

---

# Naturallesa del so

---

PID\_00269050

Martí Ruiz i Carulla

---

Temps mínim de dedicació recomanat: 3 hores

---



**Martí Ruiz i Carulla**

Professor i investigador del Laboratori d'Art Sonor de la UB. Llicenciat -doble itinerari de dibuix i escultura-, màster i doctor en Belles Arts. Especialista en acústica aplicada a la creació d'objecte sonor, artista sonor, músic experimental, cofundador del Gamelan Balinès Forja de Trons al Museu de la Música i de tallerbaschet.cat. Impulsor de projectes com ara el Ramat Musical i Pangamelan.org. Membre del trio experimental Híbrida, nen i Cavall.

Ha col·laborat amb classes, conferències i tallers amb institucions com Tokyo University of Arts, Kyoto University of Arts, Mills College de Berkeley, UNAM de Mèxic, la UNESCO de Brasil, Kunst Uni Graz, Metabolic Studio de Los Angeles. Ha exposat i actuat en espais d'aquests països i d'altres com ara el Garage Contemporary Art Museum de Moscou, el Museo de Arte Moderno de Buenos Aires i el Center for New Music de San Francisco.

L'encàrrec i la creació d'aquest recurs d'aprenentatge UOC han estat coordinats per la professora: Irma Vilà Òdena (2020)

Primera edició: febrer 2020

Autoria: Martí Ruiz i Carulla

Llicència CC BY-NC-ND d'aquesta edició, FUOC, 2020

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Realització editorial: FUOC



*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

<b>Introducció</b> .....	5
<b>1. Física de les ones mecàniques</b> .....	7
<b>2. Qualitats del so i atributs de les ones</b> .....	9
<b>3. Visualització cimàtica: nodes i antinodes</b> .....	13
<b>4. Propagació i interacció entre ones: progressives, estacionàries i batiments</b> .....	16
<b>5. Ressonància</b> .....	18
<b>6. Reverberació i eco</b> .....	20
<b>7. Morfologia del so i complexitat dels sons compostos</b> .....	22
7.1. Atac, sosteniment, decaïment .....	22
7.2. Els sobretons i la tímbrica .....	22
7.3. Sons tonals i atonals, la sèrie harmònica i les sèries inharmoniques .....	24
<b>Bibliografia</b> .....	29



## Introducció

En aquest mòdul<sup>1</sup> veurem les nocions fonamentals per a comprendre la naturalesa del so com a fenomen físic i psicoacústic, i poder prendre consciència de les diverses dimensions característiques del medi en què treballarem. Tot i que no aprofundirem en la dimensió dels possibles càlculs, sí que volem fer accessibles les nocions bàsiques que defineixen el comportament dels fenòmens acústics, esperant que la curiositat us pugui fer perdre possibles porcs i us inciti a continuar aprenent sobre la ciència del so. Al llarg de l'assignatura, veureu que, com més coneguem la dimensió científica del so, millor podrem apreciar molts aspectes de l'art sonor i més fàcilment trobarem nous àmbits de treball, més fàcilment el món sonor que ens envolta ens podrà inspirar noves idees.

<sup>(1)</sup>Tots els enllaços d'aquest mòdul van ser consultats el 16/10/2019.

No es tractarà de creure cegament en uns principis sinó de provar-los personalment, tenir experiències directes amb tot el que anirem veient, de manera que l'observació empírica ens confirmi i matisi allò enunciat. Sense endin-sar-nos en les paradoxes de les incompatibilitats de la quàntica, veurem que les lleis de la física mecànica funcionen amb una constància que ha permès a diverses civilitzacions observar els mateixos fenòmens i treure'n profit per a activitats artístiques. Així doncs, convé que ens prenguem la comprensió d'aquestes nocions elementals no pas com un exercici d'erudició, sinó com les línies guia que ens permetin reconèixer les forces subjacents a una gran diversitat de fenòmens acústics i experimentar-hi directament. Voldríem que la interdisciplinarietat que implica el so us inviti a acostar-vos a l'empirisme i que pugueu assimilar metodologies científiques capaces d'estimular la poètica de la vostra pròpia obra. De fet, conèixer les bases físiques del so pot resultar no solament pràctic i convenient per a assolir tècnicament el que ens proposem, sinó que pot ser altament inspirador.

Per a començar, cal destacar que el so és un fenomen físic i psicofisiològic, és a dir, que hauríem de prestar atenció a la **dimensió mecànica del so com a fenomen físic d'oscil·lació** i propagació en medis elàstics, i alhora prestar atenció a la **dimensió del so com a percepció** que tenim -o que generem- els oients en rebre determinats estímuls. Més endavant veurem fins a quin punt el nostre sistema perceptiu determina què sentim i què no, i com. És més, el so com a record o imaginació també pot existir tan sols com a creació de la nostra psique, encara que no hi hagi cap estímulo extern en aquell moment. Així doncs, comencem centrant-nos en el so com a fenomen físic, sense oblidar que per a parlar de so cal que hi hagi algun ésser sensible a tal estímulo.



# 1. Física de les ones mecàniques

Tot i que sovint podem pensar que sabem què són les ones i com es propaguen, de vegades els fenòmens físics poden resultar contraintuïtius, de manera que preferim dedicar una certa atenció al fenomen oscil·latori essencial que ens tindrà ocupats d'ara en endavant.

El so és un fenomen de **propagació d'ones mecàniques**, és a dir, perquè hi hagi ones cal que tinguem algun **medi relativament elàstic** -sòlid, líquid o gasós- pel qual les ones es puguin propagar.

Les ones són fluctuacions que es produeixen ens els medis elàstics quan són sotmesos a algun impacte, estímul o pressió, de manera que la deformació que es produeix a la regió estimulada es propaga a través del medi.

## Exemple

Si observem un recipient amb aigua i hi deixem caure un objecte -o simplement hi submergim un dit-, podrem veure que l'aigua que hem desplaçat inicialment empeny contra l'aigua del seu entorn, i així successivament, de manera que les molècules que estan en repòs reben un impuls de les que ja han estat desplaçades inicialment i transmeten l'impuls a les següents i així successivament.

Bàsicament, entre totes les ones mecàniques possibles, el so és una **ona de pressió** que propaga a través dels medis elàstics: s'inicia quan algun estímul empeny les molècules de l'aire, per exemple, desplaçant-les del seu lloc inicial i empenyent les molècules següents (acumulant pressió), el que provoca que una regió quedi amb menys pressió en el punt de l'espai on eren inicialment. Així doncs, amb el primer impuls observem que una regió acumula pressió (tenim més molècules de l'habitual) i una regió es queda amb menys pressió (menys molècules de l'habitual). Com que les forces tendeixen a equilibrar-se, la molècula tornarà a omplir la regió amb menys pressió que ha deixat enrere i en aquest moviment intermitent i reiteratiu les mateixes zones passaran de tenir més a menys pressió i viceversa amb una freqüència regular. És a dir, la matèria es comprimeix i descomprimeix alternativament, i el que afecta unes molècules es transfereix a les del seu voltant. Cada material presenta unes característiques i uns comportaments en funció del vincle que hi ha entre els seus elements constituents, així doncs, cada material presenta una capacitat de propagació d'aquestes compressions i descompressions diferents.

Això mateix passa dins dels sòlids i dels gasos, com l'aire, encara que no sigui tan fàcil de veure. Les ones mecàniques, doncs, **transmeten un impuls, l'energia i la informació relativa a aquest impuls, però no transporten matèria**, no la traslladen de lloc, és a dir, que quan l'energia de l'ona s'ha anat dissipant, les molècules queden en el mateix lloc on eren inicialment.

