percepció del so s'obté de convolucionar el so i la resposta impulsional. La resposta impulsional depèn dels acabats de la sala i de la posició de la font sonora, entre altres coses. No és evident com s'ha de fer per a trobar la resposta impulsional o funció de transferència[4] d'una sala i hi ha molts estudis respecte a aquesta qüestió.

[(4)]Com ja sabeu, la funció de transferència conté la mateixa informació que la resposta impulsional, ja que no és més que la resposta impulsional en el domini transformat.

Referències bibliogràfiques

Entre d'altres:

A. Carrión Isbert (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC.

J. O. Smith (2008, octubre). "Spectral Audio Signal Processing".

Per a què serveix la resposta impulsional en acústica?

1)Per a conèixer el nivell d'intel·ligibilitat d'una sala. És a dir, per a saber quina qualitat té l'acústica d'una sala. Aquest factor és molt important a l'hora de decidir l'emplaçament d'un concert, per exemple.

2)Per a dissenyar una sala segons la resposta impulsional que es vulgui. Segons l'ús de les sales es vol que el so no arribi a determinats llocs (en sales d'espera, per exemple) o que hi arribin tots els sons sense distorsió (en sales de concerts, per exemple).

3)Per a fer simulacions acústiques.

L'estudi de la resposta impulsional ha donat lloc al que es coneix com a **auralització**, que és precisament la simulació auditiva. Així, doncs, l'**auralització modela com es comporta acústicament un determinat recin-**

te. L'auralització diferencia entre orella esquerra i dreta; per tant, es construeixen dues respostes impulsionals (una per orella). Cada resposta impulsional es convoluciona amb el senyal emès i com a resultat d'això tenim el so que se sentirà a la sala, en un determinat punt.

Exemple

Noteu que el primer exemple d'aquest mòdul és un exemple d'auralització. Noteu que el discurs d'en Gaspar Hernández se simula amb vestiment o sense i la intel·ligibilitat és molt diferent.

El so és una ona mecànica que es propaga en un medi determinat. Els paràmetres principals que caracteritzen un so són la propagació, la pressió sonora, l'amplitud, la longitud d'ona, la freqüència i la velocitat de propagació.

L'espectre del so és la representació gràfica de les freqüències que componen un so. Com que no es pot predir quines freqüències componen un soroll, en aquest cas, s'utilitza la densitat espectral de potència, que ens dóna la potència sonora per unitat de freqüència.

Hi ha dos sorolls que són especialment interessants en acústica per les aplicacions que tenen: el soroll blanc i el rosa.

El comportament acústic d'una sala es pot modelar o simular per a una determinada resposta impulsional i això dóna lloc a l'auralització.

2. Percepció humana del so. Fenòmens sonors

El **sistema auditiu humà** és l'encarregat de convertir els estímuls físics que rep, en forma d'ones acústiques i en impulsos elèctrics, per a transmetre'ls després al còrtex cerebral, on es produeix la sensació d'audició.

En aquest apartat veurem breument l'estructura de l'orella humana i el mecanisme d'audició. Així mateix, veurem de quina manera percebem el so els humans i quines mesures utilitzem de manera que s'adaptin a aquesta percepció del so.

2.1. Estructura de l'orella humana

L'orella humana presenta un mecanisme molt complex. En aquest apartat farem una introducció molt breu dels elements que la constitueixen. Sovint, per a simplificar-ne la descripció, diem que l'orella es divideix en tres parts: **orella externa**, **mitjana** i **interna**.

Imatge de l'orella humana

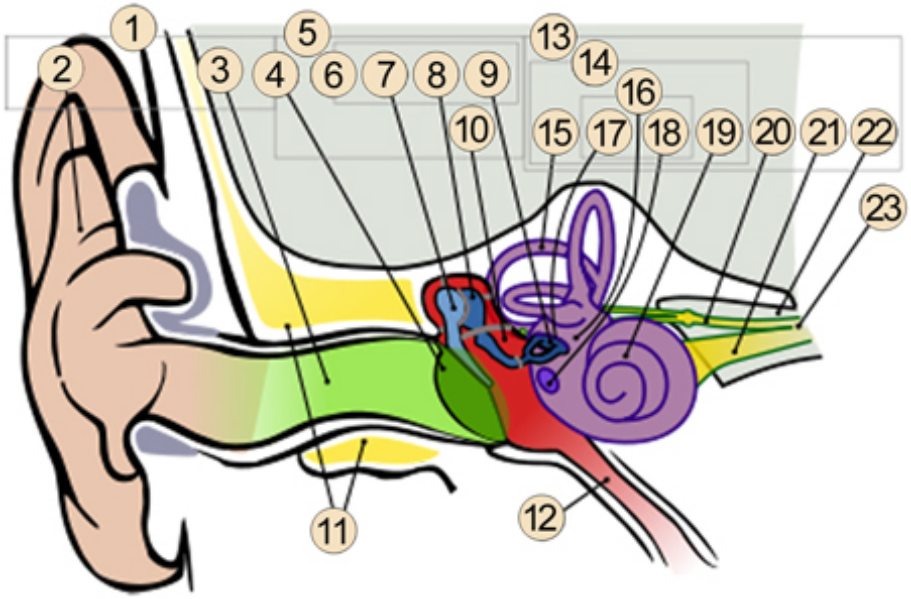

Figura 5. Anatomia de l'orella humana: 1: orella externa; 2: pavelló auricular; 3: conducte auditiu extern; 4: timpà; 5: orella mitjana; 6: ossicles; 7: martell; 8: enclusa; 9: estrep; 10: caixa timpànica; 13: orella interna; 14: laberint; 15: conducte semicircular; 16: vestíbul; 17: finestra oval; 18: finestra rodona; 19: còclea; 20: nervi vestibular; 21: nervi coclear; 22: conducte auditiu intern. Altres: 11: os temporal; 12: trompa d'Eustaqui; 23: nervi auditiu. Font: Vikipèdia.

