

L'ACÚSTICA DELS INSTRUMENTS MUSICALS EN LA DARRERA DÈCADA

JOAQUIM AGULLÓ I BATLLE

Membre de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans
Professor de la Universitat Politècnica de Catalunya

SUMMARY

The evolution of the acoustics of the musical instruments is directly related to that of the areas of Physics and Mathematics on which it is based and the implied experimental techniques.

The evolution of computers has fostered the most significant changes as it has provided the scientists working in the field with a great deal of procedures, such as data processing –being the Fourier Transform the most relevant technique– modal analysis, the finite element method and the numerical integration of differential equations.

Concerning the dynamical simulation and the experimentation, the most characteristic trend has been the switch from frequency domain to time domain. As a consequence the impulse response rather than the impedance has been adopted as the tool to describe the dynamical behaviour of the linear systems.

In Catalunya the last decade has meant the consolidation and the international recognition of the research group on Musical Acoustics of the Higher School of Industrial Engineering of Barcelona. Its research has mainly dealt, in both the theoretical and the experimental fields, with the acoustics of wind instruments. The results have been systematically applied to the particular case of the Catalan folk woodwinds, giving them a wide projection in the international acoustical domain.

INTRODUCCIÓ

La interpretació matemàtica dels sons musicals i la descripció física del seu procés de generació ha atret bon nombre de científics al llarg de la història, fascinatats per la relació entre la ciència i la música.

Cada època ha donat a la física de la generació dels sons musicals la resposta que l'estat del coneixement científic i tècnic li ha permès. Així, doncs, preguntar-se per l'evolució de la recerca sobre l'acústica dels instruments musicals en els darrers temps, com ara en l'última dècada, és en bona mesura preguntar-se per l'evolució de les diverses branques de les matemàtiques i de la física que hi convergeixen així com de les tècniques de càlcul i d'experimentació que els donen suport. Al llarg de la història de la Ciència, l'acústica dels sons musicals ha

estat un autèntic aparador il·lustratiu de l'estat d'aquestes tècniques i branques científiques.

Des del punt de vista físic, els instruments de música clàssics o tradicionals –és a dir, tots a excepció feta dels electrònics– són sistemes mecànics acoblats amb l'aire especialment concebuts per la seva facilitat a presentar règims vibratoris –mantinguts o no– molt aproximadament periòdics amb freqüències determinades per uns paràmetres constants o de fàcil control per part de l'instrumentista.

D'acord amb aquesta visió no sorprèn que els avenços en la física dels instruments siguin paral·lels als avenços en la dinàmica de sistemes entre els quals cal remarcar els relatius a l'anàlisi modal i a la dinàmica segons cicles límits, que es revisen a les seccions 2 i 3 respectivament, i més recentment els relatius a la dinàmica caòtica, que es revisen a la secció 4.

Cal tenir, però, en compte que l'objectiu final de l'estudi de la física dels instruments musicals va un pas més enllà de la comprensió de la generació dels sons. Pretén comprendre de quina manera la física dels instruments és relacionada amb les qualitats perceptives dels sons que generen, i aquí intervé el vessant extremadament complex, i encara poc conegut, de la percepció i avaluació dels sons musicals.

Si el coneixement científic ha de poder ésser un ajut en la millora dels instruments musicals, cal arribar a conèixer les causes físiques, sovint subtils, de la diferència entre un instrument de qualitat excel·lent i un de mediocre.

L'anàlisi dels avenços en la física dels instruments de música pot ésser feta des de diferents perspectives: la dels instruments mateixos, la dels recursos científics, informàtics i experimentals emprats en la recerca (FFT –transformada ràpida de Fourier–, elements finits, interferometria làser, etc.), o bé la de les àrees metodològiques (anàlisi modal, simulació de sistemes autoexcitats, anàlisi de senyals, etc.). En aquest article es dona prioritat a aquesta última perspectiva per la seva situació intermèdia entre les eines de treball i els instruments als quals s'apliquen.

Per tal de no presentar una bibliografia excessiva, la referència d'articles s'ha restringit a un mínim que inclou els més destacats d'àmbit internacional així com una mostra representativa de les contribucions fetes des de Catalunya. Una bibliografia més àmplia es pot trobar als tractats i les tesis doctorals d'acústica musical referits.

En la revisió que es presenta és inevitable un cert biaix derivat de la pròpia implicació de l'autor en la recerca de la física dels instruments musicals, que en els últims quinze anys s'ha centrat en la modelització dels instruments musicals de vent.

