

## LA GENERACIÓ DEL SO EN ELS INSTRUMENTS MUSICALS

Hi ha essencialment dues maneres de produir sons. En la primera, el so es genera per una aportació única d'energia, que es va transformant en energia sonora. Parlem de VIBRACIONS TRANSITIVES. Produïm vibracions transitives per exemple pitjant una tecla de piano o colpejant una campana amb el seu batall. Les vibracions transitives tenen una duració limitada, ja que l'única aportació energètica es transforma pausadament en energia calorífica. La segona manera d'obtenir sons està basada sobre una aportació d'energia continuada, i permet teòricament obtenir sons d'una duració il·limitada. Parlarem de VIBRACIONS MANTINGUDES. Tant bon punt s'interromp l'aportació d'energia, les vibracions es troben en una situació similar a la de les vibracions transitives, i es van extingint. Com ja ho observava Tyndall en el seu llibre "Lectures on Sound", la fricció sempre es manifesta en forma ritmada, no contínua, i és aquest ritme que pot generar sons. Com a exemple es pot citar el xiulet d'un projectil en l'aire, però també el frec d'un arquet de violí sobre una corda.

Com ho hem vist en el capítol LA CORDA COM A FONT SONORA, una corda tibada permet generar vibracions dels dos tipus esmentats aquí. En el cas del violí es reuneixen els dos modes vibratoris en un sol instrument, ja que el violí es sol tocar amb arquet, però també en mode de *pizzicato*.

Sense insistir més aquí sobre els instruments de corda, passarem a un altre tipus de font sonora molt important, el tub en el qual una columna d'aire vibra en ressonància pròpia. La columna d'aire forma la base de la majoria dels instruments de vent. El seu mode vibratori és quasi exclusivament del tipus de les vibracions mantingudes.

Ja ens hem valgut d'un exemple d'una columna d'aire vibrant, la que conté el tub de Kundt, per a il·lustrar el fenomen d'ona estacionària. El tub de Kundt està tancat pels seus dos extrems. Una ona excitada per exemple en un dels seus extrems recorrerà tot el tub, es reflectirà contra la paret de l'extrem oposat, recorrerà el tub en sentit contrari, i es reflectirà contra la paret del primer extrem. Si

el període  $T$  de l'oscil·lació del punt excitador coincideix amb el temps de recorregut descrit, l'aire del tub es trobarà en ressonància i es crearà una ona estacionària amb un node a cada extrem. Ja que  $2 \cdot L = v \cdot T$  i  $f = \frac{1}{T}$ , la freqüència base de la ressonància en un tub

tancat de les dues bandes és  $f = \frac{v}{2 \cdot L}$ .

Si l'aire del tub s'excita amb una de les freqüències  $2 \cdot f$ ,  $3 \cdot f$ ,  $4 \cdot f$ , ...,  $n \cdot f$ , es torna formar ressonància amb una ona estacionària de  $n+1$  nodes.

Amb aquests coneixements, el tub de Kundt pot servir per a fer mesuraments indirectes de la velocitat de propagació del so en l'aire (o un altre gas) contingut en el tub. Newton havia elaborat una fórmula per a calcular aquesta velocitat de propagació. Malauradament els resultats experimentals no concordaven satisfactòriament amb els de la fórmula. La fórmula fou modificada per Laplace i la nova fórmula fou posada a prova experimentalment l'any 1829 per Dulong, que mesurà les velocitats de propagació del so en diferents gasos, valent-se d'un tub semblant al de Kundt. Dulong feia ressonar el tub insuflant un raig d'aire prou ràpid per a produir un to harmònic d'índex alt. Acte seguit hom enfonsava el pistó fins a tornar a sentir la mateixa nota. Ara hi havia un node i un ventre menys i la distància entre les dues posicions del pistó corresponien a mitja longitud d'ona del to. Una sirena de laboratori permetia determinar la freqüència del to amb gran exactitud. Vet aquí uns quants dels resultats trobats per Dulong:

Gas	Velocitat del so en m/s
Aire	333,00
Oxigen	317,17
Hidrogen	1269,50
Diòxid de carboni	261,60
Monòxid de carboni	337,40

Els tubs de tipus Kundt no són els que generalment es fan servir en els instruments de música de vent, sinó els que són oberts d'una o de les dues bandes.

Una experiència similar a la de Kundt es pot efectuar amb un tub tapat exclusivament en un extrem. Aquesta disposició correspon al ressonador descrit més amunt. Per a poder figurar-nos més bé la situació, hem d'imaginar-nos la columna d'aire subdividida en una sèrie de rodanxes, de pressió variable. L'ona consisteix en la propagació d'una certa quantitat des sobrepressió d'una rodanxa a

l'altra. Si al final del tub l'ona topa amb una paret, la zona de sobrepressió inverteix el seu recorregut, l'ona està reflectida. Però què passa si l'extrem del tub està obert? L'ona de compressió passarà per l'obertura del tub i deixarà darrera d'ella una zona de descompressió amb la direcció de propagació invertida. Aquí té lloc una reflexió amb signe invertit, comparable a la reflexió de l'última bola en el model ondulatori de la introducció d'aquesta obra, quan la bola no xoca contra la paret. Per tant la zona (o rodanxa) de compressió de l'extrem del tub s'ha convertit en una zona de depressió que recorrerà el tub fins a l'extrem tancat, on serà reflectida (sense canvi de signe) i tornarà topar amb la sortida oberta del tub. Veiem que en el cas del tub obert unilateralment l'ona ha de recórrer quatre vegades la llargada del tub per a accomplir un cicle. Anàlogament al cas del tub de Kundt, podem deduir per la freqüència base:

$$f = \frac{v}{4 \cdot L}$$

Aquesta fórmula, com la del següent cas, el del tub obert de les dues bandes, s'atribueix al matemàtic Daniel Bernoulli.

Si finalment es crea una zona de compressió en un tub obert en els dos extrems, el recorregut serà el següent:

Reflexió amb signe invertit contra un extrem, creació d'una ona de descompressió que es va a reflectir contra l'extrem oposat amb inversió de signe: creació d'una nova ona de compressió. Aquí l'ona només ha de recórrer la llargada de dos tubs per a complir un cicle. En podem deduir la fórmula de Bernoulli:

$$f = \frac{v}{2 \cdot L}$$

L'ona estacionària en un tub de Kundt excitat a la freqüència bàsica presenta un node en cada extrem i un ventre al mig. El revés passa en el tub obert bilateralment. Anotarem aquest fet com a (nvn) en el primer i (vnv) en el segon cas. Doblant la freqüència trobarem (nvnvn), respectivament (vnvnv).

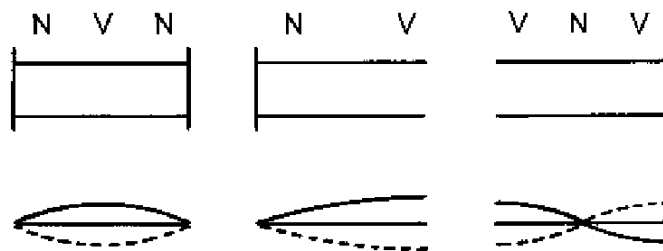
En el cas del tub tancat unilateralment tenim la configuració (nv). Si mirem la pròxima configuració possible, (nvnv) ens adonem que la llargada del tub ha quedat dividida en tres seccions. La pròxima configuració (nvnvnv) implica la subdivisió en 5 seccions. D'aquest fet podem treure la conclusió: un tub obert o tancat bilateralment està en ressonància amb totes les freqüències múltiples naturals de la freqüència fonamental, mentre que un tub obert unilateralment

només està en ressonància amb els múltiples imparells de la freqüència fonamental.

Adaptat a la realitat musical, aquest fet implica:

**ELS TUBS OBERTS (O TANCATS) BILATERALMENT PODEN EMETRE TOTS ELS PARCIALS HARMÒNICS DEL TO FONAMENTAL; EN EL TO D'UN TUB TANCAT (UNILATERALMENT) NOMÉS HI PODEM TROBAR PARCIALS HARMÒNICS D'ÍNDIXOS IMPARELLS.**

Hem d'assenyalar que els termes de nodes i de ventres en aquest context (com també en el cas de les cordes vibrants) es refereixen a la velocitat de les partícules (no a la freqüència) en els punts esmentats. Si en lloc de les velocitats considerem les pressions en cada zona, els nodes (de velocitat) corresponen a ventres (de pressió) i al revés.



Comparança dels tubs amb les cordes

La pràctica demostra que les fórmules de Bernoulli només representen una bona aproximació als fets reals. Les desviacions s'ha explicat amb diferents models matemàtics força complexes, però mai enterament satisfactoris. Això és degut essencialment a que els extrems oberts dels tubs no corresponen mai exactament a un ventre, com ho demana la teoria. Els constructors d'instruments sempre han compensat aquestes desviacions mitjançant unes fórmules empíriques com les que ideà per exemple el gran orguener Aristide Cavallé-Coll.

Com qualsevol ressonador, si ha de sonar, la columna d'aire en un tub s'ha d'excitar. En els diferents instruments de vent es fan servir sistemes excitadors (anomenats EMBOCADURES en aquest context) ben diferents. Les embocadures es poden subdividir en dues classes: les que es basen sobre les vibracions de l'aire exclusivament i les que es basen sobre algun objecte que es posa a vibrar pel pas de l'aire.

La primera classe d'embocadures, les EMBOCADURES DE FLAUTA, es basen sobre la propietat de l'aire en moviment de formar remolins darrere els obstacles. La freqüència amb què es formen aquests

remolins, comparables als que es formen en un riu darrera una pedra, determina l'altura d'un to, generalment de poca intensitat, però suficient per a fer entrar en ressonància la columna d'aire en un tub. Aquesta classe d'embocadura genera tons de la mateixa naturalesa com els xiulets que sentim quan un vent violent ve a trencar-se sobre un obstacle com pot ser una antena de TV.

L'embocadura de flauta pot ser proveïda d'un bec, com en el cas de la flauta dolça o del tub anomenat de boca, obert o tancat. Trobem l'embocadura de flauta sense bec en el cas de la flauta travessera o de la flauta de Pan per exemple. Aquest tipus d'embocadura ofereix una major varietat tímbrica que les de bec.

La segona classe d'embocadures, LES DE LENGÜETA, es pot subdividir en tres grups: les de llengüeta batent, com en el clarinet o en certs tubs d'orgue, les de llengüeta doble com en l'oboè o en la tenora, i finalment les embocadures de llengüeta lliure que es troben en l'acordió i en l'harmònim.

Les embocadures dels metalls, dons de les trompetes, trombons, trompes, etc. es poden considerar instruments de llengüeta doble, en els quals els llavis humans fan de llengüetes. La forma de l'embocadura i la posició dels llavis són factors que influeixen notablement sobre el timbre d'aquests instruments.

En una columna es poden excitar diferents harmònics. No s'han de confondre els HARMÒNICS amb els PARCIALS HARMÒNICS, ja que un parcial harmònic és un to pur, mentre que l'harmònic amb una freqüència (aproximadament) igual a la del parcial harmònic del fonamental és un to compost amb els seus propis parcials harmònics. El mateix passa amb les cordes.

Per a deslligar els instruments de vent de la seva limitació als tons harmònics s'han ideat diferents recursos. El primer és la presència de diferents tubs, cada qual amb la seva nota característica, com en el cas de l'orgue o de la flauta de Pan. En els metalls, des del segle XVIII els músics es van donar compte que introduint la ma en el pavelló s'alterava la llargada efectiva del tub i es podia obtenir una certa alteració de l'altura del to. Però aquesta manera de variar la freqüència del to també implicava una variació sovint indesitjable del timbre de l'instrument. Més endavant es van inventar les vàlvules, una mena d'aixetes que permeten intercalar un tros de tub suplementari amb una simple pressió digital. Amb tres o quatre vàlvules la majoria dels metalls s'han convertit en instruments cromàtics.

En el cas de les flutes, dels clarinets etc. el tub està perforat en diferents nivells i això podria fer pensar que el nivell del primer forat destapat vist des de l'embocadura marca la llargada efectiva del tub.

Però les coses no són tan senzilles, i una flauta també es comporta una mica com un ressonador de Helmholtz, en el qual la freqüència varia essencialment amb la superfície interior. La distribució dels forats en un instrument de vent és fruit de l'experiència de generacions de constructors i no es pot pas expressar en una senzilla fórmula matemàtica.

En aquest context també hem de mencionar un problema propi als instruments de vent que es manifesta enutjosament, sobretot en les èpoques en les que la freqüència del La solia variar considerablement d'un lloc a l'altre: el problema de l'afinació. En efecte una flauta s'afina fent variar la distància entre l'embocadura i el primer forat. Però només hi ha una posició per la qual les freqüències dels diferents tons guarden unes proporcions òptimes entre elles. D'altra banda hem de senyalar que bufant vigorosament, el to emès per una flauta per exemple tendeix a pujar lleugerament, efecte que podria servir a corregir un grau mínim de desafinació.

Mencionarem aquí un instrument de vent interessant per la seva construcció especial. Ens referim A L'OCARINA, que està feta íntegrament de *terracotta*, d'una sola peça. Es tracta essencialment d'un ressonador de Helmholtz amb embocadura de flauta i un conjunt de forats per a variar la freqüència de ressonància. Generalment hi ha dos calibres de forats, un pels semitons, l'altre pels tons enters. Cada forat que es tapa amb un dit fa baixar el to d'un interval corresponent a les seves dimensions, però no importa (teòricament) l'emplaçament del forat, sinó exclusivament la seva superfície.

Encara que els instruments de corda i de vent formen els dos grups d'instruments musicals més importants, les orquestres no poden prescindir d'un altre grup, més idoni per a marcar el ritme que no pas per formar la melodia i l'harmonia. Ens referim als instruments de percussió. Aquests estan basats generalment sobre les vibracions produïdes en les tres estructures següents: LES VARES, LES PLAQUES I LES MEMBRANES.

Les vares en forma de paral·lelepípede poden vibrar essencialment de quatre formes: vibració longitudinal, transversal en una o en l'altra direcció i torsional. La combinació dels tipus de vibració depèn de la forma d'excitació (doncs del lloc, de la direcció, de la força de la percussió o del freq, de la forma i consistència de l'objecte excitador etc.), de la fixació de la vara (en un punt o en un altre, en dos punts, etc.) i finalment del material de què està feta la vara. En efecte un material elàstic i relativament homogeni com pot ser l'acer, permet unes vibracions molt diferents que no pas un material amb una pronunciada anisotropia com és la fusta. Els tons



que emet una vara no són harmònics. En molts casos el to que considerem propi d'una vara és poc definit i només representa un màxim dins una distribució contínua de freqüències. Aquest és el cas per les vares de fusta que es fan servir en el xilofon.

Un instrument basat sobre la vara és el triangle, que es pot considerar una vara cilíndrica corbada en dos punts.

També està derivat de la vara el diapasó, inventat l'any 1711 per John Shore. Com tothom sap, el diapasó no és un instrument de música pròpiament dit, però serveix de calibre especialment apte per a afinar-los, ja que el seu to fonamental té un important predomini d'intensitat sobre els seus parcials inharmonics. A més, el segon parcial està bastant allunyat del to fonamental, de manera que l'oïda sent un to gairebé sinusoidal. El diapasó es pot interpretar com una vara corbada en un punt, o bé com un conjunt de dues vares soldades contra un mateix suport. Com en el cas de les cordes vibrants, el to d'un diapasó s'ha de reforçar amb una caixa de ressonància, que pot ser qualsevol taula o tauló de fusta. La variabilitat de la relació de les intensitats dels diferents parcials segons el punt de percussió i les característiques del percussor es poden posar de manifest molt



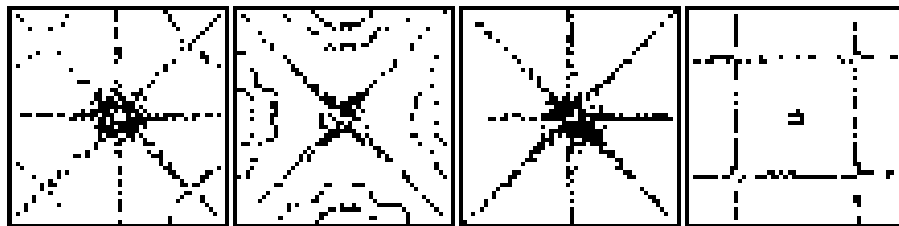
Fent vibrar la placa

clarament si percuem un diapasó una vegada amb un objecte tou (per exemple un martellet de goma tova) i un altre cop amb un objecte dur com ara una baqueta d'acer. En el primer cas obtindrem un so format gairebé exclusivament pel to fonamental, mentre que en el segon sentirem uns tons parcials alts, que ens donaran la sensació d'un so dur i desagradable. Durant la història

es van construir diferents instruments de teclat basats sobre el diapasó. Mencionarem aquí *el Dulcitone*, *el Typophone* i *l'Adiaphone*, entre altres d'aquests instruments que no van tenir més que un èxit temporal. Entre els instruments que encara es fan servir correntment avui, el *Celesta*, invenció de Mustel, és el que es sembla més a aquests instruments de diapasons.