L'orella està constituïda pel pavelló auditiu extern, el conducte auditiu exterior i el timpà. El primer actua com a col·lector del so i el segon té una doble funció: evitar l'accés directe del so sobre el timpà i actuar com a ressonador i, així, augmentar la sensibilitat auditiva. El timpà transforma les variacions de pressió associades a les ones incidents en vibracions mecàniques.

L'orella mitjana està constituïda bàsicament per una cavitat i quatre finestres; dins de la cavitat hi trobem els "ossets" de l'orella i certs músculs. En aquesta part, es protegeix l'orella interna i s'augmenta el nivell de pressió sonora amb vista a l'orella interna respecte al nivell que hi ha al timpà.

Finalment, l'orella interna conté una part òssia i una part membranosa en forma de cargol on se situa la membrana basilar i l'òrgan de Corti, que és el receptor de l'audició.

2.2. Percepció del so

La gamma de pressions sonores a les quals respon l'orella humana (dit d'una altra manera, els nivells audibles) és molt àmplia i depèn de la freqüència del so. Per exemple, amb la mateixa intensitat sonora, els sons greus es perceben com si tinguessin més volum que els sons aguts. Així mateix, és important saber que el nostre **sistema auditiu respon de manera logarítmica** als estímuls que rep. És a dir, per a posar un exemple, per a percebre el doble de fort un to pur qualsevol, el nivell de pressió sonora d'aquell to s'ha de multiplicar per 3,16 (noteu que *log* 3,16 = 2).

Activitat

Feu la comprovació de la percepció logarítmica amb l'Audacity:

- Genereu un primer to d'una determinada freqüència amb una determinada amplitud.
- Seleccioneu la pestanya *Efecte* i l'opció *Amplifica*.
- Proveu diferents amplificacions.

En quin cas percebeu un to el doble de fort?

La figura 6 mostra una il·lustració amb els nivells de pressió sonora corresponents a diferents exemples quotidians de sons i sorolls.

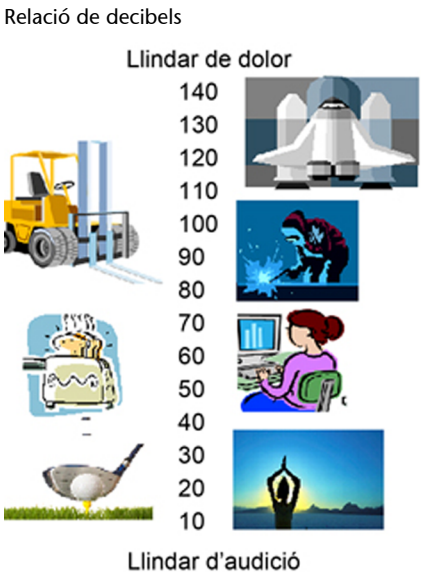

Figura 6. Quantitat de decibels associats a diferents activitats

Nota

L'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) diu que una exposició prolongada a sons per sobre de 85 dB pot comportar una pèrdua d'audició. Per tant, vigileu amb els auriculars o les discoteques!

De manera optativa llegiu l'article "The MP3 Generation: At Risk for Hearing Loss?", de Tom Valeo.

Precisament parla de la pèrdua d'audició que pot comportar escoltar música amb auriculars amb un volum alt i de manera continuada.

2.2.1. Nivells audibles segons la freqüència. Corbes isofòniques

Com comentàvem, els nivells de pressió sonora (o dit d'una altra manera, els nivells audibles) depenen de la freqüència. Vegem en la figura 7 la relació entre la freqüència i el nivell de pressió sonora. Concretament, la pressió sonora més dèbil que es pot detectar a la freqüència de 20 Hz és de 20 µPa. Aquest valor es pren com a referència quan utilitzem decibels. Per tant, s'estableix el conveni que un **senyal de pressió 20 µPa són 0 dB**. La figura també mostra les zones representatives de la generació sonora associada a la veu humana i a la música (noteu que el llindar de dolor se situa a 140 dB, que són 20 Pa).