1. APROPAMENT A LA FÍSICA DELS INSTRUMENTS MUSICALS

En la creació i evolució dels instruments musicals l'interès a obtenir uns sons molt aproximadament periòdics ha portat a aprofitar les propietats vibratò-

ries pròpies dels sistemes mecànics. De ben antic l'experiència devia posar de manifest que molts objectes eren capaços de produir sons de tons estables o l'estabilitat dels quals podia ésser controlada amb una habilitat a l'abast d'una persona que en fes l'aprenentatge.

Hi ha dos règims vibratoris que fonamenten la gairebé totalitat dels instruments musicals i que es diferencien per com l'energia per a produir la vibració és introduïda al sistema. Un és el règim vibratori lliure –és el cas dels instruments de percussió, inclòs el piano, i els de corda pinçada: guitarra, harpa, clavecí, etc.–, en el qual l'energia és introduïda per mitjà d'unes condicions inicials de posició i velocitat, a partir de les quals l'instrument té un moviment vibratori que s'atenua al llarg del temps i que dóna lloc a un so mantingut. L'altre règim vibratori és l'autoexcitat –és el cas dels instruments d'arc, com el violí, i els de vent– en els quals es posa a disposició de l'instrument una font d'energia d'on aquest la pren de manera controlada per les seves pròpies vibracions. La font d'energia és el moviment de l'arquet en els instruments d'arc, l'aire a pressió en els instruments de llengüetes –els de metall com la trompeta i els de canya com el clarinet o l'oboè– i el doll d'aire bufat en els instruments de bisell –com les flautes i els tubs d'orgue–. El règim vibratori que s'estableix sol tendir a un cicle límit que el fa estrictament periòdic, i en conseqüència útil per a generar un so musical, bé que en ocasions pot ésser marcadament irregular i impredecible. En aquest darrer cas, el règim vibratori es qualifica de caòtic i dóna lloc a un so ronc i mancat d'un to definit.

La dinàmica dels instruments de règim vibratori lliure és a grans trets lineal –és a dir, descrita per equacions diferencials lineals– i es pot descriure convenientment per mitjà de la superposició dels seus modes propis de vibració. Per a cada mode propi l'instrument presenta una vibració sinusoidal esmorteïda, de freqüència, esmorteïment i forma que són característics de l'instrument. La contribució dels diversos modes en la producció del so depèn de la intensitat i de com siguin aplicades les condicions inicials –punt d'aplicació, direcció i tipus: pinçament i/o percussió–.

Els modes propis poden presentar un cert grau d'acoblament, que sol ésser feble, causat per l'esmoreïment i que ocasiona un lent transvasament d'energia vibratòria entre ells: a moments, l'amplitud de vibració d'uns pot augmentar a costa d'una atenuació més ràpida dels altres.

Com que en les vibracions lliures se superposen en principi les vibracions sinusoidals de tots els modes, per tal que la vibració i el so produït siguin periòdics cal que les freqüències pròpies –anomenades també freqüències de ressonància– pertanyin a una família harmònica, és a dir que siguin múltiples d'una freqüència que coincideix amb la de la vibració periòdica. Aquesta és una condició extremadament exigent que es verifica amb facilitat en el cas de les cordes tensades però que és difícil d'assolir en el cas de barres, plaques, membranes i altres elements vibratoris.

En la dinàmica dels instruments de règim autoexcitat és essencial un comportament no lineal en el fenomen físic que determina l'entrada d'energia:

frec sec entre corda i arc, relació cabal/pressió a l'interior de les llengüetes, fraccionament del doll d'aire per mitjà del bisell. Sovint la dinàmica de la resta de l'instrument, però, és acceptablement lineal i pot ésser descrita per mitjà de la superposició modal.

En el funcionament autoexcitat segons un cicle límit l'entrada d'energia està controlada per un dels modes vibratoris i la freqüència de vibració que s'estableix és propera a la d'aquest (llevat d'excepcions properes a la dinàmica caòtica). Si les freqüències dels altres modes són aproximadament múltiples d'aquesta poden col·laborar en el control d'entrada d'energia, amb la qual cosa enriqueixen el contingut harmònic de la vibració i per tant el timbre del so produït. Així, doncs, en els instruments de règim autoexcitat també és convenient que les freqüències pròpies, o grups d'aquestes, pertanyin a una família harmònica.

Aquesta visió introductòria de la física dels instruments musicals es pot ampliar i aprofundir en alguns llibres d'acústica musical excel·lents com els clàssics de Benade (1976), i Leipp (1971), o els més recents, com els de Fletcher i Rossing (1991), de Rossing (1990), i de Taylor (1992).