En acústica es consideren PLAQUES unes làmines de material consistent, propenses a vibrar. Són d'especial interès les plaques de secció rodona i quadrada. Les plaques, segons els seus punts de fixació i d'excitació, poden vibrar d'unes maneres molt complicades, que va estudiar per primera vegada Chladni, l'any 1787. Chladni fixava horitzontalment una placa metàl·lica quadrada sobre un suport mitjançant un cargol que passava per la intersecció de les diagonals de la placa. Sobre la superfície de la placa hi espargia sorra fina o llimalla de suro i acte seguit feia vibrar la placa amb un arquet de

violí. En la superfície de la placa es formaven estructures més o menys complicades de nodes i de ventres. Les zones de màxima intensitat vibratòria, els ventres, agitaven els grans de sorra que s'anaven apilonant en les regions més quietes, els nodes. Si a més es toquen alguns punts del marge o de la part inferior de la superfície de la placa, aquests punts es converteixen en nodes i canvien totalment el dibuix que la sorra crea sobre la placa.<sup>1</sup> Chladni ja va obtenir més de dues-centes figures diferents d'aquesta manera. La figura representa esquemàticament alguna de les possibles figures de Chladni sobre plaques quadrades. A més d'oferir una demostració molt elegant, les figures de Chladni havien d'oferir més endavant als "*luthiers*" una eina valuosa per a afinar les taules de violí, abans del muntatge. En efecte, l'experiència de generacions de "*luthiers*" ha demostrat que les taules de violí (que es comporten com unes plaques acústiques complicades), han de presentar unes figures de Chladni ben determinades, si es fixen i es percuden en uns punts establerts.



Figures de Chladni

També les CAMPANES es poden interpretar com unes plaques vibrants corbades. Degut a la gran complexitat matemàtica de les vibracions de les campanes, la fosa de campanes és un ofici basat sobre l'experiència de segles, i queden ben poques factories capacitades per a fer bones campanes.

Les plaques, mal anomenades membranes en aquest nexce, es fan servir en diferents transductors, acústics i electroacústics, com ara la càpsula fonogràfica clàssica, el telèfon, etc.

També les copes de l'harmònica de cristall es poden considerar plaques corbades. L'harmònica de cristall, que es toca fregant lleugerament la vorada de les copes, afinades amb unes gotes d'aigua en el seu interior, amb un dit exempt de grassa, fruía d'una certa popularitat a l'època del classicisme, quan la majoria dels compositors importants van escriure alguna peça per a aquest

<sup>1</sup> Les figures 'Fent vibrar la placa' i 'Figures de Chladni' s'han reproduït a partir d'unes xilografies al boix d'un llibre del segle XIX.



instrument. Però el to estrident, carregat de parcials inharmonics i de pulsacions entre ells, i potser també la creença de que aquests sons generaven malalties del sistema nerviós, contribuïren a la desaparició successiva de l'instrument, i avui segurament ja només queden gravacions fonogràfiques d'un últim gran intèrpret d'aquest peculiar instrument musical: Bruno Hoffmann.

Mentre que les vibracions de les plaques es basen en la rigidesa del material, les MEMBRANES vibren, perquè són sotmeses a tensió, com és el cas dels tambors. Hom podria considerar una membrana com una corda bidimensional: la tensió i l'extensió es troben en una recta, en el cas de la corda, en un pla, en el cas de la membrana. La membrana té moltes propietats acústiques comunes amb la placa.

Finalment descriurem breument una màquina generadora de tons estrictament periòdica, que no ha trobat cap aplicació musical, però que era una eina imprescindible dels investigadors acústics del segle XIX. Ens referim a la sirena, inventada l'any 1819 per l'enginyer francès Cagniard de la Tour. La sirena deu el seu nom al fet que permet la producció de sons sota l'aigua. El model més senzill d'una sirena és un disc rotatiu perforat concèntricament en distàncies iguals. Un tub aplicat davant els forats dirigeix un raig d'aire a través els forats a mesura que aquests van passant. La freqüència del to produït d'aquesta manera correspon exactament al nombre de forats que desfilen davant el tub en el temps d'un segon.

La sirena descrita aquí no passa de ser un model de demostració, però les sirenes utilitzades en la pràctica estan basades sobre aquest mateix principi. No insistirem sobre els models perfeccionats de sirenes, però mencionarem que s'han construït diferents models de laboratori que permeten controlar exactament la freqüència del to emès. Per la seva sonoritat estrident i per la possibilitat de produir sons de gran intensitat, la sirena encara avui es fa servir d'alarma acústica. Les sirenes utilitzades per a aquesta finalitat es solen moure a velocitat variable, de manera que canvien constantment de freqüència.

## EL TIMBRE

En el primer capítol del seu llibre "Die Lehre von den Tonempfindungen", Helmholtz distingeix entre els SONS MUSICALS, amb la característica de ser periòdics, i les FRESSES o SOROLLS. La majoria dels instruments musicals tenen la propietat d'emetre sons periòdics (al menys aproximadament), és a dir tons amb parcials harmònics. Hi ha excepcions, sobretot en el camp dels instruments de percussió. Helmholtz assigna tres característiques fonamentals als sons musicals, la seva INTENSITAT, la seva ALTURA (freqüència) i el seu TIMBRE. Fins aquí hem parlat de les dues primeres característiques dels sons musicals i només hem fet alguna insinuació sobre la característica més complexa, el timbre. EL TIMBRE, des del punt de vista de la percepció és aquella qualitat que permet distingir dos tons musicals d'una mateixa freqüència i de mateixa intensitat. Així per exemple, qualsevol persona dotada d'una oïda normal distingirà el La de 440 Hz tocat amb un clarinet del mateix La tocat amb un violí o un piano. Un dels factors més importants en la constitució del timbre d'un to és l'estructura dels sobretòns, que es pot representar gràficament per l'espectre dels parcials. Els tons sinusoidals només es diferencien entre ells per dues de les tres propietats dels tons periòdics, doncs per la seva intensitat i la freqüència. En canvi dos tons formats per un to fonamental i el segon parcial harmònic (doncs un sobretò amb la freqüència doble del fonamental) es distingeixen en el timbre segons la proporció entre les intensitats del fonamental i de l'altre parcial harmònic. El mateix succeeix amb tons periòdics que tenen el mateix fonamental i 3, 4, ..., n parcials harmònics. Quan la intensitat dels primers parcials és relativament gran, sentim un to més aviat suau i dolç. Quan al contrari el to presenta parcials harmònics alts d'una intensitat no negligible, el to té un caràcter dur i estrident. Entre les dues possibilitats totes les combinacions són possibles. És notable entre altres el cas del tub d'orgue tapat unilateralment que només emet els parcials harmònics d'índexs imparells. En canvi la sirena emet una ona gairebé triangular (en forma de serra), en la qual hi trobem pràcticament parcials

harmònics de tots els indexes naturals, si ens recordem de la descomposició de Fourier. D'aquí l'estridentia de la sirena.

Una disposició generadora de tons sol afavorit unes estructures de parcials diferents segons la seva excitació. D'aquí s'explica la variació de timbres d'un mateix piano, segons la duresa del martellet, la seva forma i el punt de percussió.

Fins aquí no hem tingut en consideració la influència que poden tenir sobre el timbre d'un to continu les fases dels diferents components parcials. Citem aquí l'anomenada llei de Helmholtz sobre les fases dels parcials:

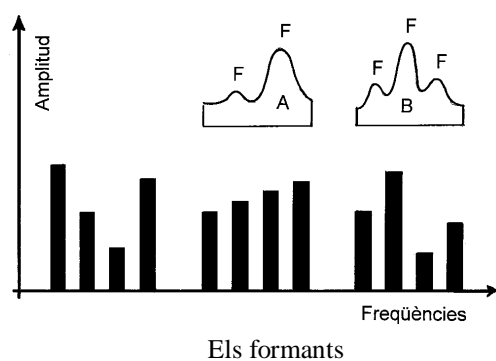
**ELS TIMBRES DELS SONS MUSICALS SÓN DETERMINATS  
PER LES INTENSITATS (I PER LA PRESENCIA O L'ABSÈNCIA)  
DELS PARCIALS HARMÒNICS, I NO VARIEN AMB LES  
DIFERÈNCIES DE FASE.**

Tot i que és possible construir artificialment uns exemples en els quals el timbre d'un to varia lleugerament amb unes alteracions de les fases dels parcials implicats, la llei de Helmholtz descriu força bé la situació. D'aquí que la representació sonogràfica d'un so (que no té en consideració les fases dels parcials!) ens ofereix una descripció molt eficaç de l'estructura sonora considerada.

Sense la vigència (relativa) de la llei de Helmholtz, una conversa telefònica difícilment seria intel·ligible, ja que les fases dels tons solen desviar-se en funció de la seva freqüència. Fletcher ens cita l'exemple d'un desviament de fases proporcional a l'arrel quadrada de la freqüència. Tot i així no notem cap confusió de timbres atribuïble a aquestes diferències de fase, i això és una sort, ja que el timbre, com ho veurem més endavant, és l'única qualitat sonora que ens permet distingir acústicament una vocal de l'altra.

Degut a les diferents posicions que poden tenir dues o més ones sinusoïdals entre elles, és extremadament difícil, per no dir impossible, dilucidar visualment la descomposició en ones sinusoïdals d'una corba fonogràfica donada. Desfasant els parcials és fàcil construir corbes fonogràfiques d'un mateix to que òpticament no es semblen de res, però que auditivament ens donen la mateixa sensació de timbre. Aquest fet queda demostrat per les corbes 3 i 4 de la figura amb el títol "4 corbes periòdiques" del capítol REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL SO I UNITATS DE MESURA. També és possible (però més complicat) d'obtenir dues corbes fonogràfiques que se semblen bastant a simple vista, a partir d'estructures de parcials ben diferents.

Si muntem una mateixa corda de violí en dos violins diferents, els timbres generalment varien força d'un violí a l'altre. Les caixes de ressonància dels dos instruments no responen idènticament als tons de diferents freqüències. Un to o una regió de freqüències que experimenta un fort increment d'intensitat en la caixa de ressonància d'un instrument s'anomena un FORMANT. Ja que els formants són distribuïts desigualment en dos violins, els espectres de freqüència dels tons emesos per la corda canvia d'aspecte d'una manera característica per a cada violí. Per a il·lustrar aquest fenomen, la figura "Els formants" ens mostra la transformació d'un mateix espectre de parcials harmònics per dues corbes de resposta diferents, A i B. Els punts F representen els formants de l'exemple de la figura.



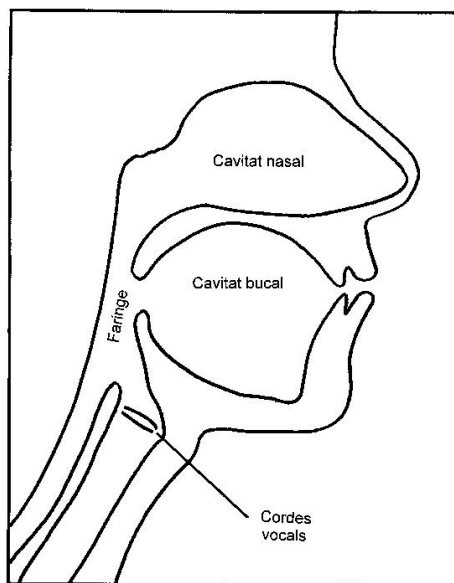
Els constructor de violins o de qualsevol instrument musical previst d'una caixa de ressonància busca una corba de resposta amb unes propietats determinades. Entre altres condicions, s'han d'evitar els formants molt accentuats situats en la tessitura de l'instrument, ja

que certs tons quedarien amplificats d'una manera desproporcionada. L'experiència ha demostrat que les corbes de resposta dels violins de qualitat notable presenta un sot en la regió dels 1500 Hz i un fort augment en la regió entre els 2000 i els 3000 Hz. Amb els instruments de corda es poden produir tons d'un timbre particularment dolç si la corda es toca lleugerament en un dels seus nodes i s'excita la corda de la forma usual. Aquests tons s'anomenen HARMÒNICS (o HARMÒNICS INSTRUMENTALS) i tornem insistir en el fet que s'han de distingir dels parcials harmònics, ja que els harmònics instrumentals són constituïts per un to fonamental i uns parcials superiors, mentre que un to parcial és un to pur, doncs sinusoïdal, sense parcials superiors. Els harmònics instrumentals formen un típic recurs dels instruments de corda fregada, sobretot del violí.

A més de determinar el timbre dels instruments musicals, els formants juguen un paper importantíssim en la formació fonètica dels vocals. En efecte, els diferents vocals que pot produir la veu humana només es distingeixen pel timbre, ja que per exemple podem cantar una 'u' i una 'o' sobre una mateixa nota i amb idèntica intensitat i llargada. Sembla que un dels primers que intuï aquest fet fou el físic anglès Wheatstone, a la vora de 1837. Les nostres cordes

vocals emeten un so aproximadament periòdic, amb un espectre de parcials bastant igualat. La freqüència d'aquest to varia d'una persona a l'altra, principalment segons l'edat i el sexe. El so emès per les cordes vocals es reforça parcialment en tres cavitats corporals que compleixen la funció de ressonadors: la faringe i les cavitats bucal i nasal. El vel assumeix la funció de vàlvula per a distribuir l'aire sobre les dues últimes cavitats citades. La freqüència de ressonància pròpia de la boca es pot graduar per mitjà de les diferents posicions dels llavis, de la llengua, de la mandíbula, etc. En menor mesura passa el mateix amb la faringe i la fossa nasal. Cada una de les tres cavitats formen doncs ressonadors graduables que constitueixen els tres formants principals de qualsevol vocal que pronunciem. És interessant constatar que si el to fonamental de la veu varia amb l'edat i el sexe, això no és el cas pels formants dels vocals. Per exemple la 'a' correspon a uns formants veïns a les notes Fa # (4), Do # (5) i Re # (6), tant si és pronunciada per una nena de 10 anys, com per un home adult. Òbviament els formants de les

vocals varien segons la pronunciació pròpia de cada idioma i de cada dialecte. La figura representa d'una manera molt esquematitzada la disposició de la faringe amb les cordes vocals i les cavitats bucals i nasal.



Formació de les vocals

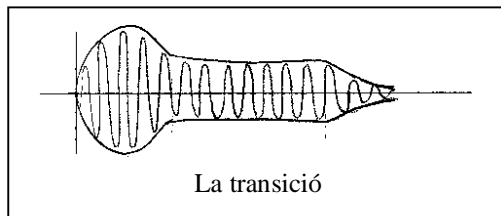
Degut als formants característics dels vocals, els timbres d'una composició vocal depèn de les lletres que corresponen a cada to. D'altra banda, la distribució dels formants implica la impossibilitat de cantar segons quina vocal sobre segons quin

to: per exemple la 'o' no es pot cantar sobre una nota molt aguda. Aquests dos fets ofereixen una argumentació sòlida als rivals de la traducció de la música vocal.

A la vora de 1855 Helmholtz construï un aparell que es pot considerar com el primer sintetitzador de tons. Consistia en un conjunt de diapasons amb vibracions mantingudes per electroimants. Amb aquest aparell es podia reproduir fàcilment qualsevol vocal a partir dels seus formants.