Freqüència i nivell de pressió sonora

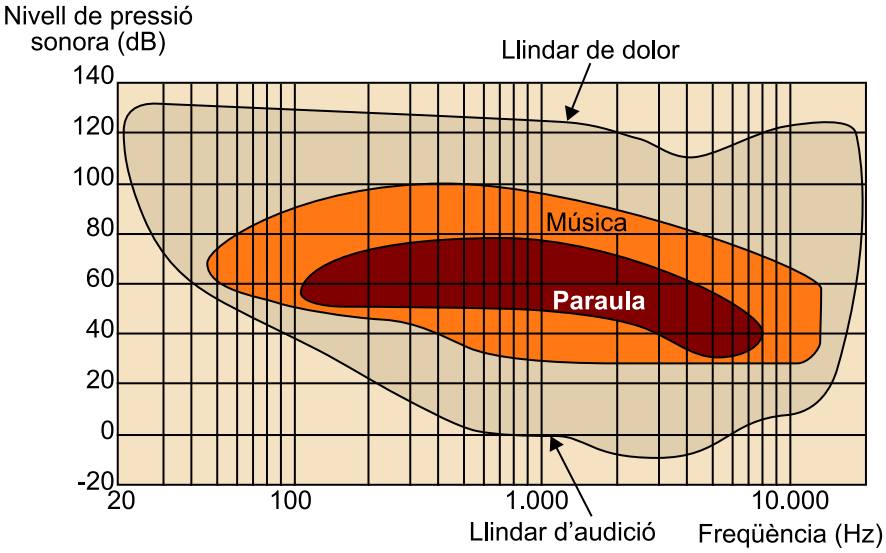

Figura 7. Relació entre freqüència i nivell de pressió sonora tot indicant el marge de valors de la música, la paraula i el marge audible per a l'orella humana. Font: Vikipèdia.

És important entendre que si un so s'emet a 30 Hz només el percebrem si el nivell de pressió sonora és superior a 50 dB, mentre que si el so s'emet a 4 kHz el percebrem si té un nivell de pressió sonora superior a 10 dB.

Un altre concepte important són les anomenades *corbes isofòniques*. Prèviament, hem de definir el fon. **Un fon determina el nivell de sonoritat; la sonoritat és la sensació subjectiva de percepció del so**. Per conveni es va determinar que a 1 to d'1 kHz i un nivell de pressió sonora de 40 dB hi correspon un nivell de sonoritat de 40 fons. A partir d'aquí, tal com es mostra en la figura 8, les corbes isofòniques representen les corbes del mateix nivell de sonoritat (mesurat en fons).

Corbes isofòniques

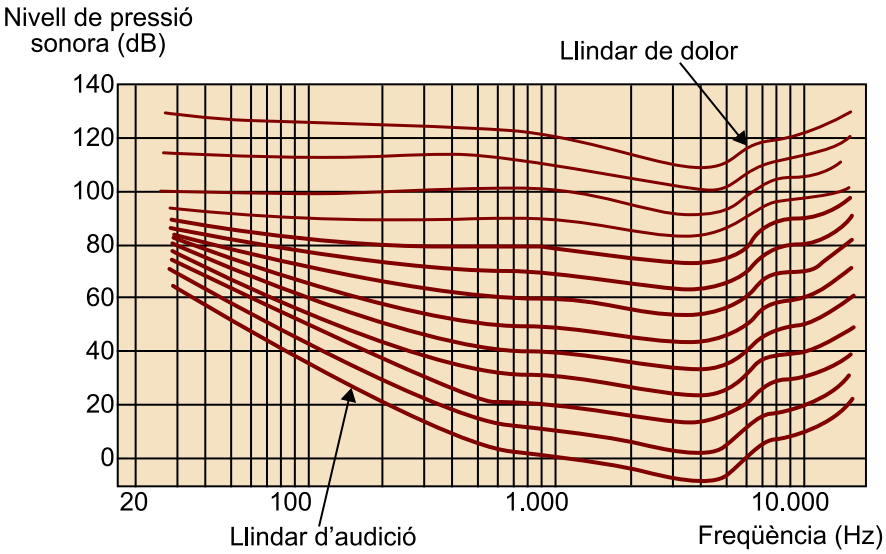

Figura 8. Representació de les corbes isofòniques segons el nivell de pressió sonora i la freqüència. Font: Vikipèdia.

Observem que:

- Amb el mateix de nivell de pressió sonora, l'orella respon diferent depenent de la freqüència. Per exemple, amb la mateixa pressió sonora (dB), els sons greus es perceben com si tinguessin més volum que els sons aguts. L'orella és poc sensible als greus (que són les freqüències baixes).

- La corba isofònica inferior no és tan lineal com les altres.

Nota

Si un so s'emet a menys de 20 Hz (anomenat *infrasò*) o a més de 20.000 Hz (anomenat *ultrasò*), no és percebut per l'orella humana. Recordem que l'orella humana només sent ones sonores que oscil·len entre 20 Hz i 20.000 Hz. Hi ha animals que sí que el poden percebre; per exemple, un gos pot arribar fins a 50.000 Hz.

Els límits auditius depenen de cada persona i de l'edat, ja que estan relacionats amb la flexibilitat del timpà, entre altres factors. Com més grans ens fem, més disminueix el nostre límit agut. Per tant, la majoria de nens poden sentir sons més aguts que els adults.

Exemple

El so que fa un tambor o un baix és més greu que el que fa una trompeta.

Contaminació acústica

Entenem per *contaminació acústica urbana* el conjunt de sons i sorolls que circulen per l'aire d'una població. Les xifres mitjanes de les legislacions europees marquen uns límits de 65 dB durant el dia i 55 dB durant la nit, ja que la capacitat auditiva es deteriora a partir de 75 dB.

Busqueu informació sobre la contaminació acústica de la vostra ciutat i sobre la legislació que ho regula.

2.2.2. Emmascarament del so

Passa relativament sovint que quan mantenim una conversa en un indret sorollós –per exemple, en un carrer transitat per cotxes– sovint no entenem el que diu el nostre interlocutor si no alça el to de veu. Veiem que el soroll emès pels cotxes "emmascara" la paraula si aquesta paraula no té un nivell de pressió sonora prou alt.

