

# INTRODUCCIÓ A L'ACÚSTICA DE LA TENORA PART I

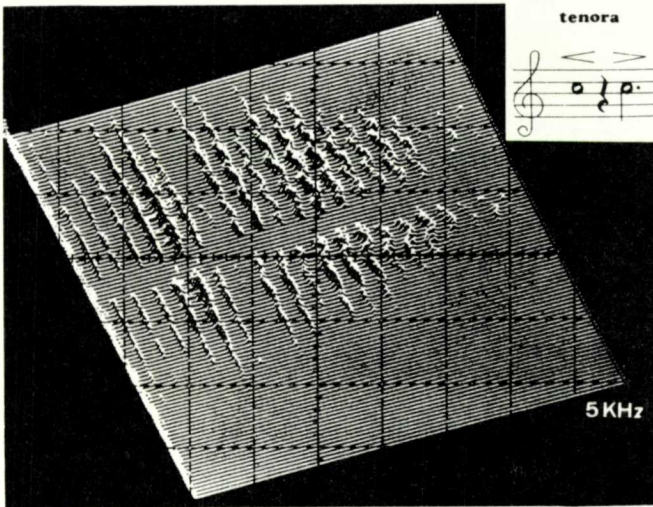
per

JOAQUIM AGULLÓ I BATLLE  
*Càtedra de Mecànica de l'E.T.S.E.I.B.,  
Universitat Politècnica de Barcelona*

SALVADOR CARDONA I FOIX - ANNA SAU I BAYER  
*Laboratori de Vibracions de l'E.T.S.E.I.B.,  
Universitat Politècnica de Barcelona*

## RESUM

L'interès per a documentar la tenora quant al seu aspecte acústic, i la singularitat del moment històric en què es troba, mogueren el Laboratori de Vibracions de l'ETSEIB a iniciar un estudi teòric-experimental del seu funcionament. El present article és el punt de partida de l'exposició d'aquest estudi,



Imatge de la variació tímbrica del so de la tenora en variar la intensitat. Variació de l'estructura espectral del so del  $Do_4$  de la tenora, en la seqüència «piano»-«forte»-«piano».

1. L'afinació segons el diapasó internacional del  $La_3 = 440$  Hz, que és emprada per la major part de les cobles de Barcelona, és l'anomenada «normal», en contraposició a l'anomenada «brillant» —de l'ordre de mig to més aguda— que és emprada per les cobles empordaneses.

2. No lineal: terme que al·ludeix a la manca de proporcionalitat estricta entre causa i efecte. En

aquest cas les variacions de cabal ocasionades per la canya no són estrictament proporcionals a les variacions de pressió.

3. Aquest fet és comú a tots els instruments de tub aproximadament cònic amb una gran diferència de diàmetre entre els extrems: oboè, fagot, tible, gralla, etc. Per al clarinet, instrument de tub aproximadament cilíndric, el segon mode té una freqüència triple de la del primer, de manera que les notes del segon registre sonen a la dotzava —una octava més una quinta— alta de les del primer.

i comprèn dues part: la primera es refereix als aspectes conceptuals, i la segona —que es publicarà properament— al model matemàtic bàsic.

A la primera part, després d'una anàlisi de les propietats acústiques del so de la tenora —riquesa espectral, variació tímbrica, atac— hom passa a considerar el funcionament del sistema canya-columna d'aire. Pel que fa a la columna d'aire, hom presenta els conceptes de modes propis i freqüències pròpies. Del primer mode propi depèn l'afinació del primer registre, i de la correcta alineació dels altres modes depèn l'espontaneïtat i l'estabilitat de l'instrument, en col·laborar aquests amb el primer mode. El nombre de modes que hi poden col·laborar és limitat per l'anomenada freqüència de tall; aquesta depèn de la mida i la separació dels forats, i és decisiva pel que fa al «color tímbric» de les notes i de l'instrument.

Hom presenta també el funcionament del segon registre i alguns detalls com és ara la composició i la direccionalitat del so emès, la relativa llibertat quant a l'emplaçament dels forats, el paper que hi fa el pavelló, i el problema de les canyes.

#### INTRODUCCIÓ

La tenora, instrument solista de la cobla, pot ésser considerada com un supervivent de les xeremies medievals emprades arreu d'Europa fins a la darrerà del segle XVII. A la segona meitat del segle passat, el renaixement de la sardana va fer-la evolucionar a fi de satisfer les exigències creixents dels compositors: hom hi afegí claus per tal de facilitar-ne la digitació i d'estendre la tessitura de l'instrument vers les notes més greus (1-2).

Avui dia pot definir-se com un instrument de doble canya i tub cònic acabat en un pavelló ample. Està afinada en  $Si^b$  i la nota més greu és el  $Fa\#_2$ , que sona  $Mi_2$  del piano (i a la qual correspondria una freqüència de 164,8 Hz a l'escala temperada afinada amb el diapasó  $La_3 = 440$  Hz<sup>1</sup>). L'extensió del primer registre va del  $Fa\#_2$  fins al  $Do\#_4$  (493, 8 Hz). El segon registre s'inicia amb el  $Re_4$  (523,3 Hz). Vers els aguts s'arriba a notes tan altes com el  $Sol_5$  (1397 Hz), bé que aquestes no són d'execució normal sinó que intervenen tan sols com a notes d'acabament de frase.

La tenora està adaptada al seu paper d'instrument solista constitutiu d'un conjunt instrumental dedicat a tocar música de dansa a l'aire lliure en ambients relativament sorollosos, en els quals el seu so pot ésser filtrat per diversos obstacles i emmascarat pel soroll ambient. Aquestes condicions demanen un instrument potent —això obliga que sigui de vent— de sons d'una gran riquesa espectral —cada so és constituït per un extens conjunt d'harmònics—, qualitat acomplerta al màxim pels instruments de doble canya. La Fig. 1 mostra el ric espectre del so de la tenora.

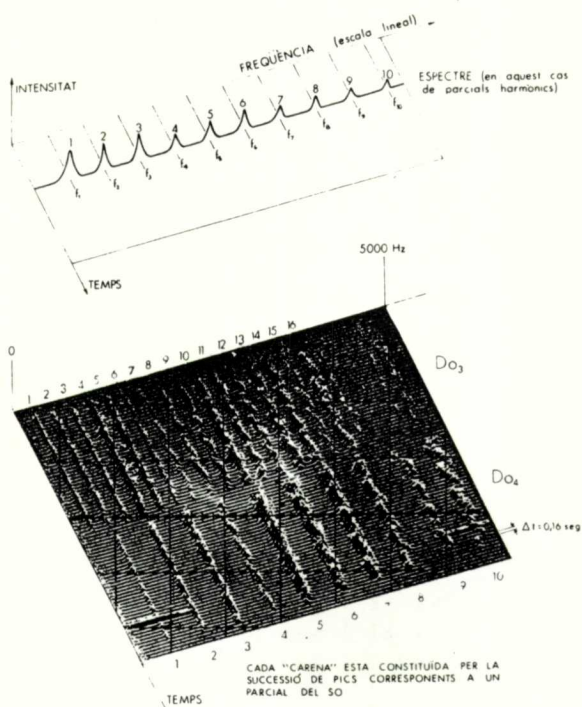


Fig. 1. Estructura espectral del so de la tenora. Successió d'espectres del  $Do_3$  i del  $Do_4$ .