### Exemple

Podem imaginar una barqueta al mar, les ones mouen la barqueta amunt i avall, però no la mouen particularment en cap direcció (si la barca es desplaça serà per l'efecte del vent o de corrents marines, però no per l'acció de les ones). Això ho veurem més endavant amb més detall.

En canvi, en el buit, com ara en l'espai exterior, com que no hi ha aire ni cap altre gas, no hi ha cap possibilitat que el moviment del nostre dit o de cap objecte provoqui aquesta mena d'ones. Així doncs, no confonguem el fet que pel buit hi puguin viatjar les ones/partícules de llum amb la impossibilitat que s'hi puguin propagar una ona mecànica com és el so.

Bé, doncs, d'ara en endavant, veurem molts tipus d'ones mecàniques, però fonamentalment totes es poden classificar en dues classes, segons la direcció amb què es propaguen: **transversals i longitudinals**.

*Physics - Waves - Introduction.* Disponible a: <<https://youtu.be/RVyHkV3wlyk>>.

1) Les **ones longitudinals** són les que trobem contínuament en l'aire o sota l'aigua. En diem longitudinals perquè la compressió i la dilatació es produeixen en la mateixa direcció en què l'ona es propaga. Si agafem la molla *slinky*, l'estirem entre dos punts i clavem un cop en la direcció de la molla, veurem com les voltes de la molla s'ajunten i empenyen les següents, i avancen d'un costat a l'altre de la molla.

2) Les **ones transversals** es produeixen en medis com ara les cordes tensades, les membranes o la superfície de l'aigua. Quan un d'aquests medis reben un impacte en la seva superfície i es deformen elàsticament, aquesta deformació avança lateralment al llarg de tota la seva superfície, de manera que la deformació, l'oscil·lació, es produeix en un sentit transversal a la direcció en què avança la vibració.

*Violin string in slow motion.* <<https://youtu.be/6JeyiM0YN04>>.

És necessari destacar que **les ones transmeten energia i informació en els dos casos, però no desplacen la matèria de lloc**, és a dir, el medi oscil·la propagant una informació relativa a la temporalitat, la freqüència i l'amplitud de les vibracions, però una vegada les ones s'han esmorteït o dissipat, totes les molècules continuen en el mateix lloc on eren.

*Transverse wave explained.* <<https://youtu.be/wofUndFivZE>>.

### Exemple

Els altaveus del vostre ordinador o del telèfon mòbil sacsegen l'aire i les ones d'aquesta mateixa manera: longitudinalment.

### Exemple

El gronxador que oscil·la en dues direccions, passant reiteradament sempre pel punt inicial de repòs, i que quan esgota l'energia acaba allà mateix.



## 2. Qualitats del so i atributs de les ones

A continuació resumim els rudiments més bàsics de la **percepció auditiva**: quan les ones sonores arriben a les molècules d'aire que estan en contacte amb el nostre timpà, que és una membrana flexible, aquest oscil·la empès per la pressió de l'aire, i els moviments es propaguen mecànicament per un conjunt d'ossets articulats situats a l'orella mitjana, i acaben movent un líquid dins d'un òrgan en forma de cargol anomenat còclea a l'orella interna. Dins de la còclea hi ha unes terminacions nervioses de longituds escalonades, que es flexionen en funció de la freqüència de les oscil·lacions del líquid, de manera que estimulen terminacions nervioses corresponents que reaccionaran segons cada banda de freqüències. A partir d'aquest punt, les ones mecàniques s'han transformat en impulsos elèctrics i ja és el sistema nerviós central el que s'ocupa de generar la sensació de so, descodificant les propietats de les ones en informació rellevant relativa a les característiques de la font i el seu comportament sonor, i també del mateix medi sonor. És a dir, com la percepció visual, al final és el cervell que crea una sensació que genera interaccions electroquímiques entre neurones.

*Video en el que se describe el proceso de audición y cómo funciona | MED-EL. <<https://youtu.be/PuC1BDFUq2I>>.*

**Douglas, L. O.**. *TED-Ed. La ciencia de la audición.* <[www.ted.com/talks/douglas\\_l\\_oliver\\_the\\_science\\_of\\_hearing/transcript?language=es#t-296919](http://www.ted.com/talks/douglas_l_oliver_the_science_of_hearing/transcript?language=es#t-296919)>.

La forma i la materialitat de les orelles han evolucionat per a optimitzar la captació simultània de les ones de múltiples freqüències. El fet que tinguem dues orelles ens permet calcular la posició en l'espai del qual provenen les ones, ja que la velocitat del so és limitada pel medi, és a dir, que triga cert temps a propagar-s'hi; un so que ens arriba d'un costat arriba a les orelles amb una mínima diferència entre l'una i l'altra, i en funció d'aquesta diferència el sistema nerviós central s'ocupa de calcular la ubicació de la font sonora, tant si es troba quieta com si està en moviment. Altrament, fixem-nos com el sistema nerviós unifica aquests dos esdeveniments lleugerament diferenciats en el temps -el so arriba primer a una orella i després a l'altra-, de manera que ens permet interpretar valors d'espacialitat sense que tinguem cap sensació relativa a aquest desfasament temporal.

Habitualment es diu que el so té quatre dimensions, qualitats o paràmetres que podem distingir: **la tonalitat, la intensitat, la duració i la tímbrica.**

A continuació observem els atributs d'una ona sonora i vegem quin impacte té en les qualitats del so que percebem:

1) La **sensació de tonalitat es correspon a la freqüència** amb què una ona oscil·la, és a dir, quantes vegades per segon oscil·la el medi. Com havíem vist, una oscil·lació és un moviment regular d'anar i tornar entre dues posicions extremes. Com que qualsevol sistema elàstic posat a oscil·lar triga el mateix en cada anada i vinguda, el nostre sistema auditiu ha desenvolupat la capacitat de reconèixer la freqüència amb què aquests desplaçaments tenen lloc, i ha convertit la velocitat relativa d'aquest moviment alternat com una percepció contínua que anomenem to. És a dir, com més lentes són les oscil·lacions, més greu és el so que percebem, i com més ràpides, més agut. Això dins d'uns llindars, és clar. Cada espècie amb capacitat auditiva té els seus **llindars i els humans hi sentim entre els 20 Hz i els 20.000 Hz<sup>2</sup>**. Teòricament, això vol dir que l'oscil·lació més lenta que sentim com a to continu és de 20 cicles per segon. Quan un sistema oscil·la més lent que 20 vegades per segon, 16, 8 o molt menys, una vegada per segon com fa l'agulla dels rellotges, el nostre sistema auditiu no uneix aquests estímuls en una sensació de to continu, sinó que els percebem com a polsos independents o *beats*. Igualment, 20 vegades per segon és una velocitat molt ràpida per a un ésser humà. Penseu en quina cosa sou capaços de fer a aquesta velocitat. A banda dels sons que fem a la veu, difícilment podreu fer cap moviment tan veloç. Tot i això, aquesta freqüència tan ràpida per a l'escala de temps humana és la més lenta que sentim com a to. La més ràpida se sol ubicar entre els 18.000 i els 20.000 cicles per segon. Això són velocitats inconcebiblement ràpides per a un ésser humà, i altrament es tracta de sons tan aguts que resulten molestos. La veu humana sol estar entre uns 100 Hz en una veu greu masculina i uns 300 Hz en una veu aguda femenina o d'infant. Per sobre dels 18.000 Hz, el so desapareix per a nosaltres i no el percebem com a tal.

