

Acústica

Ones mecàniques i so

Marc Figueras Atienza

PID_00159122

Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-Compartir igual (BY-SA) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu modificar l'obra, reproduir-la, distribuir-la o comunicar-la públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), i sempre que l'obra derivada quedi subjecta a la mateixa llicència que el material original. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.ca>.

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Acústica	7
1.1. Les ones acústiques	7
1.2. Característiques del so	9
1.2.1. Els ultrasons	12
1.2.2. Els infrasons	13
1.3. Què hem après?	13
2. Percepció d'estímuls físics	15
2.1. Una descripció fenomenològica: la llei de Weber-Fechner	15
2.2. Fisiologia de l'oïda humana	16
2.3. Percepció del so	17
2.3.1. Nivell d'intensitat sonora i decibels	18
2.3.2. Sensació sonora i fons	20
2.4. Acústica musical	21
2.5. Què hem après?	23
3. Problemes resolts	24
3.1. Enunciats	24
3.2. Solucions	24
Resum	29
Exercicis d'autoavaluació	30
Solucionari	31
Glossari	31
Bibliografia	31

Introducció

Al mòdul “Ones” heu estudiat amb força detall les ones de manera general; heu vist com es pot descriure qualsevol mena d’ona i quines són les seves característiques principals.

Un pas lògic en aquest moment és començar a estudiar casos particulars amb més detall. Equipats amb els coneixements del mòdul “Ones” podeu passar a estudiar ara els diversos tipus d’ones i veure quines propietats específiques tenen. Això és el que fareu en aquest mòdul i en els següents. Començareu amb un estudi més detallat de les ones acústiques o sonores, és a dir, el so i, posteriorment, en els mòduls següents, fareu el mateix amb un altre tipus d’ones: les ones electromagnètiques i, en particular, la llum.

Les ones acústiques ens són especialment interessants perquè nosaltres, els éssers humans, som capaços de detectar i analitzar de manera natural ones acústiques d’unes determinades freqüències. Això ho aconseguim amb l’òrgan de l’oïda, que és un instrument molt fi per a analitzar intensitats i freqüències. De fet, és tan acurat en aquest aspecte que la nostra comunicació natural, la parla, es fa mitjançant ones acústiques. Això dóna peu a que valgui la pena fer un estudi, bàsicament qualitatiu, de com funciona l’oïda humana i de com els éssers humans percebem, en general, els estímuls físics que ens arriben.

Objectius

Els objectius que ha d'aconseguir l'estudiant una vegada treballats els continguts d'aquest mòdul són:

1. Saber quina mena d'ones són les ones acústiques i com es propaguen.
2. Conèixer i poder interpretar l'equació d'ones per a les ones sonores.
3. Relacionar el que s'estudia en aquest mòdul amb el que s'ha estudiat, de manera més general, al mòdul "Ones".
4. Poder caracteritzar una ona sonora mitjançant els seus paràmetres bàsics, com l'altura, la intensitat i el timbre.
5. Tenir una idea qualitativa dels ultrasons i els infrasons.
6. Saber com els éssers humans percebem els estímuls físics i com es pot caracteritzar aquest procés mitjançant lleis fenomenològiques.
7. Tenir uns coneixements bàsics sobre l'anatomia i la fisiologia de l'oïda humana.
8. Tenir clar el significat de les magnituds *intensitat*, *nivell d'intensitat sonora* i *intensitat percebuda*.
9. Tenir clara la interpretació física de la magnitud corresponent al nivell d'intensitat sonora: el decibel, i saber les limitacions que té per a expressar la sensació del so i com es pot corregir.

1. Acústica

Ara que ja estem equipats amb prou coneixements sobre les ones, podem passar a estudiar amb més detall un tipus particular d'ones: les ones acústiques o sonores, és a dir, el so.

Al mòdul "Ones" s'estudia amb força detall les ones de manera general.

1.1. Les ones acústiques

Les ones acústiques són ones mecàniques longitudinals que es poden propagar en sòlids i en fluids. Les ones mecàniques transversals no poden propagar-se en fluids, però sí en sòlids i, de vegades, també es coneixen amb el nom d'*ones acústiques*. En aquest estudi, però, ens limitarem a les ones acústiques longitudinals, que són les més habituals.

Les ones acústiques es tracten breument al subapartat 1.2. del mòdul "Ones".

Es consideren com a **so** les ones mecàniques longitudinals amb una freqüència compresa entre 20 i 20.000 Hz i una intensitat superior a uns 10^{-12} W/m², que són les que pot detectar l'oïda humana. Les ones mecàniques de freqüències superiors són els **ultrasons**, mentre que les de freqüències inferiors són els **infrasons**.

Per a estudiar les ones acústiques començarem fent-nos les preguntes següents: què passa quan es produeix un so? què vol dir exactament *produir un so*? quins són els elements importants per a descriure la propagació del so? com es produeix el fenomen?

Bàsicament el que passa quan es produeix un so és que un objecte en un punt de l'espai es mou i aquest moviment provoca una pertorbació en l'aire que l'envolta. Ara bé, si l'objecte es mou lentament, l'aire simplement flueix al seu voltant i no provoca cap pertorbació que es propagui. L'objecte s'ha de moure ràpidament, de fet prou ràpid com perquè l'aire no tingui temps de fluir al voltant de l'objecte. Aquesta pertorbació es propaga en forma d'ona i eventualment pot arribar a algun dispositiu que la detecti, com per exemple la nostra oïda.

Molt bé, però de quin tipus de pertorbació estem parlant? En el cas del so es tracta d'un desplaçament de l'aire (o, més ben dit, de les molècules dels compostos que formen l'aire): les molècules de l'aire es desplacen i s'acumulen en una zona, després tornen a "desacumular-se" i així successivament, en un

Composició de l'aire atmosfèric

L'aire normal atmosfèric és una barreja de diversos compostos químics. En concret, està format per un 78% de molècules de nitrogen (N₂), un 21% de molècules d'oxigen (O₂), un 1% d'argó (Ar) i entre un 1% i un 4% de molècules d'aigua (H₂O), a més de moltes altres molècules en quantitats molt petites.

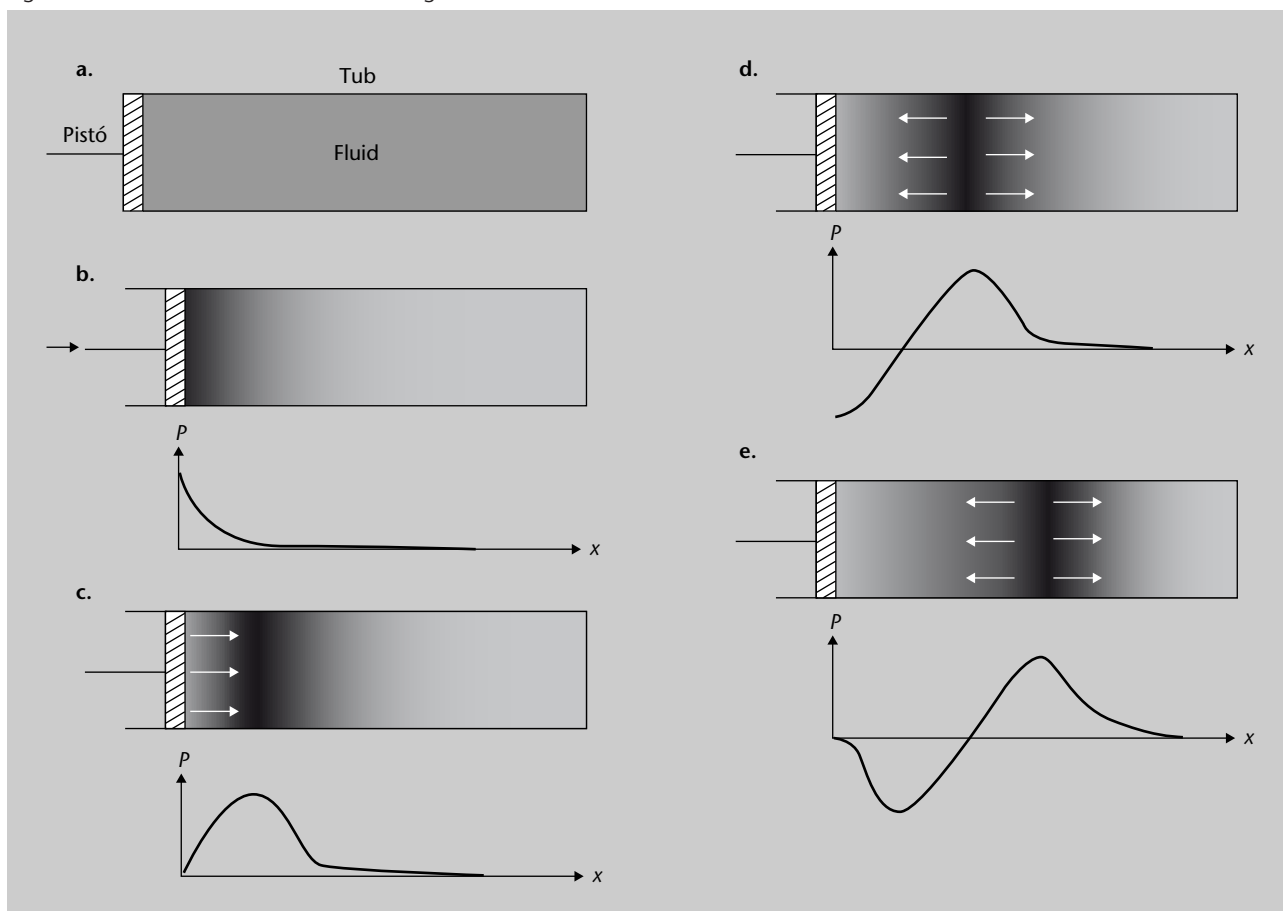
moviment vibratori. Aquest desplaçament de l'aire està associat a un canvi de densitat i a un canvi de pressió. Per això dèiem fa un moment que l'objecte que provoca el so s'ha de moure prou ràpidament: si no ho fa, l'aire simplement flueix al seu voltant i no hi ha cap canvi de densitat ni de pressió al voltant de l'objecte.