Gràcies al principi elemental de la formació dels vocals, a la vora de 1870 l'americà Faber va poder meravellar els seus contemporanis amb una MÀQUINA PARLANT de la seva construcció, basada sobre ressonadors acústics amb parets movibles acoblades a un teclat semblant al d'un piano. Segons certes fonts, el filòsof Albert el Gran hauria posseït ja un cap artificial parlant a mitjans del segle XIII, que hauria estat considerat un invent del dimoni pels seus contemporanis. Diuen que Sant Tomàs d'Aquí va destruir aquest artefacte. Aquest últim extrem confirmaria el bon funcionament de la màquina.

Les vocals no constitueixen pas la totalitat dels fonemes d'una llengua, sinó que també existeixen uns sons d'una duració generalment limitada i d'una estructura aperiòdica, els consonants. En els consonants hi intervenen clarament uns fenòmens de transició



(variació d'un estat vibratori a un altre), que són elements decisius per a caracteritzar el timbre de molts instruments. S'ha fet l'experiència de gravar un to d'un piano o d'una guitarra sobre una cinta magnètica i d'enganxar-ne

un trosset petit en forma de bucle, de manera de poder escoltar el to de manera gairebé contínua. La gran sorpresa és que el timbre propi del piano o de la guitarra ha quedat pràcticament incognoscible, per falta dels fenòmens de transició, doncs de la corba d'intensitats que recorre el to. En efecte un to musical normalment no té la mateixa intensitat durant tota la seva duració, i en aquest sentit no és estrictament periòdic durant tota la seva duració. La duració d'un so es sol dividir en tres fases (arbitràriament) que anomenarem aquí: ATAC, FASE PERIÒDICA I EXTINCIÓ. Aquestes fases no són conceptes de precisió matemàtica.

Si es tracta d'imitar el so d'un instrument tradicional amb medis electrònics, òbviament la corba de transició s'ha de tenir en compte, i una corba fonogràfica periòdica quedarà MODULADA de la manera que ho esquematitza la figura.

Però les coses no són tan senzilles: les investigacions recents han mostrat, que en la majoria dels casos cada parcial del to contemplat pot tenir una corba de transició individual, i que sobretot en el moment de l'atac (que per certs tubs d'orgue pot superar el temps de mig segon) hi poden participar freqüències de distribució contínua o aleatòria. Aquestes són unes explicacions per les grans dificultats existents per a sintetitzar música (amb sintetitzador electrònic o amb ordinador) de forma musicalment satisfactòria.



Encara que aquesta obra es dedica especialment a l'estudi dels tons musicals, doncs dels fenòmens acústics periòdics o gairebé periòdics, no hem de perdre de vista el fet, de que la majoria dels sons no són musicals i cauen en la categoria dels sorolls. Pot resultar sorprenent el fet, que en certes circumstàncies, la nostra oïda tendeix a assignar una freqüència ben determinada àdhuc als sorolls, encara que no pas d'una manera tan concisa com és el cas per exemple per un to sinusoidal. En efecte, en una distribució contínua de freqüències, l'oïda pot destacar una freqüència mitjana o representada per una màxima intensitat, doncs assignar una mena d'altura estadística a un soroll. Aquest efecte es pot demostrar, colpejant diferents taulons amb un martell, per exemple. Colpejant el primer tauló, potser ens serà difícil adjudicar un to determinat al soroll produït. Però quan piquem sobre el segon tauló, no ens serà difícil decidir, si aquesta segona fressa s'ha de considerar més alta o més baixa que la primera. Amb fustes escollides adequadament es pot arribar a construir una veritable escala d'aquests sorolls-tons. Quan un soroll està constituït per una distribució homogènia de totes les freqüències audibles, es parla d'un **SOROLL BLANC** o també d'un **SOROLL DE GAUSS**<sup>1</sup>.

En capítols anteriors hem vist que la reproducció de dos tons pot provocar pulsacions, tons de diferència i àdhuc tons de suma. Aquests efectes s'anomenen objectius si tenen lloc fora de l'oïda. En aquest cas són detectables físicament, per exemple amb ressonadors. Els tons de combinació i les pulsacions sovint són produïts en la mateixa orella, i en aquest cas són anomenats subjectius. De la mateixa forma que dos tons sinusoidals poden repercutir un sobre l'altre, creant pulsacions, tons de combinació (objectius o subjectius) o emmascarar-se, també ho solen fer els tons parcials de dos tons compostos i àdhuc els parcials d'un sol to compost entre ells. Així per exemple la quinta (Do (3), Sol (3)) temprada d'un piano ben afinat no produiria cap mena de pulsacions audibles, si no fos per la presència dels parcials. En efecte el tercer parcial harmònic de Do (3) i el segon parcial de Sol (3) gairebé coincideixen (coincidirien exactament, si la quinta fos natural, és a dir que la proporció entre les freqüències dels dos tons fos 3 : 2). En efecte, el tercer parcial del Do (de 261,625 Hz) té la freqüència de 784,876 Hz, mentre que el segon parcial (l'octava) del Sol (de 391,995 Hz) té la freqüència de 783,990 Hz. Obtenim unes pulsacions molt lentes d'uns 0,88 Hz. Aquestes pulsacions donen una vida als tons del piano, que no tindrien, si fos afinat sobre l'escala natural (o escala de

---

<sup>1</sup> En honor al gran matemàtic alemany Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

Zarlino). Veiem doncs, que àdhuc l'escala elegida pot influir sobre el timbre d'un instrument de to fix.

Un efecte tímbric similar es produeix, quan en una orquestra diferents instruments toquen la mateixa melodia. Com que els instruments no toquen matemàticament a la mateixa altura, es produeixen unes pulsacions extremadament lentes, que solen ser massa lentes per a poder-se percebre. Però les pulsacions dels segons parcials harmònics ja tenen la freqüència doble, i la diferència entre aquestes freqüències també és doble. El conjunt de les pulsacions entre tots els parcials influeix en el timbre, i d'aquí ve que l'efecte no és el mateix escoltant un violí des d'una distància de tres metres com escoltant-ne quatre des d'una distància de sis metres.<sup>1</sup> Notem aquí que en un so periòdic tots els tons de diferència o de suma entre parcials són múltiples naturals de la freqüència fonamental. D'altra banda hem de tenir en consideració que molts dels tons utilitzats en el camp de la música només són aproximadament periòdics.

Investigacions relativament recents han mostrat que l'oïda pot produir àdhuc tons de diferència entre tons que ja pertanyen a la regió dels ultrasons. És a dir que dos sobretòns inaudibles per la seva freqüència elevada poden generar un to diferencial que pot canviar l'estructura dels parcials harmònics, i en conseqüència el timbre. D'aquí sorgeix la pregunta, si els equips electroacústics s'han de limitar a la banda de freqüència audible, o bé si realment s'obté una avantatge estenent-ne la banda de freqüències fins al camp dels ultrasons.

Es troben molt lligats amb el concepte de timbre els de consonància i de dissonància. Durant la història el fenomen de dissonància ha trobat diferents explicacions. Ja Pitàgoras va observar que tots els intervals consonants eren caracteritzats per una proporció de nombres naturals petits entre les freqüències dels tons. L'interval de consonància total, l'octava, es caracteritza per la fracció 2 : 1, la quinta natural per 3 : 2, etc. En la primera meitat del segle XVIII Euler va proposar de fer servir el mínim comú múltiple de la proporció (expressada en nombres naturals reduïts al màxim) de les freqüències dels tons d'un acord, per a caracteritzar el grau de dissonància. D'aquesta manera, per exemple, l'acord (Do (1), Mi (5/4), Sol (3/2)) amb la proporció 4 : 5 : 6 tindria un grau de dissonància de 60. Aquest plantejament porta fàcilment a tota mena de contradiccions i per tant ha de ser descartat. En efecte, la quinta

---

<sup>1</sup> Ni pel que fa la intensitat, ja que les intensitats de dos violins no es sumen, degut a que una part de les ones acústiques emeses s'anul·len mutualment. Afortunadament el mateix efecte de compensació es fa notar en la fressa emesa pel trànsit urbà, que en cas contrari seria inaguantable.

"natural" amb proporció 3 : 2 tindria un grau de dissonància de 6. Si es desafina lleugerament i de manera gairebé imperceptible la quinta a la proporció  $2213 : 1477 = 1,49830$ , el grau de dissonància serà de 3268601. Aquesta quinta està situada entre la quinta natural i la temperada. Si ara desafinem molt més la quinta, a la proporció  $31 : 21 = 1,47619$ , el grau de dissonància es torna reduir al valor de 651, cosa evidentment absurda. Aquí el gran Euler es va equivocar.

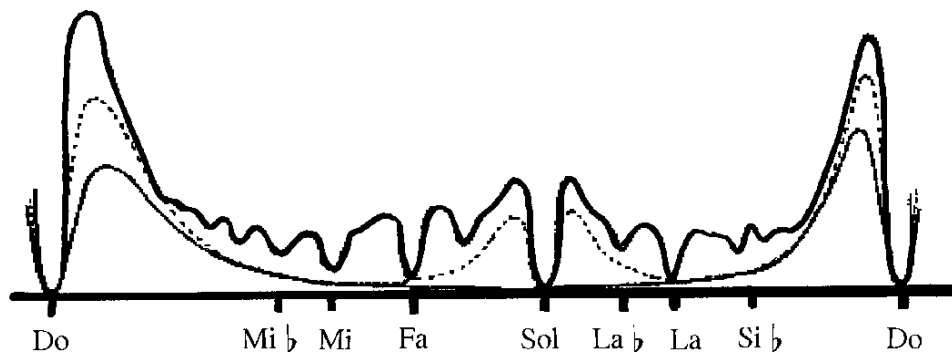


Diagrama de Helmholtz

Helmholtz explicà l'efecte de la dissonància a partir de les pulsacions entre els tons parcials dels tons implicats. En aquesta teoria de Helmholtz la dissonància depèn del timbre dels tons que es combinen, cosa que la pràctica ha demostrat de sobres. Helmholtz va constatar que la duresa d'un interval format per tons sinusoidals era màxima quan entre els dos tons es produïen 33 pulsacions i que s'anava suavitzant a mesura que el nombre de pulsacions disminuïa o augmentava. Sumant totes les "dureses" degudes a pulsacions entre els tons parcials de dos tons, Helmholtz calculava el seu grau de dissonància. D'aquesta manera va obtenir l'anomenat diagrama de Helmholtz, partint de les següents condicions: Es considera la superposició de tons de violí, un dels quals és fix, el Do (3), i l'altre variable anant de Do (3) a Do (4). El diagrama consta de diferents corbes: la primera només té en compte els fonamentals, en la segona es consideren els primers dos parcials, etc. En la figura esquematitzada que acompanya aquest text només considerem les corbes corresponents al primer parcial sol i als cinc primers parcials (puntejat). Òbviament el grau de dissonància és mínim quan un màxim nombre de parcials coincideixen. Aquesta teoria de Helmholtz constitueix un criteri de pes en favor de l'escala natural, però tampoc satisfà del tot. Si per exemple el diagrama de Helmholtz s'estableix per la propera octava, ja no s'obtenen resultats idèntics, ja que totes les pulsacions obtenen un valor doble al de l'octava inferior. Així certes "dureses" són suavitzades respecte a la seva

equivalència de l'octava inferior, mentre que d'altres s'accentuen encara més. Si considerem els tons baixos del piano, segons la teoria de Helmholtz, la quinta (Do (1), Sol (1)) hauria d'estar totalment dissonant, ja que les notes fonamentals entre elles generen unes 32,6 pulsacions. Segons la teoria de Helmholtz dos tons purs (sinusoidals) no poden crear cap mena de dissonància, si llur diferència de freqüència és prou gran. En aquest context s'ha de tenir present que àdhuc en dos tons sinusoidals massa allunyats entre si per a crear pulsacions audibles, però que han sofert distorsions en el mateix aparell auditiu, es poden percebre parcials harmònics (descomposició de Fourier de la distorsió d'una corba sinusoidal) que ens poden arribar a suggerir una certa dissonància, degut a les seves pulsacions.

Els fisiòlegs del segle XX s'han donat compte que dos tons que es troben massa a la vora un de l'altre, àdhuc sense produir pulsacions molestes, donen lloc a una sensació desagradable quan són escoltats amb la mateixa orella. Aquesta sensació desagradable desapareix, si els dos tons es troben fora d'una certa BANDA DE FREQUÈNCIES CRÍTIQUES que volten cada to, o bé si són escoltades aïlladament per cada orella. Aquesta teoria mena a uns resultats molt semblants a la de Helmholtz, però permet explicar certs fenòmens que no s'expliquen satisfactòriament a partir del concepte de dissonància de Helmholtz. Així per exemple la duresa d'un so periòdic amb harmònics elevats no es pot explicar amb la presència de les pulsacions, ja que qualsevol diferència de freqüències entre dos parcials és un múltiple del to fonamental. Si doncs la freqüència del fonamental és superior als 100 Hz, totes les pulsacions o tons de diferència seran superiors o iguals a 100 Hz. Amb la teoria de les bandes de freqüències però, la duresa s'explica: A partir d'un índex de parcials determinat podem trobar parcials que cauen dins la banda crítica d'un dels seus veïns. És a dir que un so periòdic individual pot contenir una mena de dissonància interna!

Hem de subratllar que les dues teories de la consonància, la de les pulsacions i la de les bandes de freqüències crítiques, són aplicables també a tons composts per parcials inharmonics (doncs tons no periòdics) com ara sons de campanes. La realitat musical sol ser una certa aproximació al cas dels tons periòdics. Per exemple els instruments de corda tenen uns parcials quasi-harmònics, ja que les cordes no són mai cordes ideals. Com veurem més endavant, en el cas del piano aquest efecte provoca una certa desviació de l'escala temperada calculada teòricament. El mateix efecte també dificulta la síntesi electrònica del timbre dels instruments acústics.

Fins aquí hem tractat els termes de dissonància i de consonància com si es tractés d'antagonistes: el grau de dissonància era complementari al grau de consonància. Experiències portades a terme als voltants de 1950 fan pensar que la consonància és un efecte produït centralment pel cervell, mentre que la dissonància es forma ja en la mateixa orella. Uns auriculars servien per a fer sentir un to sinusoidal distint a cada una de les dues orelles. Hom sent l'efecte poc agradable d'uns intervals poc definits, i a vegades (segons les freqüències) es pot arribar a tenir una sensació de consonància. Si els dos tons sinusoidals es substitueixen per dos tons compostos (amb parcials harmònics), hom sentia consonàncies, però mai dissonàncies. Per a demostrar que els tons binaurals es fonien d'una manera semblant com ho solen fer els tons monaurals, es va realitzar l'experiència següent: Una part dels parcials harmònics d'un to sintetitzat s'aplicava a una orella sola, els restants a l'altra: L'oient experimentava aproximadament la mateixa sensació com si escoltés el to íntegre de manera normal, és a dir amb les dues orelles. La petita diferència de timbre es pot atribuir principalment a la manca de certs tons de combinació.

Finalment ens crida l'atenció un efecte sorprenent: el timbre varia amb la intensitat d'audició d'una peça de música. Si per exemple a través una cadena electroacústica volem obtenir una audició de màxima fidelitat tímbrica, teòricament hem de graduar l'amplificador a la intensitat original de l'execució musical. Com s'explica aquest fenomen? Si mirem les corbes d'isosonia del diagrama de Fletcher en el capítol REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL SO I UNITATS DE MESURA notarem que en rebaixar dos tons de freqüència diferent d'un mateix nombre de  $dB$  (unitat física) els valors en fons (unitat psicològica) no baixen necessàriament de la mateixa quantitat. Rebaixant la intensitat total, les freqüències baixes de poca intensitat varien més que les mitjanes. Per a contrarestar aquest efecte dins la mesura del possible, les cadenes d'alta fidelitat a vegades són equipades d'un EQUALITZADOR, que permet regular individualment les intensitats de diferents bandes de freqüències.