<sup>(2)</sup>La freqüència es mesura en hertz, en memòria del físic de l'electromagnetisme **Heinrich Hertz**: un hertz equival a un cicle per segon.

Curiosament, el fenomen temporal i rítmicament regular de la freqüència d'oscil·lació es converteix en un fenomen en una percepció de continuïtat en què **no captem la velocitat sinó una sensació qualitativament diferent**, i que no podem descriure fàcilment per més que tots l'experimentem, dins d'un espectre de gradient amb valors infinits entre el més greu fins al més agut. Podem pensar que es tracta d'un fenomen semblant a la percepció del color, en què un rang de freqüències d'oscil·lació de les ones de llum es perceben com a sensació de color, i les freqüències més enllà dels llindars -infraroges i ultraviolades- no són percebudes<sup>3</sup>.

<sup>(3)</sup>Des d'aquesta perspectiva és interessant pensar, imaginar, com deuen ser les percepcions d'altres espècies animals, i potser fins i tot vegetals, que evidentment són sensibles a les ones acústiques, i que tenen ritmes metabòlics i una esperança de vida molt diferents dels humans. El que per a nosaltres són sacsejades sísmiques, polsos rítmics, podrien ser percebuts com un continu per altres espècies, i el que percebem com a continu podria ser percebut com una seqüència d'esdeveniments separats per altres.

La **percepció de la intensitat i del temps** comparativament són molt més lògiques i evidents.

2) L'**amplitud** de l'oscil·lació de les molècules en el medi, prenent com a mesura relativa el desplaçament des del punt de repòs fins al màxim assolit, i el moviment invers en l'alta fase de l'oscil·lació, es tradueix en la sensació

d'intensitat. Així doncs, si el moviment és petit, lleu, el so es percep de baixa intensitat, fluix, i com més gran és l'amplitud de l'oscil·lació més fort i potent es percep el so.

Evidentment també tenim l·lindars per a la intensitat, des de vibracions tan mínimes que no podem sentir fins a vibracions tan fortes que poden causar molèsties i fins danys irreversibles. El volum, la intensitat, es mesura en **decibels** en memòria d'**Alexander Graham Bell**.

Si determinem el l·lindar auditiu a 0 dB -és a dir, una situació en què idealment no hi hagi cap oscil·lació, l'amplitud del moviment de les molècules d'aire és zero- podem situar el so quasi imperceptible del ventilador de l'ordinador en 10 dB, una conversa normal en 60 dB, el vol d'un avió en 140 dB, on se situa el l·lindar del dolor.

3) La percepció de la **durada** encara és més òbvia. Com que l'audició es produeix continuadament, quan una oscil·lació es produeix durant un cert interval de temps, l'oïda ens permet percebre aquestes durades. Altrament, és interessant destacar que quan un so es manté durant temps molt llargs, de manera continuada, podem arribar a no parar-hi cap atenció fins a deixar de sentir-los, si més no conscientment.

### Exemple

Penseu en el so de picar de mans o de fer espetegar els dits, encara que sembli un so curtíssim, producte d'un impacte que passa virtualment en un punt del temps, les vibracions poden estar entorn de 3.500 Hz, és a dir, 3.500 cicles per segon. Així, encara que l'ona es propagui i sostingui pels ossos només durant una centèsima de segon, en aquest temps curtíssim els ossos han oscil·lat 35 vegades. I això és el que percebem com a «clic».

4) Ara bé, i la **tímbrica**? Segons moltes definicions, la tímbrica és la propietat del so que permet identificar el tipus de font sonora, en termes de materialitat i de tipus d'acció que l'estimula. La tímbrica ens permet reconèixer i distingir veus, o diferenciar entre dos instruments que estiguin tocant la mateixa nota. Però en quina dimensió d'una ona de so es codifica aquesta mena d'informació? En quin punt de la successió d'esdeveniment es genera aquesta mena d'informació? Què hi ha de diferent entre una veu humana, una flauta, un violoncel tocant la mateixa nota, que fa que puguem distingir-les sense problemes, malgrat que puguin tenir semblances raonables? La resposta la trobarem en la complexitat. La pràctica totalitat dels sons que escoltem al nostre entorn, i també els que generem amb els nostres cossos, estan formats per **multiplicitat d'ones simultànies**. És en la percepció de la suma d'aquestes ones que podem reconèixer la materialitat i el procés energètic que té lloc en cada fenomen sonor, fins i tot aspectes com ara la forma i les dimensions de la font de l'oscil·lació. I això és així perquè quan un sòlid, un líquid o un gas vibra, ho fa deformant-se de diverses maneres simultàniament, en zones diverses de les seves dimensions, i fins i tot en diverses i diferents direccions alhora. Així doncs, aquestes múltiples vibracions simultànies en l'oscil·lador generen sons compostos de múltiples freqüències, que el nostre sistema auditiu descodifica, i així atribueix el caràcter particular de cada so, comparant-ho amb allò

### Sobre els Decibels

<<https://ca.wikipedia.org/wiki/Decibel>>.

### Mesurar el so

Per a la mesura del so s'utilitza una escala logarítmica que permet representar magnituds molt grans i molt petites amb nombres relativament petits, i que és adimensional perquè és una relació entre dos magnituds amb les mateixes dimensions, la pressió sonora respecte d'una pressió sonora arbitrària de referència que, per conveni internacional, són els 2 micropascals esmentats. Es tracta de l'escala decibèlica que expressa la magnitud del so en decibels, desenes parts de bel, una unitat rarament utilitzada. L'origen de l'escala, el valor 0, correspon al l·lindar auditiu humà (2  $\mu$ Pa), de manera que els valors negatius correspondrien a sons imperceptibles per als humans. El decibel no és una unitat del sistema internacional (SI) (hi ha científics que no la consideren una unitat), però és acceptat per a ser utilitzat amb les unitats del SI.

Disponible a: <[https://ca.wikipedia.org/wiki/So\\_-\\_La\\_percepció\\_del\\_so](https://ca.wikipedia.org/wiki/So_-_La_percepció_del_so)>.

### Contingut complementari

<[https://es.wikipedia.org/wiki/Timbre\\_\(acústica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Timbre_(acústica))>.

que ha après, fent ús d'una capacitat que ha evolucionat com un avantatge adaptatiu al medi. És així que som capaços de reconèixer el tipus de font d'un so que no podem veure, o d'imaginar quina és la font d'un so que no hem vist mai, comparant-lo amb una base de dades acumulativa. Aquesta capacitat evidentment es pot educar i entrenar, i ens permetrà ser capaços d'apreciar un nombre més gran de matisos i subtilestes.

Així doncs, podem pensar en sons que tenen una qualitat tonal ben discernible, sons amb certa qualitat tonal menys clara i sons sense cap qualitat tonal o atonals. Tanmateix, els sons atonals també poden presentar certa presència en bandes amples de freqüència, com ara un brunzit greu o agut, sense que puguem distingir-ne un sol to. D'altra banda, hi ha moltes altres qualitats que cal tenir presents en el so. Podem classificar un seguit de sons entre la polaritat tonal de més greus a més aguts, dins de la polaritat temporal entre més llargs i més curts, dins de la polaritat de la intensitat entre més forts i més fluixos; però pel que fa a la tímbrica, no podem establir un sol eix polar perquè cada timbre es refereix a una combinació de matèria, forma i procés, i, a més, sovint no tenim més remei que **apel·lar a altres sentits i camps semàntics** per a referir-nos a qualitats que els sons ens suggereixen, com ara textures, consistències, temperatures, gustos, lluminositat, pesos, etc., més o menys aspres, brillants o apagats, estridents o rodons, càlids o freds, durs o tous, llefiscosos, humits o secs, etc. D'altra banda, la tímbrica també té a veure amb l'evolució dinàmica de totes aquestes freqüències al llarg del temps.