L'atenuació i l'emascarament poden deteriorar la percepció d'alguns dels harmònics, però allò que resta de la família harmònica de cada nota forneix encara un coneixement precís de la seva afinació mitjançant el recurs de la percepció anomenat «mecanisme de percepció del fonamental», el qual és breument descrit a l'APÈNDIX I (3-4). Aquesta riquesa espectral, que és característica de cada nota, augmenta en passar d'intensitat «piano» a «forte»; això proporciona una varietat tímbrica, o del «color» del so, que incrementa l'interès musical dels sons de la tenora.

A més l'atac summament viu i matisable de les dobles canyes és un ajut decisiu per al reconeixement i seguiment de la seva successió de notes, i per tant és un col·laborador eficaç en la transmissió del ritme d'una música prevista per a dansar.

La singularitat de la tenora —com a supervivent més evolucionat de les xeremies— i les seves remarcables característiques acústiques per una banda, i la seva manca de normalització i situació crítica pel que fa al nombre de cons-

tractors en actiu per l'altra, van moure el Laboratori de Vibracions de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona a iniciar un estudi introductor de la seva acústica, com a primer pas d'un programa d'investigació més ampli encaminat a analitzar-ne el disseny des del punt de vista físic (5).

Hom duu a terme aquest estudi sota el doble enfocament, teòric i experimental, que és característic de les recerques d'arreu del món en l'àmbit de l'Acústica Musical.

La complexitat dels fenòmens físics dels quals depèn el comportament musical d'un instrument —afinació, espontaneïtat, color tímbric, etc.— i la precisió demanada, fan que els estudis exclusivament teòrics, malgrat llur interès conceptual, hagin tingut una incidència gairebé nul·la en el projecte dels instruments. Darrerament, l'evolució dels mètodes experimentals i de tractament de la informació ha fet progressar l'Acústica Musical fins al punt de poder constituir un valuós element d'ajut a l'hora d'estudiar modificacions dels instruments i dels dissenys existents, per tal de millorar-ne algunes característiques

Aquest article introductor és compost de dues parts: la primera, publicada en aquest butlletí, es refereix als aspectes conceptuals dels quals depèn el funcionament de la tenora, s'hi ha prescindit de tota formulació matemàtica. La segona part, que serà publicada en un proper butlletí, es refereix a la teoria bàsica de l'acústica de la columna d'aire de la tenora.

#### FUNCIONAMENT DE LA TENORA. SÍMIL HIDRÀULIC

Els instruments de vent de canya es basen en el moviment vibratori d'una columna d'aire, mantingut per l'entrada pulsativa d'aire a pressió. Aquesta entrada és governada per la mateixa vibració de la columna d'aire en actuar damunt la canya, la qual fa la funció de vàlvula de pas a l'entrada.

El funcionament d'aquests instruments pot ésser il·lustrat mitjançant un símil hidràulic, esquematitzat a la Fig. 2, que es basa en l'analogia que existeix entre la propagació de les ones sonores i la propagació de les ones superficials dels líquids.

En un canal de profunditat variable i amplària constant que desguassa dins un gran estany, el forniment arriba a l'extrem tancat a través d'una vàlvula de pas governada per una boia. En pujar la boia, el forniment augmenta, i en baixar, disminueix. Aquesta actuació de la boia tendeix a incrementar les pertorbacions de nivell a l'entrada: quan l'arribada d'una ona superficial hi fa pujar el nivell, l'increment de forniment tendeix a fer-lo pujar encara més; quan el nivell baixa, la reducció de forniment tendeix a fer-lo baixar més. Aquest funcionament pot establir i mantenir allò que hom anomena una *ona*

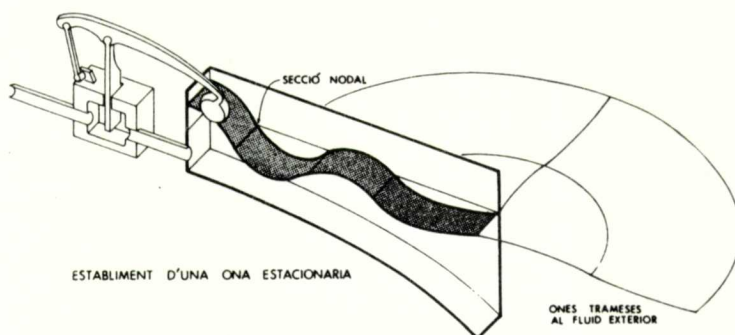


Fig. 2. Símil hidràulic del funcionament de la tenora.

*estacionària* dins el canal: la superfície del líquid presenta una forma ondulada que oscil·la verticalment; hi ha seccions del canal que resten pràcticament en repòs, entre les quals el nivell fluctua amunt i avall; a l'extrem obert hi ha una certa transmissió d'ones al fluid exterior.

Aquesta ona estacionària pot ésser considerada com la superposició de dues ones que avancen en sentits oposats: una ona avança vers l'extrem obert i, en arribar-hi, el canvi bruscat de secció fa que en una gran part es reflecteixi enrera, i d'aquesta manera s'origina l'ona que avança en sentit contrari, la qual, en arribar a l'extrem tancat, es reflecteix de nou i simultàniament es reforça per l'acció de la vàlvula d'entrada. Les ones trameses al fluid exterior provenen de la part no reflectida de l'ona que avança vers l'extrem obert.

Les ones estacionàries només són factibles per a unes determinades freqüències d'oscil·lació del nivell, ja que l'ona després de les reflexions cal que «tanqui» correctament, és a dir que quedi superposada en coincidència amb ella mateixa, i això, atesa la llargària del canal i la velocitat de propagació de les ones —la qual és en principi variable en ésser-ho la profunditat del canal—, condiciona les possibles freqüències i formes de les ones estacionàries.

#### COMPORTAMENT DE LA COLUMNA D'AIRE DE LA TENORA AMB TOTS ELS FORATS LATERALS TANCATS

Per a iniciar l'estudi de la tenora és convenient de centrar l'atenció al moviment vibratori de la columna d'aire, per tal com, pel que fa a la doble canya, aquesta actua com a vàlvula de pas governada per aquest moviment. Com que la canya augmenta el cabal en augmentar la pressió a l'interior, i el disminueix en disminuir aquesta, l'extrem del tub de l'instrument on es troba la canya es comporta molt aproximadament com si fos tancat.