A la figura 1 podeu veure un dispositiu simple que genera ones mecàniques longitudinals en un fluid, com el so. Tenim un pistó que es pot moure endavant i endarrere en un tub. A la figura 1a el pistó està en repòs i no passa res. A la figura 1b el pistó es mou endavant ràpidament i provoca un augment sobtat de densitat i de pressió a la zona immediatament adjacent del fluid (sota el dibuix del tub podeu veure una gràfica que indica la pressió del fluid en funció de la distància x al pistó). En les figures següents 1c, 1d i 1e podeu veure que aquest augment de pressió i de densitat es va propagant pel fluid i, alhora, crea una zona de menor pressió i densitat al darrere. Hem creat un pols i, si tingués la freqüència adequada, podríem sentir-lo com una mena de cop, una petita "explosió". Si el pistó seguís movent-se endavant i endarrere generariem una ona més o menys harmònica i podríem sentir un so més o menys continu.

Figura 1

Pistó que es pot moure endavant i endarrere en un tub i generar ones mecàniques longitudinals. Sota el tub podeu veure una gràfica que indica la pressió del fluid P en funció de la distància x al pistó.
a. Pistó en repòs: no hi ha cap canvi de pressió al fluid.
b. El pistó es mou endavant ràpidament i provoca un augment de densitat i de pressió a la zona immediatament adjacent del fluid.
c., d. i e. Aquest augment de pressió i densitat es va propagant pel fluid i, alhora, crea una zona de menor pressió i densitat al darrere.

Figura 1. Generació d'una ona mecànica longitudinal



A partir de tot el que acabem de dir podem trobar l'equació d'ones per al so. Com que la derivació d'aquesta equació d'ones implica diversos conceptes de termodinàmica que no estan directament relacionats amb el moviment on-

dulatori i ens durien massa lluny en el nostre estudi, la deixem com a lectura complementària.

El resultat del càlcul de l'equació d'ones per al so és:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

on B és el mòdul de compressibilitat del medi per on es propaga l'ona, p és la pressió i ρ (la lletra grega rho minúscula) és la densitat del medi.

El mòdul de compressibilitat

El mòdul de compressibilitat, o mòdul de volum, B , es defineix com la pressió necessària per a produir un canvi unitari de volum. Per a l'acer, per exemple, $B \approx 160$ GPa i per a l'aigua $B \approx 2,2$ GPa, mentre que per a l'aire, en un procés adiabàtic (és a dir, sense intercanvi de calor), $B = 0,142$ GPa.

Si recordeu del mòdul "Ones" l'equació que ens relaciona la velocitat de propagació de les ones, v , amb les característiques del medi per on es propaga, aquesta velocitat serà:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

A la taula 1 us donem uns quants valors de la velocitat del so en diferents medis, per tal que us pogueu fer una idea de les velocitats implicades.

Taula 1. Velocitat del so en diversos medis

Medi	Velocitat del so (m/s)
Aire (0 °C)	332
Aire (20 °C)	344
Heli (20 °C)	1.020
Aigua destil·lada (20 °C)	1.480
Aigua de mar (20 °C)	1.470
Etanol (20 °C)	1.165
Oli d'oliva (32,5 °C)	1.381
Plom	1.200
Coure	3.500
Ferro	5.000
Alumini	5.200
Titani	6.070
Poliestirè	1.800
PVC tou	80
Formigó	3.100

1.2. Característiques del so

Tal com ja hem comentat al subapartat 1.1., es consideren com a **so** les ones mecàniques longitudinals amb una freqüència d'entre 20 i 20.000 Hz i una

Lectura complementària

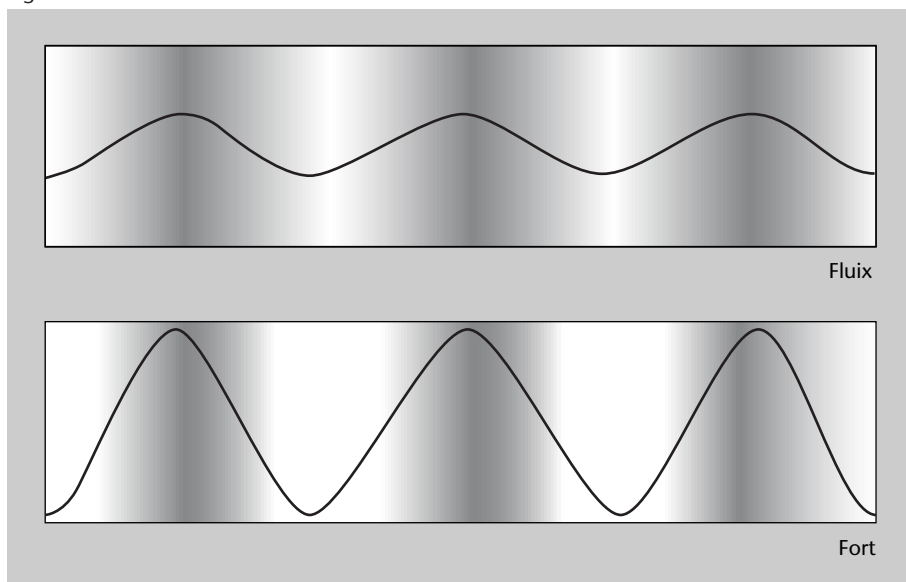
Us recomanem la lectura dels apartats 47-2 i 47-3 de Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. (1963) *The Feynman lectures on Physics*, on es dedueix l'equació d'ones per a les ones sonores detalladament. També podeu trobar aquesta deducció, explicada de manera més esquemàtica, al capítol 2 de Isalgué Buxeda, A. (1995). *Física de la llum i el so*.

intensitat superior a uns 10^{-12} W/m², que són les que pot detectar l'oïda humana. Les ones mecàniques de freqüències superiors són els **ultrasons**, mentre que les de freqüències inferiors són els **infrasons**.

Un so d'una freqüència determinada es pot caracteritzar a partir d'uns paràmetres, que normalment són la intensitat, el to i el timbre. Vegem cadascuna d'aquestes magnituds:

- La **intensitat** d'un so, també anomenada a vegades **volum**, és la potència per unitat d'àrea de l'ona sonora corresponent a aquell so en el punt on es mesura. Els éssers humans podem detectar ones sonores a partir d'una intensitat de 10^{-12} W/m², mentre que quan s'arriba al voltant d'1 W/m² comença la sensació de dolor en l'oïda humana. A la figura 2 podeu veure representades dues ones sonores de la mateixa freqüència però diferent amplitud i, per tant, diferent potència i intensitat.

Figura 2. Intensitat del so



- El **to** o **altura** indica la freqüència fonamental del so. En funció de l'altura, els sons s'ordenen de més greus o baixos (freqüències petites) a més aguts o alts (freqüències grans). A la figura 3 podeu veure representades dues ones sonores de la mateixa intensitat però diferent freqüència i, per tant, diferent to o altura.
- El **timbre**, també anomenat **qualitat** i algunes vegades **color**, indica tots aquells factors que componen un so i que permeten distingir-lo d'altres sons que tenen la mateixa altura i intensitat. Per exemple, un piano i una trompeta poden estar emetent exactament la mateixa nota i amb la mateixa intensitat, però els dos sons són clarament diferents i podem dir quin és quin; això és degut al timbre de cadascun dels sons. Sovint es diu que el timbre és una característica "calaix de sastre", on s'inclouen molts factors. Certament, el factor més determinant en el timbre són els diferents harmò-

Podeu repassar la definició d'intensitat amb més detall al mòdul "Ones".



Figura 2

Dues ones sonores de la mateixa freqüència però amb diferent intensitat: l'ona superior és més fluixa (menor intensitat) i la inferior més forta (major intensitat).

Altura i intensitat

No s'ha de confondre l'altura amb la intensitat, malgrat que habitualment diguem "la ràdio està molt alta" o "puja la tele, que se sent molt baix"; en aquests casos en realitat ens referim a la intensitat, no pas a l'altura, que indica la freqüència.

El soroll

El concepte de *soroll* és relativament difícil de definir, perquè és una idea bàsicament qualitativa. Sovint es considera soroll qualsevol so no desitjat que s'afegeix, per causes diverses, al so que estem estudiant.

nics que formen un so (vegeu la figura 4), però també hi intervenen el grau de soroll que conté, el procés temporal en la generació del so (per exemple, si triga molt o poc a arribar a la intensitat màxima) i altres elements més subtils que s'estudien en acústica.



Els harmònics s'esmenten en parlar d'ones estacionàries en el subapartat 5.2. del mòdul "Ones".