Més endavant, ens ocuparem en diversos apartats d'aquest fenomen de la complexitat de sons compostos, i de com és que les formes i materials tenen aquests comportaments. Precisament és en el terreny de la música del segle XX -la més experimental i aventurada- on trobem un interès per ampliar la diversitat de timbres en joc i en el de la lutieria experimental i l'escultura sonora on precisament podem trobar exemples poc habituals de formes i materials que generen les tímbriques més innovadores. Així doncs, com més compreguem aquests fenòmens perceptius, i més entrenem l'oïda, més elements i objectius podrem plantejar-nos per a un treball sonor ric, aprofitant processos d'exploració de materials, formes i accions, cosa amb la que tot artista hauria d'estar familiaritzat.

#### Apreciar els matisos

Us recomanem que proveu d'escriure, de descriure i d'adjectivar les qualitats tímbriques dels sons, referint-vos a totes les dimensions combinades que hem comentat. L'esforç de reflexionar i descriure ens fa prendre més consciència i enfortir la nostra capacitat d'apreciar els matisos i operar mentalment en la nostra imaginació sonora.

### 3. Visualització cimàtica: nodes i antinodes

Si ens acostem més a la naturalesa de les oscil·lacions en els medis físics -sòlids, líquids, gasosos-, i amb vista a poder començar a manipular objectes i aprofundir en les complexitats de la tímbrica, ens convé comprendre més aspectes de la propagació de les ones. Per tot això ens convé trobar maneres de visualitzar les ones. Més enllà de la visualització amb eines electròniques com ara oscil·loscopis i programaris diversos, és possible visualitzar les ones acústiques directament en alguns medis. **La ciència i l'art d'aquestes visualitzacions s'anomena cimàtica i fou establerta pel físic acústic Ernst Chladni en el segle XVIII, malgrat que hi ha proves de la cimàtica des de temps immemorials.** La cimàtica es basa en el fet que les vibracions, les oscil·lacions periòdiques, tenen una amplitud en algunes parts que poden desplaçar altres molècules cap a regions on l'amplitud de la vibració és menor o nul·la.

Sobre la cimàtica:

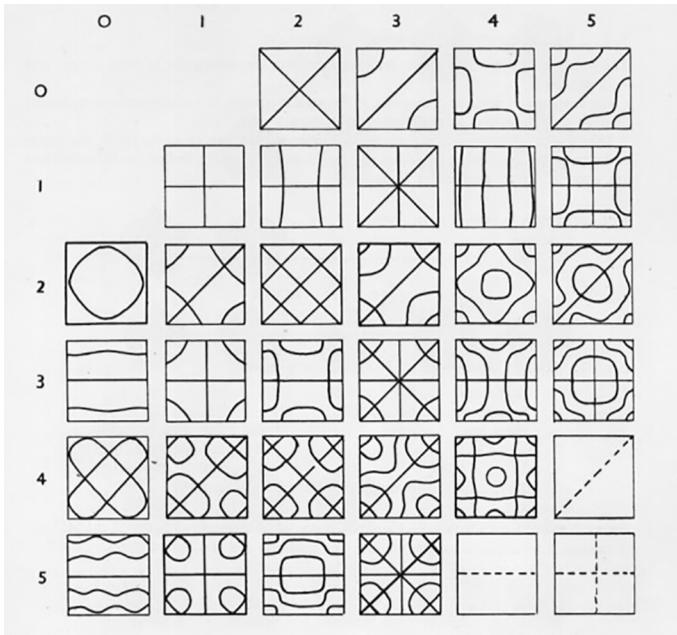
*Chladni Figures - random couscous snaps into beautiful patterns.* <[https://youtu.be/CR\\_XL192wXw](https://youtu.be/CR_XL192wXw)>.

#### **Exemple**

Si imaginem una corda tensada, podem entendre que si la fem vibrar, el punt on la corda es pot deformar més és just al centre i gradualment, perd llibertat de moviment, cap als extrems, i finalment en els punts fixos per on la subjectem, en què l'amplitud de l'oscil·lació és nul·la. Si dipositem pols a sobre de la corda, l'amplitud de la vibració en el centre elàstic desplaçarà la vibració als extrems. Així podem veure l'amplitud.

Chladni, que era molt bon violinista i havia observat les cordes vibrar habitualment, va dissenyar un experiment per a visualitzar les vibracions en plaques de metall. Dipositava algun tipus de sorra fina o pols en tota la superfície de metall i la fregava amb el seu arquet de violí, així proporcionava energia continuadament, de manera que l'energia de les regions on les ones tenien més amplitud empenyia la sorra a les regions on les ones no tenien amplitud. Aquestes són les cèlebres figures de Chladni.

Figura 1. Figures cimàtiques d'Ernst Chladni (dibuix de Mary D. Waller)



Font: <[www.cymascope.com/cyma\\_research/history/chladnigram.jpg](http://www.cymascope.com/cyma_research/history/chladnigram.jpg)>.

Fregant en posicions diverses aconseguia estimular i mantenir vibracions amb longituds diverses, amb tonalitats diverses, i per tant patrons gràfics diferenciats. Com més agut era el to, més curtes eren les longituds d'ona, i més intricats els patrons resultants.

Les regions dels cossos i de les ones on l'amplitud de l'oscil·lació és nul·la (on s'acumula la sorra), s'anomenen **nodes -nusos-** i les regions on l'amplitud és més gran i que expulsen la sorra s'anomenen **antinode**s.

Les regions nodals poden tenir altres materials en contacte sense que s'interrompi la propagació de les ones; en canvi, les regions antinodals són les més mòbils i les que necessiten poder estar lliures per a vibrar. Certs contactes lleus desplaçaran allò que hi posem en contacte per la mateixa vibració, certs contactes més fermes interrompren la propagació de les ones.

Cada objecte té la seva pròpia tensió natural, la seva elasticitat relativa natural i, per tant, unes **freqüències de vibració pròpies corresponents a unes longituds d'ona naturals**, que presenten regions nodals i antinodals. Per sort nostra, totes les formes i estructures similars presenten els mateixos comportaments nodals i antinodals. Així doncs, tota cultura que ha volgut fer vibrar una llistó de fusta, una pedra, una làmina de metall, ha trobat -per tacte, assaig i error- aquestes regions antinodals per a sostenir el cos, sense bloquejar-ne el so, sense necessitat dels càlculs científics que ens prediuen on s'originen nodes i antinodes.

Abans de Chladni, i des de temps immemorials, potser de manera fortuïta en alguns casos, la humanitat ha pogut observar les vibracions en membranes de timbals que acumulaven pols, o sobre les quals es dipositava sorra. Les membranes tensades tenen les seves freqüències i longituds d'ona naturals, però atesa la seva elasticitat i la seva poca massa relativa, també es poden forçar a vibrar per efecte del cant. Les ones de la veu en l'aire, si són prou intenses també poden mobilitzar la superfície de la membrana. Així doncs, podem visualitzar les longituds d'ona dels sons a l'aire (instruments de vent i veu humana, per exemple) si cantem contra una membrana de tambor. Aquesta és la idea que se sistematitza en l'*eidephone*, invent de **Margaret Watts** i perfeccionat per **Hans Jenny** sota el nom de tonoscopi.

*Hans Jenny's - Cymatic Soundscapes.* <<https://youtu.be/D2JeHlFtMDM>>.