Quan l'orella està exposada a diferents fonts de soroll, pot ser que un emmascari l'altre (depenent del nivell de pressió sonora de cadascun). El fenomen d'emmascarament s'explica simplificadament considerant com varia l'excitació de la membrana basilar de l'orella (interna) segons la freqüència. Aquesta membrana s'estén al llarg de la còclea des de la finestra oval, de manera que si no rep cap estímul es troba a una distància zero de la finestra oval. Quan rep una estimulació sonora, aquesta membrana vibra i s'allunya de la finestra oval. La figura 9 mostra que, si tenim tons del mateix nivell de potència sonora, els tons d'una freqüència inferior emmascaren els d'una freqüència més alta. Això passa perquè l'excitació de la membrana basilar és més gran per a tons de menys freqüència i les cues d'aquesta excitació són més extenses. Així, doncs, veiem que un to pur de 50 Hz emmascara (encavalca) els tons purs de 200 Hz, 400 Hz i fins i tot una mica el de 1.600 Hz. Per la seva banda, el de 1.600 Hz emmascara menys. Per tant, podem dir que els tons de menys freqüència fan que la membrana basilar s'allunyi més de la finestra oval que els de més freqüència; per això l'emmascarament que es veu en la figura 9.

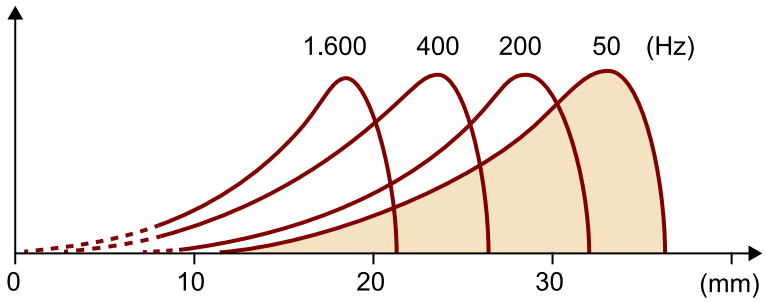

Figura 9. Desplaçament en mil·límetres de la membrana basilar per a quatre tons purs (50 Hz, 200 Hz, 500 Hz i 1.600 Hz) respecte a la finestra oval. L'eix d'ordenades és l'amplitud relativa i l'eix d'abscisses és la distància a la finestra oval en mil·límetres. Font: Vikipèdia.

A continuació presentem diferents situacions d'emmascarament possibles. Presentem dos tons (T1 i T2) amb les freqüències corresponents (F1 i F2) i els nivells d'amplitud corresponents (L1 i L2):

- F2 < F1 i L1 = L2: el T2 emmascara parcialment el T1.

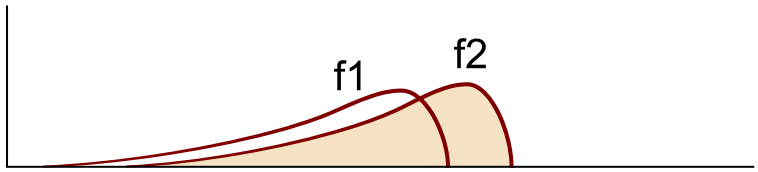

Figura 10. Amplitud a l'eix d'ordenades i distància a la finestra oval a l'eix d'abscisses. Font: Vikipèdia.

- F2 < F1 i L1 >> L2: el T2 quasi no emmascara el T1.

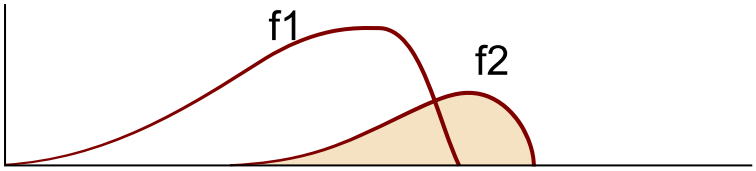

Figura 11. Amplitud a l'eix d'ordenades i distància a la finestra oval a l'eix d'abscisses. Font: Vikipèdia.

- F2 < F1 i L1 << L2: el T2 emmascara quasi totalment el T1.

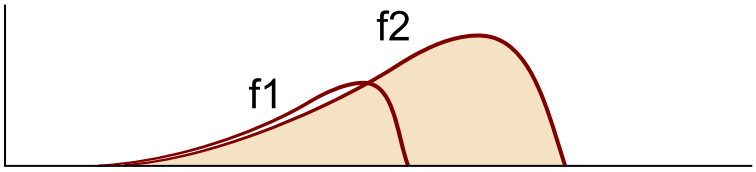

Figura 12. Amplitud a l'eix d'ordenades i distància a la finestra oval a l'eix d'abscisses. Font: Vikipèdia.

La conclusió principal que extraiem de l'emmascarament dels sons és que un **so de baixa freqüència emmascara amb molta més facilitat un so d'alta freqüència que al contrari**.

Referència bibliogràfica

L. Cremer; H. A. Muller (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics* (vol. 1). Londres: Applied Science Publishers.

Reflexió

Penseu per a què ens pot servir saber com percebem els sons i com s'emmascaren els sons. Relacioneu-ho amb el mòdul de filtres d'aquesta assignatura.