Figura 3. Altura del so

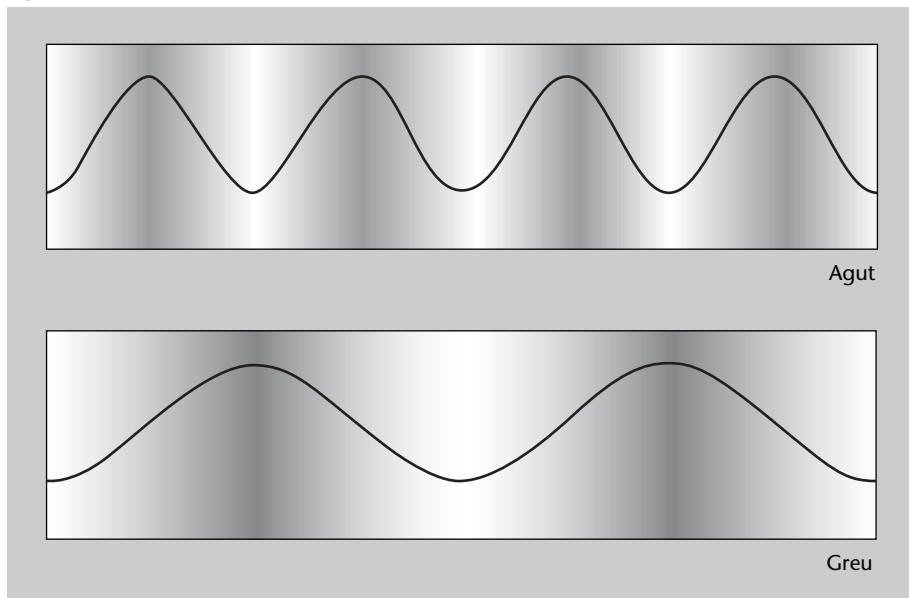


Figura 3

Dues ones sonores de diferent altura: l'ona superior és més aguda (freqüència més alta) i la inferior més greu (freqüència més baixa).

Figura 4. Timbre de diferents instruments

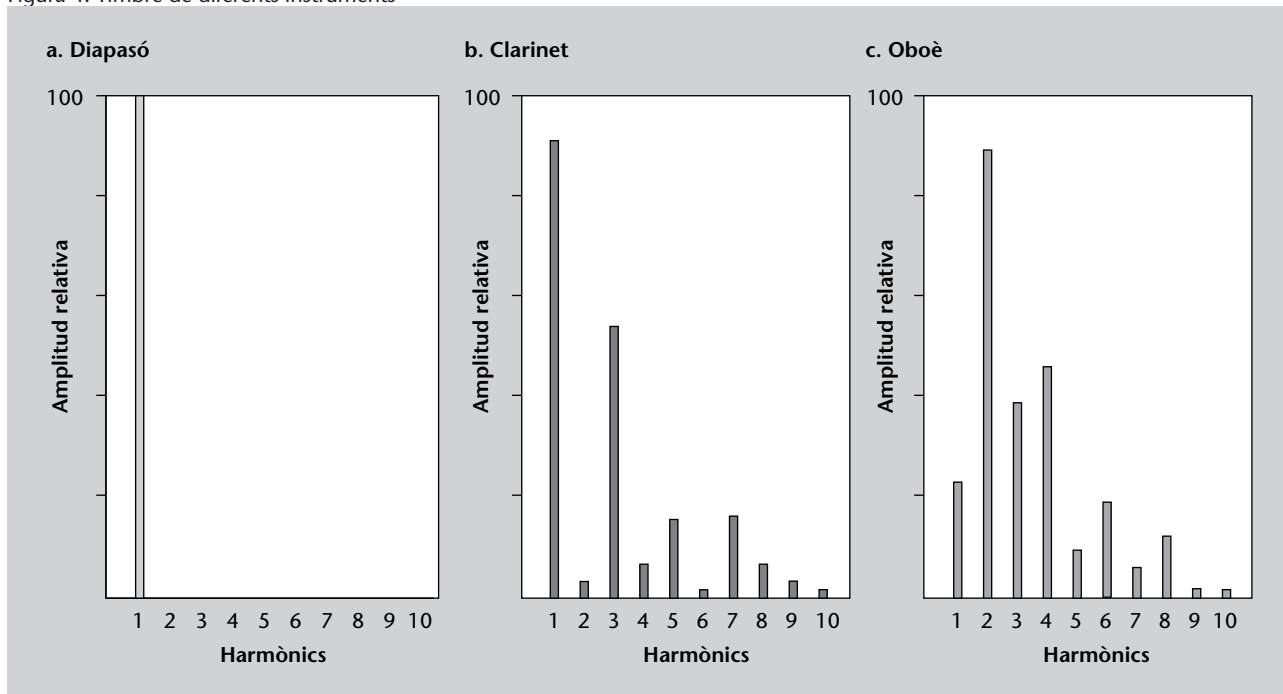


Figura 4

Representació de l'amplitud relativa dels diversos harmònics presents en el so de tres instruments diferents:

- a. un diapasó, que sempre dona un so "pur", sense cap harmònic, només amb la freqüència fonamental;
- b. un clarinet;
- c. un oboè.

Fixeu-vos que aquests dos instruments, com qualsevol altre generador de so, no emeten només a la freqüència fonamental, sinó que també, en més o menys amplitud, als diversos harmònics. Bàsicament és el diferent contingut d'harmònics el que dóna a cada so la seva particularitat i permet distingir-lo d'un altre, malgrat que s'emetin amb la mateixa altura i la mateixa intensitat.

Una vegada caracteritzat el so, mitjançant la sèrie de paràmetres que acabem de veure, potser val la pena aturar-se un moment a comentar alguna cosa sobre els ultrasons i els infrasons que, malgrat que no els poguem sentir, tenen característiques equivalents als sons audibles.

1.2.1. Els ultrasons

Els ultrasons, com ja hem comentat, són ones sonores amb una freqüència superior a 20 MHz. Actualment els ultrasons s'utilitzen en moltes aplicacions industrials, però sobretot, ens és especialment familiar el seu ús en medicina, en les ecografies.

En les ecografies s'utilitzen ultrasons d'entre 1 i 20 MHz, que s'emeten cap al pacient i es detecten les ones reflectides en cada part de l'interior del cos (el procés de formació de la imatge ecogràfica final és més complex, però aquí no entrarem a detallar-lo). És possible que molts hàgiu vist alguna ecografia d'un fetus, que són les més habituals, però la tècnica també s'utilitza en cardiologia, en gastroenterologia i en urologia, entre altres camps.

En el cas dels ultrasons, val la pena comentar breument l'energia que transporten, perquè, com veurem, pot arribar a ser molt superior a l'energia transportada pels sons audibles. L'energia transportada per una ona és proporcional al quadrat de la seva freqüència, d'acord amb la relació:

$$e = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (3)$$

on e és la densitat d'energia, ρ és la densitat del medi, ω és la freqüència angular i A és l'amplitud de l'ona. A partir d'aquesta expressió podeu veure que els ultrasons, que tenen freqüències (ω) més altes que els sons audibles, transporten molta més energia (e), ja que ω està elevada al quadrat. Quan s'utilitzen ultrasons per a ecografia s'ha de procurar no utilitzar gaire energia, per tal de no danyar els teixits; llavors es compensa la gran energia provocada per la major freqüència dels ultrasons disminuint-ne l'amplitud (A). Aquesta energia, però, també es pot utilitzar al nostre favor de manera terapèutica, i no només diagnòstica, per a tractar determinats problemes mèdics. Un exemple n'és l'ús d'ultrasons (ara ja d'amplitud força més alta) per a trencar i desfer pedres al ronyó, tècnica anomenada *litotripsia*.

D'altra banda, molts animals són capaços de generar i captar ultrasons (recordeu que posar la frontera entre so i ultrasò a 20.000 Hz és simplement conveniència nostra, no hi ha cap mena de diferència intrínseca entre un so i

Ultrasonography

El terme anglès per a la tècnica de l'ecografia és *ultrasonography*, que a vegades es tradueix amb el poc habitual *ultrasonografia*.

En l'apartat 6 sobre l'efecte Doppler del mòdul "Ones" teniu un exemple d'aplicació de les ecografies: l'ecocardiografia.

En l'apartat 7 del mòdul "Ones" s'estudia l'energia transportada per una ona.

ρ és la lletra grega rho minúscula, mentre que ω és la lletra grega omega minúscula.

un ultrasò, excepte la freqüència). El més conegut és segurament el rat-penat, que té un límit superior d'audició als 110.000 Hz i utilitza hàbilment els ultrasons com a eina de localització i orientació. Altres menys coneguts són els ratolins, que arriben a captar 90.000 Hz, i diversos mamífers marins, com el subordre dels Odontoceti (dofins, orques, marsopes i catxalots) que també utilitzen l'ecolocalització, com els rats penats.