## LA REPRODUCCIÓ DEL SO

Sota el títol "LA REPRODUCCIÓ DEL SO" no pensem pas considerar els aspectes de la reproducció d'una obra musical a partir de la seva partitura, eventualment amb l'ajuda de relacions escrites per testimonis de l'època del compositor, potser àdhuc amb instruments originals, a fi d'intentar de recrear l'ambient sonor de l'era del compositor. De pas sigui dit, que una reproducció amb aquests criteris de fidelitat no necessàriament ha de ser més valuosa des del punt de vista artístic, que una interpretació amb instruments moderns adequats. Crec per exemple que si Joan Sebastià Bach hagués disposat d'uns pianos tan perfeccionats com són els moderns "Steinway & Sons", "Bösendorfer" o "Bechstein", hagués escrit la major part de la seva obra de teclat per a piano, en lloc de clavecí. Crec també que s'ha de distingir entre les composicions musical concebudes exclusivament per la tècnica d'un determinat instrument, de la música universal, que es pot adaptar a qualsevol instrumentació sense perdre la seva essència, a condició que les possibilitats tècniques de l'instrument o del conjunt ho permetin. Així una fuga de Bach es pot interpretar al clavecí, al piano o per un conjunt instrumental. En canvi els nocturns de Chopin no es poden interpretar al clavecí. Aquests, però, són criteris personals.

Aquest capítol tracta d'un altre tema, que és la reproducció automatitzada de la música, de la paraula i fins i tot de sorolls qualsevols. El capítol es ramifica en dues parts principals: la reproducció indirecta, que fa servir un instrument musical automatitzat, i la reproducció directa que tracta d'uns aparells que permeten reproduir directament els fenòmens sonors, sense distinció de la seva procedència.

L'evolució dels autòmats musicals durant la història està estretament correlacionada amb el progrés de la mecànica, especialment de la rellotgeria. Podem considerar els carillons<sup>1</sup> i altres jocs de campanes dels rellotges públics com a la primera manifestació musical en el camp de la rellotgeria. En el transcurs del temps, la mecànica sempre més sofisticada va crear unes veritables

---

<sup>1</sup> Mot etimològicament derivat de "quatre".



meravelles, com per exemple el "*Panharmonicon*" construït a la vora de 1802 per Maelzel, un conjunt de 42 autòmats musicals que formaven una orquestra capaç d'executar amb perfecció mecànica diferents peces del repertori musical clàssic. És interessant constatar que Beethoven va compondre la seva obertura op. 91 (La Victòria de Wellington) per a aquest autòmat i no pas per una orquestra de debò. 45 anys més tard, el patriarca de la casa Welte, Michael Welte, construiria un *Orchestrion* amb uns 590 instruments.

Sense cap mena de dubte els meravellosos autòmats d'aquella època constitueixen la font inspiradora de la novel·lesca Olímpia d'un dels contes fantàstics d'E.T.A. Hoffmann. L'Olímpia del conte, d'una gran bellesa, tot i que una mica freda, toca el piano amb gran virtuositat i balla al ritme de la música. Quin desengany més cruel sofrirà el seu enamorat en comprovar que la seva estimada no és altra cosa que un autòmat altament perfeccionat.

En la primera època el límit entre el rellotge i l'autòmat musical era vague, com ho demostra l'expressió alemanya "Flötenuhr" (rellotge de Flauta) per designar un dels autòmats musicals del segle XVIII, construït per Johann Gottfried Kauffmann, que no tenia cap finalitat cronomètrica. Un dels primers mecanismes de reproducció musical automàtica està descrit en el llibre "Les raisons des forces mouvantes"<sup>1</sup> de l'inventor francès De Caus (1615); aquesta màquina ja utilitzava un cilindre amb espigues per a coordinar la successió temporal dels diferents tons.

El fet de que uns músics de categoria artística indiscutible com Friedemann Bach, Haydn i Mozart hagin compost obres musicals destinades a ésser executades mitjançant autòmats musicals, comprova que en aquell moment no es devien considerar simplement com a curiositats mecàniques o com a atraccions de fira.

A la vora de 1800 un instrument automàtic amb mecanisme de cilindre va assolir gran popularitat entre els músics ambulants, *l'orgue de barbarie*", expressió que sembla relacionada etimològicament amb el presumpte constructor italià, Barberi o Barbieri.

També eren coordinats mitjançant un cilindre els dos autòmats flautistes que va presentar Vaucanson a Paris l'any 1738.

Engramelle va exposar metòdicament la tècnica de programar peces musicals mitjançant cilindres en el seu llibre "La Tonotechnie...", aparegut l'any 1775.

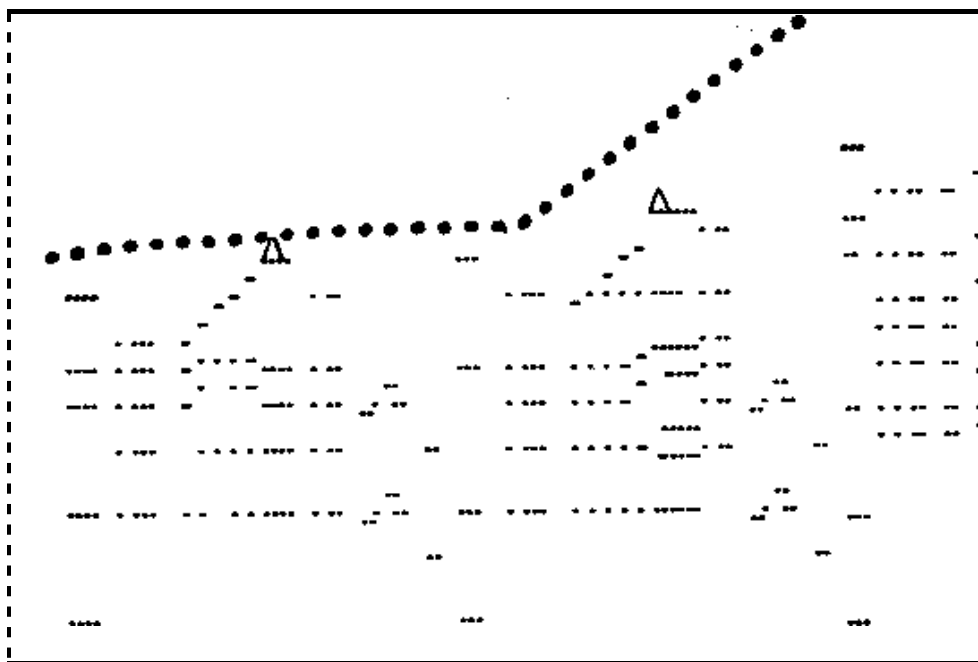
En el curs del segle XIX la construcció d'autòmats musicals es convertí en un ram industrial d'una certa importància, i a la vora de

---

<sup>1</sup> Les raons de les forces movedisses.

1900 més de 50 fàbriques es dedicaven a aquesta especialitat tan sols en territori alemany. Avui dia la reproducció de la música per medis electroacústics ha substituït els autòmats musicals, si exceptuem algunes manifestacions de nostàlgia com ara la fabricació de caixetes de música.

Una contribució decisiva en l'evolució dels instruments de música mecànica va ésser la invenció de les targes perforades per Jacquard, destinades al principi a automatitzar els telers: amb el temps el cilindre de la majoria dels instruments automàtics es va substituir per una tarja, un disc o una cinta perforada.



Aspecte parcial d'un rull de pianola

Entre tots els instruments automàtics que es van construir durant la història, i els que només se'ns han manifestat en forma llegendària, aquí ens limitarem a una breu exposició d'un dels seus més dignes representants, el piano mecànic o pianola<sup>1</sup>.

Aquest mecanisme pot ésser incorporat de manera permanent al piano o bé es pot tractar d'una màquina continguda en un moble individual que es pot col·locar davant el teclat d'un piano qualsevol, fent coincidir cada una de les tecles amb els corresponents "dits" recoberts de feltre de la pianola, de manera que d'una certa forma, la màquina supleix la funció del pianista. Per falta d'un tecnicisme adequat, aquesta última disposició es sol denominar amb el mot alemany "Vorsetzer" que es podria traduir aproximadament amb "el

<sup>1</sup> De fet "Pianola" era la marca del piano mecànic creat per Votey, l'any 1900; però avui el terme s'utilitza indistintament per a designar qualsevol tipus de mecanisme automàtic per a fer sonar un piano.

que es posa al davant". El Vorsetzer té l'avantatge de que es pot adaptar a un gran piano de cua de concert sense haver de violar-lo, quan per exemple es vol procedir a la gravació discogràfica de la música gravada sobre un rull de pianola per un gran artista.

En el transcurs del segle XIX el piano automàtic passava per un procés de maduració tècnica, el resultat del qual eren els models perfeccionats de les cases Welte, Hupfeld i Aeolian, entre altres. Un dels primers models funcionals fou construït per Debain, l'inventor de l'harmòni. Mentre que els autòmats musicals d'aquella primera època eren en gran majoria accionats per cilindres d'espigues, després de 1880 els constructors més capdavanters adoptaren les bandes de paper perforades que es podien embobinar sobre rulls. A partir de 1883 la casa Welte treballava amb rulls d'aquesta mena en els seus autòmats musicals, utilitzant de moment un sistema pneumàtic de sobrepressió, que es substituï a partir de 1890 per un sistema pneumàtic de buit, que ofereix certes avantatges sobre l'altre sistema.

A la vora de 1880 els primers rulls musicals tenien unes amplades d'entre 15 i 20 cm i permetien una tessitura de 15 o 20 notes aproximadament. Gradualment l'amplada de les cintes creixia, la distància entre les pistes s'anava reduint i la tessitura s'estenia poc a poc fins a arribar als clàssics rulls de 28,5 cm d'amplada de paper, que es va normalitzar a l'ocasió de la reunió a Buffalo dels principals fabricants nord-americans de pianos, l'any 1908. Aquest rull estava preparat per rebre perforacions corresponents a les 88 tecles del piano, a més d'una pista per a controlar l'acció del pedal, així com alguna pista suplementària.

Dins el camp dels pianos automàtics es poden distingir essencialment tres grups que anomenarem aquí PIANO ELECTROMECÀNIC, PIANOLA COMUNA I PIANO DE REPRODUCCIÓ.

Els pianos electromecànics es caracteritzen per un automatisme total, que no permet la intervenció humana per a regular la velocitat o la intensitat de la reproducció. Aquests instruments solien funcionar amb un sistema pneumàtic accionat per un electromotor. Es tractava del típic piano mecànic d'alguns locals públics del principi del segle XX, que solia fer servir cintes perforades sense fi per a poder evitar els canvis de rulls. Els pianos electromecànics a vegades contenen fonts sonores impròpies del piano, com ara tubs d'orgue o platerets. La seva posta en marxa solia combinar-se amb un cobrador automàtic de monedes.

Mentre que el piano electromecànic era concebut de cara als efectes sorollosos, la pianola clàssica, moguda mitjançant un parell de pedals (com en el cas de l'harmòni), permet una extensa

intervenció de l'executant sobre el *tempo* i la modulació dinàmica, mitjançant unes palanquetes a propòsit. Els clàssics rulls de pianola porten un seguit de taquetes impreses que indiquen LA LÍNIA DE MODULACIÓ DINÀMICA<sup>1</sup>. La palanqueta corresponent està situada de tal forma que es pot seguir fàcilment la línia de modulació recomanada per la casa productora del rull, sense estar-hi obligat. S'aconsegueix així una certa individualització interpretativa a partir dels rulls perforats en sèrie. Més endavant els rulls començaven a portar una altra indicació interpretativa, la LÍNIA METROSTÍLICA, que comunicava la velocitat adequada en cada moment. En les primeres pianoles totes les notes emeses simultàniament havien de donar una mateixa intensitat de reproducció, i era impossible destacar la melodia sobre l'acompanyament. Per a esquivar aquesta deficiència, a partir de 1900 l'empresa americana Aeolian va produir rulls amb unes perforacions suplementàries que accentuaven les notes corresponents mitjançant el sistema "Themodist". Un sistema semblant fou creat per Hupfeld l'any 1908 amb el nom de "Solodant". Però com s'aconseguia que només fos accentuada una de les notes (o dues...) dins un acord? Per a aquest fi, (o les notes) que s'havia d'accentuar s'anticipava (o es retardava) lleugerament respectivament a les altres notes de l'acord, cosa que molts pianistes d'aquella època solien fer de totes maneres.

Per a fabricar els rulls de pianola, la primera operació consistia en dibuixar els forats corresponents a les notes d'una composició determinada sobre una banda de paper, de manera metronòmica, valent-se de plantilles. Acabat totes les notes marcades es perforaven manualment amb uns punxons que es movien en les pistes corresponents a les de la banda perforada definitiva. El rull original tractat així es podia verificar mitjançant una pianola. Totes les correccions eren possibles: es podien afegir forats i se'n podien treure, enganxant un pegat en el lloc corresponent. La tira de paper original s'introduïa en una màquina copiadora especial, amb la que se'n podia obtenir un nombre il·limitat de duplicats. Finalment es marcaven les indicacions respectives a la dinàmica i a l'agògica sobre la banda que queda visible a l'executant que se'u davant la pianola i es bobinava la tira sobre el seu rodet. La fabricació de rulls de pianola era una indústria d'una certa importància en les primeres dècades del segle XX. A Catalunya la primera fàbrica es va fundar l'any 1912 a la Garriga.

---

<sup>1</sup> La nostra il·lustració '*Aspecte parcial d'un rull de pianola*' mostra aquesta línia en el cas del rull Número 2089 de la sèrie '*Rollos Victoria*', que reproduïx l'anomenada *Polonesa Militar* Op. 40, Núm. 1 de Chopin.

A partir de 1905 diferents fabricants de rulls i de pianoles començaven a substituir la línia metrostílica per una perforació flexible, adaptada a la velocitat real, en lloc de la perforació tradicional, metronòmica. Això implicava que la perforació dels rulls matrius s'havia d'efectuar sota els auspicis d'un músic competent, que evidentment imprimia un cert grau de subjectivitat interpretativa a la gravació, que d'altra banda podia ser corregida a l'hora de l'execució amb la palanqueta de velocitat de la pianola. Aquests rulls, que no foren acceptats incondicionalment per tothom, es designaven com A RULLS ARTÍSTICS. Àdhuc amb els rulls artístics, l'executor encara havia de regular la modulació dinàmica, seguint la línia de modulació impresa amb la palanqueta corresponent, o segons el seu propi criteri.

Finalment els anomenats PIANOS DE REPRODUCCIÓ treballen amb un rull gravat a partir de la interpretació d'un pianista, respectant d'una manera sorprenent l'agògica i la modulació dinàmica del pianista. Hi ha qui opina que una reproducció mecanitzada no pot donar mai la mateixa riquesa tímbrica i expressiva que la intervenció directe d'un pianista sensible. Es poden enumerar diferents objeccions a aquesta opinió. Primer hem de constatar que pitjant una tecla, el timbre del so resultant només depèn de la velocitat de l'impuls (que està determinada per la força aplicada sobre la tecla), ja que el moviment del martellet no es deixa influenciar més, un cop projectat en direcció de les cordes. La corba fonogràfica i els sonogrames obtinguts electrònicament han confirmat la identitat sonora d'un so obtingut pitjant la tecla amb el dit i d'un so obtingut movent la tecla deixant-hi caure un pes mort des d'una altura convenient. Aquestes experiències, des del punt de vista científic, anihilen moltes de les creences romàntiques respecte a la influència de la pulsació sobre el timbre. Per a il·lustrar a què em refereixo, citarem aquí un passatge de l'article "Piano" del "Diccionario Enciclopédico Hispano-Americano"<sup>1</sup>:

*"El meñique, ora débil, ora vigoroso, según los casos, combinado con el cuarto dedo, resulta tímido; con el segundo, velado; con el tercero, potente; y unido al pulgar, estridente. Ninguno más á propósito que este para ejecutar los portamentos, por la suavidad, dulzura y mimosidad á que en dichas ocasiones se presta."*

---

<sup>1</sup> Ed. Montaner y Simón, 1894.

Un so de piano individual està doncs sonogràficament determinat per la força de l'impacte i per la seva duració. Aquests dos factors, al menys teòricament, es poden registrar i reproduir mecànicament, de manera que una gravació així no es distingeixi en res de la interpretació original.