#### **Voleu fer el vostre propi tonoscope?**

Si voleu provar a fer un *tonoscope* casolà per a començar a experimentar pel vostre compte, aquí podeu veure com fer-ho: *How to make a tonoscope.* <[https://youtu.be/jhL933QoK\\_Y](https://youtu.be/jhL933QoK_Y)>.

## 4. Propagació i interacció entre ones: progressives, estacionàries i batiments

Si una ona de so no es troba amb cap obstacle ni límit anirà perdent energia per la fricció o resistència que tot medi exerceix, és el principi d'entropia en el fons. Això té lloc, per exemple, quan emetem sons a l'aire lliure, on no puguin rebotar contra cap paret. Aquestes ones que s'extingeixen, que perden intensitat com més lluny estem de la font, s'anomenen **ones progressives**.

Per contra, quan les ones sonores es propaguen i topen contra límits (ja siguin ones dins d'un sòlid, un líquid o un gas) poden rebotar i emprendre una altra direcció, just oposada a la que duia o una altra en un angle diferent i dispersar-se. Quan les ones reboten i s'acumulen -pel fenomen de la ressonància que veurem a continuació-, parlem d'**ones estacionàries**. Quan sostenim un cos sòlid sonor per les seves regions nodals, podem activar la vibració i permetre que les ones es propaguin fins als extrems, rebotin i tornin enrere. S'acumulen i el so continua fins que la inèrcia es perd. Això mateix és el que passa quan polsem una corda tensada en els seus extrems. Si no interrompem la corda, les ones es propaguen de punta a punta, reboten i coincideixen sempre en les mateixes regions antinodals. És a dir, com que la corda o el tros de fusta són sistemes amb límits propis, externs i interns (nodes), si els respectem podem aconseguir que vibrin segons el seu potencial d'elasticitat.

Les ones poden interactuar entre si sumant-se o restant-se en funció de la relació matemàtica entre els seus períodes, i generar tota mena de fenòmens auditius.

Això ho anirem veient més endavant. En el mòdul «Síntesi de so» veurem com les matemàtiques de Fourier descriuen com les ones simples es poden sumar i crear-ne de més complexes. Algunes d'aquestes interaccions són **constructives**, com ara les que tenen lloc en les ones estacionàries: si tenen la mateixa freqüència se sumen i s'acumula amplitud, i per tant intensitat sonora. En altres casos, quan dues ones de freqüències diferents difereixen en molt pocs hertz, poden aparèixer **fenòmens destructius, seguits d'altres de constructius, que creen efectes de batiments i tremolos**, pel fet que les dues ones s'acumulen i s'anul·len alternativament en una seqüència en què el so resultant creix i decreix. Aquestes fluctuacions en el volum del so fruit de les interaccions constructives i destructives es poden produir de moltes maneres, i diverses cultures n'han fet ús.



**Exemple**

La cultura balinesa ha aprofitat aquest fenomen per a crear textures sonores molt interessants per superposició del so de dues làmines que estan desafinades des de la perspectiva de la tradició occidental<sup>4</sup>. Ho podeu veure en aquest vídeo: *Balinese gamelan ombak vibration*. <<https://youtu.be/SkrmzXOLFp4?t=36>>.

<sup>(4)</sup>La física que estudia el comportament de les ones és extensa. Al llarg de tota la matèria veurem la manifestació de tota mena de fenòmens, i esperem que us agafin ganes de saber-ne més. Encara que no necessàriament hàgiu de comprendre les matemàtiques que descriuen els fenòmens, és molt recomanable que anem coneixent aquest món. Si teniu curiositat per aquests fenòmens d'interacció entre ones podeu començar per aquest vídeo: *Pulsacions con ondas sonoras*. <<https://youtu.be/4X0cOF2qAKI>>.

## 5. Ressonància

Hem vist que les ones es poden acumular, i hem vist que cada objecte sonor - incloses cavitats i espais delimitats per algun tipus de paret- té unes freqüències naturals, vinculades a les longituds d'ona amb què vibraran tals dimensions amb tals elasticitats específiques.

El fenomen de la ressonància es produeix quan la freqüència d'una energia que es transmet a un objecte coincideix amb la seva freqüència natural. En aquest cas, les ones amb la mateixa longitud d'ona se solapen, l'energia s'acumula i l'amplitud creix molt més del que aparentment estem introduint en el sistema.

### Exemple

Una manera d'entendre aquest fenomen és observant l'acte de gronxar un gronxador. Quan impulem un gronxador, aquest es mou amb una freqüència pròpia i constant, amb independència de l'impuls que hi donem. Ara bé, quan el gronxador s'acosta al punt de màxima amplitud i canvia de direcció és el moment òptim per a empènyer-lo de nou. En aquest precís moment del temps podem aportar més energia de manera òptima (si ho fem quan encara se'ns acosta el gronxador ens empenyeria a nosaltres, i si ho fem quan ha començat el recorregut que s'allunya de nosaltres i serà difícil empènyer-lo perquè s'escapa en la mateixa direcció de l'empenta). Així doncs, si ens anem enretirant i empenyent en el moment just, l'oscil·lació del gronxador serà cada vegada més àmplia; per això, fent sempre una empenta petita, ens hem d'enretirar cada vegada més i la gronxada és més gran. No estem fent més que acumular energia per ressonància, fent coincidir la freqüència del nostre impuls amb la freqüència natural del gronxador.

La ressonància, ja sigui acústica o no, és un fenomen que pot acumular energia en proporcions descomunals, com demostra l'històric esfondrament del pont de Tacoma Narrows, que va entrar en ressonància per efecte d'un vent que el va fer vibrar de manera continuada. Veiem com el ciment armat aparentment sòlid es flexiona elàsticament, fins que acumula unes ones tan àmplies que l'estructura no pot resistir i es trenca. Aquest seria el mateix procés pel qual es pot trencar una copa amb la veu o amb el so, sempre que puguem sotmetre-la a una ona de so de la seva mateixa freqüència natural, per a acumular més amplitud d'oscil·lacions de les que pugui resistir.

*Tacoma Bridge.* <<https://youtu.be/3mclp9QmCGs>>

Aprofitem ara per a veure una peça paradigmàtica de l'art sonor: *I am sitting in a room*, d'**Alvin Lucier**, que precisament es basa en el fenomen de la ressonància d'un espai arquitectònic i l'aprofita. Es tracta d'una proposta que es descriu a si mateixa: ens mostra la transició d'una peça textual que es transforma en pur so per efecte de ser enregistrada i reproduïda en una mateixa habitació, de manera que les freqüències de ressonància naturals de la sala es van reforçant fins a fer desaparèixer qualsevol traça original de la veu. El procés d'iteració i filtratge que es produeix gràcies a l'enregistrament i reproducció en un espai

és interessant en si mateix, molt més per la brillant explicació del mateix fenomen que serveix de punt de partida conceptual i de matèria primera per a l'experiment. Us recomanem que l'escolteu seguint el text, i us adonareu que podeu continuar identificant les síl·labes i els quequeigs irònics de Lucier fins i tot quan la majoria de fonemes ja s'han dissolt en la ressonància pura de la sala. Dèiem que la peça és paradigmàtica del que anomenem art sonor, tant pel fet de ser interessant des de la poètica conceptual com per la sonoritat en si mateixa, especialment perquè les dues dimensions, la poètica conceptual i la realització, no es poden separar sinó que formen un tot coherent de coneixements i experiències indestriables.

Alvin Lucier. *I am sitting in a room*. <<https://youtube.com/watch?v=fAxHILK3Oyk>>.