2. L'ANÀLISI MODAL, UNA TÈCNICA MADURA

La descripció del comportament vibratori d'un sistema lineal per mitjà de la superposició dels seus modes propis constitueix un dels grans capítols clàssics de la física que s'ha vist potenciat els últims temps pel desenvolupament dels mètodes experimentals i dels recursos informàtics de càlcul. Amb la denominació d' "anàlisi modal" s'al·ludeix tant a la utilització del recurs teòric com a les tècniques experimentals per a determinar els modes i paràmetres modals o com als mètodes numèrics per a calcular-los.

En el vessant experimental les tècniques d'assaig modal assistides per ordinador, que han assolit un grau elevat de maduresa en l'àmbit de la vibroacústica, han estat útils en l'estudi dels instruments de percussió i de les tapes de les caixes de ressonància. La modalitat de més interès aplica i mesura percussions seqüencialment en un conjunt de punts per mitjà d'un martell dinamomètric, al temps que es mesura la vibració en un punt. El tractament posterior dels senyals forneix els paràmetres i la forma dels modes.

Aquesta tècnica és particularment apta per a objectes vibratoris de forma senzilla i dimensions grans. En són una il·lustració les mesures dels modes de vibració de la taula harmònica del piano publicades per Wogram (Askenfeld, 1990) o les de Suzuki (Rossing, 1991).

Una alternativa particularment interessant en el cas d'instruments de dimensions més reduïdes és la fornida per la tècnica de visualització dels modes de vibració per mitjà de l'holografia interferomètrica, que també ha assolit la darrera dècada un remarcable nivell de maduresa i difusió. En aquesta tècnica el cos vibratori de l'instrument és excitat sinusoidalment a la freqüència de resso-

nància, i la forma del mode és visualitzada per les corbes de nivell de la seva superfície en situació vibratòria respecte a la superfície en repòs. Els llibres de Fletcher i Rossing (1991) i de Rossing (1990) publiquen resultats que il·lustren l'interès d'aquesta tècnica en el cas de les campanes (Rossing *et al.*, els platerets (Rossing i Peterson) i la guitarra (Richardson i Roberts; Janson) i el violí (Hutchins *et al.*).

L'aplicació de l'anàlisi modal a les columnes i cavitats d'aire ha estat limitada per les dificultats d'excitació i de mesura. Ha seguit pràcticament restringida a la determinació dels paràmetres modals de columnes d'aire a partir de la impedància acústica a la secció d'entrada.

En el vessant de la modelització matemàtica, el *mètode dels elements finits* –i també dels *elements de contorn*– ha estat el gran aliat del càlcul dels modes i els paràmetres modals.

La millora i l'abaratiment dels programes informàtics d'elements finits –amb elements d'ordre superior que milloren la precisió i amb la possibilitat de considerar materials anisòtrops– han permès una difusió extraordinària del mètode.

La precisió dels resultats obtinguts, que pot ésser notable en el cas d'elements vibratoris metàl·lics per l'homogeneïtat i la isotropia dels materials, es troba dificultada en el cas d'elements de fusta per la manca d'homogeneïtat i isotropia d'aquest material. Aquesta dificultat resulta incrementada quan els elements vibratoris tenen curvatura i han estat obtinguts esculpint la fusta, com és el cas de les tapes dels violins. En el cas de les columnes d'aire les dificultats d'aplicació del mètode vénen de les condicions de contorn als indrets on aquestes comuniquen amb l'aire exterior –l'extrem del pavelló i els forats laterals–.

3. LA SIMULACIÓ I L'EXPERIMENTACIÓ DINÀMICA. PAS AL DOMINI TEMPORAL

El tret més característic de l'última dècada en la modelització i l'experimentació dels instruments autoexcitats ha estat el pas del domini freqüencial al temporal. Aquest pas, necessari per a un tractament adequat de les no linealitats dels mecanismes d'autoexcitació, ha estat possible per l'evolució dels ordinadors. L'augment de les prestacions i la disminució del preu han fet assequibles als investigadors la integració de les equacions del moviment així com l'adquisició digital de senyals experimentals i el seu tractament posterior.

Els mètodes freqüencials, que havien configurat l'acústica musical en les dècades anteriors, a l'hora de simular el funcionament de l'instrument només podien plantejar-se l'estudi del règim estacionari. Típicament suposaven una evolució periòdica de les variables que era descrita per una sèrie de Fourier en les equacions no lineals descriptives del mecanisme d'autoexcitació. Aquestes equacions eren descrites en forma polinòmica per mitjà del desenvolupament en sèrie. La identificació de coeficients dels termes harmònics conduïa a equacions algè-

briques no lineals per a la determinació dels coeficients de les sèries de Fourier. La complexitat operativa solia fer necessària la introducció de truncaments a les sèries, cosa que restava validesa a uns resultats que, d'altra banda, es limitaven a descriure, com s'ha dit, el règim permanent.