El fet que hi hagi un corrent continu d'aire superposat al moviment vibratori té un paper secundari, i en prescindirem. Com a primer pas convé de considerar el tub amb tots els forats laterals closos, i a més convé, de moment, de prescindir del ràpid augment de secció que representa el pavelló.

Dins el tub són possibles diverses ones estacionàries. La de freqüència més baixa és caracteritzada per les distribucions de les amplituds de fluctuació de la pressió i del cabal esquematitzada a la Fig. 3. Durant mig cicle el moviment a les diverses seccions és d'apropament vers l'extrem tancat, al qual s'estableix una sobrepessió que progressivament atura aquest moviment fins arribar a la seva detenció, instant en el qual la sobrepessió és màxima a totes les seccions. A partir d'aquest instant s'inicia la segona meitat del cicle, en la qual el moviment és vers l'extrem obert, la sobrepessió a l'extrem tancat decreix i passa a convertir-se en depressió que detura el moviment fins a detenir-lo; en aquest instant la depressió és màxima a totes les seccions i s'inicia de nou el cicle. La fluctuació periòdica de pressió, així com la de cabal, són sinusoidals. Aquesta manera de vibrar de la columna d'aire és anomenada *1<sup>er</sup> mode propi* —o simplement *1<sup>er</sup> mode*—, i a la seva freqüència, *1<sup>a</sup> freqüència pròpia* —o de resonància—.

A la Fig. 4 mostrem esquemàticament les distribucions de les fluctuacions

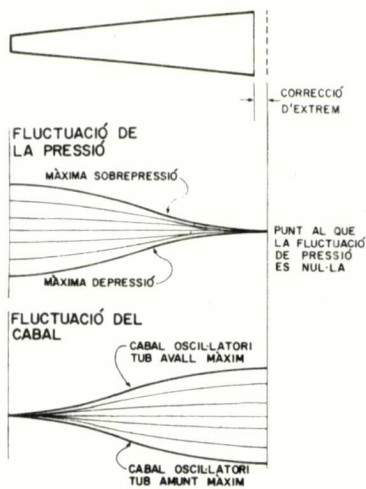


Fig. 3. Primer mode propi de la columna d'aire.

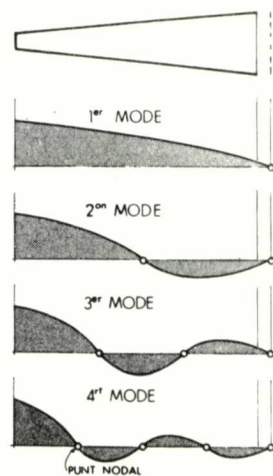


Fig. 4. Fluctuacions de pressió dels modes propis de la columna d'aire.

de pressió corresponents a les diverses ones estacionàries possibles de freqüències creixents. Aquestes distribucions descriuen els *modes propis* 2<sup>on</sup>, 3<sup>er</sup>, 4<sup>rt</sup>,... A cada nou mode apareix una nova secció de fluctuació nul·la de pressió, les quals són anomenades *seccions nodals de pressió*, o simplement *nodes de pressió*.

Una característica remarcable d'aquests moviments vibratoris és que a l'extrem tancat es presenten les màximes fluctuacions de pressió, mentre que a l'extrem obert és el cabal allò que presenta una fluctuació important.

A l'extrem obert, en oscil·lar l'aire endins i enfora, hi ha una interacció amb l'aire exterior, i hom li tramet un moviment vibratori de la mateixa freqüència que la de la columna d'aire. La transmissió d'energia que comporta la radiació d'ones a l'exterior creix amb la freqüència. La incidència d'aquest fet en el comportament vibratori de la columna d'aire es fa palesa si hom considera l'ona estacionària com a superposició de dues ones que avancen en sentits oposats.

Com més energia és tramesa a l'exterior per radiació, menys intensa és la reflexió de les ones a l'extrem obert. A freqüències baixes l'ona reflectida és quasi tan intensa com la incident, i això fa que l'ona resultant de compondre-les sigui pràcticament una ona estacionària; quasi tota l'energia de l'ona incident és reflectida cap a l'interior del tub i queda atrapada en aquest. Qui tingui cura de mantenir el nivell de la vibració caldrà que contínuament reposi l'energia escapada per l'extrem obert, que és poca.

A freqüències més elevades, a causa de la major radiació a l'extrem obert, l'ona reflectida resta afeblida respecte de la incident, i llur composició deixa d'ésser pròpiament una ona estacionària: deixen d'existir seccions nodals pròpiament dites i passen a existir seccions de fluctuació mínima —però no nul·la— de pressió; i, d'altra banda, la fluctuació de pressió deixa d'ésser sincrònica per a tots els punts —és a dir, deixen de passar simultàniament pels valors de màxima sobrepressió, pels de màxima depressió, etc.—. A mesura que la freqüència creix, les fluctuacions de pressió tendeixen a una ona que avança tub avall i s'escapa per l'extrem obert.

Hi ha una certa freqüència a partir de la qual la transmissió d'energia a l'exterior és pràcticament total. Hom l'anomena *freqüència de tall*.

El comportament vibratori de la columna d'aire a les diverses freqüències queda caracteritzat per mitjà de l'anomenada *impedància acústica del tub*. Si a l'extrem de la canya fem actuar un èmbol amb moviment axial sinusoidal de freqüència seleccionable i d'amplitud de velocitat constant, i mesurem les fluctuacions de pressió dins el tub i prop de l'èmbol, obtindrem en variar la freqüència, un diagrama d'amplitud de fluctuació de pressió —com el que resta esquematitzat a la Fig. 5— anomenat *mòdul de la impedància acústica del tub*.

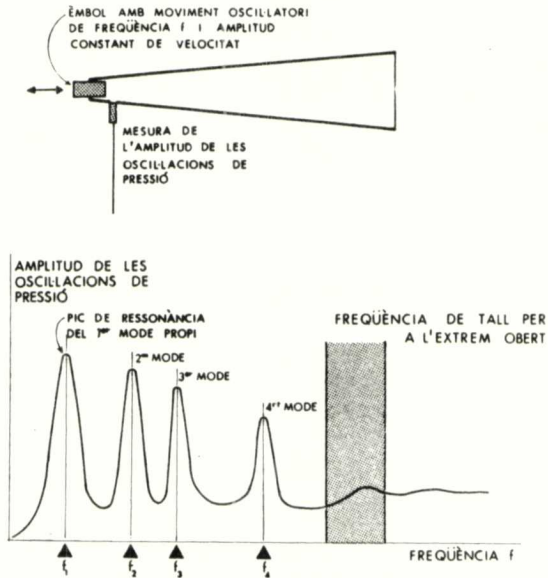


Fig. 5. Determinació de la impedància acústica de la columna d'aire.