1.2.2. Els infrasons

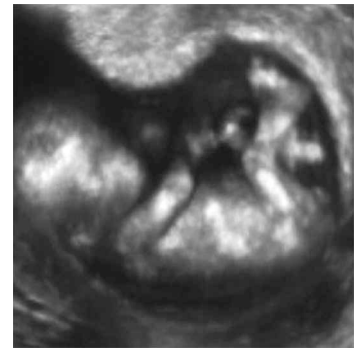
Els infrasons són les ones acústiques de freqüències inferiors a 20 Hz i, dins del camp de la infraacústica, s'estudien fins a freqüències tan baixes com 0,001 Hz. Malgrat que les seves aplicacions no són tan conegudes com les dels ultrasons, s'utilitzen sovint en geologia per a fer prospeccions del terreny i per a seguiments de terratrèmols. Un gran avantatge dels infrasons és que, a diferència dels ultrasons, poden arribar a grans distàncies amb molt poca dissipació.

Els infrasons es generen molt sovint en la natura quan es produeixen allaus, terratrèmols o erupcions volcàniques, i també en els salts d'aigua i durant el trencament d'icebergs. Cal destacar que es coneix una vibració d'infrasons d'uns 0,2 Hz que es detecta al mar i que sembla que està produïda per interaccions complexes entre les ones superficials dels oceans. També és molt interessant un tipus d'infrason d'uns 3 a 7 mHz, descobert fa uns 10 anys i detectable arreu del planeta, que sembla estar produït per la transferència d'energia de l'atmosfera cap a les masses continentals mitjançant, també, ones superficials oceàniques. Però a banda de les fonts naturals d'infrasons, també hi ha fonts artificials, com les explosions químiques i nuclears, les grans màquines dièsel, les turbines eòliques i els grans altaveus de subgreus (els *subwoofers*).

Molts animals, com ara balenes, elefants i hipopòtams, entre d'altres, també utilitzen infrasons per a comunicar-se. En els éssers humans, diversos experiments assenyalen que infrasons d'entre 10 i 19 Hz (just per sota del llindar d'audició, doncs) provoquen una sensació desagradable i, fins i tot, de por. El fet que la freqüència de 18 Hz provoqui ressonàncies mecàniques al globus ocular humà també sembla estar relacionat amb visions i al·lucinacions en determinades circumstàncies.

1.3. Què hem après?

En aquest apartat hem vist el primer exemple d'una aplicació concreta de tot allò estudiat al mòdul "Ones". Els diversos conceptes estudiats en aquell mòdul els hem començat a utilitzar aquí per a un cas concret, el de les ones mecàniques longitudinals. Encara més, hem vist que un tipus concret d'aquestes ones, les que tenen una freqüència d'entre 20 i 20.000 Hz i una intensitat superior a 10^{-12} W/m², és precisament el que anomenem so.



Ecografia 3D: L'ecografia tridimensional és una tècnica ecogràfica en què els ultrasons s'emeten en diversos angles respecte al pacient, per a poder reconstruir-ne posteriorment una imatge en tres dimensions.

Atenció! No confongueu els mHz (mil·liherztz) amb els MHz (megahertz). Un mil·liherztz és igual a 0,001 Hz, mentre que un megahertz és 10^6 Hz.

Una vegada ben establerta una definició clara de so, hem passat a veure les característiques amb què el podem estudiar: l'altura, la intensitat i el timbre, que hem comentat breument. Finalment, amb la intenció de tenir una visió una mica més general de les ones mecàniques longitudinals, hem fet una introducció als ultrasons i als infrasons, que no podem sentir directament amb la nostra oïda però que podem detectar per altres mitjans.

Tot aquest estudi, però, ha quedat encara poc relacionat amb la percepció que nosaltres, els éssers humans, tenim del so. Això és el que farem a continuació. Ara que ja sabem què és el so i com el podem descriure, veurem com el percebem nosaltres i com podem quantificar aquesta percepció.

2. Percepció d'estímuls físics

Fins ara hem estat parlant del so i les seves característiques, però encara cal determinar com nosaltres, els éssers humans, percebem aquest so. Si dupliquem la intensitat (i, per tant, la potència) d'un so nosaltres el sentirem (el percebrem) el doble de fort? o potser no tant? o potser més? En altres paraules, la relació entre un estímul físic i la sensació que ens produeix és lineal o té un altre comportament?

2.1. Una descripció fenomenològica: la llei de Weber-Fechner

L'experiència posa de manifest que la relació entre la magnitud d'un estímul i la sensació percebuda no és lineal, sinó que en molts casos aquesta relació és logarítmica. Això vol dir que un canvi en la sensació percebuda no és proporcional a un canvi absolut de l'estímul, sinó a un canvi relatiu; és a dir, que, com més fort sigui l'estímul, més gran ha de ser la seva variació perquè nosaltres en percebem un canvi.

Matemàticament això es pot expressar de la manera següent: si S és la sensació i ΔS la seva variació, i si I és l'estímul i ΔI la seva variació, es compleix

$$\Delta S \propto \frac{\Delta I}{I} \quad (4)$$

La integració d'aquesta relació ens dona la relació logarítmica entre estímul i sensació percebuda:

$$S = A \ln \frac{I}{I_0} \quad (5)$$

on A és una constant que cal determinar en cada cas concret i I_0 és una intensitat de l'estímul que es pren com a referència (per exemple, la intensitat mínima a partir de la qual es comença a percebre la sensació). Aquesta relació es coneix com a *llei de Weber-Fechner* i ens està dient que si duplico l'estímul no el notaré "el doble de fort", si triplico l'estímul no el notaré "el triple de fort", sinó bastant menys. En concret, l'equació 5 ens diu que la sensació és proporcional al logaritme de l'estímul: si duplico la intensitat de l'estímul només el notaré "més fort" en un factor logaritme de dos, $\ln 2$; si triplico la intensitat de l'estímul el notaré més fort només en un factor logaritme de tres, $\ln 3$; etc.

Linealitat

Una relació entre dues magnituds és lineal quan una és directament proporcional a l'altra; és a dir, si una magnitud augmenta el doble, l'altra també ho farà el doble. Aquest fet es pot expressar matemàticament com $a = kb$, on a i b són les dues magnituds i k és una constant de proporcionalitat.

Recordeu

Recordeu que Δ és la lletra grega delta majúscula i s'acostuma a utilitzar per a indicar una variació o un canvi. Recordeu també que \propto és el símbol per a expressar "proporcional a"; s'assembla a la lletra grega alfa minúscula (α), però no són iguals.

Relacions logarítmiques

Una relació entre dues magnituds és logarítmica quan una és proporcional al logaritme de l'altra. Aquest fet es pot expressar matemàticament com $a = k \ln b$, on a i b són les dues magnituds, k és una constant de proporcionalitat i \ln és el logaritme neperià (hem posat el logaritme neperià perquè és el més habitual, però qualsevol altre logaritme, com el decimal, també serveix).

La **lleï de Weber-Fechner** estableix que els éssers humans perceben les sensacions de manera que una variació de la sensació equival a un canvi relatiu de l'estímul; és a dir, que existeix una relació logarítmica entre estímul i sensació percebuda.

Cal tenir present que, malgrat la denominació de *lleï*, només es tracta d'una relació empírica aproximada, sense caràcter absolutament general. Descriu prou bé les sensacions que percebem associades a l'altura dels sons i a la intensitat dels sons i també, fora ja del camp de l'acústica, descriu bé les sensacions associades al pes i a la lluminositat.

Aquesta dependència logarítmica és la causa que la unitat de sensació d'intensitat sonora, el decibel, sigui logarítmica, com veurem amb més detall en el subapartat 2.3., igual que també passa amb l'escala de magnituds visuals en astronomia.

Ara que ja hem vist, de manera general, com els éssers humans percebem els estímuls físics, ens ocuparem del cas particular que estem estudiant en aquest mòdul, el so. I per això començarem estudiant breument l'òrgan que ens permet percebre el so: l'oïda.

2.2. Fisiologia de l'oïda humana

Molts éssers vius disposen d'òrgans que els permeten detectar les ones mecàniques. Cada espècie és capaç de sentir un determinat interval d'intensitat i de freqüència. Les freqüències de les ones mecàniques que detecta l'oïda humana són les freqüències sonores o acústiques i estan compreses entre 20 Hz i 20 kHz, aproximadament, com ja hem vist.

S'ha de tenir present que l'orella és un instrument d'anàlisi de freqüències i d'intensitats que transmet aquesta informació al cervell, que és l'òrgan on s'interpreten els sons rebuts a l'orella. És en aquest sentit que podem dir que qui realment "sent" és el cervell; per això, en algunes malalties es produeixen els anomenats *acúfens* o *tinnitus*, sensacions sonores interpretades pel cervell però que no corresponen a cap estímul físic.

Internament, l'orella de tots els mamífers és molt semblant, malgrat les considerables diferències externes. En tots els casos es pot dividir en tres parts (vegeu la figura 5):

- 1) l'orella externa, formada pel pavelló auditiu, el conducte auditiu i la membrana timpànica;
- 2) l'orella mitjana, formada per un conjunt d'ossets: el martell, l'enclusa i l'estrep;
- 3) l'orella interna, amb la còclea i els conductes semicirculars.

La lleï de Stevens

Una altra relació proposada entre estímul i sensació és la lleï de Stevens, una lleï potencial del tipus $S \propto AI^\alpha$, és a dir, en què la sensació és proporcional a l'estímul elevat a una certa potència α , que depèn de cada tipus d'estímul.

Relacions empíriques

Una relació empírica és la que s'obté exclusivament a partir de dades experimentals, no a partir de raonaments teòrics bàsics.