En el domini temporal, la integració numèrica de les equacions del moviment a partir d'unes condicions inicials és un procediment ben suportat per la informàtica actual i que porta de manera espontània a determinar el transitori inicial i, prosseguint la integració, a la determinació del règim permanent. A més, permet de considerar la variació temporal de paràmetres, com ara la pressió de bufada i la pressió dels llavis sobre la canya en un instrument de vent amb llengüetes de canya.

Un altre avantatge de la simulació en el domini temporal és que els règims vibratoris calculats no es limiten als que convergeixen en un cicle límit, bé que aquests siguin els més freqüents. Poden calcular-se també els que corresponen a la dinàmica caòtica. El realisme dels resultats només depèn del realisme de les equacions del moviment emprades.

Entre les equacions del moviment, la que descriu la dinàmica lineal del cos vibratori de l'instrument és una equació integral de convolució que, en la seva forma més genuïna, té com a nucli la resposta impulsional del cos vibratori. Així, en el cas d'un instrument de vent de llengüetes, aquesta equació integral determina la pressió $p(t)$ que la columna d'aire estableix a la secció d'entrada com a conseqüència de tota la història del cabal $u(t)$ introduït a través de la mateixa secció:

$$p(t) = h(t) * u(t) = \int_0^t h(t - \tau) u(\tau) d\tau \quad (1)$$

La resposta impulsional $h(t)$ té implícita tota la dinàmica dels modes vibratoris de la columna d'aire vistos des de la secció d'entrada i descriu l'evolució de pressió que es produïria en aquesta secció si s'introduïa un impuls unitari de cabal (equivalent a introduir en un temps infinitament breu un volum unitari d'aire).

Com que les respostes impulsional dels instruments musicals solen extingir-se lentament, la integral de convolució és de convergència lenta. McIntyre (1979), a propòsit de la modelització del violí, publicà un procediment alternatiu al de l'equació (1) en el qual el nucli de la integral de convolució és la funció de reflexió $r(t)$, la qual s'extingeix més ràpidament que la resposta impulsional $h(t)$.

Aquest procediment fou emprat més tard per Schumacher (1981) per a calcular el transitori inicial dels sons d'un clarinet—instrument cilíndric de canya simple—. En aquesta mateixa línia, Barjau i Agulló (Barjau, 1987, 1989) empraren l'equació (1) i diverses variants per al càlcul de transitori inicial dels sons d'un instrument cònic i de doble canya—la *tenora*—, la més gran complexitat del qual, tant per la conicitat de la columna d'aire com per les intenses depressions de Bernoulli a la doble canya (depressions produïdes per efecte Venturi en passar

l'aire per la secció estreta de l'entrada de la canya), el feia de simulació particularment difícil. Els resultats d'aquesta simulació posaren de manifest que en aquests instruments, a diferència del clarinet, la depressió de Bernoulli és la que mou efectivament la canya i aconsegueix tancar-la a cada cicle, mentre que les reflexions provinents de la columna d'aire es limiten a actuar com a disparador precís d'aquest procés de tancament. El càlcul dels transitoris inicials dels instruments de metall –com les trompetes– i de bisell –com les flautes i tubs d'orgue– encara és un problema obert a causa de la complexitat de la dinàmica dels llavis i del doll d'aire, respectivament.

Schumacher (1981) havia aplicat també als tubs d'orgue el procediment de McIntyre, però la manca de realisme en la descripció del doll i de la seva interacció amb la columna d'aire –massa ancorada en els procediments freqüencials desenvolupats les dècades anteriors per Coltman i Fletcher– restà vàlida a la modelització. Calia una comprensió millor de la dinàmica del doll. Un pas important en aquest sentit ha estat el treball experimental dirigit per Hirshberg, basat en la tècnica de Schlieren de visualització del moviment dels fluids. Amb aquesta tècnica s'han obtingut imatges fotogràfiques que il·lustren detalladament la formació i l'evolució del doll durant els primers mil·lisegons. La tesi de Fabre (1992) és la primera a recollir els fruits d'aquesta experimentació.