Els pics que hi apareixen corresponen a les freqüències pròpies del tub, i procedeixen del procés acumulatiu de l'energia reflectida a l'extrem obert, característic dels modes propis. Hom els anomena *pics de ressonància* dels modes propis. Per a freqüències superiors a la del tall, en ésser quasi total la transmissió de l'ona a l'exterior, desapareix el procés de reflexió-acumulació d'energia i deixen d'existir pics de ressonància.

Per sota de la freqüència de tall hom pot considerar que la reflexió de les ones es troba localitzada en un pla enfora de l'extrem obert. Encara que aquest pla pugui variar lleugerament amb la freqüència, en primera aproximació podem considerar-lo comú per a tots els modes, i pot ésser considerat l'*extrem acústic de l'instrument*. Hom anomena *correcció d'extrem* la distància a què es troba de l'extrem obert.

#### GOVERN DE L'ONA ESTACIONÀRIA DE LA COLUMNA D'AIRE PEL PRIMER MODE, I COL·LABORACIÓ DELS ALTRES MODES

A la qüestió de quina serà l'ona estacionària que s'estableixi en fer sonar la tenora, el procés de reflexió-acumulació analitzat suggereix que el primer mode s'establirà amb més facilitat atesa la major reflexió que es produeix a



l'extrem obert per a les seves ones. Per a la intensitat «piano» la vibració de la columna d'aire és constituïda quasi exclusivament pel primer mode.

A mesura que l'amplitud de vibració augmenta en passar a intensitat «forte», a causa del comportament no lineal<sup>2</sup> de la canya com a reguladora de cabal en funció de la pressió, les variacions sinusoidals de la pressió degudes al primer mode originen variacions periòdiques del cabal que poden ésser considerades com a superposició a l'ona inicial de variacions sinusoidals de freqüències  $2f_1, 3f_1, \dots$ . La no linealitat afegeix harmònics a les variacions de cabal de freqüència  $f_1$ .

D'aquests harmònics, els que tenen freqüència superior a la de tall tenen poca incidència en el funcionament vibratori de la columna d'aire, per tal com l'ona corresponent s'escapa a l'exterior en arribar a l'extrem obert.

Els que tenen freqüència inferior a la de tall però que no coincideix amb cap de les freqüències pròpies de la columna d'aire, tampoc no tenen gaire incidència en el funcionament vibratori. Malgrat que l'ona corresponent es reflecteix a l'extrem obert, no arriba a «tancar-se» adequadament en ésser reflectida a l'extrem tancat. Tan sols si la freqüència d'un d'aquests harmònics coincideix amb la freqüència d'un mode propi de la columna d'aire es produeix un efecte important en el funcionament vibratori. En aquest cas s'afegeix a la vibració intensa del primer mode la vibració intensa d'aquest altre mode, i ambdues vibracions estan sincronitzades pel funcionament de la canya. Aquest fet té com a conseqüència una major estabilitat del funcionament de la canya, ja que ara són dos els modes propis que li dicten allò que ha de fer. Des del punt de vista de l'instrumentista l'instrument té un comportament més espontani i estable.

És per tant desitjable que la columna d'aire tingui modes propis de freqüències que formin part de la família harmònica del mode que governa l'ona estacionària —és a dir, que siguin múltiples de la freqüència d'aquest— a fi d'obtenir la seva col·laboració. Això fa entendre el perquè només determinades formes de tubs són adients per als instruments de vent, i el perquè dels retocs que cal introduir al perfil d'un tub quan hom pretén una acurada posada a punt: cal que tinguin freqüències pròpies que formin una família harmònica.

El valor de la freqüència de tall limita el nombre màxim de modes que poden col·laborar en l'establiment de l'ona estacionària per a cada nota.

#### COMPORTAMENT DE LA COLUMNA D'AIRE DE LA TENORA AMB FORATS LATERALS OBERTS

En obrir un forat lateral prop de l'extrem obert, aquesta obertura impedeix que les fluctuacions de pressió a l'indret del forat puguin ésser tan importants com podien ésser-ho abans.

Als nous modes propis corresponen unes corbes de pressió que s'assemblen a les del tub sense el forat, però que presenten un descens induït pel baix valor que poden tenir les fluctuacions a l'indret del forat. El primer tram, des de l'extrem tancat fins al forat, posa de manifest que el funcionament del tub passa a assemblar-se al d'un tub més curt. El punt  $N_1$  indica l'extrem acústic del tub escurçat convenientment per tal que el seu primer mode tingui la mateixa freqüència que el primer mode del tub amb el forat obert.

Com més ampla i curta sigui la xemeneia del forat, menys importants seran les fluctuacions de pressió admeses al seu indret. El punt  $N_1$  es trobarà més prop de la posició del forat i per tant més elevada serà la freqüència del primer mode, tal i com correspon a una columna d'aire més curta. Oposadament, els forats de xemeneia estreta i llarga permeten dins el tub fluctuacions més elevades de pressió al seu indret, de manera que el punt  $N_1$  s'allunya tub avall. La freqüència del primer mode, bé que augmentarà en obrir el forat, tindrà un augment més petit que amb els forats més amples i curts. A la Fig. 6 il·lustrem aquest fet.

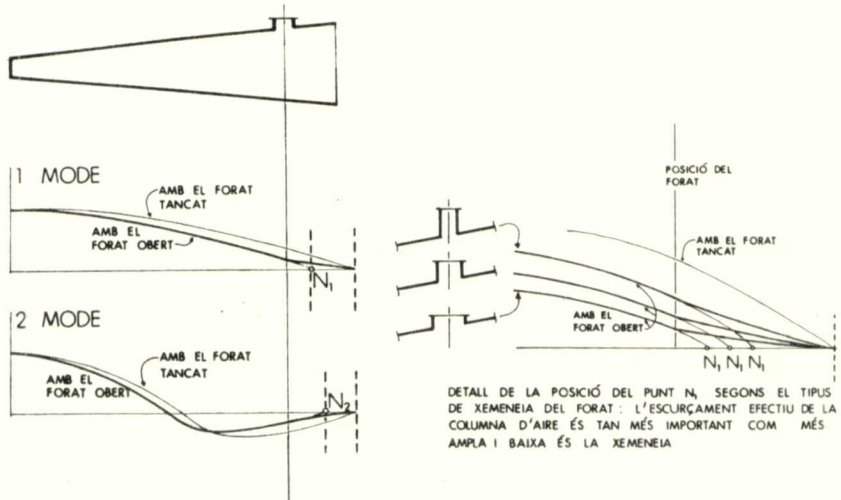


Fig. 6. Modes propis de la columna d'aire d'un tub amb un forat lateral.