Aquest coneixement és directament aplicable en processament d'àudio. Per exemple, permet filtrar les parts dels senyals acústics que són inaudibles per a l'orella humana de manera que els senyals ocupin menys (això és el que fa precisament l'MP3). Així, doncs, una aplicació és en codificació d'àudio, com veurem més endevant.

2.3. Mesurament del so. Sonòmetre i filtres de ponderació

L'aparell electrònic que s'utilitza per a mesurar el so és el sonòmetre, que intenta donar una mesura objectiva del que sent l'orella humana. El **sonòmetre mesura exclusivament els nivells de pressió sonora**. Per a evitar el biaix entre les diferències en les mesures de diferents sonòmetres hi ha normes internacionals.

Figura 13. Imatge d'un sonòmetre. Font: hellopro.

Els sonòmetres mesuren la pressió sonora en termes de dB SPL, és a dir, l'escala que no aplica cap tipus d'atenuació ni accentuació a les freqüències del so. Per defecte, la pressió sonora es mesura en dB SPL. Ara bé, hi ha l'anomenat filtre de ponderació A (conegut com a *dBA*), que emfatitza les freqüències entorn de 3 kHz i 6 kHz (que és on l'orella humana és més sensible) i atenua la resta de freqüències on l'orella humana és més insensible. Aquesta escala dBA permet que la mesura sigui al màxim de semblant a la sonoritat que rep l'orella humana.

Vegeu també

Vegeu l'apartat "Percepció del so".

La percepció humana del so té unes característiques particulars. Així, doncs, l'orella humana pot percebre sons des de 20 Hz fins a 20 kHz però per a cadascuna d'aquestes freqüències hi ha un llindar d'audició o de dolor diferent –les corbes isofòniques ens donen aquesta informació (vegeu la figura 8, referent a les corbes isofòniques).

Si escoltem simultàniament dos sons diferents, pot ser que un no ens deixi sentir l'altre. Aquest fenomen s'anomena *emmascarament* i, genèricament parlant, un so de baixa freqüència emmascara amb més facilitat un so d'alta freqüència que no pas al revés.

L'instrument més utilitzat com a mesura dels sons és el sonòmetre. Aquest aparell utilitza tant l'escala dB SPL com la dBA. Aquesta segona escala s'utilitza per la semblança que té amb el que percep l'orella humana.

3. Fonts sonores i propagació del so

Entenem com a **font sonora** l'element que emet un so. Una de les característiques acústiques més rellevants d'una font sonora és la **directivitat (o característiques direccionals)**. La **directivitat d'una font** es mesura mitjançant el factor de directivitat *Q*, que depèn de la relació entre el nivell d'intensitat sonora produït en la direcció considerada (θ) i el nivell que s'obté si la font emet igual en totes les direccions, és a dir, si és omnidireccional[5].

(5)Sabem que una font sonora omnidireccional és aquella que emet el mateix so en totes les direccions. Per tant, el factor de directivitat que té és 1.

$$Q = \frac{I(\theta)}{I_{\text{omni}}}$$

3.1. Exemple de font sonora: el mecanisme de fonació humana

Els òrgans que formen part del sistema de fonació humana són els pulmons, la faringe, la cavitat nasal i la cavitat bucal.

Reflexió

Per què és important saber com funciona el sistema de fonació humana?

Per exemple, si volem crear una veu sintètica podem intentar imitar el mecanisme humà. L'aplicació de síntesi de veu la veurem en el mòdul 8.

Activitat

Feu una cerca sobre quin és el factor de directivitat de la veu humana.

Els sons que emet una persona es poden classificar d'acord amb diversos criteris segons diferents aspectes d'emissió. Així, doncs, una classificació pot ser segons el caràcter vocàlic o consonàntic del so. La taula següent presenta les característiques principals d'aquests sons:

	Vocal	Consonant
Duració mitjana	90 ms	20 ms
Contingut freqüencial dominant	Baixes freqüències	Baixes freqüències
Contribució a la intel·ligibilitat de la paraula	Baixa	Alta

La intel·ligibilitat d'una paraula depèn principalment del soroll de fons, del temps de reverberació i de la mida de la sala. Per a mesurar la intel·ligibilitat de la paraula s'utilitzen mesures com aquestes:

Nota

Mesurar la intel·ligibilitat de la paraula en llenguatges tonals (com el xinès) pot ser més complex ja que s'ha de tenir en compte que el to es transmeti correctament.

- % ALCONS (percentatge de pèrdua d'articulació de consonants). Idealment es demanen valors més petits que 5%.

- STI (*speech transmission index*). El valor que té oscil·la entre 0 (intel·ligibilitat nul·la) i 1. Les variants més utilitzades són les següents:

– RASTI (índex de transmissió de la rapidesa del discurs). El valor d'aquest índex també oscil·la entre 0 (intel·ligibilitat nul·la) i 1 (intel·ligibilitat total).

– STI-PA (índex de transmissió del discurs per a sistemes públics). El valor que té també oscil·la entre 0 (intel·ligibilitat nul·la) i 1 (intel·ligibilitat total).

Activitat

Els llenguatges tonals són els que varien segons com es pronuncien les síl·labes. Feu una cerca a Internet sobre llengües tonals i quins tons diferents utilitzen.