## 6. Reverberació i eco

Veient interaccions diverses de les ones sonores, i relacionant-ho amb la ressonància, abordem ara la qüestió del so en espais amb límits o parets. Quan les parets d'un espai són paral·leles, les ones poden rebotar i fàcilment crear ones estacionàries, si alguna cosa estimula alguna de les seves longituds d'ona natural. Així doncs, com més eixos amb límits paral·lels tingui un espai, més marcat serà el seu perfil tonal, amb unes bandes de freqüència que més fàcilment s'amplificaran per ressonància com veiem a la peça d'Alvin Lucier. Això pot fer que si estem fent qualsevol activitat sonora, correm el risc que la sala de parets paral·leles ens respongui de manera desigual al que hi emetem, i amplifiqui unes freqüències més que altres, i per tant deformi, filtri el contingut sonor de la nostra proposta.

Quan parlem del so propagant-se per l'aire, aquest pot rebotar o ser absorbit en funció del material amb què topi. Hi ha materials absorbents, per la seva densitat i textura superficial, com ara les teles espesses, les escumes sintètiques pesants o el suro, i també hi ha configuracions geomètriques (superfícies asimètriques no regulars) que permeten trencar una ona de manera que es dispersi en moltes direccions i no generi un rebot audible, com ara les famoses caixes de cartró per als ous, que no insonoritzen però que poden evitar els rebots indesitjats o la formació d'ones estacionàries. D'altra banda hi ha materials que reflecteixen el so, materials durs i de superfície llisa, com ara pedra polida, ceràmica, metall, etc.

Quan el so rebotar i torna cap a l'oient, es poden generar els fenòmens que anomenem reverberació i eco. La reverberació consisteix en la prolongació dels sons emesos en un medi per l'acumulació de rebots de manera escalonada, que perden energia i generen una estela sonora.

Hi ha reverberacions molt curtes i altres de molt llargues, en funció de la geometria i les dimensions dels espais. Penseu en la reverberació curta, com enllaunada, d'un lavabo petit, i en la reverberació llarga i fantasmagòrica d'una gran catedral. En la reverberació les ones rebotades arriben a l'oient lleugerament més tard que les ones originals, però prou ràpidament per a coincidir. Com més rebots es produeixen i més diversitat d'arribades a l'oient, més llarga és l'estela, més es prolonga el so total reverberat. Altrament, quan tenim una superfície reflectant a una distància prou gran de l'oient -17 metres com a mínim-, una ona sonora trigarà prou a retornar per a ser percebuda com un segon so independent del primer. Així doncs, en l'eco no es produeix una estela

enganxada al so original sinó una o diverses repeticions. Alguns espais singulars, i des d'algunes ubicacions específiques dins d'aquests, poden presentar simultàniament eco i reverberació.

**Vídeo recomanat**

En el fragment final d'aquest vídeo podem escoltar clarament com canvia la reverberació d'una sala amb el terra dur i parets de fusta paral·leles, a mesura que s'hi instal·len materials absorbents: *Sound Recording Room / Foley Room - Sound Absorption*. <<https://youtu.be/uRyHtC2278?t=1045>>.

## 7. Morfologia del so i complexitat dels sons compostos

### 7.1. Atac, sosteniment, decaïment

Quan un so comença, en les primeres fraccions de temps en què es transmet l'energia a un cos o medi per a fer-lo oscil·lar, normalment s'exciten un munt de freqüències, però tan sols algunes es mantenen vibrant. Així doncs, podem distingir:

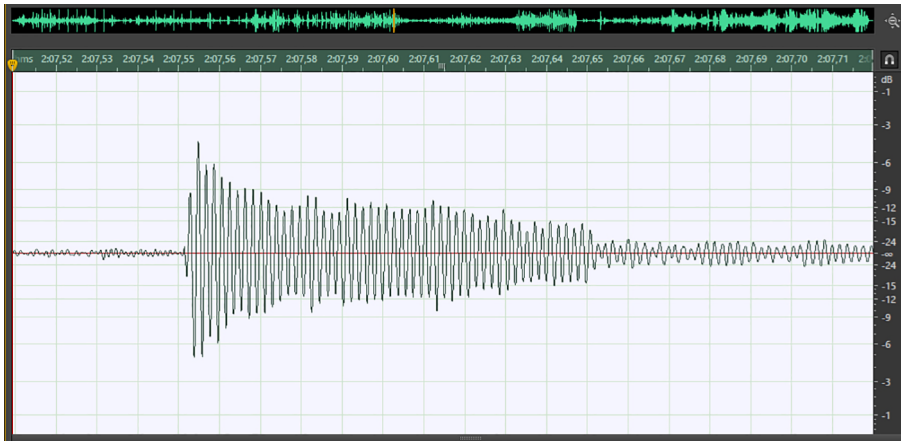
- la fase d'atac
- la fase de sosteniment o cos del so (les freqüències naturals de l'objecte ressonen)
- la fase de decaïment

Aquesta dinàmica d'intensitats, que podem anomenar **envolvent del so**, té lloc al llarg del temps, i no totes les bandes de freqüència duren el mateix ni varien alhora. Aquests comportaments complexos al llarg del temps formen part de la identitat tímbrica dels sons. Si enregistrem un so -imaginem el so d'una campaneta- i en retallem l'atac, eliminant totes les freqüències que associem a la transferència d'energia de la percussió al seu inici, escoltant només el cos del so que queda ressonant, el so ens pot resultar estrany fins al punt de no reconèixer-lo. Quan més endavant treballem en edició i síntesi de so, i vegem els experiments electroacústics sobre la morfologia del so del Groupe de Recherches Musicales de **Pierre Schaeffer**, veurem amb més detall les implicacions dels potencials creatius de comprendre aquestes facetes del so.

### 7.2. Els sobretons i la tímbrica

Quan comencem a enregistrar i editar so podem veure la forma de les ones, i convindria que poguéssim relacionar-la amb les qualitats del so. En general estem familiaritzats amb la representació bidimensional de les ones, de manera que podem veure'n l'amplitud en l'eix vertical i les duracions (i per tant les freqüències) en l'altre eix.

Figura 2. Forma d'ona



Font: Martí Ruiz

Però de nou, i la tímbrica? Bé, com dèiem, les característiques tímbrics de cada so es troben en la suma de diverses ones combinades, pel fet que gairebé tot allò que oscil·la ho fa en diverses longituds d'ona simultàniament.

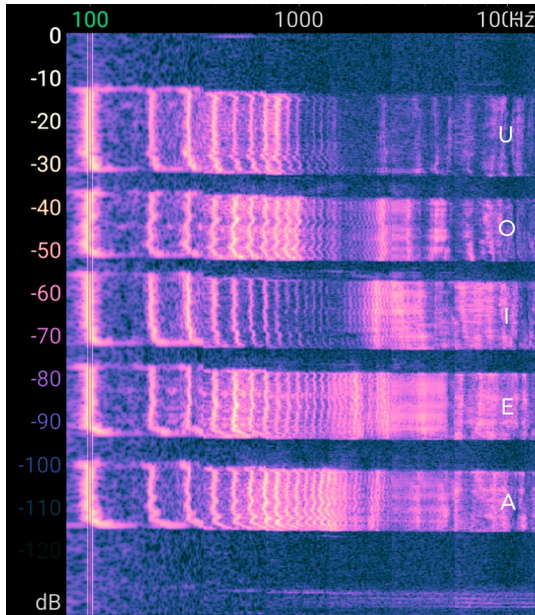
La longitud d'ona més llarga i greu s'anomena fonamental i la resta d'ones, més curtes i agudes, s'anomenen sobretons.