Les respostes impulsional $h(t)$ poden ésser calculades com a transformada de Fourier (TF) de la impedància $Z(\omega)$, que és la descripció del comportament dinàmic en el domini freqüencial i per a la qual hi ha mètodes de càlcul ben establerts. Les funcions alternatives a $h(t)$ (com són les funcions de reflexió) també es poden trobar a partir del domini freqüencial com a transformada de Fourier de funcions de la impedància. Aquest és el procediment de càlcul més freqüent, bé que la darrera dècada hi ha hagut interès a desenvolupar mètodes que eludeixen el pas pel domini freqüencial en el cas dels instruments musicals de vent. Aquests mètodes es basen en el càlcul en el domini temporal de la propagació de les ones en el cos vibratori de l'instrument, en la qual intervenen diverses funcions de propagació així com les funcions de reflexió i de transmissió a les discontinuïtats.

El desplaçament dels mètodes teòrics i de càlcul vers el domini temporal ha significat un desplaçament paral·lel de les tècniques experimentals, fet possible també per l'evolució dels recursos digitals d'adquisició i de tractament de senyals experimentals. Tantmateix, l'extrema facilitat amb què es pot calcular la transformada de Fourier ha portat a un ventall de procediments que van des del càlcul de la resposta impulsional com a TF de la impedància mesurada en la forma més genuïna –és a dir, directament com a resposta a un senyal sinusoidal de freqüència variable–, fins a prop del cas idealitzat de la mesura directa de la resposta a un impuls.

Tècniques particularment vàlides pel seu bon compromís entre la durada de l'assaig i la relació senyal/soroll són les basades en la resposta a un *xirp* o en la resposta $y(t)$ a un senyal transitori $x(t)$. Les dues porten al problema de desconvolució de trobar $h(t)$ a partir de l'equació $y(t) = h(t) * x(t)$. Aquest

problema es pot resoldre passant al domini freqüencial: $H(f) = Y(f) / X(f)$, on H , Y i X són respectivament les transformades de Fourier de h , y i x . També es pot resoldre directament en el domini temporal, però en aquest cas el mal condicionament de la desconvolució numèrica porta a emprar mètodes de regularització com els basats en la descomposició matricial en valors singulars (Agulló *et al.*, 1993).

L'increment de capacitat de càlcul i d'adquisició i tractament de senyals han incidit també favorablement en la recerca dels instruments de règim vibratori lliure, particularment en els de funcionament més complex com és el cas del piano a causa del seu mecanisme i de la multiplicitat de cordes per nota. Són particularment rellevants en l'àmbit del piano els estudis sobre la dinàmica del martell, la interacció martell-corda, la interacció corda-taula harmònica i la interacció entre cordes introduïda per aquesta fets per Askenfelt, Jansson, Hale i Weinreich (Askenfelt, 1990).

4. CAOS I SONS MUSICALS

Els sons *multifònics*, que són sons complexos en els quals se sobreposen de manera irregular dues freqüències sense una relació simple entre elles, han constituït la porta d'entrada de la dinàmica caòtica a l'àmbit de l'acústica musical. La irregularitat d'aquests sons dins un ordre és un tret ben característic d'un comportament caòtic determinista que, d'altra banda, no és sorprenent, atesa la naturalesa física dels instruments musicals de règim autoexcitat: sistemes dissipatius no lineals acoblats a una font d'energia.

El caràcter caòtic no es limita als multifònics dels instruments de vent. Es troba també a les notes "llop" ("wolf notes" en terminologia anglo-saxona) dels instruments d'arc, i versemblantment molts dels sons i efectes musicals més interessants corresponen a règims vibratoris propers al llindar del comportament caòtic. Aquests règims fluctuen entre diversos estadis de la ruta cap al caos i eventualment poden participar d'un lleuger caràcter caòtic. Això introdueix en els sons les petites fluctuacions impredecibles que en deslliurar-los de l'estricta periodicitat els fan musicalment interessants.

Les recerques empreses la darrera dècada sobre la participació de la dinàmica caòtica en la generació de sons musicals tenen dos vessants. D'una banda hi ha la constatació experimental del caràcter caòtic dels sons produïts (Keefe, 1991, Gibiat, 1988) mitjançant la *reconstrucció topològica de l'atractor caòtic* dins l'espai de fases i la quantificació posterior de la seva naturalesa caòtica, feta usualment per mitjà de la *dimensió de correlació* (les conferències pronunciades a l'Institut d'Estudis Catalans per D. Keefe el 1990 i per V. Gibiat el 1991 il·lustraren l'estat de la recerca en aquest àmbit). D'altra banda hi ha l'estudi del comportament caòtic dels instruments musicals fet sobre les seves modelitzacions matemàtiques, el qual no es troba tan avançat com la

constatació experimental per la dificultat d'obtenir models prou realistes i estables numèricament.