Figura 5. L'òïda humana

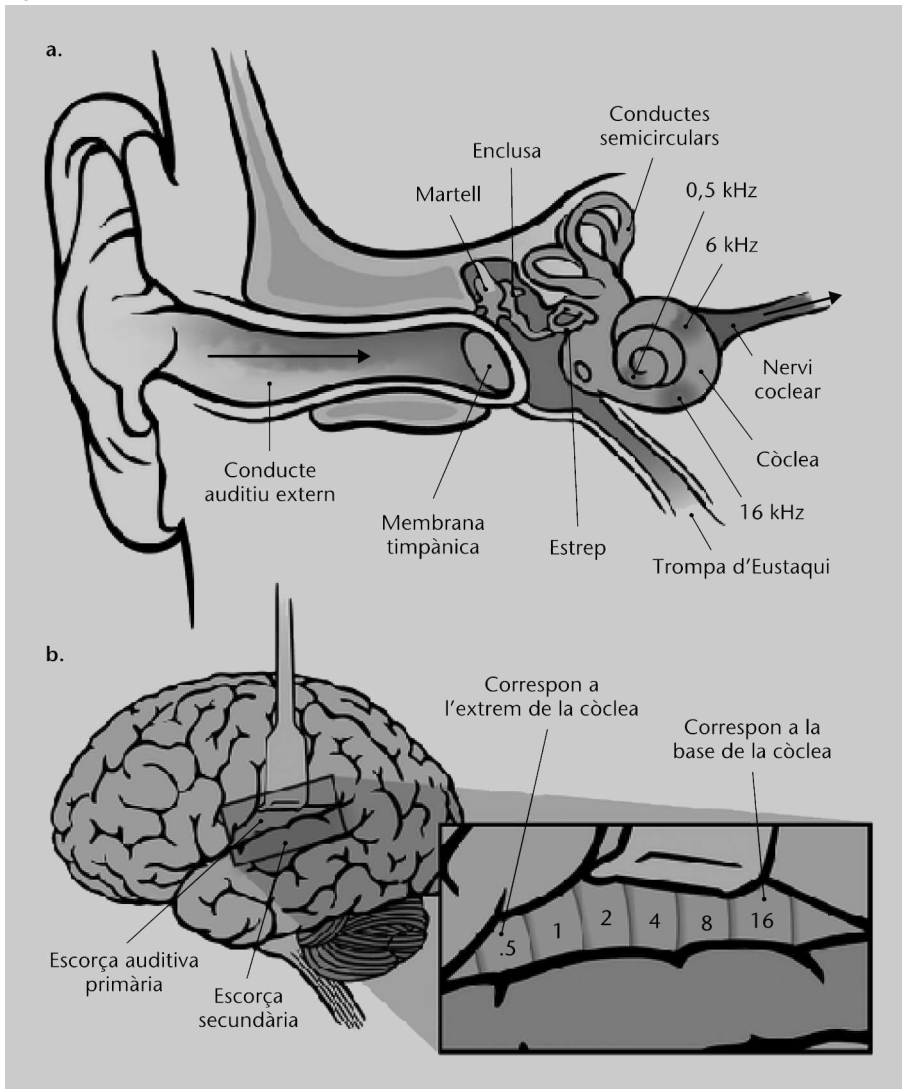


Figura 5

a. Estructura general de l'orella humana. A la còclea els diferents components de freqüència d'un so provoquen ressonàncies a diferents punts de la membrana basilar; es mostren els llocs aproximats per a les ressonàncies a 16, 6 i 0,5 kHz. La informació es transmet al cervell mitjançant el nervi vestibular i el nervi coclear, les dues branques del VIII parell cranial o nervi auditiu.

b. Esquema del cervell amb l'escorça auditiva. Fixeu-vos que l'escorça primària conté un *mapeig* (el mapa tonotòpic) de la distribució de ressonàncies a la còclea.

Les ones sonores entren a l'orella pel pavelló auditiu i segueixen pel conducte auditiu. El so arriba a la membrana timpànica, connectada als tres ossets anomenats martell, enclusa i estrep, que en transmeten les vibracions a la finestra coclear situada a la base de la còclea. Els tres ossets actuen com un filtre passabaix, ja que per sobre de 20.000 Hz no poden transmetre les vibracions. La còclea està plena de líquid i la membrana basilar s'hi disposa longitudinalment, amb un gran nombre de fibres. Els diferents components de freqüència d'un so provoquen ressonàncies en diferents punts de la membrana basilar, ja que la longitud de les fibres augmenta progressivament a mesura que ens endinsem per la còclea. Aquesta vibració de les fibres permet transmetre al cervell informació sobre la intensitat i la composició de freqüències del so.

"Sentir" ultrasons

En alguns casos podem "sentir" ultrasons si aquests es transmeten directament pels ossos del crani i arriben a la còclea, sense passar per l'orella mitjana, que, com hem dit, actua de filtre passabaix.

2.3. Percepció del so

Ja hem vist que, segons la llei de Weber-Fechner la nostra percepció de la intensitat sonora és logarítmica, amb la forma de l'equació 5:

$$S = A \ln \frac{I}{I_0} \tag{6}$$

La llei de Weber-Fechner s'estudia en el subapartat 2.1.

on recordeu que A és una constant que cal determinar en cada cas concret i I_0 és una intensitat de l'estímul que es pren com a referència. Per a determinar les constants A i I_0 suposem que l'origen de les sensacions, $S = 0$, correspon a la intensitat mínima que podem percebre, l'anomenat **llindar d'audició**. El problema és que aquesta intensitat mínima és diferent per a cada freqüència audible (per a freqüències baixes la intensitat mínima audible és força més elevada que per a freqüències altes). Per convenció, doncs, s'ha decidit establir com a I_0 el llindar d'audició per a una freqüència de 1.000 Hz, que és:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

2.3.1. Nivell d'intensitat sonora i decibels

L'elecció de la constant A en l'equació 5 és absolutament arbitrària i, així, també per convenció es defineix el **nivell d'intensitat sonora**, N_I , com

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (8)$$

la unitat de mesura de la qual és el **decibel** (dB). A vegades també s'utilitza, en lloc de la intensitat, la pressió sonora, p , que dóna lloc a la definició del **nivell de pressió sonora** com

$$N_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

la unitat de mesura de la qual també és el decibel (dB) i en què la pressió llindar s'escull com a $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. De vegades, per a distingir els dos casos, s'escriu dB(SPL)* quan els decibels es refereixen al nivell de pressió sonora i dB(SIL)** quan els decibels es refereixen al nivell d'intensitat sonora.

Fixeu-vos que la pressió correspon a l'amplitud de l'ona sonora i que, per tant, la intensitat és proporcional al quadrat de la pressió (recordeu que les intensitats sempre són proporcionals als quadrats de les amplituds), és a dir,

$$I \propto p^2 \quad (10)$$

Com que $\log p^2 = 2 \log p$, veiem que les equacions 8 i 9 són equivalents.

A la taula 2 mostrem alguns nivells d'intensitat sonora de diversos sons habituals.

Definicions per convenció

Quan diem que un valor o una expressió s'ha establert per convenció, cal entendre que és una decisió arbitrària escollida entre moltes altres possibles per la seva comoditat o per altres raons. En el cas que ens ocupa es podria haver escollit com a I_0 el llindar d'audició no a 1.000 Hz sinó a 5.000 Hz o a 100 Hz, per exemple.

Atenció! No heu de confondre la intensitat amb el nivell d'intensitat! No són el mateix: una i l'altra estan relacionades per l'equació 8.

El decibel

El decibel no s'usa només en acústica; també és molt habitual, per exemple, en electrònica, en teoria de control i en radiometria i antenes.

Compte! No confongueu el logaritme neperià (\ln) amb el logaritme en base 10 (\log).

* SPL, de l'anglès *sound pressure level*
** SIL, de l'anglès *sound intensity level*

Taula 2. Nivells d'intensitat sonora

Font	I (W/m ²)	Nivell d'intensitat (dB)
Llindar d'audició	10^{-12}	0
Respiració normal	10^{-11}	10
Remor de fulles	10^{-10}	20
Conversa en veu baixa	10^{-9}	30
Conversa normal	10^{-6}	60
Trànsit dens al carrer	10^{-5}	70
Soroll de construcció	0,1	110
Llindar de dolor	1	120
Enlairament proper d'un avió	1.000	150

Exemple. Nivell d'intensitat sonora

El nivell d'intensitat sonora que produeix un cotxe de carreres en el punt on estan situats els espectadors més propers a la pista és de 89 dB. El nivell d'intensitat sonora d'un altre cotxe en el mateix punt és de 92 dB. Quin és el nivell d'intensitat sonora que reben els espectadors quan els dos cotxes passen junts per aquest mateix punt?

Solució

Els nivells d'intensitat sonora no els podem sumar directament. El que podem sumar són les intensitats i llavors, amb la intensitat total, trobar el nivell d'intensitat sonora total. Fem-ho!

Acabem de veure que el nivell d'intensitat sonora s'expressa segons l'equació 8:

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (11)$$

En aquest cas, de totes les variables de l'equació, coneixem:

- el nivell d'intensitat de cadascun dels cotxes, que indicarem amb A i B :
 - $N_{I,A} = 89$ dB
 - $N_{I,B} = 92$ dB
- la intensitat de referència (per definició, recordeu l'equació 7): $I_0 = 10^{-12}$ W/m².