Hem dit teòricament, ja que els pianos de reproducció del principi de segle (la casa Welte va construir el primer l'any 1904) no registraven els dos factors (força i duració) individualment per a cada nota. Però l'aproximació era tan ben trobada, que per la majoria de les composicions musicals, la reproducció era d'una fidelitat sorprenent.

La idea de concebre un instrument de tecla que pogués gravar qualsevol peça tocada, no era nova quan la casa Welte va produir el seu model "Welte Mignon". Només cal pensar en la llegenda que atribueix ja a Engramelle un mecanisme capaç d'enregistrar improvisacions executades sobre un instrument de teclat. Un aparell funcional d'aquest tipus fou construït a finals del segle XIX per l'enginyer francès Carpentier, que anomenà el seu invent *Mélographe*. Carpentier construï també un segon aparell, el *Mélotrope*, destinat a tocar automàticament sobre un piano les peces musicals gravades mitjançant el *Mélographe*. Però amb el *Mélotrope* encara no s'obtenien gravacions diferenciades dinàmicament.

La diferenciació dinàmica també era limitada en els pianos de reproducció. Alguns pianos de reproducció constaven d'una extensió dinàmica escalonada en un nombre determinat de graus. Els psicòlegs han constatat que la majoria de les persones (incloent-hi els músics professionals) no són capaços d'identificar més d'uns 6 o 8 nivells d'intensitat. Així per reproduir tots els graus dinàmics identificables individualment, hi ha prou que un piano reproductor disposi d'uns 8 nivells dinàmics. Però encara que no tinguem la facultat d'identificar més de 8 nivells d'intensitat quan es tracta de tons separats, sí que distingim diferents intensitats dins una successió de tons d'intensitat variable, encara que llur diferència sigui força més petita que la que existeix entre dos graus de la divisió de l'extensió dinàmica en 8 nivells.

Podem comparar aquest efecte amb un fet visual: La nostra memòria pot retenir 6 o 8 tonalitats de gris, però si les tenim davant, en podem distingir moltes més. Veiem doncs que un piano de reproducció amb una extensió dinàmica escalonada respecta suficientment la dinàmica general d'una obra, mentre que s'hi perden certs *crescendi* i *diminuendi*, cosa que resta vida a la reproducció. La casa Welte va poder evitar aquesta deficiència de la següent manera: Els seus pianos de reproducció tenien tres nivells d'intensitat fixos,



que podríem anomenar *pp*, *mf* i *ff*; per a canviar d'un nivell a l'altre tenien dos sistemes pneumàtics, que provocaven un *crescendo*, respectivament un *diminuendo* gradual. L'únic inconvenient residia en el fet de que un nivell constant situat entre dues de les posicions fixes no es podia mantenir amb constància absoluta.

La segona limitació en la diferència dinàmica era la falta d'individualització en la reproducció de les 88 notes de la tessitura. Així els pianos de reproducció treballaven a partir d'una fragmentació del teclat en dues o més regions. En els pianos de reproducció de la casa Welte hi havia una fragmentació del teclat en dues zones, entre el Fa # (3) i els Sol (3). Per moltes composicions musicals aquesta disposició és insuficient, i això obligava a manipular les gravacions originals per a introduir uns arpegis artificials, com en el cas del "Themodist" de la pianola comuna de l'empresa Aeolian, per exemple.

L'enginyer suec Nyström va inventar un sistema de piano reproductor (gravació i reproducció) que respectava la individualitat dinàmica de cada nota. Malauradament no es va resoldre el problema de la fabricació en sèrie se l'instrument, del que només es van construir molt pocs exemplars. Quelcom de semblant va ocórrer amb un piano de reproducció de l'empresa "American Piano Company", l'anomenat "Ampico B".

Avui dia es coneixen tots els detalls del funcionament dels diferents pianos de reproducció, ja que els nombrosos instruments conservats, conjuntament amb els rulls corresponents, que àdhuc encara es fan servir, per exemple per fer gravacions discogràfiques de grans intèrprets del passat, no ens poden pas amagar cap secret tècnic. En canvi el misteri que voltava el procediment de gravació de les grans empreses, encara no s'ha pogut penetrar, i cada dia serà més difícil, ja que les poques persones que potser encara ens sabrien informar, ja solen ser molt grans. Aquelles cases amagaven els mecanismes de la gravació, àdhuc davant dels mateixos tècnics de la casa, com ara dels afinadors. Avui només podem fer conjectures sobre com es registraven les notes, la seva duració i la seva intensitat en les diferents cases de pianos automàtics. Diferents autors especialitzats en la matèria sostenen que sota cada tecla de l'instrument gravador hi havia una barreta metàl·lica que quedava submergida en un bany de mercuri en pitjar la tecla, de manera que tancava un circuit elèctric durant tot el temps que es mantenia la tecla pitjada. Segons aquests autors, la immersió més o menys profunda que resulta d'una aplicació amb més o menys força sobre la tecla, hauria implicat unes diferències de resistència elèctrica, que determinarien el grau dinàmic. També és possible que pitjant una

tecla, s'haguessin tancat successivament dos circuits i que és la diferència temporal entre aquests tancaments que determinés el grau dinàmic. De totes formes, l'arpegi artificial per a separar la intensitat de dues notes compreses en una mateixa regió del teclat, era una operació que s'havia d'efectuar manualment. I suposem que no és pas l'únic retoc que es feia després de la interpretació. Es podien corregir fàcilment les notes falses, els ritmes imprecisos o les notes que faltaven. Els efectes de pedal a vegades es substituïen per la manutenció de certes notes, cosa que l'anatomia de la mà dels pianistes no sempre permet. D'altra banda l'ús del pedal celest no es solia registrar; els efectes de mig pedal també es perdien.

Malgrat tot, les gravacions de piano de reproducció poden ser summament útils a la investigació de la tècnica i de l'estil dels pianistes que ens han deixat gravacions. Hem de tenir en compte que els mateixos pianistes solien assessorar els retocs realitzats sobre els rulls. Ja fa anys que les interpretacions més interessants s'han gravat sobre discos fonogràfics i d'aquesta manera han quedat assequibles al gran públic. Avui aquestes gravacions constitueixen l'únic medi per valorar d'una manera raonablement objectiva les interpretacions de molts dels grans pianistes del principi de segle.

A més dels grans virtuosos com Eugène d'Albert, Joseph Hofmann, Frédéric Lamond o Paderwsky, entre molts altres, també han deixat gravacions de piano reproductor gran nombre dels més importants compositors de l'època, com ara Claude Debussy, Maurice Ravel, Enric Granados, Alexandre Scriabin o Sergey Rachmaninof.

La pianola, a més de la seva aplicació reproductiva en té una de creativa: Diferents compositors del segle XX han optat per dedicar obres pianístiques a la pianola, que serien intocables per un pianista, per les limitacions que imposa la mateixa anatomia de la mà o per altres problemes tècnics insuperables. Aquests compositors tenen la possibilitat de perforar manualment un rull de pianola. Un dels primers grans compositors que va utilitzar aquesta possibilitat fou Strawinsky, amb el seu "Estudi per a Pianola" (op. 7, Núm. 1). Altres compositors que han deixat obres per a pianola són Eugene Goossens, Herbert Howells, Hindemith (Toccatà per a piano mecànic, 1926) i Malipiero.

A mitjans de segle XX semblava que la pianola passaria definitivament a la història i que com a molt encara podria servir per a donar testimoni de la interpretació de grans intèrprets d'una època passada. Però cap a finals de segle, la tecnologia microelectrònica es va associar a la idea del piano reproductor i la empresa Yamaha va crear el seu *Disklavier*. Aquest sistema permet guardar les

interpretacions executades sobre el piano equipat del mecanisme oportú sobre un disquet que pot ser llegit en la disquetera de  $3\frac{1}{2}$  pulgades d'un PC. La memòria delicada i voluminosa que representa un rull de paper perforat amb 88 columnes ha quedat substituïda per un medi electrònic que permet copiar, manipular i àdhuc enviar per correu electrònic les interpretacions pianístiques.

Els principals aparells reproductors directes del so que descriurem a continuació son: el telèfon, el fonògraf i el magnetòfon.

La telefonia, com la majoria d'invents d'una certa complexitat, no es va desenvolupar per un sol home, tot i que el més famós en relació amb la història de la telefonia, sense dubte A.G. Bell. Abans de parlar del telèfon elèctric no deixarem de mencionar dos sistemes de telefonia purament acústic. El primer d'entre ells, el telèfon de cordill no va superar mai el seu estadi d'experiència de física didàctica i de joguina infantil. Aquest sistema transmissor de la paraula consisteix en dos gobelets de llauna o de cartró fort, foradats pel centre de la base, on es fixa una de les dues extremitats del cordill transmissor. Si el cordill es tensa entra els gobelets, adquireix la propietat de transmetre les vibracions sonores: una persona que posa l'orella contra el seu gobelet sent perfectament les paraules que pronuncia a veu baixa una altra persona en el seu gobelet, a l'altre extrem del fil.

Un altre sistema de telèfon acústic es basa en la propietat dels tubs de conduir el so a gran distància sense afluixament excessiu. Una persona que aplica l'orella contra un extrem d'un tub acústic sent perfectament el que li comunica una altra persona que parla en l'altre extrem del tub. Aquest sistema de comunicació encara es pot fer servir entre el menjador i la cuina d'un hostal o a bord d'un vaixell, per exemple, tot i que actualment els telèfons tubulars s'han substituït majoritàriament per medis electroacústics.

La descripció de tots els invents i totes les temptatives que finalment van menar al telèfon en la forma actual podria ser l'objecte de tot un llibre. Aquí ens limitarem a unes quantes de les dades més destacades. Una condició sine qua non<sup>1</sup> pel desenvolupament de tots els sistemes de telefonia elèctrica fou el descobriment de l'electromagnetisme per Ørsted, l'any 1819. En efecte una corrent elèctrica pot engendrar un camp magnètic, i viceversa. Un altre descobriment menà al que podríem considerar el primer telèfon elèctric, el de Reis. Ens referim a l'anomenat efecte de Page, professor nord-americà que va comprovar l'any 1837 que les

<sup>1</sup> Condició necessària, en contraposició a la condició suficient.

reiterades imantacions i desimantacions per la corrent elèctrica de freqüència ràpida d'una vara de ferro van acompanyades d'un efecte acústic: s'emet un to feble de la mateixa freqüència que les pulsacions elèctriques. Avui sabem que la magnetització d'una barnilla per una corrent elèctrica implica una variació extremadament petita en la seva llargada, degut al canvi d'orientació dels seus àtoms. Si per exemple fem passar una corrent alterna de 50 *Hz* pel bobinatge d'un electroimant, la llargada total del nucli de la bobina sofrirà 100 canvis de grandària al segon i emetrà un to extremadament feble de 50 *Hz*, que no s'ha de confondre amb el to de la mateixa freqüència que emet qualsevol objecte magnetitzat situat DAVANT de l'electroimant i que tan aviat està repel·lit com atret. Tampoc és idèntic aquest últim cas amb el d'un objecte de ferro NO MAGNETITZAT que es troba davant de l'electroimant: un ferro així queda atret tant quan el pol més pròxim de electroimant està polaritzat N com S: L'oscil·lació resultant en aquest cas té la freqüència doble, doncs 100 *Hz* en el nostre exemple.

L'efecte de Page també forma la base d'una tecnologia industrial d'ús relativament recent: L'afaiçonament mitjançant vibracions ultrasòniques. En la disposició més corrent una barnilla d'acer descriu contraccions i dilatacions successives sota l'efecte d'un bobina alimentada per una corrent alterna d'altra freqüència generada en un circuit electrònic. Sota l'aportació d'abrasius, la barnilla penetra en la peça que es desitja treballar. D'aquesta manera és possible obtenir forats prismàtics amb qualsevol secció, mentre que perforant amb una broca sempre s'obtenen forats cilíndrics. Les freqüències emprades solen ser superiors als 20.000 *Hz*. La tecnologia a base de vibracions ultrasòniques també s'estén al camp de la soldadura dels plàstics i al del mesurament de precisió.

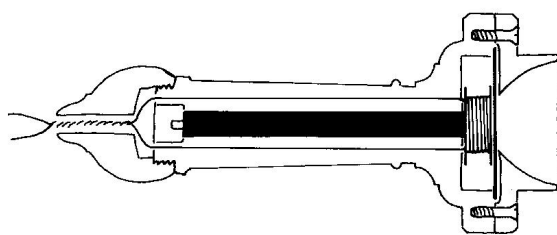
Un dels primers precursors de l'actual telèfon, era l'instrument presentat a la vora de l'any 1861 pel professor alemany Reis, que sembla que també fou el primer en introduir la paraula "telèfon". Degut a la seva concepció, el telèfon de Reis es prestava a la transmissió de tons (no de sons) musicals, però no de la paraula. D'aquí que certes fonts anomenen el telèfon de Reis "telèfon musical".

El transmissor del telèfon de Reis consisteix en una caixa en la qual desemboca un pavelló. Una paret de la caixa està substituïda per una membrana de pergamí, en el centre de la qual s'ha fixat un disc de platí, que està reunit amb un dels pols d'una pila, mentre que l'altre pol se'n va a la línia que reuneix el transmissor amb el receptor. Una punta de platí que es troba a curta distància correspon al segon fil de la línia. El receptor no és res més que un electroimant

recte amb un nucli prim de ferro agafat entre els dos cavallets d'una caixa de ressonància. Quan la membrana es posa a vibrar a una freqüència  $n$ , i la punta està ben ajustada respecte al disquet de platí, té lloc una successió d'interrupcions i reconexions a un ritme de  $n$  Hz de la corrent alimentada per la pila. En l'estació receptora, l'electroimant es magnetitza i es desmagnetitza  $n$  vegades per segon; degut a l'efecte de Page, la barnilla s'escurça i s'allarga  $n$  vegades al segon. Aquesta vibració es transmet a la caixa de ressonància i en condicions excel·lents, resulta audible.

Què passa, si augmenta la intensitat del to de  $n$  Hz que incita la membrana a vibrar? La membrana del transmissor es posa a vibrar amb una amplitud major, però el ritme d'interrupció entre el disquet i la punta de platí no varia; el to emès per l'estació receptora no s'altera en la seva intensitat. D'aquí que el telèfon "musical" de Reis es limita essencialment a la transmissió de la freqüència fonamental dels tons, sense distinció d'intensitat ni de timbre.

El telèfon de Bell<sup>1</sup> de 1876 ens brinda un exemple sorprenent de la transformació d'una forma energètica en una altra. Un aparell que transforma una magnitud física en una altra, com ara el telèfon de Bell, s'anomena un TRANSDUCTOR. El telèfon de Bell és essencialment un imant permanent cilíndric rodejat d'una bobina de cable elèctric finíssim, davant el qual està fixada per la seva circumferència una planxa de ferro molt prima, que ha rebut el nom de MEMBRANA, tot i que es tracta d'una placa vibrant. Si aquesta membrana es posa a vibrar en ressonància amb el so de la veu, ja que està situada a molt poca distància de l'imant, la variació rítmica



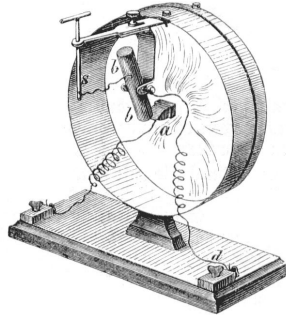
El telèfon de Bell

de distància indueix tensions elèctriques en la bobina, seguint les freqüències del so que incita la membrana de ferro a vibrar. Els dos caps del cable de la bobina es connecten als caps d'un altre aparell idèntic situat en

una altra habitació. Si ara es parla en el primer aparell, la membrana vibrant indueix una corrent que influeix rítmicament sobre la força de l'imant en el segon aparell (aquell imant permanent ara assoleix la

<sup>1</sup> Per una extraordinària casualitat un altre inventor, Elisha Gray, va anunciar el mateix invent que Bell a l'oficina de patentes, el mateix dia que aquest. I és degut exclusivament a un retard en les oficines de correu de que Bell hagi passat a la història com a inventor del telèfon, mentre que hom avui en dia només es recorda de Gray de manera anecdòtica.

funció d'electroimant), cosa que fa vibrar la membrana al mateix ritme que la de l'aparell transmissor, amb què la paraula queda reproduïda, sense necessitat de cap font energètica suplementària, com ara d'una pila. A diferència del telèfon de Reis, el de Bell



Micròfon de Hughes

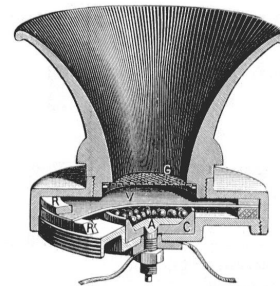
reproduceix la freqüència, la intensitat i el timbre del so, ja que la corrent induïda en el transmissor varia com la corba fonogràfica del so (si prescindim de les distorsions). La simetria del telèfon de Bell és tan perfecta com la del telèfon de cordill, ja que el transmissor i el receptor són perfectament idèntics i intercanviables. Però degut a les pèrdues per resistència i els paràsits en forma de corrents induïdes per estructures alienes

al telèfon, sobretot en línies llargues, l'ús d'aquest telèfon es limita a les distàncies relativament curtes. Com en tots els transductors electroacústics, és important que les ressonàncies pròpies de la membrana no es situïn en el camp de la tessitura dels sons a reproduir.