5. LES COLUMNES D'AIRE

Les columnes d'aire dels instruments estan formades per trams cilíndrics, cònics i de perfil amb angle variable com és el cas dels pavellons que es troben a l'extrem de molts instruments. En el cas dels instruments dits "*de fusta*" –i aquests inclouen les flautes travesseres i els saxòfons– hi ha forats laterals que poden estar oberts o tancats.

En entrar en la darrera dècada, els mètodes per al càlcul de la impedància a la secció d'entrada havien assolit un grau de precisió prou satisfactori per als interessos de l'acústica musical. En gran part les seves limitacions eren més teòriques que no pràctiques, i provenien de:

a) Prendre com a formulació per a la impedància d'extrem la corresponent a la d'un èmbol en un pla infinit, o una d'intermèdia entre aquesta i la d'un èmbol a l'extrem d'un tub de paret prima.

b) Substituir els pavellons per una successió de trams cònics.

c) Modelitzar inadecuadament els forats oberts, que fins i tot en les modelitzacions més elaborades negligien els termes no lineals i les interaccions entre forats, tant per l'exterior com per l'interior de la columna d'aire.

d) No considerar un cabal continu al llarg de la columna.

La situació no ha canviat gaire al llarg de la dècada. No s'ha fet cap progrés en la formulació de la impedància d'extrem obert. Quant als pavellons, l'alternativa donada per l'equació de Webster era poc satisfactòria perquè suposava que les ones eren planes, i un intent de reformulació basat en ones esfèriques (Benade i Jansson, 1974) no havia acabat de reeixir. Els darrers anys, Keefe, Barjau i Agulló (1993) han desenvolupat una nova equació per a les ones longitudinals dels pavellons que fou presentada al recent Congrés d'Acústica Musical d'Estocolm. Aquesta formulació, que no restringeix la geometria de les ones longitudinals més enllà de l'ortogonalitat dels seus fronts d'ona a les parets del pavelló i al seu eix, quan es particularitza al cas de les ones esfèriques supera en precisió les dues formulacions anteriors. En la formulació dels forats, les interaccions interior i exterior entre forats encara són un problema no resolt.

Un altre problema obert és la modelització de l'efecte del cabal continu en el comportament acústic de les columnes d'aire. Les previsions teòriques basades en l'acústica lineal en un flux laminar són molt inferiors a les constatades experimentalment. Es conjectura que l'efecte prové majoritàriament dels remolins en la columna d'aire. Les arestes vives en la unió dels forats amb el tub serien una de les principals causes de generació d'aquests remolins. La recent tesi doctoral de Peters (1993) és una aportació decisiva en aquesta línia.

El pas al domini temporal ha plantejat problemes nous que ha calgut resoldre. Sorprenentment, l'acústica dels tubs cònics en el domini temporal era

incompleta, particularment pel que fa a les funcions de reflexió a les discontinuïtats. En completar-se aquesta formulació, les funcions de reflexió $r(t)$ associades als canvis de conicitat conduïren a un resultat insospitat. Per a aquestes discontinuïtats existia la formulació dels coeficients de reflexió $R(f)$ en el domini freqüencial, i l'intent de trobar les $r(t)$ com a transformada de Fourier de $R(f)$ només funcionava per a algunes discontinuïtats de conicitat, però en altres conduïa a funcions no causals (que comencen abans de l'arribada de l'impuls incident) clarament rebutjables com a funcions de reflexió. L'estudi del problema, iniciat simultàniament i de manera independent per Ayers (1985) als Estats Units i per Agulló, Barjau i Martínez (Martínez, 1988 i Agulló, 1992) a Barcelona, posà de manifest que en aquests darrers casos la funció de reflexió és una exponencial creixent –i que per tant no té transformada de Fourier– i que corresponen a discontinuïtats en què el ritme de creixement de la secció disminueix (o bé el ritme de decreixement augmenta) en creuar-les. La presència d'exponencials creixents en l'evolució temporal de les pressions dins els tubs cònics, que fou vista amb aprensió per un sector de la comunitat científica, no presenta cap incompatibilitat amb la realitat física: aquest creixement acaba essent cancel·lat per reflexions provinents d'altres discontinuïtats. L'origen d'aquestes dificultats es troba en la ficció matemàtica de les ones propagatives en els tubs cònics: mentre una ona sinusoidal es pot propagar indefinidament allunyant-se del vèrtex, no pot fer-ho apropant-s'hi. En arribar-hi és reflectida.