A l'hora de fer un forat que aconseguixi un determinat augment de la freqüència del primer mode hi ha per tant una certa llibertat en l'elecció de l'emplaçament, tal i com és il·lustrat a la Fig. 7, hom pot fer-lo més amunt

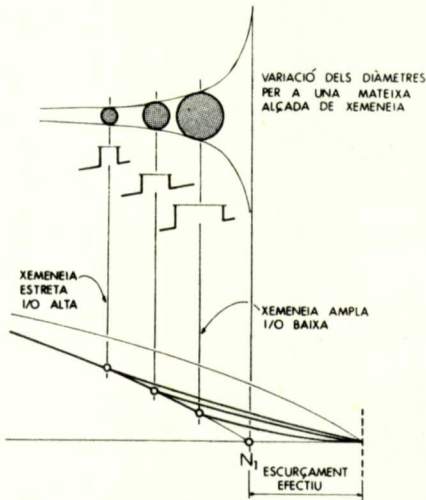


Fig. 7. Llibertat en l'emplaçament d'un forat.

a condició de fer-lo més estret i/o llarg, o bé més avall a condició de fer-lo més ample i/o curt.

En obrir una sèrie de forats laterals, l'efecte sobre el primer mode és similar al descrit per a un forat. El forat obert més prop de l'extrem tancat és el més determinant pel que fa a la forma i freqüència del primer mode. El punt  $N_1$  es troba sempre tub avall prop del primer forat obert. Els altres modes es veuen afectats d'una manera semblant.

Com en el cas del tub sense forats laterals, la freqüència del mode més elevat resta limitada per una freqüència de tall, la qual és anomenada *freqüència de tall vinculada a una sèrie regular de forats oberts* (6). La interpretació dels fets es fa clara si hom considera novament la determinació de la impedància acústica del tub, mitjançant la transmissió per l'extrem de la canya d'un moviment sinusoidal a l'aire per mitjà d'un èmbol, tal i com ha estat esquematitzat a la Fig. 8.

Per a freqüències baixes, l'obertura del forat fa que l'ona es reflecteixi en gran part tub amunt, i el punt  $N$ , on hom pot considerar que la reflexió és efectiva, es troba tub avall prop del forat. En augmentar la freqüència, l'aire contingut a les xemeneies —especialment si aquestes són estretes i llargues— fa que a l'interior del tub i a l'indret del forat puguin haver-hi fluctuacions de pressió més elevades. Això fa desplaçar el punt  $N$  tub avall. Per damunt d'una certa freqüència, l'anomenada freqüència de tall, l'ona és capaç de progressar fins a l'extrem del tub. La pèrdua d'energia que suposa la radiació emesa per cada un dels forats —a freqüències elevades radien amb

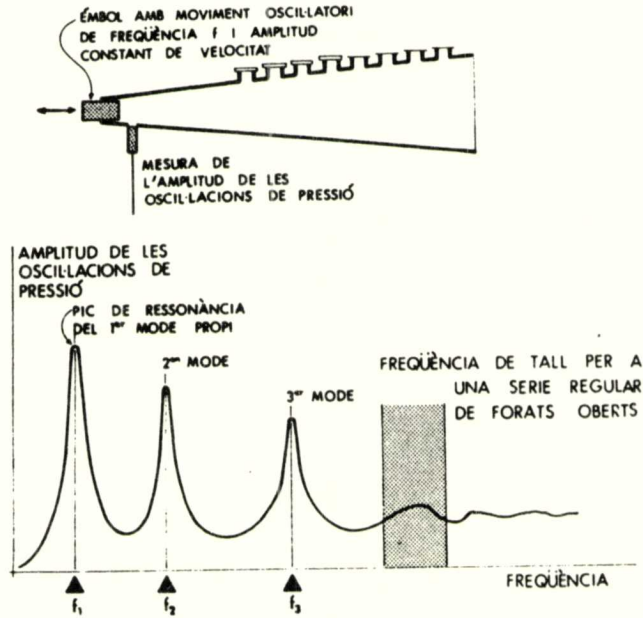


Fig. 8. Impedància acústica de la columna d'aire amb una sèrie de forats oberts.

eficiència— i finalment la radiació a l'extrem obert, fan que aquestes ones siguin poc reflectides enrera, i per tant que no puguin establir una ona estacionària.

Les ones estacionàries poden ésser establertes per a freqüències per sota de la de tall. Cada cop que la freqüència de l'èmbol coincideixi amb la d'una ona estacionària possible, es produirà el procés acumulatiu d'energia dins el tub, es presentarà un pic de ressonància, el tub vibrarà segons un dels seus modes propis. Per a cada un d'ells, considerats en ordre creixent de freqüències, el punt N es trobarà més desplaçat tub avall.

La freqüència de tall condiona el nombre màxim de modes que poden col·laborar a l'establiment de l'ona estacionària, i afavorir per tant l'estabilitat i espontaneïtat de l'instrument.

#### COMPOSICIÓ ESPECTRAL DEL SO EMÈS

L'estructura espectral del so emès, cal no confondre-la amb l'estructura espectral de l'ona estacionària interna.

L'ona estacionària s'estableix gràcies a l'escassa radiació de les ones que

la componen, però els alts nivells que aquestes adquireixen dins el tub fan que, malgrat l'escassa radiació, la seva emissió sigui important. Per sota de la freqüència de tall, les ones són trameses a l'exterior de manera creixent amb la freqüència: la relació entre el nivell de so emès i el nivell de so existent dins el tub —anomenada *factor de transmissió*— creix d'una manera gairebé proporcional a la freqüència (6), tal i com resta esquematitzat a la Fig. 9. Per damunt de la freqüència de tall, les ones són del tot emeses i el factor de transmissió es fa igual a la unitat.

Aquests dos fets fan que en principi no sempre sigui factible de determinar la freqüència de tall en observar espectres del so emès: l'emissió franca dels harmònics aguts —per damunt de la freqüència de tall— i l'escassa emissió dels harmònics greus —per sota de la freqüència de tall—, tendeix a esborrar la marcada diferència que hi ha entre aquests dos conjunts d'harmònics dins l'instrument.

Això no ha de fer pensar que la freqüència de tall deixi de tenir un paper important pel que fa al so emès: d'ella depèn la intensitat tant dels harmònics greus com dels aguts. Cal tenir en compte que els harmònics aguts, malgrat que no constitueixen l'ona estacionària, són originats per aquesta, a causa del comportament no lineal de la canya.