D'aquí podem aïllar I :

$$\frac{N_I}{10} = \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow I = I_0 \cdot 10^{N_I/10} \quad (12)$$

i substituint els valors per a cada cotxe, trobem:

- $I_A = 7,9 \cdot 10^{-4}$ W/m²
- $I_B = 1,6 \cdot 10^{-3}$ W/m²

Ara sí que podem sumar intensitats, per a obtenir la intensitat total produïda pels dos cotxes conjuntament, I_T :

$$I_T = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

I amb aquest resultat ja podem calcular el nivell d'intensitat sonora total en decibels, N_{IT} :

$$N_{IT} = 10 \log \frac{I_T}{I_0} = 93,8 \text{ dB} \quad (14)$$

2.3.2. Sensació sonora i fons

Ja hem comentat que la sensació sonora depèn de la freqüència, però el nivell d'intensitat sonora és únic: per a una intensitat determinada obtenim un nivell d'intensitat únic. En canvi, nosaltres no percebem la mateixa sensació sonora per a un mateix nivell d'intensitat sonora a diferents freqüències. Per exemple, els sons molt greus han de ser realment molt intensos perquè els no-tem tan molestos com un so més agut molt menys intens. En altres paraules, els aguts molesten més que els greus i aquests, perquè molestin tant com un agut, han de ser molt intensos.

Per aquesta raó es defineix la unitat anomenada **fon** (símbol phon), que mesura el nivell d'intensitat percebuda, la sensació sonora, de manera que 1 fon és igual a 1 dB(SPL) a una freqüència de 1.000 Hz. Així, a una freqüència de 1.000 Hz, 20 fons equivalen a 20 dB(SPL), 65 fons equivalen a 65 dB(SPL), etc.

Fixeu-vos en la figura 6. En l'eix de les *x* representem la freqüència d'un so en hertzs i en l'eix de les *y*, el nivell de pressió sonora en decibels. Per la definició de nivell d'intensitat o de nivell de pressió, la sensació que nosaltres percebem i el nivell de pressió sonora es corresponen (són iguals) per a una freqüència de 1.000 Hz. Per a altres freqüències tindrem la mateixa sensació percebuda a nivells d'intensitat o de pressió diferents. Les corbes que es mostren a la gràfica són les **corbes d'igual intensitat percebuda** o **corbes isòfones**, és a dir, les corbes amb un mateix valor de fons. Per exemple, si resseguim la corba corresponent a 60 fons veiem que percebem amb la mateixa sensació sonora ("sentim igual de fort") un so de 2.000 Hz a 60 dB que un so de 30 Hz a 100 dB i que un so de 10.000 Hz a 73 dB.

Figura 6

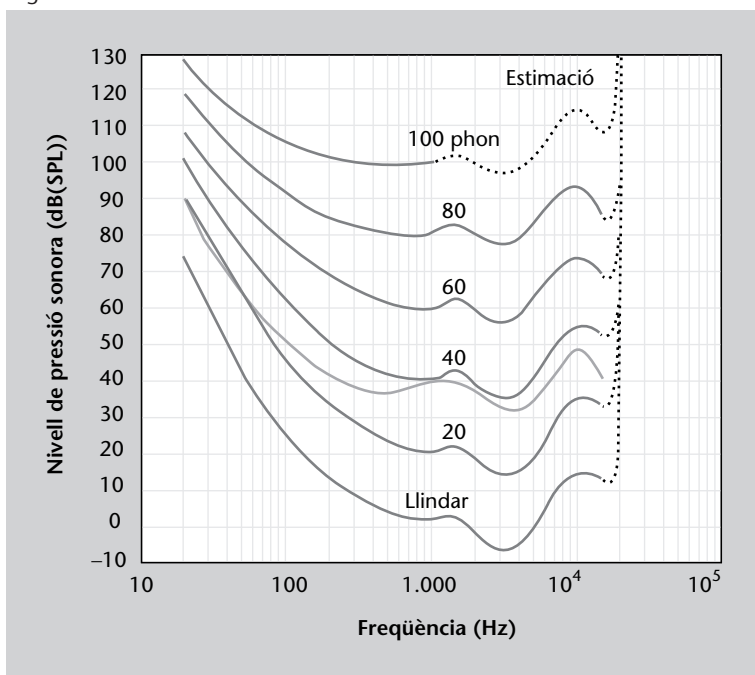


Figura 6

Corbes d'igual intensitat percebuda o corbes isòfones, segons la norma ISO 226:2003. Cada una d'aquestes corbes representa una mateixa sensació sonora (un mateix valor de fons) en els éssers humans. Així, percebem igual de fort (amb un valor de 20 fons) un so de freqüència 20 Hz i 90 dB(SPL) i un so de freqüència 3.000 Hz i 20 dB(SPL). La corba grisa correspon a una versió anterior de la norma ISO per a 40 fons.

Aquestes corbes s'obtenen a partir d'experiments amb un gran nombre de persones amb audició normal, ja que pot haver-hi lleugeres diferències en la percepció de les intensitats en funció de diverses característiques fisiològiques. Actualment les corbes estan normativitzades segons la norma internacional ISO 226:2003, i substitueixen les corbes utilitzades fins el 2003, que es coneixen com a corbes de Fletcher-Munson i corbes de Robinson-Dadson.

En acústica solen utilitzar-se també alguns tipus especials de decibel que intenten reproduir aproximadament les corbes isòfones. Són els dB(A), dB(B) i dB(C), que s'utilitzen per a mesurar el nivell d'intensitat o el nivell de pressió però amb uns factors de ponderació que aproximen el valor obtingut a la sensació sonora. Aquests factors de ponderació són expressions matemàtiques relativament complexes i queden més enllà dels objectius del mòdul.

2.4. Acústica musical

Per a especificar les característiques del so tal com les percep l'ésser humà no és gaire adequat utilitzar sempre els valors de freqüència, ja que la capacitat que tenim per a detectar canvis de freqüència depèn de la mateixa freqüència, igual que passa amb la intensitat. Una possibilitat, seguint la llei de Weber-Fechner, però ara aplicada a freqüències i no a intensitats sonores, és utilitzar una relació logarítmica per a determinar l'altura d'un so. En aquest sentit, si no es vol utilitzar directament la freqüència, doncs, es pot definir una nova unitat de mesura d'altura d'un so, el **savart**, de manera logarítmica com

$$s = 1.000 \log \frac{f}{f_0} \quad (15)$$

on s és el valor de l'altura del so en savarts, f és la freqüència i f_0 és una freqüència de referència. Tot i així, normalment no s'utilitza una freqüència de referència f_0 , sinó que només es fa servir per a diferències d'altura. El savart no es fa servir gaire actualment, ja que s'utilitza molt més una altra unitat de mesura, el **cent**, que es defineix com

$$c = 1.200 \log_2 \frac{f}{f_0} \quad (16)$$

Amb aquesta definició, si una freqüència és el doble d'una altra, difereixen en 1.200 cents, com podeu comprovar:

$$c = 1.200 \log_2 \frac{2f}{f} = 1.200 \log_2 2 = 1.200 \quad (17)$$

Aquestes unitats de mesura, però, són força tècniques. Tradicionalment s'ha utilitzat un sistema basat en els intervals entre sons tal com els percebem els humans, i que s'ha anat desenvolupant amb la teoria musical. L'**interval** entre

La llei de Weber-Fechner s'estudia al subapartat 2.1.



\log_2 correspon al logaritme en base 2.

dos sons és el quocient entre les freqüències d'aquests sons. Quan un so té una freqüència doble que un altre so, els dos sons estan separats per un interval d'una **octava**. Per exemple, si un so té una freqüència de 400 Hz, el so situat una octava per sobre té una freqüència de 800 Hz, i el so situat una octava per sota té una freqüència de 200 Hz. És a dir, que el quocient de freqüències de dos sons separats una octava és 2:1 (i, per tant, difereixen en 1.200 cents, com acabem de veure).

Les octaves addicionals d'una nota es produeixen a freqüències que són un múltiple 2^n de l'original, és a dir, a freqüències 2, 4, 8, 16, etc. superiors o a freqüències $1/2, 1/4, 1/8, 1/16$, etc. inferiors a l'original. Així, 50 Hz és dues octaves per sota dels 200 Hz (quocient $1 : 4 = 1 : 2^2$), mentre que 1.600 Hz és 3 octaves per sobre (quocient $8 : 1 = 2^3 : 1$). L'octava es pot considerar l'interval més simple en música, però aquesta "simplicitat" és clarament una qüestió antropocèntrica, ja que l'oïda humana tendeix a sentir ambdues notes com a "iguals"; no hi ha cap raó física per a la naturalitat de l'interval d'octava. Totes les notes separades per octaves reben el mateix nom en la notació musical occidental, és a dir, una nota una octava més alta que un *la* també és un *la*.

A partir d'aquesta relació, l'octava es divideix en 12 parts iguals, anomenades **semitons**. L'interval entre dos semitons dona un quocient igual a $\sqrt[12]{2} \approx 1,0594630943593$, que correspon exactament a 100 cents. Aquest interval no és una relació senzilla entre nombres enters i és una creació relativament moderna en la teoria musical: es tracta de l'escala anomenada *d'igual temperament* o *temprada*. Tradicionalment, en música s'han fet servir intervals que sempre corresponen a quocients de nombres enters: *l'escala natural*, que podeu veure a la taula 3.