La utilització de funcions exponencials creixents en els càlculs en el domini temporal planteja problemes numèrics evidents: si cada ona reflectida o transmesa és calculada per separat aviat s'arriba a la saturació numèrica. Un algorisme de multiconvolució (Martínez, Agulló i Cardona, 1988) basat a considerar dues úniques ones propagatives globals –una tub amunt i l'altra tub avall– que interaccionen entre elles a les discontinuïtats resol aquesta dificultat alhora que resol favorablement el problema plantejat pel ràpid creixement del nombre d'ones reflectides i transmeses que es presenten en l'estudi de les columnes d'aire dels instruments.

6. ELS MATERIALS: DE LA FUSTA I LA CANYA ALS COMPÒSITS

En l'àmbit dels materials l'avenç més representatiu de la dècada es troba en els materials *compòsits*. La seva lleugeresa i estructura fibrosa interna els apropa a la fusta i la canya, amb avantatges mecànics clars sobre aquestes, com ara la predictibilitat de les característiques mecàniques i la possibilitat d'adaptar-les a interessos concrets, la durabilitat i la insensibilitat a factors pertorbadors com ara la humitat.

No sorprenen doncs els intents de substituir en més o menys grau la fusta per aquests nous materials en la construcció de les caixes de ressonància dels instruments de corda i de les canyes dels instruments de vent –saxòfon, clarinet, fagot,...-. Besnainou, a París, ha estat un dels pioners en la utilització de

compòsits en la construcció de violins i guitarres, bo i conservant de moment el disseny i la forma constructiva clàssica.

En valorar les expectatives d'aquestes substitucions cal distingir entre les propietats macroscòpiques (que presenten gradients petits, com ara els paràmetres elàstics) i les microscòpiques (íntimament associades a l'estructura microscòpica). És entre les primeres on es troben les afinitats i els avantatges més clars: es poden aconseguir els valors més adequats per als paràmetres mecànics – densitat i coeficients elàstics, anisotropia– que determinen el comportament vibratori macroscòpic.

Pel que fa a les propietats microscòpiques les diferències són encara profundes. Els materials naturals com la fusta i la canya tenen una estructura microscòpica molt més complexa que l'obtenible amb les actuals tècniques de fabricació de compòsits. Això els fa diferir en propietats com les característiques viscotèrmiques superficials o la influència de la humitat.

Com a exemple: una canya de clarinet feta de compòsit pot imitar bé l'elasticitat de l'estructura fibrosa de la canya natural, amb l'avantatge d'unes millors predictibilitat i durabilitat, però, ara per ara, tindrà un comportament visco-plàstic ben diferent del de les canyes naturals en condicions reals d'ús. Això, en principi, ni és bo ni és dolent, però cal ésser-ne conscients perquè pot significar un canvi en el disseny òptim així com en la interacció amb l'instrumentista i en la qualitat del so.

Un aliat en la recerca sobre les propietats –i també sobre els tractaments per a millorar-les– de la fusta i la canya ha estat el microscopi electrònic d'escombrada, que permet visualitzar l'estructura microscòpica de la fusta i els efectes provocats pels tractaments químics i mecànics.

EPÍLEG

Les seccions anteriors il·lustren –malgrat les inevitables mancances– la vitalitat de la branca de l'acústica musical que s'ocupa dels instruments.

Són també mostra d'aquesta vitalitat els congressos específics d'Acústica Musical que s'han celebrat a Alemanya, Estats Units, França, Índia, Japó i Suècia, i els més de 60 articles publicats a la revista de la Societat Americana d'Acústica, que és la més representativa en aquest àmbit.

El darrer congrés d'Acústica Musical, l'SMAC.93, –celebrat a Estocolm just després de deu anys d'haver-s'hi celebrat el primer– fou un bon punt de trobada per a copsar l'evolució i l'estat actual de la recerca, que evidencià una vegada més que, seguint una llarga tradició, aquesta recerca ha estat feta majoritàriament en temps esgarrapat a treballs científics i tècnics en camps d'importància pràctica més immediata, per una comunitat estesa arreu i de clara vocació universitària per l'esperit d'intercanvi franc i amical que anima les trobades.

A Catalunya aquests deu anys han significat la consolidació i el reconeixement internacional de l'equip de recerca d'Acústica Musical de l'Escola Tècnica

Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. A les dues primeres tesis doctorals, de Cardona (1981) i Vivancos (1981), sobre l'estudi freqüencial de la *tenora* i el *flabiol*, respectivament, en següen dues més, Barjau (1987) i Martínez (1987) sobre l'estudi de la tenora i el tible en el domini temporal, i actualment n'hi ha dues més en curs, una sobre l'acústica dels pavellons i l'altra sobre l'estudi de les flautes de bec en el domini temporal.