Per a una nota, si la freqüència de tall es fa més baixa disminueixen els

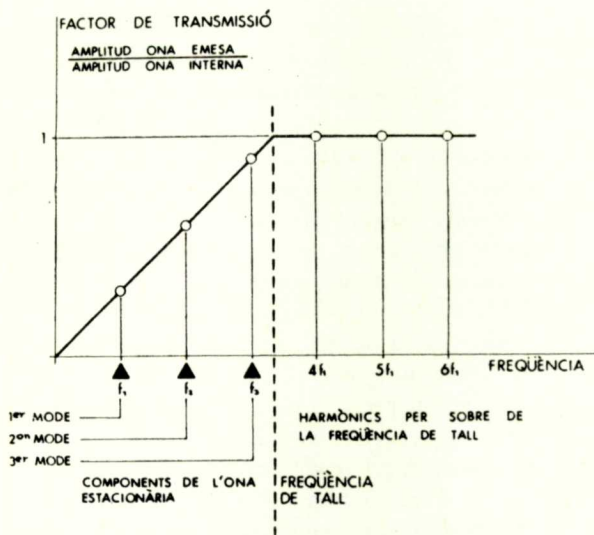


Fig. 9. Emissió dels diferents harmònics del so.

modes que hi col·laboren, i en conseqüència disminueixen també els harmònics aguts que aquests indueixen. El so es fa menys brillant. Si la freqüència de tall es fa més alta, augmenta el nombre de modes que hi col·laboren, i en conseqüència també augmenten els harmònics aguts que aquests indueixen. El so es fa més brillant, fins a poder esdevenir estrident.

Es remarcable el fet que la major part dels instruments de fusta tenen una freqüència de tall relativament constant per a totes llurs notes, la qual cosa fa que, en un instrument amb els modes ben alineats, el nombre de modes que hi col·laboren disminueix vers les notes agudes. Les greus resulten riques en harmònics, mentre que les agudes es veuen lliures d'harmònics massa elevats que les farien estridents.

Canvis, bé que petits, en el valor de la freqüència de tall per a les diverses notes d'un instrument, tenen una forta incidència en allò que hom anomena «color tímbric» de les notes i «personalitat» de l'instrument.

La composició espectral del so emès no és la mateixa per a totes les direccions. Només les ones de freqüències per sota de la de tall són radiades amb intensitats sensiblement iguals en totes les direccions. Les ones de freqüències lleugerament superiors a la de tall —fins de l'ordre d'un 50 % més— són radiades preferentment segons una superfície cònica coaxial amb l'instrument. Les ones de freqüències més altes són radiades en forma d'un feix estret dirigit segons l'eix de la tenora. En conseqüència el timbre de cada nota varia amb la direcció; al llarg de l'eix de la tenora el so emès pot ésser poc representatiu per massa brillant.

#### EL SEGON REGISTRE

A fi d'estendre la gamma de notes de l'instrument sense apropar massa els forats vers l'extrem tancat ni augmentar massa el nombre d'aquests, l'anomenat segon registre dels instruments de fusta forneix, amb els mateixos forats del primer registre, un conjunt de notes més agudes en ésser governada la formació de l'ona estacionària pel segon mode de la columna d'aire en comptes del primer. Per a la tenora el segon mode té —si està degudament alineat— freqüència doble de la del primer, de manera que les notes del segon registre sonen a l'octava alta de les notes del primer.<sup>3</sup>

El funcionament del segon registre es basa en el fet d'evitar que el primer mode governi l'ona estacionària. Per tal d'aconseguir-ho es poden prendre dues mesures: afeblir la seva forta tendència a emmagatzemar energia, i alterar la seva freqüència de manera que deixi d'estar alineat amb els altres modes. La primera mesura és especialment efectiva a règim «piano» i la segona a règim «forte»; per això la solució emprada fa ús d'ambdues mesures, les quals

hom introdueix normalment per mitjà de l'obertura de l'anomenat *forat de registre*, però que també poden ésser introduïdes mitjançant digitacions forcades.

Si per a una certa nota del primer registre, a la qual corresponen les corbes de pressió dels modes 1 i 2 esquematitzades a la Fig. 10, s'obre un petit forat exactament a la posició de la secció nodal del segon mode, aquest i tots els que tinguin una secció nodal en aquest indret no en resultaran afectats. Per contra, per al primer mode l'entrada i sortida d'aire pel forat estret crea una dissipació que evita l'acumulació d'energia que li era característica. A més la seva freqüència es veu augmentada pel fet que, en resultar afeblida la corba de pressió pel descens a l'indret del forat de registre, el punt N on es pot considerar efectiva la reflexió de les ones es desplaça tub amunt i per tant la llargada acústica es menor. Això és comú a tots els modes que no tinguin una secció nodal a l'indret del forat de registre.

El nou diagrama de la impedància acústica posaria de manifest que l'alçada del pic del primer mode ha disminuït i que la seva freqüència ha augmentat. D'aquesta manera el mode més destacat pel que fa a l'emmagatzematge d'energia és el segon. En iniciar-se l'ona estacionària a nivell «piano» el segon mode es farà càrrec del seu govern. A nivell «forte» hom hi afegirà els modes 4<sup>rt</sup>, 6<sup>è</sup>,..., si llur freqüència no ha resultat alterada. Si la freqüència del fonamental no hagués estat modificada, a nivell «forte» el comportament no lineal de la canya podria fer aparèixer en escena els modes 1<sup>er</sup>, 3<sup>er</sup>,... malgrat que llurs pics de ressonància no fossin massa elevats, amb la qual cosa la nota sonaria com del primer registre.

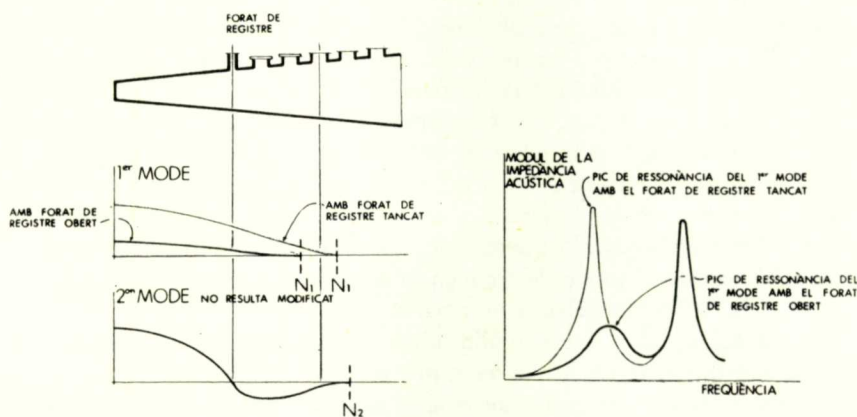


Fig. 10. Funció del forat de registre.

Incidentalment, una sabatilla de la part alta de l'instrument mal ajustada actua parcialment com a forat de registre per a notes de la part baixa: disminueix l'alçada del pic de ressonància del 1<sup>er</sup> mode sense modificar-ne suficientment la freqüència. Això fa que a intensitat «piano» certes notes baixes sonin com del segon registre, i que en passar a intensitat «forte» aquestes passin a sonar al primer registre.

