

Capítol 1

INTRODUCCIÓ

1.1 Modelització física d'instruments musicals

La modelització física d'instruments musicals, ultra la comprensió del fonament físic de l'instrument, té dues finalitats bàsiques que la fan atractiva. Per una banda, la modelització dels mecanismes físics que generen el so d'un instrument permet fer una síntesi realista del so de l'instrument modelitzat. I, per altra banda, la modelització d'instruments musicals prèvia a la seva construcció permet reduir la necessitat de prototipus i facilita la tasca dels constructors a l'hora d'introduir-hi canvis o millores.

La primera finalitat és coneguda amb el nom de *síntesi sonora per modelització física* i és, sens dubte, l'aportació més innovadora en l'àmbit de la síntesi sonora. La síntesi sonora per modelització física genera el so d'un instrument a partir de la modelització de les seves característiques físiques i del seu funcionament. Aquest mètode de síntesi presenta com a major avantatge respecte d'altres mètodes de síntesi sonora, com són la síntesi additiva o la síntesi per taula d'ona, la possibilitat de reproduir les variacions temporals de la generació del so i de la interacció entre l'instrumentista i l'instrument. Això fa que el so generat per síntesi per modelització física sigui més realista pel que fa als règims transitoris i a les variacions temporals de les característiques del so. Fenòmens com la variació de la pressió de bufada en instruments de vent o els *vibratos* generats pels instrumentistes en instruments de corda són impossibles de modelitzar de manera realista en altres mètodes de síntesi sonora. Igualment, les múltiples maneres d'atacar una nota utilitzades en la interpretació musical només poden ser modelitzades de manera realista mitjançant la síntesi per modelització física.

Hi ha dos factors que limiten les possibilitats de la síntesi sonora: la capacitat de càlcul en temps real dels ordinadors actuals i el coneixement dels mecanismes involucrats en la generació del so. El primer fa que per a la síntesi en temps real sovint sigui necessari utilitzar models simplificats i obviar alguns mecanismes secundaris que demanarien un temps de

2 INTRODUCCIÓ

càlcul molt elevat. I el segon fa que en alguns casos sigui necessari recórrer a models *ad hoc* basats, no tant en principis físics, sinó en els coneixements i l'experiència dels constructors d'instruments.

El limitat coneixement actual dels fenòmens físics involucrats en la generació del so en instruments musicals fa que, excepte per a algunes característiques dels instruments, la modelització prèvia a la construcció no aportï gaire informació als constructors sobre la forma i mides exactes que han de donar a l'instrument, els materials a utilitzar i, en definitiva, les característiques que ha de tenir un instrument perquè resulti excepcional. Encara que els models teòrics d'instruments musicals disponibles actualment modelitzin de manera prou acurada les característiques dels instruments per aconseguir generar un so creïble, no són prou elaborats per tenir en compte les petites diferències físiques que distingeixen els instruments excepcionals dels bons o dels mediocres. Així, la informació i l'ajuda que hauria de passar del món científic al món de la construcció d'instruments, de moment, i amb els coneixements actuals, és limitada i més aviat el traspàs d'informació va en sentit contrari per, a partir dels coneixements adquirits pels constructors al llarg dels segles, avançar en el coneixement dels fenòmens físics involucrats en la generació de so en els instruments musicals. Allí on els models físics comencen a ser d'ajut als constructors és en el redisseny d'instruments per aconseguir determinades millores, en permetre determinar la sensibilitat del seu funcionament segons diversos paràmetres constructius.

1.2 Els instruments autoexcitats

D'entre les nombroses classificacions possibles dels instruments musicals, se'n pot fer una tenint en compte la forma com és subministrada l'energia a l'instrument per produir el so. Així es pot parlar d'instruments de so mantingut, que requereixen una aportació continuada d'energia per mantenir el so, i d'instruments en què el so decau fins a extingir-se a partir d'una única aportació d'energia. En els primers, és evident que aquesta aportació continuada d'energia requereix un mecanisme de regulació, controlat per les vibracions pròpies de l'instrument, per tal que l'energia introduïda actuï a favor del manteniment de les ones estacionàries que es generen en els instruments, i que són les que produeixen el so, i no pas en contra d'aquestes. És essencial que el ritme temporal del règim vibratori que en resulta depengui de les característiques vibratòries de l'instrument. La font d'energia, a diferència del cas d'un altaveu, no imposa de manera directa un règim vibratori, sinó que es posa al seu servei.

La gran majoria d'instruments de so mantingut poden esquematitzar-se, tal com indica la figura 1.1, com un element de comportament no lineal, a través del qual hi ha l'entrada d'energia, i un element de comportament lineal energèticament passiu (McIntyre, Schumacher

i Woodhouse, 1983). La interacció entre aquests dos elements actua com a regulador de l'entrada d'energia. Exemples d'aquests instruments són els instruments de vent, tant els de fusta com els de metall, i els de corda fregada. En els primers és el tub, o més concretament la columna d'aire de dins el tub, qui actua com a element passiu lineal, mentre que en els segons és la pròpia corda, juntament amb el ressonador emprat, l'element lineal del sistema. Pel que fa a l'element no lineal, en els instruments de vent n'hi ha una gran varietat: doble canya, canya simple, bisell o fins i tot els propis llavis de l'instrumentista. En aquests elements es presenten diferents fenòmens físics no lineals, responsables de l'establiment de l'autoexcitació, que s'anomenen, de manera genèrica, *mecanismes d'autoexcitació*. En els instruments de corda fregada és el frec sec entre l'arquet i la corda el que actua com a element no lineal.