La recerca portada a terme ha estat difosa internacionalment en 7 ponències a congressos, 7 articles en revistes i diverses conferències en institucions acadèmiques.

Una constant d'aquesta recerca ha estat la seva projecció als instruments tradicionals catalans, que ha creat bons vincles d'amistat i cooperació amb instrumentistes i constructors catalans alhora que ha difós el coneixement d'aquests instruments en l'àmbit internacional.

REFERÈNCIES

- ASKENFELT, A. ed. (1990). *Five lectures on the acoustics of the piano*, Royal Swedish Academy of Music.
- AGULLÓ, J., BARJAU, A. i MARTÍNEZ, J. (1988). Alternatives to the impulse response $h(t)$ to describe the acoustical behaviour of conical ducts. *J. of the Acoustical Society of America*, **84**(5), 1606-1612.
- AGULLÓ, J., BARJAU, A. i MARTÍNEZ, J. (1992). On time-domain descriptions of conical bores. *J. of the Acoustical Society of America*, **91**(2), 1099-1105.
- AGULLÓ, J., CARDONA, S. i KEEFE, D. H. (1993). *Time domain measurements of reflection functions for discontinuities in wind-instrument air-columns*. Stockholm Music Acoustics Conference. Royal Swedish Academy of Music.
- AYERS, R. D., ELIASON, L. J. i MAHGEREFTEH, D. (1985). The conical bore in musical acoustics. *Am. Jour. of Physics*, **56**(6), 528-537.
- BARJAU, A. (1987). *Contribució a l'estudi de l'acústica dels instruments de canya de la cobla*, Tesi doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- BARJAU, A. i AGULLÓ, J. (1989). Calculation of the starting transients of a double-reed conical woodwind. *Acustica*, **69**, 204-210.
- BENADE, A. H. i JANSSON, E. V. (1974). On plane and spherical waves in horns with non-uniform flare I. Theory of radiation, resonance frequencies, and mode conversion, *Acustica*, **31**, 79-98.
- BENADE, A. H. (1976). *Fundamentals of Musical Acoustics*, Oxford Univ. Press (reedit recentment per Dover).

- CARDONA, S. (1981). *Contribució a l'estudi de l'acústica de la tenora*, Tesi doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- FABRE, B. (1992). *La production du son dans les instruments de musique à embouchure de flûte modèle aéro-acoustique pour la simulation temporelle*, Tesi doctoral de la Université du Maine.
- FLETCHER, N. H., ROSSING, T. D. (1991). *The physics of musical instruments*, Springer-Verlag.
- GIBIAT, V. (1988). Phase space representations of Musical acoustics signals, *J. of Sound and Vibrations*, 123, 529-536.
- KEEFE, D. H. i LADEN, B. (1991). Correlation dimension of woodwind multiphonic tones, *J. of the Acoustical Society of America*, 90(4), 1754-1765.
- KEEFE, D. H., BARJAU, A. i AGULLÓ, J. (1993). *Theory of wave propagation in axisymmetric horns*, Stockholm Music Acoustics Conference. Royal Swedish Academy of Music.
- LEIPP, E. (1971). *Acoustique et Musique*, Masson et Cie.
- MARTÍNEZ, J. (1987). *Contribució a l'estudi de l'acústica de la tenora i del tible en el domini temporal*, Tesi doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- MARTÍNEZ, J. i AGULLÓ, J. (1988). Conical bores. Part I: Reflection functions associated with discontinuities, *J. of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1613-1619.
- MARTÍNEZ, J. i AGULLÓ, J. (1988). Conical bores. Part II: Multiconvolution. *J. of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1620-1627.
- MCLNTYRE, M. E. i WOODHOUSE, J. (1979). On the fundamentals of bowed-string dynamics. *Acústica*, 43(2), 93-108.
- PETER, M. (1993). *Aeroacoustic sources in internal flows*. Tesi doctoral de la Technische Universiteit Eindhoven.
- ROSSING, T. D. (1990). *The science of sound*, Addison-Wesley.
- SCHUMACHER, R. T. (1981). Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet, *Acústica*, 48(2), 71-85.
- TAYLOR, C. (1992). *Exploring music: The science and technology of tones and tunes*, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
- VIVANCOS, J. (1981). *Contribució a l'estudi de l'acústica del flabiol*, Tesi doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya.

(Original rebut per a publicació
el dia 1 de desembre de 1993)