El pròxim invent clau en la història de la telefonia era el micròfon de Hughes, l'any 1877. Un micròfon és un transductor que transforma les ones acústiques en ones elèctriques. En el sentit ampli de la paraula, el telèfon de Bell ja és un micròfon. El micròfon de Hughes és una resistència elèctrica variable que s'adapta a la corba fonogràfica del so. El micròfon de Hughes es basa sobre el fet que la resistència elèctrica entre dos carbons o altres conductors elèctrics, varia segons la pressió entre els seus punts de contacte. Un model elemental del micròfon de Hughes es pot construir amb tres puntes de ferro. Dues d'elles es col·loquen paral·lelament sobre una taula aïllant i es connecten de la següent manera: el primer clau correspon a un dels pols d'una pila, l'altre es connecta amb un dels pols d'un telèfon de Bell (o d'un altaveu); el pol restant del telèfon es connecta amb el pol lliure de la pila. Per a tancar el circuit, es posa la tercera punta transversalment sobre els dos claus ajaguts sobre una taula. Si l'experiència es fa en bones condicions, notarem que els sorolls forts i les petites trepidacions es tradueixen per fresses emeses pel telèfon (o l'altaveu). El model més corrent del micròfon de Hughes consisteix en un cilindre de carbó amb les puntes afilades que es col·loca verticalment entre dos suports de la mateixa substància. Aquest conjunt es munta sobre una planxeta de fusta suportada verticalment per una base. La planxeta de fusta actua de caixa de ressonància. Qualsevol vibració que afecta la planxeta fa variar



rítmicament la pressió exercida per les puntes del cilindre de carbó sobre els seus suports, i la resistència elèctrica entre els dos suports varia al mateix ritme. Un telèfon connectat en sèrie amb el micròfon i una pila reproduirà amb una certa fidelitat els sons que fan vibrar el suport del micròfon. Es van construir models més sofisticats del micròfon de Hughes, com per exemple el que mostra la figura, reproduïda a partir d'una xilografia d'aquella època. Molts inventors van modificar el micròfon de Hughes. Aquí només descriurem el micròfon de carbó que ha tingut més èxit i que encara s'utilitza avui: el micròfon de granalla d'Edison. La nostra figura, reproduïda a partir d'un gravat xilogràfic del principi del segle XX representa una secció a través un micròfon perfeccionat d'aquest tipus. Al centre de la membrana, al costat oposat al pavelló, per a ajustar la pressió, està enroscat una barnilla roscada que prem un disc metàl·lic que tanca el recipient ple de granalla de carbó. Les parets del recipient estan fetes d'un material aïllant (generalment ebonita), mentre que els dos discos que empresonen la granalla són metàl·lics i corresponen als dos pols del micròfon. Segons la posició momentània de la membrana els grans estan sotmesos a una pressió més o menys intensa, que determina una resistència elèctrica inversament proporcional i per tant un flux elèctric proporcional a la pressió momentània. Ja que els grans tenen tendència a aglomerar-se, el bon funcionament d'aquest tipus de micròfon exigeix una sacsejada de tant en tant. Per a augmentar l'efectivitat del micròfon en telefonia, ja aviat es recorregué a la bobina inductora, una mena de transformador que es connecta segons un esquema similar al que feia servir Duddell pel seu arc parlant (veure més endavant).



Micròfon de granalla

Però és gràcies als amplificadors electrònics equipats amb tríodes de buit, que més endavant la telefonia a gran distància fou feta possible, sense pèrdues d'intensitat. Avui els amplificadors de vàlvules de buit s'han substituït per la tecnologia basada en els semiconductors.

El cas del micròfon ens brinda una excel·lent oportunitat per a presentar els principals tipus de transductors que s'han anat emprant al llarg de la història.

El MICRÒFON DE CARBÓ sense dubte és el sistema més antic, ja que el telèfon de Reis en constitueix el primer exemple. I en la seva

forma més perfecta, el micròfon de granalla, encara avui ens el podem trobar en més d'un telèfon domèstic.

El MICRÒFON ELECTROMAGNÈTIC és el descendent directe del telèfon de Bell. Mentre que en aquell, el propi transductor produïa l'energia elèctrica necessària a la transmissió de la informació, en els micròfons anomenats electromagnètics es fa passar una corrent contínua a través un rodets en el qual un nucli magnetitzat vibra al ritme de les ones acústiques, induint així oscil·lacions elèctriques en el circuit que corresponen a les vibracions acústiques.

El MICRÒFON ELECTRODINÀMIC és un micròfon electromagnètic mecànicament millorat, en el qual és la bobina que vibra al voltant del nucli metàl·lic. // Ja que el rodets vibra més fàcilment que la membrana metàl·lica, aquesta disposició és més efectiva.

El MICRÒFON PIEZOELÈCTRIC està basat sobre la propietat de certs cristalls, com ara el quars, de generar una tensió elèctrica quan se'ls comprimeix o descomprimeix. En un micròfon piezoelèctric els cristalls estan disposats de tal forma que les ones acústiques hi produeixen successives diferències de pressió que es transformen en potencials elèctrics variables detectables gràcies a uns elèctrodes aplicats sobre les superfícies dels cristalls.

En el MICRÒFON DE CONDENSADOR les ones acústiques mouen una de les dues plaques que formen un condensador elèctric. La capacitat elèctrica del condensador està sotmesa a unes variacions rítmiques que corresponen a les ones sonors que les originen en forma i freqüència.

El MICRÒFON DE MAGNETOCONSTRICCIÓ està basat sobre el fet de que els imants fets de segons quin material tenen tendència a variar la seva imantació en funció de la compressió a la que estan sotmesos i a l'inrevés.

El MICRÒFON DE FILAMENT CALENT conté uns fils extremadament prims de platí escalfats mitjançant una corrent elèctrica contínua, que varien llur temperatura i per tant la seva resistència, de forma (gairebé) instantània, sota l'efecte del més petit flux d'aire, com ara el generat per les pròpies ones acústiques.

La majoria d'aquests principis són aplicables al pick-up. El principi invers sol ésser aplicable al transductor invers, que és l'altaveu.

Un bon transductor hauria de donar resultats lineals. Es diu que la resposta d'un transductor és lineal quan la resposta és una funció lineal, en el sentit algebraic de la paraula,

$$\text{RESPOSTA} = A \cdot \text{EXCITACIÓ} + B$$

de l'excitació. Si no és el cas, es parla de DISTORSIONS NO LINEALS.

En la disposició de dos fils de línia que constitueixen la connexió entre l'estació emissora i la receptora, es pot eliminar un dels fils, fent servir la terra com a segon conductor. Com tothom sap, en radiotelefonía l'emissió de les ones sonores s'efectua prescindint totalment dels fils de línia. Les bases d'aquest invent foren elaborades cap a l'any 1900 per Marconi i Popov. El principi de la radiotelefonía (o breument: radiofonía) és la modulació de les ones hertzianes<sup>1</sup> d'un emissor per les ones que representen la corba fonogràfica del so. En el procediment de modulació d'amplitud (AM) la modulació consisteix en una superposició de l'ona portadora sinusoidal generada per un circuit oscil·latori i de la corba fonogràfica del so. Com que aquesta última influeix lleugerament sobre la freqüència de l'ona portadora en cada moment, l'estació receptora no es pot limitar a la captació d'una sola freqüència en el sentit estricte de la paraula, sinó que les emissions es capten sobre un interval de freqüències que té la freqüència de l'ona portadora com a centre. D'aquí ve que una selectivitat massa rigorosa d'una estació receptora implica pèrdues qualitatives en la reproducció sonora. L'estació receptora desmodula l'ona captada, és a dir que es separa electrònicament l'ona portadora de l'ona sonora, que finalment s'amplifica. No es poden descriure aquí els detalls tècnics d'aquests processos, que formen l'objecte de nombrosos tractats especialitzats.

Un altre sistema molt important de radiofonía consisteix en modular la freqüència de l'ona portadora, en lloc de la seva amplitud. És el sistema conegut per MODULACIÓ DE FREQUÈNCIA (FM).

Però ja abans de la concepció de la radiotelefonía, es podia enviar sons telefònics d'un lloc a l'altre sense la intervenció d'un fil de línia. Entre els diferents sistemes mencionarem aquí el que va fer servir Ruhmer a finals del segle passat: l'aparell transmissor de Ruhmer treballava amb una càpsula manomètrica de Koenig. La llum de la flama es projectava òpticament mitjançant un mirall parabòlic sobre l'estació receptora, on la llum fluctuant al ritme de les ones sonores actuava sobre una resistència fotoelèctrica (conductor a base de seleni, que adapta la seva resistència elèctrica a la intensitat de la llum), que feia de transductor, una mica com si es tractés d'un micròfon. Fora de la qualitat sonora no gaire satisfactòria del sistema (cosa que avui en dia es podria millorar, substituint la flama manomètrica per una font de llum amb menys inèrcia, com ara un raig de laser modulad per les vibracions del so), el procediment de

---

<sup>1</sup> Les ones electromagnètiques anomenades així en homenatge al seu descobridor, el físic Heinrich Hertz (1857-94).

Ruhmer té el desavantatge de que la llum ha de seguir una línia recta que és interceptada fàcilment per tota mena d'obstacles, com ara un núvol, un ocell,...

Com ho comproven antigues llegendes, ja des d'èpoques immemorials havia estat un dels grans somnis de la humanitat de disposar d'un aparell que permeti gravar i tornar a reproduir en qualsevol moment els sons, especialment els de la veu humana. Citem per exemple la novel·la de ficció "Histoire comique des États et Empires de la Lune" (1656) de Cyrano de Bergerac, en la qual es descriu un llibre fantàstic que parla quan s'aplica una agulla sobre el capítol corresponent. Pensem també en l'aventura fantàstica relatada per Münchhausen (1720-97), en la qual els tons tocats en un corn de caça han quedat congelats de tant de fred que feia. En el moment de descongelar-se l'instrument, es posava a tocar melodies tot sol...

El que potser podem considerar el primer pas en la solució tecnològica d'aquest problema, és el sistema per gravar la corba fotogràfica del so emès per un diapasó sobre un cilindre recobert de sutge, de Young, a la vora de 1807. Una generalització d'aquest procediment fou inventada l'any 1857 per Scott, en forma del seu *Phonautographe*. Ara "només" faltava el sistema per a tornar reproduir acústicament les gravacions fetes per la màquina de Scott. És en 1877 que finalment dos inventors es van donar compte, com sembla, independentment l'un de l'altre, de la reversibilitat del *Phonautographe* de Scott i van concebre la forma primitiva del FONÒGRAF. Ara que coneixem la solució del problema, ens sembla que el pas donat finalment en 1877 era elemental i ens estranya que s'hagués trigat tant en arribar en aquest punt. És una mica com el famós ou de Colom. Però és interessant de constatar que ni el mateix Scott, ni els grans científics com ara Helmholtz o Koenig, que havien treballat amb la màquina de Scott, no van donar el pas decisiu.

El primer fonògraf d'Edison (el de Charles Cros va romandre a l'estadi de projecte) consta d'un cilindre amb un eix roscat que es va desplaçant lateralment d'un pas de rosca a cada volta de maneta, i d'una membrana sota la qual s'ha disposat una punta gravadora. Quan la membrana es posa en posició de gravar (o de reproduir), la punta està premsada contra la superfície del cilindre per un tac de goma situat entre el centre de la membrana i la molla portadora de la punta. El cilindre de coure ha estat recobert d'un full prima d'estany, en la qual s'ha marcat ja lleugerament la ranura que marca el recorregut de la punta. Si el cilindre es posa a voltar uniformement mentre que es parla en el pavelló de l'aparell gravador (que és

idèntic a l'aparell reproductor), la punta s'endinsarà més o menys en el full d'estany, segons la posició momentània de la membrana i vist des del costat s'obté una corba fonogràfica marcada en el full. Es parla de gravació vertical o en profunditat. Finalitzada la gravació es separa la membrana del cilindre, que es torna a col·locar en la seva posició inicial i es disposa la punta en la mateixa posició que en el moment de la gravació. Si ara fem voltar el cilindre, l'agulla anirà seguint la corba traçada, que d'aquesta manera imposarà els mateixos moviments vibratoris a la membrana que han actuat sobre l'agulla en el moment de la gravació, amb què el so queda reproduït en freqüència, intensitat i timbre, si prescindim de les distorsions. Malauradament aquest sistema de gravació fonogràfica només permet un nombre molt limitat d'audicions, ja que la corba marcada en el full d'estany es va aixafant a cada passada de l'agulla.

Una notable millora en la qualitat reproductora del fonògraf va ésser introduïda per l'adopció de la cera com a recobriment dels cilindres, en substitució de la fulla d'estany, l'any 1888 per G. Bell, Chichester Bell i Tainter. L'adaptació de l'aparell a la nova tècnica fou anomenat *Graphophone* pels seus inventors. En la fonografia sobre cilindres de cera s'utilitzaven dues agulles distintes, una per la gravació, que tenia forma de burí, i una altra amb punta més roma destinada a la reproducció. L'elecció d'una cera adequada, generalment a base de parafina, de cera d'abelles i de cera de Carnauba, afavoria un nombre gairebé il·limitat de reproduccions. A finals de segle els fonògrafs es fabricaven en grans sèries per a l'ús domèstic, i la fabricació de cilindres gravats es convertí en una important indústria. En aquesta primera època de la fonografia, la gravació s'efectuava amb mitjans purament acústics, sense intervenció de transductors electroacústics. Davant les orquestres i els solistes s'havien de disposar pavellons acústics de grans dimensions, i el so recollit d'aquesta manera s'enfocava cap a l'aparell gravador a través de tubs acústics. Cap a finals de segle, un alemany, A. Stroh, inventà un violí de construcció extravagant, que no tenia caixa de ressonància; en canvi el cavallet del violí de Stroh comunicava les seves vibracions a una membrana equipada d'un pavelló, com si es tractés d'un fonògraf. Aquest instrument, que actualment ja només és una peça de museu curiosa, va prestar bons serveis a la indústria fonogràfica d'aquell temps, ja que eliminant el pavelló, l'instrument es prestava a ésser empalmat directament a un aparell gravador mitjançant un tub acústic. Possiblement és gràcies al violí de Stroh que avui dia es disposen de gravacions fonogràfiques d'una qualitat relativament acceptable de grans violinistes de l'època com per exemple Joseph Joachim.

A partir de 1925 començà a imposar-se la gravació electroacústica. El so es captava amb micròfons i s'amplificava electrònicament. L'instrument gravador és comparable al tradicional, amb la diferència de que ara la membrana vibrant s'ha substituït per un electroimant que tradueix fidelment les oscil·lacions elèctriques que li comunica l'amplificador en oscil·lacions mecàniques del burí gravador. Més endavant també es va imposar la substitució anàloga en la reproducció de les gravacions fonogràfiques, la suplantació del pavelló i de la membrana per un micròfon especial, el *fonocaptor* o *pick-up*. Actualment els fonocaptors de qualitat solen ésser electrodinàmics, però també abunden els fonocaptors basats en la piezoelectricitat.