Taula 3. L'escala natural

Interval	Quocient de freqüències	Exemple
Octava	2:1	do – do
Setena major	15:8	do – si
Sisena major	5:3	do – la
Quinta perfecta	3:2	do – sol
Quarta perfecta	4:3	do – fa
Tercera major	5:4	do – mi
Segona major, to major	9:8	do – re
Segona menor, to menor	10:9	re – mi
Semitò	16:15	mi – fa
Uníson	1:1	–

El problema amb l'escala natural és que si comencem l'escala amb el *do* obtenim els intervals que apareixen a la taula anterior, però si comencem l'escala amb el *sol*, per exemple, i volem respectar els mateixos intervals, les notes no coincideixen. A la figura 7 hem representat les notes de l'escala de do major (la mateixa que hem posat d'exemple a la taula) i hem indicat quina és la relació de freqüències entre cada una i la següent. Fixeu-vos que entre el *do* i el *re* hi ha un interval de 9:8, mentre que entre el *sol* i el *la* l'interval és de 10:9. Si

Recordeu que una nota no és més que un so d'una freqüència determinada (i també d'una durada determinada, però aquest aspecte ara no ens interessa).

Les notes musicals

En la nomenclatura musical llatina les notes musicals reben els noms *do, re, mi, fa, sol, la i si*. En la nomenclatura anglosaxona són C, D, E, F, G, A i B (anglès) o H (alemany).

comencem ara l'escala en el *sol* i respectem l'interval de 9:8 entre la primera i la segona notes, que és el que cal respectar per a construir l'escala natural, ja no tindrem el *la* original de l'escala de *do* major, que és a 10:9 del *sol*, sinó "un altre" *la* que és a la distància correcta de 9:8!

Figura 7. L'escala natural

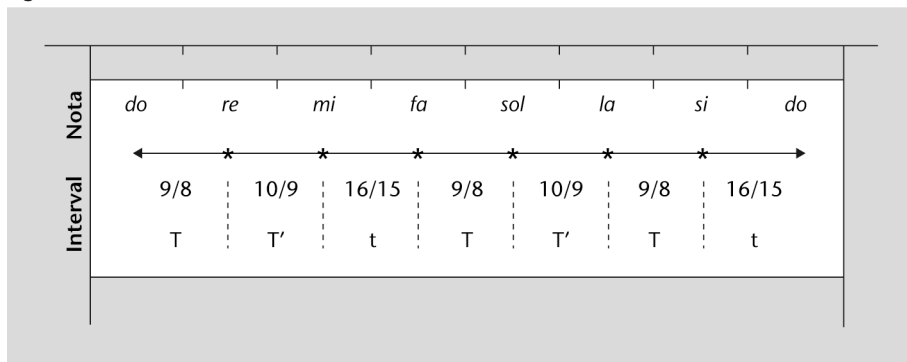


Figura 7

Esquema de l'escala musical de do major, on hem representat cada nota i la relació de freqüències que té cada una amb la següent. A sota de la relació de freqüències indiquem si l'interval es tracta d'un to major (T), un to menor (T') o un semitò (t).

Amb instruments de longitud variable, com molts dels de corda (la família del violí i la de la guitarra, per exemple), aquesta situació no és un problema gaire important, però amb instruments de longitud fixa, com el piano, resulta impossible arreglar-ho, ja que no podem canviar la longitud de la corda per a adaptar-nos exactament a una escala o una altra i fer que en un cas entre el *sol* i el *la* hi hagi una relació de 9:8 i en l'altre cas una relació de 10:9. Per aquesta raó es va crear l'escala ben temperada o d'igual temperament, que és la que hem comentat abans, i en la qual tots els intervals entre notes consecutives són exactament iguals (i per tant, en concret, un to menor i un to major són iguals).

El temperament

En música s'anomena *temperament* el procés d'afinació que sacrifica els intervals exactes de l'escala natural per a adaptar-se als requeriments d'un instrument.

2.5. Què hem après?

Aquest apartat l'hem dedicat bàsicament a qüestions de percepció dels estímuls per part dels éssers humans. El punt important és tenir clar que, en molts casos, la relació entre les magnituds físiques i les sensacions que ens provoquen quan les detectem amb els nostres sentits és una relació logarítmica. És a partir d'aquest fet que es defineixen les unitats de mesura del nivell d'intensitat sonora (el decibel) i de la sensació sonora (el fon), aquesta última amb l'afegitò del fet que la nostra oïda té sensibilitats diferents a freqüències diferents.

3. Problemes resolts

3.1. Enunciats

1. El nivell d'intensitat sonora d'una conversa normal entre persones a 1 metre de distància és d'aproximadament 65 dB. Quina és, doncs, la potència amb què parlem habitualment els éssers humans?
2. En un concert el nivell d'intensitat sonora mitjà resulta ser de 105 dB a una distància de 20 m de l'escenari. Quina és la potència sonora que s'emet des de l'escenari? (Suposeu que l'emissió només és en la mitja esfera sobre l'escenari.)
3. a) El *do* central de l'escala musical té una freqüència de 262 Hz. Quina és la longitud d'ona d'aquesta nota en l'aire? b) Quina és la longitud d'ona en l'aire, del *do* situat una octava per sobre del *do* central?
4. Demostreu que si dupliquem la intensitat d'un so, el seu nivell d'intensitat sonora augmenta en 3 dB.
5. Tenim tres fonts sonores (A, B i C) que produeixen uns nivells d'intensitat sonora de 70, 73 i 80 dB, respectivament. Quan les tres fonts emeten juntes, les intensitats de les fonts se sumen.
 - a) Trobeu el nivell d'intensitat sonora quan les tres fonts emeten juntes.
 - b) Per a reduir el nivell d'intensitat sonora pensem a eliminar les dues fonts menys intenses. Serà gaire útil fer això? (És a dir, disminuirà gaire el nivell d'intensitat sonora resultant?)
6. 38 persones que han anat a una festa estan parlant amb la mateixa intensitat. Si a la festa només hi hagués una persona, el nivell d'intensitat sonora seria de 72 dB. Quin és el nivell d'intensitat sonora quan totes les 38 persones parlen alhora?

3.2. Solucions

1. Sabem que el nivell d'intensitat sonora s'expressa com a (equació 8):

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (18)$$

on coneixem:

- el nivell d'intensitat: $N_I = 65$ dB,
- la intensitat de referència (per definició, recordeu l'equació 7): $I_0 = 10^{-12}$ W/m².

D'aquí aïllem I :

$$\frac{N_I}{10} = \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow I_0 \cdot 10^{N_I/10} = I \quad (19)$$

i obtenim $I = 3,16 \cdot 10^{-6}$ W/m². Aquesta és la intensitat a 1 metre de distància.

Recordeu

Si $x = \log y$, llavors $y = 10^x$. Si utilitzem logaritmes neperians en lloc de decimals tindriem que si $x = \ln y$ llavors $y = e^x$.

Ara recordeu que la intensitat és la potència per unitat d'àrea, per tant, per a saber la potència, P , cal multiplicar aquesta intensitat que acabem d'obtenir per l'àrea, S , sobre la qual es reparteix. Si no hi ha cap impediment, les ones sonores que emetem es reparteixen de forma esfèrica al voltant nostre, és a dir, sobre una superfície igual a la superfície d'una esfera, que és $4\pi r^2$. Per tant, com ens diuen que aquest valor de la intensitat era a 1 m de distància, $r = 1$ i així:

$$P = I \cdot S = 3,16 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi 1^2 = 3,97 \cdot 10^{-5} \text{ W} \quad (20)$$

2. Aquest problema és pràcticament igual que l'anterior. Sabem que el nivell d'intensitat sonora s'expressa com a (equació 8):

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (21)$$

on coneixem:

- el nivell d'intensitat: $N_I = 105$ dB,
- la intensitat de referència: $I_0 = 10^{-12}$ W/m².

D'aquí obtenim $I = 0,0316$ W/m². Aquesta és la intensitat a 20 metres de distància. Recordeu que la intensitat és la potència per unitat d'àrea, per tant, per a saber la potència, P , cal multiplicar aquesta intensitat que acabem d'obtenir per l'àrea, S , sobre la qual es reparteix. Com que ens han dit que el so s'emeta només en mitja esfera, l'àrea serà $4\pi r^2/2$. Per tant:

$$P = I \cdot S = 0,0316 \cdot \frac{4\pi 20^2}{2} = 79,4 \text{ W} \quad (22)$$

3.

a) La longitud d'ona la podem calcular sabent que es compleix la relació següent:

$$v = \lambda f \quad (23)$$

on v és la velocitat de propagació, λ , la longitud d'ona i f , la freqüència. D'aquesta expressió sabem:

- la velocitat de propagació: $v = 340$ m/s,
- la freqüència: $f = 262$ Hz.

Per tant, podem trobar la longitud d'ona:

$$\lambda = \frac{v}{f} = 1,3 \text{ m} \quad (24)$$

b) Com ja hem vist en el subapartat 2.4., una nota que és una octava per sobre d'una altra té una freqüència doble. Així doncs, si la freqüència del do central és 262 Hz, la del do que està una octava per sobre serà el doble, 524 Hz. I com que la velocitat de propagació no canvia, la longitud d'ona serà la meitat, és a dir 0,65 m.