Avui en dia, per sort, tenim diferents maneres de visualitzar aquestes ones diverses, en particularment el que anomenem visió espectral, que ens mostra el temps en un dels seus eixos i les freqüències en l'altre eix, i deixa la representació de l'amplitud a valors de color o brillantor. Entre els molts programaris de visualització disponibles (*Sonic Visualizer*) i algunes aplicacions incorporades en programaris d'edició (*Audacity*, *Adobe Audition*, *Cubase*, *Logic*, etc.), us recomanem que us descarregueu alguna aplicació<sup>5</sup> per a visualitzar l'espectre sonor en temps real amb el mòbil i així poder experimentar amb els sons del vostre entorn i amb la vostra pròpia veu.

D'aquesta manera, si manteniu una sola nota amb la veu, hauríeu de veure un seguit de línies paral·leles, els sobretons, la suma de les quals forma la vostra veu. Si proveu de mantenir la mateixa nota i anar canviant la vocal -a, e, i, o, u- hauríeu de veure com la línia més greu es manté al mateix lloc i les línies corresponents als sobretons van canviant en intensitat segons la quantitat d'energia de cada banda de freqüències per a cada vocal. Com es formen tots aquests sons entre les nostres cordes vocals i la cavitat buconasal ressonadora?

<sup>(5)</sup>Recomanem particularment l'aplicació gratuïta «Spectroid» per a Android. Si teniu IOS podeu trobar «Analizador de espectro HD Pro», que també és gratuïta o «Spectrogram» per uns 10 €.

Figura 3. Espectre de la vocalització d'AEIOU



Font: Martí Ruiz

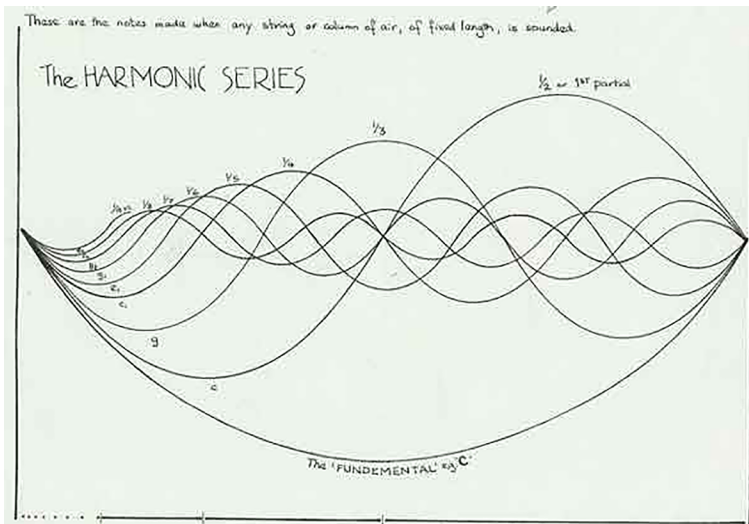
Pitàgores ja va descobrir que una sola corda produïa diverses freqüències simultàniament, o altrament dit, que una corda presentava diversos **modos de vibració, corresponents a la fonamental i els sobretons**. Havíem anunciat que qualsevol corda tensada genera un antinode amb una regió de màxima flexió al centre de la corda, i dos nodes en els extrems fixos. La secció central de la corda oscil·la d'un costat a l'altre, passant pel punt inicial de repòs cada mig període. El fet és que el moment en què el centre antinodal de la corda torna a passar pel punt inicial de repòs, la resta de la corda no està plana, perquè s'havia deformat inicialment i ara la deformació es produeix als dos costats, és a dir, que durant un curt període de temps, el màxim antinodal es converteix en un node just al centre de la corda i els laterals es flexionen formant dos antinodes. És a dir, la corda es divideix en dues meitats que vibren el doble de ràpid que l'oscil·lació central. Com que aquestes dues oscil·lacions tenen freqüències i longituds d'ona diferents, els dos fenòmens tenen lloc sense destorbar-se, passen en una seqüència de temps i amb una geometria molt precises. La longitud d'ona es divideix entre dos i la freqüència es multiplica per dos.

### 7.3. Sons tonals i atonals, la sèrie harmònica i les sèries inharmòniques

El més sorprenent és que la corda també es divideix en 3, 4, 5, 6, 7, etc. segments enters. Cada una d'aquestes longituds d'ona és resultat de multiplicar la freqüència fonamental per 3, 4, 5, 6, 7, etc. Aquesta progressió s'anomena **sèrie harmònica** i es produeix en totes les cordes. Les columnes d'aire, tot i oscil·lar longitudinalment dins d'una cavitat, presenten una formació de nodes i antinodes seguint aquest mateix patró de la sèrie harmònica. **Aquests sobretons, doncs, s'anomenen harmònics.**



Figura 4. Representació de la divisió harmònica d'una corda



Font: <[http://fden-2.phys.uaf.edu/211\\_fall2013.web.dir/zachariah\\_yarbro/Photos/STA-harmonic-series.jpg](http://fden-2.phys.uaf.edu/211_fall2013.web.dir/zachariah_yarbro/Photos/STA-harmonic-series.jpg)>.

Sembla difícil de creure que una corda pugui fer tot això alhora, però ho podem provar nosaltres mateixos de diverses maneres, amb qualsevol instrument de corda que tinguem a l'abast o tensant una corda de pescar de niló entre dos punts, o amb una molla de tracció com us proposarem més endavant.

### Exemple

Si teniu una corda tensada i poseu un dit prou a prop de la corda en una de les posicions concretes, per exemple, just al mig, estareu impedit que la corda vibri amb un node a la regió, de manera que bloquejareu la freqüència fonamental i tots els modes imparells que tenen un antinode al centre (3, 5, 7, 9, etc.), i, tanmateix, podreu escoltar com la corda encara pot vibrar en tots els modes parells que tenen un node al centre de la corda (2, 4, 6, 8, 10, etc.). Així doncs, el so més greu que escoltareu serà el 2, que se situa just a una octava més agut que la fonamental que heu bloquejat. Encara que hàgiu bloquejat la corda posant un dit que la interromp a la regió antinodal que vibra més en el seu mode fonamental, la corda continua vibrant, és a dir, podeu veure com la corda té diverses maneres de vibrar subdividint-se. Així, si poseu el dit prou a prop de qualsevol fracció entera de la corda ( $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/5$ , etc.), podreu escoltar longituds d'ona diferents. Cada una d'aquestes tonalitats que podem aïllar per aquest procediment són les que sonen simultàniament quan deixem que la corda vibri sense cap bloqueig.

I quin impacte té això en la tímbrica? El fet és que totes aquestes freqüències - presents en les cordes però també en les columnes d'aire i també en la nostra veu - tenen una relació matemàticament tant exacta que el nostre cervell, perquè ha evolucionat, comprèn immediatament que són components produïts en un sol esdeveniment per una sola font. Tot i que cada una d'aquestes freqüències té un to diferent, no les distingim i les sentim com un acord sinó com un sol so. Totes les cordes produeixen aquesta sèrie d'harmònics, però cada material, i cada corda en particular, **presentaran un patró d'intensitats singular per a cada harmònic**. Així doncs, la intensitat i la durada -l'envolvent dinàmica- de cada harmònic ens permet percebre les característiques de cada material i de cada font d'oscil·lacions en particular. També és així que podem reconèixer la veu dels nostres coneguts.