A partir de 1895 aproximadament, un nou medi fonogràfic començà a rivalitzar amb el cilindre, el disc del gramòfon inventat l'any 1887 per Berliner. Els solcs dels discos de Berliner es gravaven lateralment i no pas verticalment com en el cas dels cilindres. Això vol dir que si mirem un dels discos de Berliner sota un microscopi veurem una corba serpentejant dins els límits que marca el solc, mentre que en els cilindres gravats en profunditat és la profunditat del solc que varia.

En els primers discos de Berliner, l'espiral estava gravada del centre cap a la perifèria. Edison també va crear un sistema fonogràfic a base de discos, però utilitzant la gravació vertical. Amb el temps diferents cases van adoptar universalment el disc de gravació lateral de la perifèria cap al centre, d'un diàmetre de 30 cm, amb una velocitat de 78 revolucions al minut.

Per a permetre la comercialització a gran escala de les gravacions fonogràfiques, la indústria necessitava un sistema per a la seva fabricació seriada. Ja aviat Berliner trobà un sistema de reproducció dels seus discos de gravació lateral:

La gravació original s'efectuava sobre un disc de zenc recobert d'una capa de cera protectora. La membrana gravadora proveïda d'un burí d'iridio-platí estava acoblada a un tub auditiu. Per a apartar les estelles de cera acumulades en curs de gravació, el plat rotatiu era enterament submergit en una cubeta d'aigua, de manera que els residus de cera nedaven cap a la superfície. Un cop efectuada la gravació en la capa de cera, es gravava el disc amb àcids, com una planxa calcogràfica; la capa de cera actuava de reserva. A partir d'aquesta gravació es feien matrius (contra-relleus) galvàniques que servien al premsatge de plaques termoplàstiques. Aquest sistema tenia un inconvenient que no es va saber apreciar en la primera època i que devia ser el principal responsable de l'escassa propagació del disc en aquells moments, en benefici del cilindre: els



àcids tenen la tendència a accentuar superficialment l'estructura cristal·lina dels metalls que corroeixen. En el cas dels discos de Berliner, l'acció dels àcids originava un soroll de fons en la reproducció que perjudicava la qualitat de la gravació.

A partir de 1897 les matrius galvàniques es començaven de fer directament a partir de gravacions en la capa de cera, procediment que no ha canviat essencialment fins als nostres dies.

Actualment<sup>1</sup> el disc original de cera es sol gravar a partir d'un enregistrament magnètic. El relleu de la gravació original es recobreix electrolíticament d'una capa de metall, després de què la cera es fon. El motlle que en resulta ja podria servir pel premsatge de discos comercials. Però generalment se'n fa un contramotlle electrolític a partir del qual es poden obtenir una o diferents matrius. Finalment les matrius serveixen per a premsar un tros de material termoplàstic en una premsa escalfada a una temperatura determinada. La matriu<sup>2</sup> es refrigera i es separa del disc premsat al que ja només s'ha d'allisar el marge en una mena de torn.

Els fabricants de cilindres fonogràfics es trobaren amb un problema molt més complex, puix que a primera vista no sembla possible reproduir un cilindre gravat per cap mena de premsatge o d'injecció de material, ja que després no es podria separar la còpia del seu motlle. Els recursos de la indústria de cilindres fonogràfics eren successivament:

- Fer tocar la peça de música tantes vegades com se'n volien fer cilindres.
- Distribuir les vibracions acústiques sobre varis aparells gravadors alhora, mitjançant tubs auditius.
- Copiar un cilindre gravat sobre un o més cilindres verges amb un aparell copiadador especial.

Tenint en compte que la cera emprada en la gravació tampoc tenia una consistència com per aguantar un nombre il·limitat de reproduccions, la perspectiva dels fabricants de cilindres fonogràfics era molt obscura. Eren Edison i el seu equip que van salvar la situació, quan al cap de moltes experiències, l'any 1903, van trobar una tècnica genial, que els permetia produir un nombre gairebé il·limitat de còpies a partir d'un cilindre fonogràfic. Vet aquí aquest procediment:

El primer problema era el tractament de la superfície gravada del cilindre de manera que conduís l'electricitat. Primer intentaren de preparar el cilindre per la gravació amb una mescla de cera i de

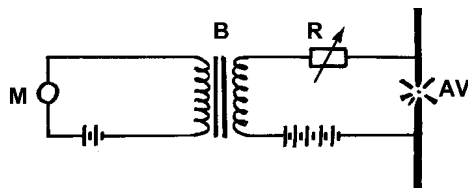
---

<sup>1</sup> De fet actualment la tècnica del disc fonogràfic està a punt de desaparèixer a favor dels discos digitals de tipus CD.

<sup>2</sup> Generalment són dues: una per a cada cara del disc definitiu.

grafit, com la que es feia servir en la confecció de galvanotípies destinades a les impremtes. Però el resultat era massa bast per a la reproducció del so, potser degut a que no s'aconseguia un grafit prou fi i pur. Finalment s'aconseguia recobrir els cilindres d'una finíssima capa d'or, en una cambra de buit, on el cilindre voltava regularment entre dues planxes d'or, entre les quals es mantenia un arc elèctric. Els electrons que saltaven del càtode a l'ànode, arrencaven alguns àtoms d'or, que quedaven enganxats sobre la superfície del cilindre de cera.

Aquesta finíssima capa d'or permetia de recobrir el cilindre electrolíticament d'una capa de coure.



Amplificació amb arc elèctric

La cera del cilindre original s'eliminava amb dissolvents i la matriu de coure es muntava dins un tub de llautó d'una gruixària d'uns 5 mm. Per a obtenir una reproducció del

cilindre, el tub es submergia verticalment en una bany compost d'una mena de cera líquida d'una certa temperatura i es tornava a treure de seguida. En refredar-se, la capa de cera que havia quedat adherida a l'interior del tub fred s'enduria i s'encongia més que el tub de llautó que l'envoltava. Ja que la profunditat dels solcs és mínima (de l'ordre d'un dècim de mil·límetre) aquesta diferència de mesures permetia treure la còpia de dins el tub. El procediment s'acabava amb un tractament mecànic que donava les dimensions definitives al cilindre.

Una altra problemàtica inherent a la fonografia de la primera època és la de l'amplificació de la reproducció sonora. Com tothom sap, avui el so s'amplifica electrònicament. L'amplificació electrònica esdevingué possible gràcies a la invenció del tríode de buit, l'any 1907 per Lee De Forest. A partir dels anys 1950 la tecnologia de les vàlvules de buit es va començar de supplantar per l'electrònica a base de semiconductors; el transistor fou el substitut de la tradicional bombeta amplificadora. Però, era possible l'amplificació del so abans de l'era electrònica? Com es podia fer sentir un disc fonogràfic a tota una sala plena d'auditors?

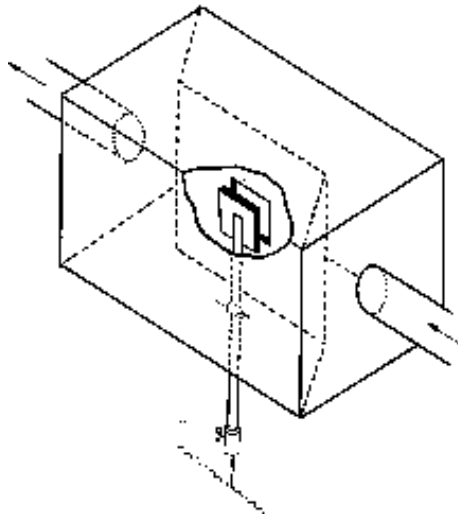
Descriurem a continuació tres procediments que es feien servir a principi de segle per a aquesta finalitat. El primer sistema per a amplificar els sons del fonògraf, l'arc parlant, està basat sobre un fenomen físic sorprenent: Quan els dos pols d'una font de corrent contínua de gran potència es connecten amb sengles elèctrodes de carbó, podem obtenir el que s'anomena un arc voltaic, si establim un contacte breu de les dues puntes de carbó i les tornem separar

immediatament fins a una certa distància. D'aquesta manera s'obté un arc lluminós d'una intensitat extrema, acompanyat d'una temperatura que en certs casos pot superar els 3500 °C. A la vora de 1900 l'arc voltaic, descobert per Davy, era emprat per a l'enllumenat públic. Avui aquest mateix fenomen forma la base de la soldadura elèctrica de l'acer i d'altres metalls. L'enginyer anglès Duddell havia observat que a la més petita fluctuació de tensió de la font de corrent, l'arc solia emetre sorolls. Se li va ocórrer controlar l'emissió sonora de l'arc voltaic amb un micròfon. En aquesta aplicació de l'arc convé que la font de corrent no presenti cap mena de fluctuacions brusques, i per aquest motiu és preferible l'ús d'una bateria de piles o d'acumuladors que no pas la producció de l'energia elèctrica amb un generador dinamo-elèctric. El micròfon no es pot pas intercalar en el mateix circuit de l'arc voltaic, ja que els arcs voltaics necessiten intensitats de corrent molt superiors a les que podria aguantar qualsevol micròfon. En la disposició més senzilla de l'arc parlant de Duddell el micròfon influeix sobre la intensitat de la corrent del circuit de l'arc a través d'una bobina d'inducció, com una mena de transformador. Les lletres de la figura signifiquen: Micròfon, Bobina d'inducció, Resistència variable, Arc parlant. Efectivament les fluctuacions elèctriques generades a partir de les ones acústiques que incideixen sobre el micròfon impliquen unes variacions sincròniques de la corrent de l'arc voltaic, que emet el so en forma amplificada. Si els sons emesos per la membrana d'un fonògraf es dirigeixen sobre el micròfon mitjançant un tub acústic (en lloc del pavelló), aquesta disposició es presta a fer sentir gravacions fonogràfiques a l'auditori de tota una sala d'espectacles, en falta de medis d'amplificació electrònics. Però malgrat els èxits experimentals, aquest sistema no es va imposar mai en la pràctica, sobretot per l'enorme cost energètic. Hem de tenir present que els arcs voltaics solen funcionar a base de 100 V i de més de 20 A. En la soldadura elèctrica s'empren habitualment intensitats que poden superar els 200 A.

Un procediment d'amplificació sonora per fricció s'atribueix a l'inventor Wawrina. Un fil que donava dues o tres voltes a un cilindre rotatiu d'acer comunicava la punta d'un fonògraf amb una membrana molt superior en les seves dimensions a les que estan normalment destinades a reproduir les vibracions de l'agulla fonogràfica. Si el fil s'estira lleugerament en direcció de l'agulla, el fil es restreny sobre el cilindre rotatiu, la fricció creix, i el cap de fil que estira la membrana està atret en direcció al cilindre. Tant bon punt s'afluixa la tensió del segment de fil entre l'agulla i el cilindre, la fricció disminueix i la membrana es pot distensar. Aquest efecte

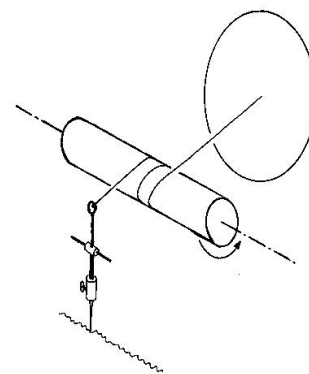
pot servir a l'amplificació mecànica de les febles vibracions que comunica el solc del disc a l'agulla.

Una disposició amplificadora que va tenir un cert èxit era la vàlvula pneumàtica. La vàlvula pneumàtica treballa a base de la regulació del pas d'una corrent d'aire comprimit per una vàlvula que s'obre i es tanca al ritme imposat pel solc d'una gravació fonogràfica. S'obtenia una forta amplificació del so. L'aire comprimit solia ésser subministrat per una bombona de gas. Els primers models de vàlvules treballaven segons l'esquema representat en la figura. Més endavant es construïen vàlvules que regulaven el pas de l'aire amb una vàlvula en forma de dues pintes que lliscaven una sobre l'altre en direcció perpendicular a les seves pues, cosa que evitava en gran part les retroaccions de l'aire comprimit sobre el generador de les vibracions. És captivant l'analogia esquemàtica entre la vàlvula pneumàtica, el tub de buit triòdic i el transistor.



La vàlvula pneumàtica

El disc de 78 revolucions no donava cabuda a gravacions superiors a cinc minuts de gravació aproximadament., per cada una de les seves cares. D'aquesta manera la majoria dels moviments simfònics entre altres, s'havien de distribuir sobre dues o més cares. Per a fer cabre més temps de música sobre una cara dels discos, s'havien de trobar solucions a dos problemes: Reduir la velocitat de rotació i estrènyer l'amplada del solc, ambdues coses sense pèrdues de qualitat. Ja a partir de 1931 Leopold Stokowsky realitzà una sèrie d'experiències de cara a la futura creació del disc fonogràfic de 33 1/3 revolucions per minut. El sistema es comercialitzà a partir de 1950, aproximadament.



Disposició de Wawrina

En aquests discos, que reben la denominació LP (Long Play = reproducció llarga), la pasta a base de goma laca fou substituïda per vinil o per PVC, amb la gran avantatge de la seva irrompibilitat. Una nova tecnologia va permetre realitzar la gravació original amb un burí calent. Al principi un gran problema s'havia de resoldre: Els solcs havien de tenir com a mínim l'amplada suficient per a rebre les oscil·lacions de màxima amplitud. S'inventà el següent sistema, per a flexibilitzar l'amplada dels solcs: En el moment de la gravació del disc a partir d'una cinta magnètica, aquesta es feia passar per davant de dos caps de lectura, amb una distància que corresponia aproximadament al temps que necessita el disc per fer una volta, doncs aproximadament 1,8 segons. La informació recollida pel primer cap serveix per a controlar automàticament la distància que el burí gravador s'ha d'aproximar al centre en la volta següent del disc. D'aquesta manera el solc té una amplada que varia segons la intensitat del material sonor gravat, cosa que augmenta notablement la capacitat d'un disc en la gran majoria dels casos. Ja que en les gravacions musicals són les oscil·lacions de freqüències inferiors a uns 440 Hz, les que solen exigir les amplituds més grans, es va idear un sistema suplementari: els sons gravats es sotmeten a un tractament electrònic que els resta un nombre determinat de dB per cada octava que baixen per sota el límit de 400 Hz, límit fixat arbitràriament. L'aparell de reproducció ha de ser equipat d'un sistema electrònic que torna contrarestar aquest efecte. D'aquesta manera es pot reduir notablement l'amplada dels solcs en passatges de gran intensitat.

Per a contrarestar els sorolls paràsits d'alta freqüència que es produeixen fàcilment degut a les petites imperfeccions del material, es fa servir el sistema invertit: s'incrementa electrònicament l'amplitud de les freqüències superiors a uns 2500 Hz, proporcionalment a l'increment de les octaves per sobre d'aquest límit.

La possibilitat de transmetre música en estèreo es va demostrar per primera vegada en l'ocasió de l'exposició d'electricitat de Paris l'any 1881 per Clément Ader. La música fou tramesa directament des de l'Òpera de París a través de cables telefònics sobre els cascos dels oients meravellats.

A partir de 1958 la fabricació de discs estèreo en gran sèrie fou iniciada. Era també l'època dels primers magnetòfons en estèreo comercials. En els anys seixanta es començava a produir emissions radiofòniques en estèreo.

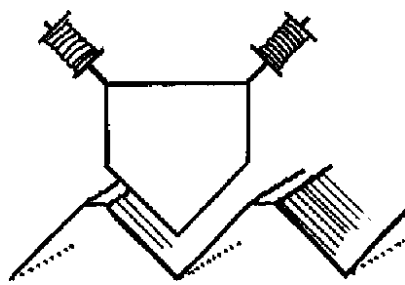
La tècnica d'enregistrament coneguda com a *binaural* treballa amb un cap artificial de matèria plàstica, en el qual els micròfons

dels dos canals es col·loquen en una situació semblant a la de la nostra oïda. S'obtenen resultats sorprendentment realistes amb aquesta tècnica.