Des del punt de vista acústic, caldria un forat de registre per a cada nota, situat exactament a la secció nodal del segon mode. Des del punt de vista pràctic hom opta per situar-ne només dos a la tenora. Les notes del segon registre resultarien altes per a les que el forat de registre no fos exactament a lloc, si hom no prenguéss certes mesures per tal de corregir aquesta anomalia, com és ara la modificació de la pressió dels llavis sobre la canya, la utilització d'una digitació forçada, o algun retoc al perfil del tub.

#### EL PAVELLÓ (O CAMPANA)

Feta l'anàlisi del funcionament del tub acabat sense l'eixamplament del pavelló a l'extrem obert, és fàcil de considerar l'efecte que aquest té.

Per al tub acabat sense pavelló, les ones dels diferents modes propis es reflecteixen pràcticament al mateix pla. Quan hi ha el pavelló, els plans on hom pot considerar que les ones dels diversos modes es reflecteixen són diferents, tal i com resta esquematitzat a la Fig. 11. El canvi de conicitat al llarg del tub constitueix un obstacle per a la propagació de les ones tant més greu com més baixa és la freqüència. A les ones del primer mode, aviat se'ls fa excessiu el ritme de canvi de conicitat; per a elles l'extrem de l'instrument és com si fos a la posició A. Les ones de freqüències més elevades dels modes 2<sup>on</sup>, 3<sup>er</sup>,... poden avançar més al llarg del pavelló; per a elles és com si l'extrem de l'instrument fos a les posicions B, C,... Per damunt d'una certa freqüència hom pot considerar que les ones arriben a l'extrem i són totalment radiades; aquesta fa el paper de freqüència de tall del tub amb pavelló (6).

De la diferenciació dels plans de reflexió de les ones, deriva que la llargada efectiva de l'instrument sigui diferent per als diferents modes. En comparar l'interval entre les freqüències d'un parell de modes consecutius de la columna d'aire amb pavelló i sense, aquest resulta disminuït per la presència del pavelló, ja que al mode de freqüència més elevada correspon una llargada superior a la del de freqüència més baixa.

Aquest fet és aprofitat per alinear les freqüències dels modes de la columna d'aire que corresponen a les notes més greus, que d'altra manera quedarien separades per intervals excessius a causa de certes característiques del tub. A més el pavelló contribueix a millorar l'emissió del so d'aquestes notes més greus.



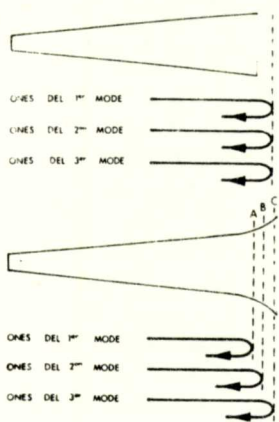


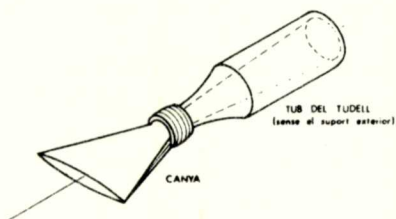
Fig. 11. Funció del pavelló.

Com que el segon registre comença amb l'octava del Re, nota a la qual correspon un forat lluny del pavelló, la forma d'aquest no hi té una influència apreciable.

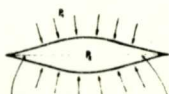
LA DOBLE CANYA

Ajuda a entendre el funcionament de la doble canya la consideració del cabal com a funció del salt de pressió entre l'exterior i l'interior de la canya, el qual varia de la manera mostrada esquemàticament a la Fig. 12.

Per a salts de pressió petits, la canya actua com una obertura fixa. En augmentar el salt de pressió, augmenta el cabal —aquest salt de pressió és el que hom anomena pèrdua de càrrega—. A mesura que augmenta el salt de



EL SALT DE PRESSIÓ  $\Delta P = P_1 - P_2$  TENDEIX A TANCAR LA CANYA



ZONA D'ACTUACIÓ DE LES FORCES DE BERNOULLI —FUNCIÓ DE LA VELOCITAT DEL AIRE— QUE TAMBÉ TENDEIXEN A TANCAR LA CANYA

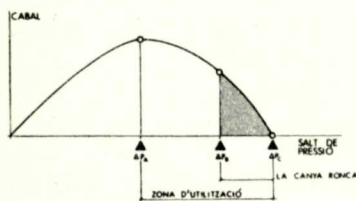


Fig. 12. La canya. Corba característica cabal-pressió.

pressió, comença a intervenir la flexibilitat de la canya, aquesta es clou progressivament i el cabal creix amb més lentitud, fins que, en sobrepassar un cert salt de pressió  $\Delta p_A$ , el cabal disminueix en augmentar aquest. És en aquestes condicions que la canya serà efectiva en el govern de la vibració de la columna d'aire: quan la pressió interna creixi, la canya s'obrirà i farà augmentar el cabal; quan la pressió interna decreixi, la canya es tancarà i farà disminuir el cabal.

Un altre efecte que tendeix a tancar la canya, i que actua als indrets estrets del pas entre les dues làmines de la canya, és el de les forces anomenades de Bernouilli: un estrenyiment del pas fa augmentar la velocitat del aire, i aquest augment origina una depressió local que tendeix a tancar més el pas. Als extrems laterals de l'obertura de les dobles canyes, la proximitat de les dues superfícies fa que les forces de Bernouilli hi siguin especialment acusades.

Per sobre d'un cert salt de pressió  $\Delta p_B$ , l'augment de les forces de Bernouilli degut a l'augment de la velocitat de l'aire que es produeix en disminuir el pas, supera la rigidesa de la canya, amb la qual cosa deixa d'existir una obertura d'equilibri. El pas es tanca progressivament fins quedar clos. En quedar clos desapareix el cabal, i amb ell la velocitat de pas que originava les forces de Bernouilli. Per a salts de pressió inferiors a  $\Delta p_C$  les forces de pressió sobre la canya no poden retenir-la closa, i per tant s'inicia la seva obertura. Això fa que tornin a actuar les forces de Bernouilli i que s'estableixi un procés cíclic. Es diu que la canya «ronca», i aquest procés serveix a l'instrumentista per a conèixer les qualitats de la canya. Finalment, per damunt del salt de pressió  $\Delta p_C$  la canya es manté closa.

En el funcionament de la tenora la pressió  $p_2$  dins la canya no es manté constant sinó que fluctua d'acord amb les vibracions de la columna d'aire.