4. Per a demostrar aquest fet, considerem novament que el nivell d'intensitat sonora s'expressa com (equació 8):

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (25)$$

i volem saber quin és el canvi en el nivell d'intensitat sonora per a una intensitat que és el doble de l'original, és a dir, igual a $2I$. El nivell d'intensitat sonora per a una intensitat de $2I$ serà:

$$N_I(2I) = 10 \log \frac{2I}{I_0} \quad (26)$$

Ara convé recordar la propietat dels logaritmes que el logaritme del producte és igual a la suma de logaritmes, és a dir, que:

$$\log a \cdot b = \log a + \log b \quad (27)$$

Així, podem expressar l'equació 26 com

$$N_I(2I) = 10 \left(\log 2 + \log \frac{I}{I_0} \right) \quad (28)$$

Consulteu el mòdul "Ones" per a veure la relació entre la velocitat i la freqüència.



El logaritme decimal de 2 és aproximadament 0,3, per tant:

$$N_I(2I) = 10 \left(0,3 + \log \frac{I}{I_0} \right) = 3 + 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (29)$$

I precisament el segon terme de la suma és el nivell d'intensitat sonora original, per a una intensitat I :

$$N_I(2I) = 3 + N_I \quad (30)$$

Que és el que volíem demostrar: el nivell d'intensitat sonora per a una intensitat doble és 3 dB més alt que l'original.

5.

a) Com que ens diuen que les tres intensitats se sumen però ens donen els nivells d'intensitat sonora de cadascuna, primer caldrà calcular la intensitat de cada font. Novament partim de l'equació 8:

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (31)$$

on coneixem:

- el nivell d'intensitat de cada font: 70 dB, 73 dB i 80 dB.
- la intensitat de referència: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

D'aquí aïllem I :

$$\frac{N_I}{10} = \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow I_0 \cdot 10^{N_I/10} = I \quad (32)$$

i obtenim, per a cada font, A, B i C:

- $I_A = 10^{-5} \text{ W/m}^2$,
- $I_B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$,
- $I_C = 10^{-4} \text{ W/m}^2$.

La intensitat total, doncs, serà la suma: $I_T = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$. Ara que ja sabem la intensitat total, calculem el nivell d'intensitat sonora:

$$N_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 81,14 \text{ dB} \quad (33)$$

b) Fixeu-vos que les tres fonts juntes ens donen un nivell d'intensitat sonora de 81,14 dB, només una mica més que la font més potent, que ella sola ja ens

dóna 80 dB. Per tant, eliminar les dues fonts més dèbils no ens redueix gairebé gens el nivell d'intensitat sonora.

Aquesta qüestió ens serveix per a adonar-nos que les relacions logarítmiques, com la que defineix el nivell d'intensitat sonora, són poc intuïtives i ens poden despistar força. Segurament, sabent que les tres fonts produeixen 70, 73 i 80 dB esperaríem que el nivell d'intensitat sonora total fos bastant alt, però resulta que només és de 81,14 dB; és a dir, les dues fonts més dèbils contribueixen molt poc a augmentar el nivell de la font més potent.

6. Per a resoldre aquest exercici podríem calcular la intensitat corresponent a aquests 72 dB d'una persona, multiplicar-la per 38 i llavors calcular el nou nivell d'intensitat sonora total. Però no cal. Igual que hem fet en l'exercici 4, sabem el nivell d'intensitat sonora per a una intensitat determinada, I , i volem saber quin és el canvi en el nivell d'intensitat sonora per a una intensitat que és 38 vegades l'original, és a dir, igual a $38I$. El nivell d'intensitat sonora per a una intensitat de $38I$ serà:

$$N_I(38I) = 10 \log \frac{38I}{I_0} \quad (34)$$

Recordant novament la propietat dels logaritmes que el logaritme del producte és igual a la suma de logaritmes, podem expressar l'equació 34 com

$$N_I(38I) = 10 \left(\log 38 + \log \frac{I}{I_0} \right) \quad (35)$$

El logaritme decimal de 38 és aproximadament 1,58; per tant:

$$N_I(38I) = 10 \left(1,58 + \log \frac{I}{I_0} \right) = 15,8 + 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (36)$$

Com que el segon terme és el nivell d'intensitat sonora d'una sola persona, que ens diuen que és igual a 72 dB, tenim finalment que:

$$N_I(38I) = 15,8 + 72 = 87,8 \text{ dB} \quad (37)$$

Resum

En aquest mòdul hem completat el primer estudi detallat d'un tipus d'ona concret: les ones mecàniques longitudinals i, més específicament, el so, les ones sonores o acústiques, que no són més que les ones mecàniques longitudinals que podem detectar amb el nostre òrgan de l'oïda: l'orella. L'estudi ha estat volgudament qualitatiu, amb una complexitat matemàtica inferior al cas general que hem vist en el mòdul "Ones".

En primer lloc, hem definit exactament què és el so i les característiques amb què el podem estudiar: l'altura, la intensitat i el timbre. Vist això, hem passat a fixar-nos més en com percebem nosaltres aquests sons. El punt clau aquí ha estat veure que la relació entre les magnituds físiques i les sensacions que ens provoquen quan les detectem amb els nostres sentits és una relació logarítmica, que podem expressar matemàticament amb la llei de Weber-Fechner. Tanmateix, cal tenir ben present que aquesta relació logarítmica entre estímul i sensació és una relació aproximada, prou vàlida en molts casos però no és en absolut universal.

A partir de la constatació d'aquesta relació logarítmica sembla assenyat intentar establir unitats de mesura que segueixin la nostra percepció logarítmica dels estímuls. D'aquesta manera s'arriba a la definició de decibel. Tot i així, encara es presenta un problema: els éssers humans no percebem la mateixa sensació amb una mateixa intensitat a diferents freqüències (dit d'una altra manera, no som igual de sensibles a totes les freqüències audibles). Per a això es defineix una altra unitat, el fon, que intuïtivament podem considerar igual al decibel però adaptada (augmentada o disminuïda) a la nostra sensibilitat a cada freqüència diferent.

Exercicis d'autoavaluació

1. Un so de 100 dB té una intensitat...
 - a) doble que un de 50 dB.
 - b) doble que un de 97 dB.
 - c) 1.000 vegades més gran que un de 50 dB.
 - d) 100 vegades més gran que un de 50 dB.

2. Quan la densitat del medi augmenta, la velocitat de propagació del so en aquest medi...
 - a) augmenta.
 - b) disminueix.
 - c) no canvia.
 - d) Totes les respostes anteriors són falses.

3. Les ones sonores són ones...
 - a) electromagnètiques.
 - b) polaritzades.
 - c) mecàniques.
 - d) planes.

4. El so es propaga a 340 m/s en l'aire i a 1.500 m/s en l'aigua. Si produïm un so de 256 Hz sota l'aigua, la seva freqüència en l'aire serà...
 - a) la mateixa, però la longitud d'ona serà més curta.
 - b) més alta, però la longitud d'ona serà la mateixa.
 - c) més baixa, però la longitud d'ona serà més llarga.
 - d) més baixa, però la longitud d'ona serà la mateixa.
 - e) la mateixa, i la longitud d'ona també serà la mateixa.

5. Si dupliquem la distància entre un emissor acústic i un receptor, el nivell d'intensitat sonora en el receptor disminueix, aproximadament, en...
 - a) 2 dB.
 - b) 3 dB.
 - c) 6 dB.
 - d) una quantitat que no podem determinar perquè no tenim prou dades.

Solucionari

1. b; 2. c; 3. c; 4. a; 5. c

Glossari

altura *f* Freqüència fonamental d'un so.
sin. **to**

escala *f* Successió de notes que formen la base d'un sistema musical determinat.

infràsò *m* Ona mecànica longitudinal d'una freqüència inferior a la mínima freqüència detectable per l'oïda humana, uns 20 Hz.

interval *m* Quocient entre les freqüències de dos sons.

llindar d'audició *m* Intensitat mínima de les ones sonores que pot detectar l'oïda humana.

octava *f* Interval entre dues notes en què una té una freqüència doble que l'altra.

oïda *f* Sentit dels éssers vius amb què es perceben els sons.

orella *f* Aparell dels éssers vius que constitueix l'òrgan de l'oïda.

qualitat *f*
sin. **timbre**

so *m* Ona mecànica longitudinal detectable per l'oïda humana, amb una freqüència compresa entre 20 i 20.000 Hz i una intensitat superior a uns 10^{-12} W/m².

temprament *m* Procés d'afinació d'un instrument musical que sacrifica els intervals exactes de l'escala natural per adaptar-se als requeriments d'un instrument

timbre *m* Conjunt de factors que fa que es distingeixin dos sons de la mateixa altura i intensitat.
sin. **qualitat**

to *m*
sin. **altura**

ultrasò *m* Ona mecànica longitudinal d'una freqüència superior a la màxima freqüència detectable per l'oïda humana, uns 20.000 Hz.

Bibliografia

Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. (1963). *The Feynman lectures on Physics* (capítols, 47-51). Reading, Massachusetts: Addison Wesley.

French, A. P. (1974). *Vibraciones y ondas*. Barcelona: Editorial Reverté.

Isalgué Buxeda, A. (1995). *Física de la llum i el so*. Barcelona: Edicions UPC ("Politext", 41).

José Pont, J.; Moreno Lupiáñez, M. (1994). *Física i ciència-ficció* (capítol 7). Barcelona: Edicions UPC ("Politext", 33).

Tipler, P. A.; Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (5a edició, volum 1B). Barcelona: Editorial Reverté.