3.2. Propagació del so en recintes oberts i tancats. Reflexió i absorció

El comportament del so en un recinte obert i tancat varia principalment en la manera com percep el so l'oient. En el primer cas, l'energia d'una font sonora arriba a un oient només de manera directa (so directe), mentre que, en el segon cas, hi arriba de dues maneres diferents: de manera directa (so directe) i de manera indirecta (so reflectit). El so indirecte o reflectit al mateix temps pot arribar amb primeres reflexions o amb reflexions tardanes tal com es mostra en la figura 14. L'energia del so directe depèn de la distancia a la font sonora i de la posició de l'oient respecte a la directivitat de la font. En el cas del so reflectit, l'energia associada a cada reflexió depèn del camí recorregut pel raig sonor, i també del grau d'absorció acústic dels materials utilitzats i el revestiment d'aquests materials que fan que el so perdi energia.

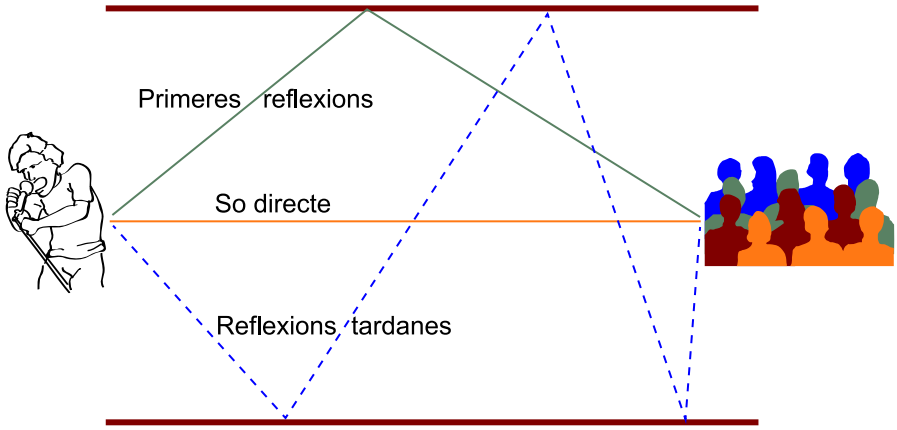

Figura 14. So directe. Primeres reflexions (línies blaves contínues). Reflexions tardanes (línies blaves discontínues).

Per a saber-ne més

L'acústica geomètrica estudia el comportament del so dins d'un recinte tancat i, concretament, estudia quina trajectòria segueixen les ones: com es propaguen, com reboten i com s'absorbeixen.

Analitzem una mica més els conceptes de **reflexió** i **absorció**. Si una ona es propaga en espai lliure no hi ha reflexió ni absorció, però si es propaga en un recinte tancat, quan "xoqui" contra una superfície hi haurà una part de l'ona que es reflectirà i una que la mateixa superfície absorbirà. Aquests dos efectes produeixen la reverberació i l'eco, que els veurem en els propers apartats.

La quantitat d'ona que es reflecteix o s'absorbeix depèn del material de la superfície en qüestió. Així, doncs, cada material es caracteritza per un **coeficient d'absorció** que indica quina proporció de l'ona s'absorbeix (i la resta es reflecteix). El coeficient d'absorció d'un material és diferent segons quina sigui la freqüència del so. Per exemple, a la freqüència d'1 kHz el vidre té un coeficient d'absorció de 0,03 i un tapís té un coeficient d'absorció de 0,75; i a la freqüència de 250 Hz el vidre té un coeficient d'absorció de 0,04 i el tapís, de 0,35.

El coeficient d'absorció es defineix de la manera següent:

$$\propto = \frac{\text{energia absorbida}}{\text{energia incident}}$$

Aquest coeficient es mesura en sabines (1 sabine correspon a l'absorció d'1 m^2).

Cambra anecoica

Una cambra anecoica és una sala que es caracteritza perquè absorbeix el cent per cent les ones sonores que s'hi produeixen. Per tant, és una sala sense ecos.

Figura15. Imatge d'una cambra anecoica. Font: Vikipèdia.

3.3. Reverberació

Entenem per *reverberació* la situació en què les **reflexions arriben a l'oient quan el so original encara no s'ha extingit**. Quan el retard de les reflexions és més petit que 0,05 segons, el so reflectit s'integra amb el so original i es contribueix a millorar la comprensió del missatge.

Activitat

El nostre cervell està capacitat per a integrar el so reverberant. Ara bé, si ens concentrem podem notar la reverberació. Per exemple, piqueu de mans en una sala i concentreu-vos en el so que es produeix a la sala. Proveu-ho en diferents sales.

El temps de reverberació (TR) d'un recinte mesura la persistència del so en una sala després de cessar la font. Concretament, el TR és el temps que passa des que es produeix un determinat so fins que aquest so disminueix a una milionèsima part del seu valor original (una caiguda de 60 dB). El TR ideal d'una sala depèn de quins actes es realitzin a la sala: concerts, discursos, entre d'altres. Així mateix, es diu que com més alt és el temps de reverberació, més "viva" és la sala. En sales en què el més important és la parla (conferències, classes, etc.) és millor un temps de reverberació inferior a 1 segon, mentre que en altres recintes (concerts) és preferible que sigui més gran que 1,5 segons.