La sèrie harmònica es produeix en les cordes i les columnes d'aire. I la resta de formes? Doncs la resta de formes, en principi, no. El físic Ernst Chladni va començar a estudiar els patrons modals de vibració de formes poligonals -

quadrats, rectangles, triangles, pentàgons, hexàgons, etc.- demostrant que les relacions entre els diversos modes i sobretons no segueixen la sèrie harmònica. Altres físics han estudiat altres formes, com ara les barres i les llengüetes fixades en un extrem, discos, plats, campanes, diapasons, etc., i cada una d'aquestes formes presenten patrons no harmònics, és a dir, que la relació entre la freqüència fonamental més greu i els sobretons no segueixen una relació de multiplicació i divisió per nombres enters.

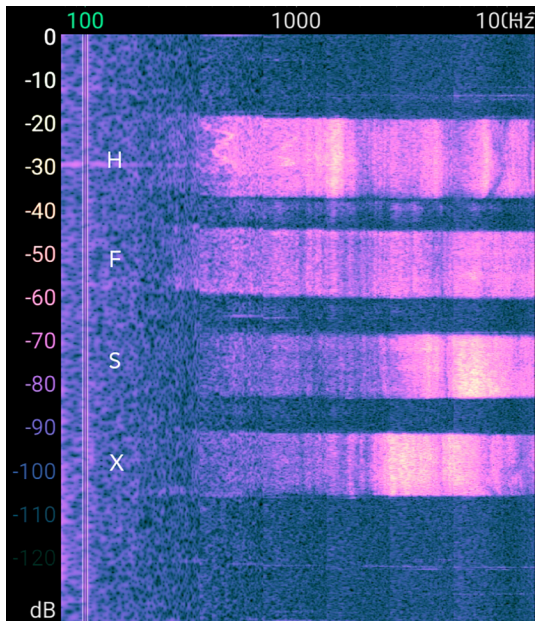
És a dir, en la sèrie harmònica, les diverses freqüències estan sincronitzades entre si, en qualsevol sèrie inharmònica els períodes no tenen cap relació de proporcionalitat en termes de nombres racionals. Això té múltiples implicacions en la percepció d'aquests sons compostos.

En alguns casos, els sons compostos per series inharmòniques encara poden generar una sensació de to clara, com ara les campanes i les làmines de metall o fusta suspeses pels nodes, tot i que si escoltem amb deteniment podem sentir algun sobretò com una veu independent i sense una relació particularment coherent amb la veu fonamental<sup>6</sup>.

En altres casos, totes les freqüències sumen i no podem distingir cap sensació tonal, de manera que tot passa a ser timbre, material, forma, accionament... Pensem en el so d'estripar un full, d'un cop de porta, d'un globus que explota, d'un gerro que es trenca. Tots aquests sons generen múltiples freqüències perquè moltes parts vibren amb longituds d'ona simultàniament, però no n'hi ha cap que predomini o que ens serveixi per a ordenar cap relació tonal entre aquestes.

Pensem en els sons de les consonants, que fruit de diverses accions produïm sons que no produeixen cap so tonal. Sons com ara els corresponents a les grafies *p*, *k*, *t*, *f*, *sh*, *ss*, *z*, *j*, i qualsevol en què no s'activen les cordes vocals, no ens permetrien taral·lejar cap melodia. Tenen timbres que podem distingir fàcilment, malgrat que cada un està format per bandes de freqüències molt àmplies. És molt recomanable provar amb tota mena de sons amb la veu i comparar-los entre si, observant com es distribueix l'energia en diverses bandes de freqüències, ja que qualsevol petita variació que fem podrem observar en quines bandes de freqüències es produeix i així guanyarem consciència de la morfologia dels sons i les seves característiques estructurals.

<sup>(6)</sup>Una ona estacionària tendeix a subdividir-se harmònicament, de manera que hi ha oscil·ladors naturalment inharmònics que s'acaben comportant de manera harmònica i tonal si els freguem i establim ones estacionàries. Penseu en el grinyol d'una porta, en el xerric de les potes d'una cadira lliscant sobre el terra. Es produeixen tons continus d'una qualitat molt diferent del so que produirien si rebes-sin un sol impacte.

Figura 5. Espectre dels sons consonàntics *x*, *s*, *f* i *h*

Veiem les bandes de freqüències corresponents als sons de *x* (*sh* com a *ship*), *s* sorda (com a *sound*), *f* i *h* aspirada (com a *Harry*).  
Font: Martí Ruiz

Des que naixem acumulem informació sobre aquests patrons espectrals, per les veus, pels instruments musicals de tot tipus, pels sons del nostre entorn quotidià i de l'imaginari popular compartit, de manera que de fet encara que no en tinguem cap consciència, sempre estem desxifrant atributs sobre la realitat de les fonts tímbriques, confirmant a cada so que sentim que es correspon amb el que en sabem i com esperem que es comporti.

Quan observem la forma d'una ona composta, veiem que no s'assembla a la típica representació sinusoidal del so, sinó que veiem formes molt més complexes. Això es deu al fet que de la mateixa manera que en la realitat les ones poden sumar-se i estar compostes per diverses freqüències alhora, el matemàtic Fourier va inventar el mètode per a representar-ho, com compondre i descompondre la suma d'ones compostes, i aquest sistema és el que fan servir tots els programaris.

Així doncs, tornant al so de les vocals, si mantenim un to amb la veu i anem transformant la vocal, passant de *A* a *E*, *I*, *O* i *U*, ara ja podem entendre que les cordes vocals generen un espectre harmònic de moltes freqüències i que segons com obrim o tanquem la boca, segons on posem la llengua, crearem unes cavitats de ressonància en les quals alguns dels sobretons originats en les cordes vocals podran ressonar més o menys. Totes les freqüències hi són potencialment, però quan cantem un to amb la vocal *a* sobretot tenen força els primers harmònics més greus, i quan canviem a *e* els harmònics entorn del 4, 5, 6 i 7 perden intensitat i la guanyen els superiors, 8, 9, 10 i 11. Podeu provar-ho amb la seqüència de sons *U O A E I*, i veureu com van apareixent i enfortint-se els harmònics superiors. Amb la boca estem equalitzant, canviant el balanç de freqüències ressonants i canviant la identitat d'aquest so. I el més fascinant és que la majoria de gent ho fa i no sap ni com ni per què passa. Ara que comencem a entendre aquestes complexitats, podem passar al següent

mòdul, en què ens capbussarem en la naturalesa de l'objecte sonor i en com es relacionen les qualitats i la morfologia dels sons amb els atributs dels objectes i fenòmens físics que els produeixen.

**Lectura recomanada del capítol:**

**Ruiz Carulla, M.** (2015). «Nocions clau sobre so i música» (pàg. 189-282). A: *Escultura Sonora Baschet, llibre d'amexos*. Barcelona: Universitat de Barcelona. Disponible a: <<http://tesi.tallerbaschet.cat/>> i a <[https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/363918/02.MRiC\\_ANNEXOS.pdf?sequence=15&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/363918/02.MRiC_ANNEXOS.pdf?sequence=15&isAllowed=y)>.

## Bibliografía

**Ball, P.** (2010). *El instinto musical. Escuchar, pensar y vivir la música*. Madrid: Turner Publicaciones S. L. (título original: *The Music Instinct. How Music Works and Why Can't Do Without It*).

**Levitin, D. J.** (2008). *Tu cerebro y la música*. Barcelona: Libros, S. A. (título original: *This is your Brain on Music*, 2006, USA).

**Sethares, W.** (1998). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. Londres: Springer-Verlag.

**Stone, W. H.** (1879). *Elementary Lessons on Sound*. Londres: MacMillan & Co.