Fins ara s'ha fet atenció només a la flexibilitat de les canyes; però aquestes, a més, tenen inèrcia, i conseqüència d'ambdues propietats són les freqüències pròpies de la canya: freqüències a les quals tendeix a vibrar. Atesa l'elevada rigidesa i la minça inèrcia, aquestes freqüències són elevades, de manera que només la més baixa té incidència acusada en el funcionament de l'instrument. La proximitat d'aquesta freqüència de la canya amb algun harmònic de l'ona estacionària, el reforça. A l'oboè i en altres instruments de doble canya, l'harmònic reforçat és el segon del primer registre, i per tant el fonamental del segon registre. Hom aconsegueix la sintonia de la freqüència de la canya al llarg d'un registre en prémer més o menys la canya amb els llavis. Els estudis experimentals que hom preveu de portar a terme permetran de conèixer per a la tenora quin és l'harmònic reforçat per la canya.

Els fets descrits expliquen les dificultats que troba tot instrumentista per a aconseguir una canya que respongui adequadament a tota l'extensió de l'instrument.

## CONCLUSIONS

De l'exposició del funcionament de la tenora destaquen com a trets més rellevants l'establiment de l'ona estacionària gràcies a l'acció dels modes propis de la columna d'aire sobre la canya. Per tal d'aconseguir la col·laboració dels modes cal que es trobin degudament *alineats*: llurs freqüències han de constituir una família harmònica. Per a cada nota el nombre de modes que poden col·laborar és limitat per la *freqüència de tall*.

Ambdós aspectes, col·laboració de modes i freqüència de tall, són decisius pel que fa a la qualitat de l'instrument. Del primer deriva l'espontaneïtat i l'estabilitat, i del segon deriva l'anomenada personalitat tímbrica de l'instrument.

Així com la freqüència de tall depèn fonamentalment de la disposició dels forats —mides i separació— i queda pràcticament definida en definir el disseny, l'alineació dels modes exigeix no tan sols certes mesures relatives al perfil del tub a l'etapa de disseny —com per exemple el perfil del pavelló— sinó també certs retocs finals del perfil.

El problema de l'afinació del primer registre és menys delicat a causa de la gran flexibilitat pel que fa a la posició i mida dels forats. L'afinació del segon registre queda pràcticament garantida si el segon mode resta degudament alineat.

## AGRAÏMENTS

Els autors agraïm la col·laboració de nombroses persones en assessorar-nos i facilitar-nos accés a diversos instruments.

Molt particularment desitgem expressar el nostre agraïment a Jaume Vilà, tenor solista de la Cobla La Principal de la Bisbal, per la seva col·laboració en els estudis experimentals; el seu interès ha constituït un estímul per a la nostra tasca. També agraïm les interessants converses mantingudes amb el constructor Pere Pardo, de la Bisbal, i amb Lluís Albert, gran coneixedor de la història de la cobla i dels seus instruments.

Al professor Arthur H. Benade, de la Universitat de Cleveland, un dels investigadors de més experiència i prestigi en el camp de l'Acústica Musical, ens cal agrair les converses mantingudes durant el 9<sup>è</sup> Congrés Internacional d'Acústica, i la documentació tramesa relativa als seus estudis recents sobre l'acústica dels instruments de fusta.

Així mateix volem fer constar les facilitats donades pel Museu Municipal d'Instruments de Música de Barcelona i pel Museu d'Història de la Ciutat de Girona —dins el qual hi ha la «Secció de la Sardana»— per a estudiar les tenores de llurs col·leccions.

## REFERÈNCIES

1. ALBERT, LL.: *La cobla*. Article dins l'obra «La Sardana», vol. II. *El fet musical*. Ed. Bruguera, Barcelona 1972, pp. 29-40. Es refereix als precedents i l'evolució de la cobla i dels seus instruments.
2. BAINES, A.: *Woodwind Instruments and their History*, Faber, 1967. Remarcable com a llibre descriptiu dels instruments de vent de fusta i de llur història. A les pàgines 114-115 fa una descripció de la tenora.
3. ROEDERER, J. G.: *Introduction to the Physics and Psychophysics of Music*. Heidelberg Science Library, 1973, p. 39. Llibre d'introducció a l'estat actual del coneixement de la percepció dels sons.
4. LEIPP, E.: *Acoustique et Musique*. Masson et Cie, 1971, cap. XI i XII. És un llibre d'introducció a l'acústica musical, que inclou la descripció del funcionament dels instruments i diversos aspectes de la percepció.
5. AGULLÓ-BATLLE, J. i CARDONA-FOIX S.: *The Acoustics of the Tenora (Catalan Tenor Shawm)*. 9è Congrés Internacional d'Acústica. Madrid, juliol de 1977. Hom presenta les tècniques experimentals emprades pels autors d'aquest article.
6. BENAË, A. H.: *Fundamentals of Musical Acoustics*. Oxford University Press, 1976. Capítols 20, 21 i 22. Llibre de divulgació dels conceptes d'acústica musical, de contingut extens i profund, escrit per un dels investigadors de més prestigi.

## APÈNDIX. MECANISME DE PERCEPCIÓ DEL FONAMENTAL

En superposar dos harmònics consecutius d'una sèrie, l'ona obtinguda és periòdica i el seu període, que és el mínim comú múltiple dels períodes dels harmònics compostos, és igual al del fonamental de la sèrie.

Això mateix passa en superposar un conjunt d'harmònics —mentre no siguin totes les freqüències múltiples de la d'un harmònic de la sèrie diferent

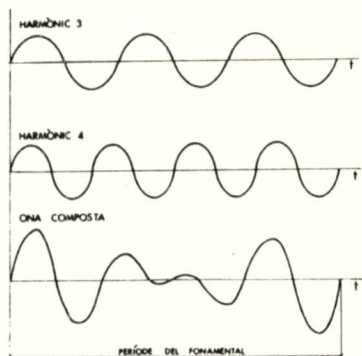


Fig. 13. Detecció del període del fonamental com a període de repetició de la forma d'ona.

del fonamental—. Malgrat que pugui mancar físicament el fonamental, el període de repetició de la forma d'ona és el del fonamental, i és la detecció d'aquest període allò que permet d'assignar una alçada precisa al so, ja que la detecció de períodes de repetició enfront de l'arribada de qualsevol tipus d'informació és un dels processos bàsics de la percepció a nivell cerebral.

Aquest fet és el que permet, per exemple, de sentir afinada una peça musical retransmesa per ràdio i escoltada mitjançant una ràdio petita, l'alta-veu de la qual és pràcticament incapaç de trametre freqüències per sota dels 150 Hz. La qualitat tímbrica en resulta deteriorada, però no l'afinació.

Són molts els instruments que per a llurs notes més baixes són incapaços d'emetre d'una manera eficient la freqüència del fonamental —el piano, la tenora, etc. en són exemples. La resta de la família harmònica permet la seva detecció malgrat la seva absència física.