Exemple

A continuació veiem els marges de valors recomanats de TR per a diferents tipus de sales:

Ús de la sala	TR (s)
Paraula parlada / teatre	0,4 - 1
Cinema	1 - 1,2
Música de cambra	1,3 - 1,7
Música simfònica	1,8 - 2
Església	2-3

Nota

Podeu veure exemples sonors de diferents temps de reverberació a la pàgina web d'Armstrong.

Així, doncs, per què ha de tenir un temps de reverberació baix, una sala dedicada a conferències?

El contingut freqüencial de les vocals és més ric a baixes freqüències, i les consonants presenten un contingut més gran d'altes freqüències. Així, doncs, com més alt és el temps de reverberació, més lenta és la caiguda energètica d'una vocal emesa. Aquest fet provoca un encavalcament temporal de la vocal amb la consonant emesa immediatament després. És el cas representat en la figura 12 ($f2 < f1$), i seguint la conclusió de l'apartat "Emmascarament del so", un to de baixa freqüència emmascara fàcilment un to d'alta freqüència.

Com hem vist en estudiar el mecanisme de fonació humana, la intel·ligibilitat de la paraula està altament lligada amb les consonants. Per tant, un excés de reverberació fa que les vocals emmascarin les consonants i en conseqüència la intel·ligibilitat de la paraula parlada decau.

Per a calcular el temps de reverberació s'utilitza la **fórmula de Sabine**:

$$\mathrm{TR} = 0{,}161\frac{V}{A_{tot}} \quad (s)$$

Lectura de la fórmula

V és el volum del recinte (en m^3)

A_{tot} és l'absorció total del recinte (m^2 sabine)

0,161 és el número que relaciona la velocitat del so (prenent com a medi de propagació l'aire) a la sala (m/s).

Per a calcular aquesta absorció total necessitem saber el coeficient d'absorció de totes les superfícies que componen el recinte. A partir d'aquí, tenim que:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \ldots + \alpha_n S_n$$

Lectura de la fórmula

α_n és el coeficient d'absorció.

Cada valor de S es correspon amb una superfície (paret, terra, sostre).

A_{tot} es mesura en m^2 sabine.

El temps de reverberació segons la fórmula de Sabine:

- No varia dins d'una mateixa sala.
- No depèn de la posició de la font.
- No depèn de la forma, ni la geometria de la sala ni tampoc la localització dels materials absorbents dins la sala.

Els problemes que presenta la fórmula de Sabine són els següents:

- En el cas d'una sala totalment reflectora, el TR és infinit.

- En el cas d'una sala totalment absorbent, el TR no és nul.

Per a resoldre aquests casos, es plantegen equacions com les d'Eyring i la de Millington. La diferència principal que aporten aquestes fórmules és que el descens de l'energia acústica quan s'atura la font es fa a salts (és a dir, de manera discontínua), mentre que per Sabine és lineal. Hi ha diversos treballs experimentals que comparen i discuteixen les diferents maneres de calcular el temps de reverberació.

La **fórmula d'Eyring** és la següent:

$$\mathrm{TR} = \frac{0{,}161V}{-S\ln(1-\bar{\alpha}_E)}$$

Lectura de la fórmula

$\bar{\alpha}_E$ és el coeficient d'absorció mitjà.

S és el total de la superfície.

El principal avantatge d'aquesta aproximació comparada amb la de Sabine és que té en compte el decaïment intermitent amb l'arribada de menys reflexions (noteu que incorpora el logaritme neperià). Per tant, aquesta fórmula és una aproximació millor al temps de reverberació quan la sala és menys reverberant.

Nota

Per a valors d'absorció baixos, la fórmula d'Eyring i la de Sabine coincideixen.

La fórmula de Millington és la següent:

$$\mathrm{TR} = \frac{0{,}161V}{-\sum_i S_i \ln(1-\bar{\alpha}_{E_i})}$$

Lectura de la fórmula

$\bar{\alpha}_{E_i}$ és el coeficient d'absorció mitjà per àrea de superfície S_i.

El principal avantatge d'aquesta fórmula respecte a la d'Eyring és que té en compte si dins d'una sala hi ha materials amb diferents coeficients d'absorció.

Cal tenir en compte que a la pràctica s'utilitzen preferentment Sabine o Eyring.

Lectura recomanada

De manera optativa llegiu l'article "Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption".

S'hi discuteix l'aplicació de la fórmula de Sabine i d'Eyring per a mesurar el temps de reverberació en una sala de concerts.

3.4. Eco

Entenem per *eco* la situació en la qual el **senyal acústic original s'ha extingit però encara es retorna so en forma de reflexions**. L'eco treu intel·ligibilitat, cosa que vol dir que el missatge es fa menys comprensible. Un eco pur és el que es genera a partir d'una única reflexió del so font. Els ecos en la natura es produeixen per la reflexió amb parets dures (poc absorbents) com les muntanyes sense vegetació o amb molt poca vegetació.

Exemple

Així, doncs, es pot generar eco al Grand Canyon si cridem "Hola!". L'efecte és que al cap d'un moment tornarem a sentir "Hola". Però si cridem "Hola!" al mig del mar no sentirem res.

El retard de l'eco (τ_{eco}) és donat per la distància extra (d_{extra}) que recorre la reflexió (respecte al so directe) dividida per la velocitat del so:

$$\tau_{eco} = \frac{d_{extra}}{c}$$

La pregunta en aquest punt pot ser la següent: quan es considera reverberació una reflexió i quan es considera eco?