Els anys setanta es començaven a oferir sistemes de 4 canals. El sistema més famós és la *Quadrifonia*, sistema que va tenir un cert èxit llavors. Mentre que en els aparells domèstics els sistemes de més de dos canals no tenen gaire importància, en el camp del cinema són molt usuals i es solen designar amb el mot *Surround*.

El principi reproductor dels discs estereofònics és el següent: cada flanc del solc representa individualment un dels dos canals estereofònics. El fonocaptor, previst d'una sola agulla, disposa de dues bobines electrodinàmiques, cada una de les quals respon a una de les dues direccions perpendiculars al flanc corresponent del solc. La figura representa aquest principi, esquematitzant-lo al màxim.

Últimament el disc LP de 33 1/3 revolucions per minut es va suplantant cada vegada més per un altre medi de gravació, basat en



Captació des dels dos flancs del solc

el so digitalitzat, el disc compacte (CD). Aquest disc es llegeix òpticament (doncs sense cap mena de desgast mecànic com el que causaria una agulla) mitjançant un raig Laser.<sup>1</sup> Què vol dir digitalitzar el so? En el sistema clàssic la informació sonora està representada per una corba contínua, la corba fonogràfica. Es parla d'un sistema analògic. Qualsevol petita deformació

d'aquesta corba influeix sobre el so reproduït, introduint-hi tota mena de distorsions i fresses. Una corba analògica es pot representar enterament amb medis numèrics, fins a qualsevol grau de precisió desitjat. La "malla" que forma la clau de la numerització o digitalització només ha de ser prou fina, perquè la corba digitalitzada no es distingeixi perceptiblement de la corba original. Aquesta tècnica és comparable a l'autotípia que s'empra en el camp de les arts gràfiques per reproduir originals de to continu mitjançant una estructura tramada prou fina per quedar dissimulada a l'ull no entrenat especialment. En la gravació fonogràfica és la nostra oïda que determina la finor necessària de la malla. Quina avantatge té la conservació del so en forma numèrica? Sobretot el d'una inalterabilitat absoluta, ja que si per qualsevol causa durant el curs

<sup>1</sup> Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.



del temps un valor numèric, gravat sobre un suport magnètic, per exemple, variés en un percentatge petit, el lector, després d'arrodonir-lo, el tornaria interpretar com a nombre natural, que coincideix amb el nombre original, sempre quan el desviament no sigui massa gran i el valor alterat no s'apropi més d'un dels nombres naturals veïns que de l'original. D'aquesta manera es poden treure còpies digitalitzades reiterades del material sonor (còpies en cadena), sense ni la més mínima pèrdua de qualitat, igual com si es tractés de disquets magnètics d'informàtica. En canvi una gravació analògica copiada reiteradament aniria acumulant sorolls de fons i distorsions a cada procés copiatiu. D'altra banda, la forma digital és la idònia, per a ser processada en un ordinador.

En el disc compacte els valors digitals són codificats en forma de cavitats microscòpiques detectables amb un sistema òptic a base de raig laser, que treballa a través d'una fina capa de plàstic transparent, prou gruixuda per que les fines imperfeccions de la superfície no arribin a pertorbar la lectura correcte del codi. Unes pistes de control que acompanyen la pista principal a una certa distància asseguruen la perfecció de la reproducció sonora en els casos inevitables de petites imperfeccions de fabricació i en el de les ratllades. Aquest sistema de correcció és prou eficient perquè un aparell reproductor de màxima qualitat pugui reproduir un disc elaborat amb una màxima perfecció, encara que aquest estigui travessat per un forat d'un mil·límetre de diàmetre, sense cap pèrdua de qualitat. És més: una còpia efectuada amb la maquinària adequada a partir d'un disc amb aquesta mena de "defecte" tornarà ésser idèntic a l'original en perfecte estat de conservació.<sup>1</sup>

En el telèfon de Bell són els moviments, al ritme de les ones sonores, entre la membrana i l'imant permanent construït en forma d'electroimant que engendren una corrent alterna que permet reproduir els sons en la estació receptora. Si en lloc d'alterar la distància, alteréssim el seu estat de magnetització al mateix ritme, l'efecte seria semblant. El pròxim pas d'aquest raonament consisteix en substituir la membrana per una successió ràpida de membranes amb magnetitzacions ben determinades. Si ara ens imaginem totes aquestes membranes col·locades sobre una cinta transportadora que les fa passar ràpidament per davant de l'imant del telèfon de Bell, la disposició ja fa pensar en una mena de magnetòfon, que treballa amb una cinta magnetitzada contínua. Aquest podia haver estat el raonament que induí el danès Poulsen a concebre el seu

---

<sup>1</sup> Veure l'article "*Reproducción digital del sonido*" en la revista "*Investigación y Ciencia*", febrer 1985.

*Telegraphone*, que avui es considera el principal precursor del magnetòfon.

Eren sobretot dues limitacions tecnològiques que van obstaculitzar un èxit radiant d'aquesta màquina de Poulsen. D'una banda encara no es disposava de possibilitats amplificadores adequades del so, i d'altra banda el suport magnètic utilitzat per Poulsen no permetia els muntatges, com les cintes magnètiques actuals. En efecte, el medi de gravació de Poulsen era un fil d'acer, com una corda de piano prima, enrotllat sobre un cilindre. Més endavant es van fer servir cintes d'acer. A partir de 1935, aproximadament, s'introduí l'ús d'un nou medi magnetofònic, en substitució del fil i de la cinta d'acer: la cinta de plàstic, recoberta unilateralment de material magnetitzable en distribució microscòpica. Aquesta combinació encara avui forma la base de la cinta magnetofònica, com també de la cinta magnetoscòpica.

El fonament de la magnetofonia és la possibilitat de magnetitzar una peça d'acer amb un imant. Segons el material, la magnetització només serà transitòria, com en el cas del ferro dolç, o bé permanent, com en el cas de la majoria dels acers. Ens podem imaginar el fenomen de la magnetització com una alineació d'unes partícules, que en el seu estat natural tenen orientació arbitrària.

Si el magnetòfon s'utilitza per a gravar, la cinta està sotmesa primer a l'efecte d'un electroimant, el cap esborrador que treballa amb corrent d'alta freqüència i alinea la polaritat de les partícules magnètiques de la cinta. D'aquesta manera la sensibilitat de la cinta s'incrementa notablement. El *Telegraphone* de Poulsen encara no disposava de cap element esborrador. La polarització amb corrent contínua fou introduïda per Poulsen l'any 1903. La polarització amb alta freqüència es començà de practicar a partir de 1927, aproximadament.

Passada per la fase de polarització, la cinta passa per davant el cap gravador (que actua com un telèfon de Bell en situació de receptor) i crea unes despolaritzacions en la cinta, que són proporcionals en cada moment a l'amplitud de la corba fonogràfica del so tramesa fins al cap gravador en forma d'oscil·lacions elèctriques. Quan l'aparell s'utilitza en posició de lectura, els caps d'esborrar i de gravar es desconnecten a favor del cap de lectura, que assoleix una funció similar a la d'un micròfon: les diferències de polarització d'una cinta magnètica que passa pel seu davant es tradueixen en una mena de corrent alterna corresponent al so original.

Avui en dia la cinta magnètica és el medi de gravació sonora més generalitzat entre els professionals, sobretot per la possibilitat

d'efectuar muntatges amb estisores i cinta adhesiva.<sup>1</sup> Aquesta possibilitat forma un dels pilars de la música electroacústica, que va començar a manifestar-se pels volts de 1945. D'altra banda les cintes magnètiques poden ser gravades en varies pistes, el nombre de les quals només està limitat pels aparells i l'amplada de les cintes.

A mesura que el magnetòfon es va anar perfeccionant, les cintes es tornaren cada vegada més estretes (també es feien cabre cada vegada més pistes sobre una cinta de la mateixa amplada) i es movien cada més lentament, de manera que es podia estalviar material. Quan en el anys seixanta aparegué la cassette àudio, el brunzir de fons es convertí en un autèntic problema. L'americà Ray Dolby desenvolupà un sistema amb el que es podia suprimir efectivament aquest brunziment de fons. El sistema de Dolby treballava de la manera següent: en el moment de l'enregistrament les parts de poca intensitat s'amplifiquen més que les altres. En el moment de la reproducció el descodificador Dolby reconeix les parts que es van amplificar més que les altres i les reproduceix amb la intensitat adequada. Ja que el brunziment de fons sobretot es percep en les seccions de poca intensitat, aquesta tècnica permet resoldre el problema.

Des de l'existència de magnetòfons amb una bona qualitat de reproducció, els discos s'han deixat de gravar en directe, per a gravar-los a partir d'un enregistrament magnetofònic, sovint muntat a trossos, i en els quals cada micròfon correspon a una pista individual, cosa que permet variar les intensitats relatives de cada pista en el moment de la gravació del disc original de cera.

Finalment comentarem uns sistemes de gravació del so que treballen a base de pel·lícula fotogràfica. Aquests sistemes, anomenat fotofonogràfics, permeten fer servir una pista reservada a propòsit com a portadora del so sobre la pel·lícula de 35 mm de la cinematografia comercial. D'aquesta manera s'assegura una perfecta sincronització<sup>2</sup> del so i de la imatge. Els nombrosos sistemes fotofonogràfics es poden subdividir en dos grups principals, segons el sistema d'enregistrament: els sistemes d'àrea variable i els de densitat variable. Ambdues classes de sistemes són compatibles en el moment de la reproducció.

En els sistemes d'àrea variable, les vibracions elèctriques que corresponen al so que s'ha de gravar s'envien sobre un sistema òptic que impressiona la pel·lícula fotogràfica de tal manera que després

---

<sup>1</sup> Segurament en breu aquests muntatges s'efectuaran gairebé exclusivament mitjançant ordinador.

<sup>2</sup> El desplaçament que hi ha entre l'exposició de la imatge i del so en la cambra cinematogràfica (que sol ser d'uns 21 fotogrames) s'ha de compensar en el moment de la projecció.

de revelar obtenim una cinta blanca i negra d'amplada variable (generalment simètrica), els marges de la qual corresponen exactament a la corba fonogràfica del so gravat.

Els procediments de densitats variables treballen amb unes fonts de llum pràcticament exemptes d'inèrcia, la intensitat lluminosa de les quals està relacionada en cada moment a la corba fonogràfica del



Els dos principals sistemes fotofonogràfics

so. La llum d'aquesta bombeta s'envia sobre la zona fonogràfica de la pel·lícula a través d'una clivella estreta. La pel·lícula queda impressionada uniformement en direcció de la seva amplada. El que varia és la intensitat lluminosa de cada franja,

proporcionalment a la corba fonogràfica o a la fracció negra d'una banda sonora d'àrea variable.

En realitat existeixen molts sistemes fotofonogràfics diferents, tots derivats dels dos procediments bàsics descrits aquí. Àdhuc s'han fet proves amb sistemes que varien en les seves àrees i en les densitats ensembles. De cara als entesos en les arts gràfiques em permeto aquí comparar els procediments d'àrea variable, de densitat variable i els combinats amb els procediments del rotogravat autotípic, del rotogravat tradicional i del rotogravat semi-autotípic.

L'aparell de reproducció projecta la banda sonora a través una escletxa sobre una cèl·lula fotoelèctrica amb poca inèrcia. La cèl·lula deixa passar impulsos elèctrics al ritme dels successius factors globals de transparència, tant en el cas d'un sistema de gravació com en el cas de l'altre. En un amplificador electrònic el so original es reconstrueix a partir d'aquestes fluctuacions lluminoses. Queda el problema del transport sofrenat a què es sotmeten els fotogrames de les pel·lícules en el moment de la projecció. Per a superar aquesta dificultat la indústria cinematogràfica va acordar una distància de 21 fotogrames entre el sistema de projecció i el de la reproducció sonora.

Els primers intents de sincronitzar discs fonogràfics amb pel·lícules cinematogràfiques es tornaren obsolets gràcies al desenvolupament dels sistemes fotofonogràfics.

La famosa obra de Disney de l'any 1940, Fantasia, era la primera pel·lícula comercial amb so en estèreo. Per a projectar-la s'havien de fer servir dos projectors perfectament sincronitzats: el primer

projectava les imatges, mentre que el segon llegia les tres pistes sonores de la seva pel·lícula. D'altra banda en aquella pel·lícula ja s'utilitzava el sistema *Technicolor*.

Els anys cinquanta l'enregistrament sonor de moltes pel·lícules s'efectuava de manera magnetofònica sobre una estreta cinta magnètica enganxada al marge de la pel·lícula fotogràfica.

Mes endavant en el cinema es començà a utilitzar so digitalitzat. Un dels primers sistemes era el que Eastman Kodak va introduir el 1990 sota el nom de CDS. En aquest sistema la pista de so tradicional (doncs fotofonogràfica) ha estat substituïda per una pista amb codificació digital. El sistema treballa amb supressió de brunziment Dolby de 6 canals i es destaca per la seva qualitat sonora extraordinària. Tant es pot fer servir amb pel·lícula de 35 com de 70 mm. La falta d'èxit comercial del CDS és essencialment deguda a dos factors: d'una banda les pel·lícules només es podien projectar en sales especialment preparades i en el cas d'una pana no hi havia cap pista sonora tradicional per substituir la pista digital.

L'any 1993 s'introduí el sistema DTS, en el qual entre els fotogrames i la pista sonora tradicional hi ha una pista estreta (Time Code Track) que conté el codi que controla la sincronització de la projecció i del so; les dades digitals que corresponen al so es troben en un CD àudio. Malgrat tot no es renúncia a la pista sonora tradicional, d'una banda pel cas d'una pana, d'altra banda també pels cinemes que no estan preparats per projectar pel·lícules DTS. Un avantatge del sistema és la facilitat del sistema per canviar d'un idioma a l'altre, ja que només cal canviar el CD.

A França ja al 1991 es va introduir l'anomenat *Concepte L.C.* de Pascal Chedeville que treballava d'una manera semblant al DTS. L'escàs èxit d'aquest sistema és degut al fet de que les grans empreses multinacionals no l'emparaven.

L'any 1994 l'empresa Dolby introduí el seu sistema sonor *Dolby Digital*, en el qual el so digitalitzat es col·loca entre les perforacions de la pel·lícula, en forma d'un codi de trama. També en aquest sistema la pista sonora tradicional es manté.

En els anys setanta en el món del cinema aparegué un sistema que popular durant pocs anys, el Sensurround. Aquest sistema tenia una pista sonora suplementària per l'infrasó per sota de 20 Hz i els altaveus especials estaven disposats de tal manera que els seients dels espectadors transmetien vibracions que es percebien corporalment. En pel·lícules de catàstrofes això donava una sensació de realitat que esgarrifava. Diuen que diferents edificis han estat danyats per les vibracions, cosa que ens fa pensar en les trompetes de Jericho.

Si volem passar l'una o l'altra pista d'un CD àudio sobre el nostre PC, cosa que no és sempre legal, obtenim fitxers amb l'extensió WAV. Aquest tipus de fitxers són enormes així que no són indicats per a ser enviats per Internet. Hi ha dues maneres de comprimir dades. Hom pot recórrer a un programa compressor que permet reconstruir les dades originals, com per exemple PKZIP.EXE de PKWARE Inc. Però els fitxers WAV no es deixen comprimir prou amb aquest tipus de programes. Una altra solució consisteix en buscar un algoritme que elimina exclusivament la informació que la nostra oïda no pot apreciar igualment. Aquesta és la tasca que es va portar a terme a *l'Institut Fraunhofer* i que s'ha convertit en l'estandard MPEG. Els fitxers comprimits segons aquesta norma tenen l'extensió MP3 i són molt més petits que els fitxers WAV. Els fitxers MP3 es poden tornar transformar a fitxers del tipus WAV, per exemple per copiar-los sobre discs CD àudio. Però aquests fitxers WAV ja no són idèntics als fitxers WAV originals. Mentrestant existeixen tocadiscs MP3 portàtils i pel cotxe que llegeixen directament els fitxers MP3. La capacitat d'un CD creix notablement gràcies a la compressió. Un sistema anàleg està a l'origen del disc de vídeo DVD que sembla que està a punt de substituir les cassettes de vídeo actuals.