Com hem dit en l'apartat anterior, es considera que qualsevol reflexió que arriba amb un retard inferior a 0,05 segons es pot integrar al so original i, per tant, no és un eco, sinó que és reverberació. Aquest llindar no és exacte, i a la pràctica o a la literatura es poden considerar vàlides altres quantitats.

Activitat

Ara generarem un eco amb l'Audacity. Gravem la nostra veu i després en generem un eco.

Enregistrament: seleccionem el botó d'enregistrament (el punt vermell) i diem: "Estem generant un eco." Parem l'enregistrament.

Generació d'un eco amb el programa Audacity

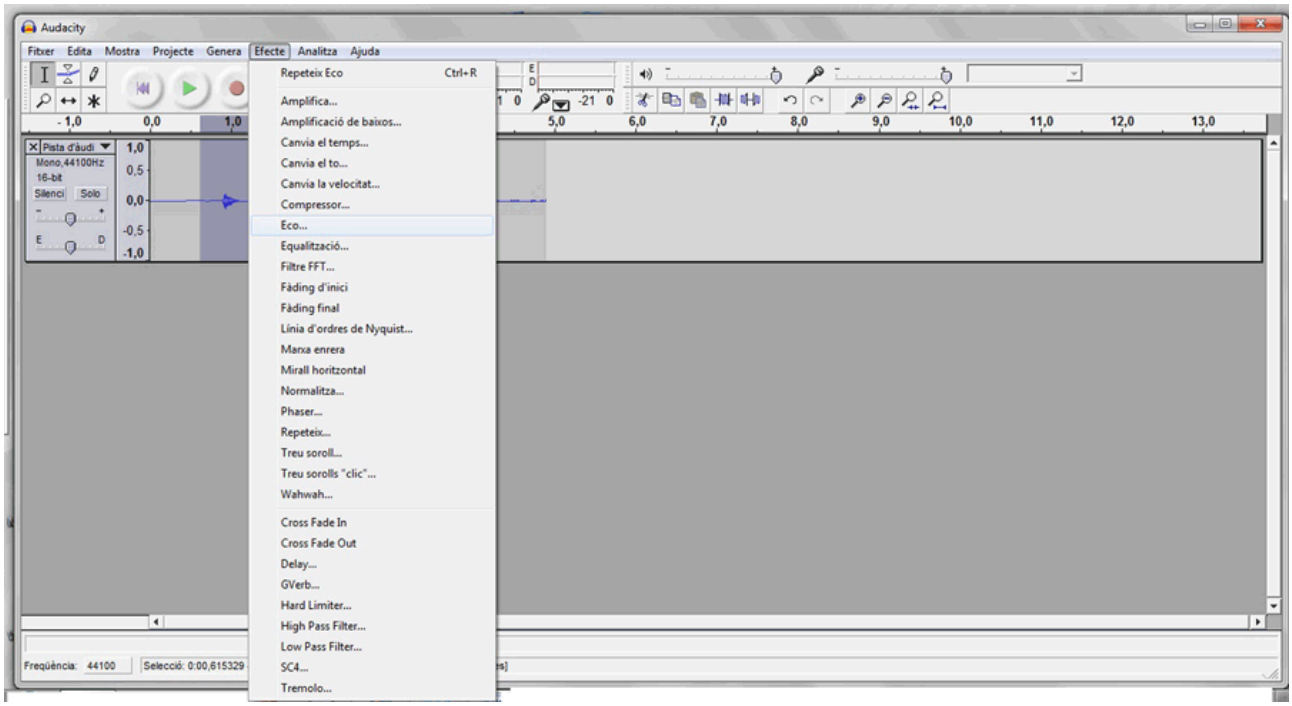

Figura 16. Generació d'un eco amb el programa Audacity

Generació d'eco: seleccionem el senyal que hem generat. Anem al menú *Efecte* i cliquem a *Eco* (tal com indica la figura 16). Podem triar el factor de decaïment (l'atenuació sobre el senyal d'eco) i el retard de l'eco. En el moment de decidir el retard podem comprovar el llindar entre eco i reverberació.

Un cop hem fet la nostra elecció podem provar l'efecte clicant a *Provar* o bé acceptar-lo mitjançant *D'acord*. Una vegada generat l'efecte, escoltem el nostre senyal i l'efecte prement el botó *Reproducció* (botó verd).

Nota

Una cambra d'ecos és una sala dissenyada especialment per a generar ecos. Normalment, aquestes cambres s'utilitzen per a gravar programes de televisió o de ràdio (per exemple, quan en una sèrie de televisió es vol generar una conversa amb l'efecte eco). Generalment,

aquestes sales es modelen com les clàssiques esglésies o coves, és a dir, amb parets molt reflectores.

Es considera font sonora tots els elements que són capaços d'emetre sons. Així, doncs, les persones actuem com a fonts sonores quan parlem, cantem o xiulem, entre altres accions.

El so emès per una font sonora es percep de manera diferent en recintes oberts o tancats. En el primer cas només es percep el so directe, mentre que en el segon cas, a més, s'ha de tenir en compte el so reflectit.

El so reflectit que arriba a l'oient separat en el temps del so original menys de 0,05 segons ajuda a la intel·ligibilitat. Aquest so reflectit l'anomenem *reverberació*. En cas contrari (el so reflectit arriba més tard de 0,05 segons a l'oient), es percep com un eco i perjudica la intel·ligibilitat.