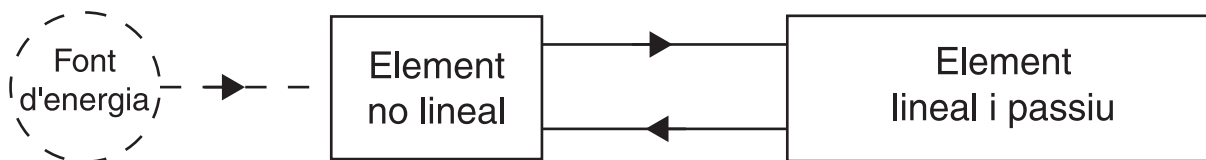


Figura 1.1: Esquema dels instruments autoexcitats

En els instruments de vent, les variacions de pressió que es produeixen en la posició d'enllaç entre el tub i l'element no lineal governen l'entrada d'energia: en uns casos, obrint i tancant les canyes o els llavis de l'instrumentista i, en els altres, movent el doll d'aire a banda i banda del bisell en la seqüència adequada per generar i mantenir les ones estacionàries de l'element lineal. En els instruments de cordes fregades és el moviment relatiu entre l'arquet i la corda el que fa alternar els estats de lliscament i adherència de manera adequada per generar i mantenir la vibració. Com que la variació del moviment relatiu entre l'arquet i la corda ve bàsicament marcada per les oscil·lacions de la corda, són les ones estacionàries que s'estableixen en la corda les que regulen l'entrada d'energia.

Així doncs, l'element no lineal és l'encarregat de transmetre l'energia a l'element lineal i aquest l'encarregat de regular-ne l'entrada. En funció de les característiques de l'element lineal (bàsicament llargària de la corda o llargària i perfil del tub), aquest excitarà un règim vibratori determinat. És per això que es parla d'instruments autoexcitats.

En adoptar aquest model, un element lineal i un de no lineal que interaccionen entre ells, com a model vàlid per als instruments autoexcitats, és obvi que el domini freqüencial, que pressuposa la validesa de la superposició, no és l'adequat per al seu estudi aprofundit. Això no treu que l'estudi de l'element lineal en el domini freqüencial pugui aportar informació interessant. Així l'anàlisi modal, que és una eina adequada quan es tracta

4 INTRODUCCIÓ

d'estudiar sistemes lineals invariants en el temps, aporta informació de l'element lineal i passiu, que és, sens dubte, molt útil per conèixer la forma que ha de tenir aquest element i les característiques del so generat. La posició dels forats en els instruments de vent o la llargada i la massa de la corda en els instruments de corda són característiques que poden determinar-se a partir de l'anàlisi modal.

Si es volen modelitzar els fenòmens transitoris i les variacions temporals del so dels instruments autoexcitats cal recórrer a l'anàlisi en el domini temporal. Aquesta anàlisi planteja, respecte de l'anàlisi freqüencial o modal, una major complexitat matemàtica, però permet modelitzar l'element no lineal i les variacions del règim vibratori en el temps, des del transitori d'inici fins al transitori d'extinció, passant pel règim estacionari.

1.3 Els instruments de bisell

Els instruments autoexcitats que produeixen el so a partir de la interacció entre les ones acústiques produïdes dins d'un tub i un doll d'aire aerodinàmicament inestable s'anomenen *instruments de bisell*. La part de l'instrument que actua com a element lineal és la columna d'aire continguda en el tub, i la part que actua com a element no lineal s'anomena *embocadura de bisell*. Entren dins aquesta categoria d'instruments les flautes travesseres, les flautes de bec i els tubs més característics de l'orgue. També hi ha molts instruments tradicionals que produeixen el so d'aquesta mateixa manera i que, en funció de la regió on estan localitzats, presenten noms i formes diferents. A Catalunya el més conegut és el flabiol, que forma part de la cobla.

Els elements que constitueixen un instrument de bisell reben diferents noms en funció de l'instrument concret. Al llarg d'aquest treball s'empra la nomenclatura següent:

- peu: cavitat prèvia al canal on es produeix una sobrepressió que generarà el doll. En les flautes és la boca de l'instrumentista la que fa aquesta funció.
- canal: conducte estret que va del peu a la boca de l'instrument. En les flautes travesseres són els llavis de l'instrumentista els que realitzen aquesta funció.
- llavi inferior: extrem de la finestra per la part del canal. S'anomena *inferior* perquè en la col·locació habitual dels tubs d'orgue està per sota del llavi superior.
- llum: obertura de l'extrem del canal per on surt el doll d'aire.
- boca o finestra: obertura en el tub limitada pel llavi inferior i el superior o bisell. És la zona on el doll rep la pertorbació de les ones acústiques del tub. En les flautes travesseres les dimensions de la finestra són variables en funció de la col·locació dels llavis de l'instrumentista respecte el bisell.

- bisell o llavi superior: extrem de la finestra per la part del tub. És un extrem més afuat que la resta i fa que una part del doll d'aire que hi arriba procedent de la llum s'introdueixi dins el tub, mentre que la resta va a l'exterior.

- tub: és l'element on es generen les ones estacionàries que produeixen el so. La dificultat apareix a l'hora de delimitar-ne exactament el contorn en els indrets d'obertura, especialment en el costat de l'embocadura.

La figura 1.2 mostra, per al cas d'un tub d'orgue i d'una flauta de bec, aquests diferents elements que constitueixen les parts fonamentals d'un instrument de bisell.

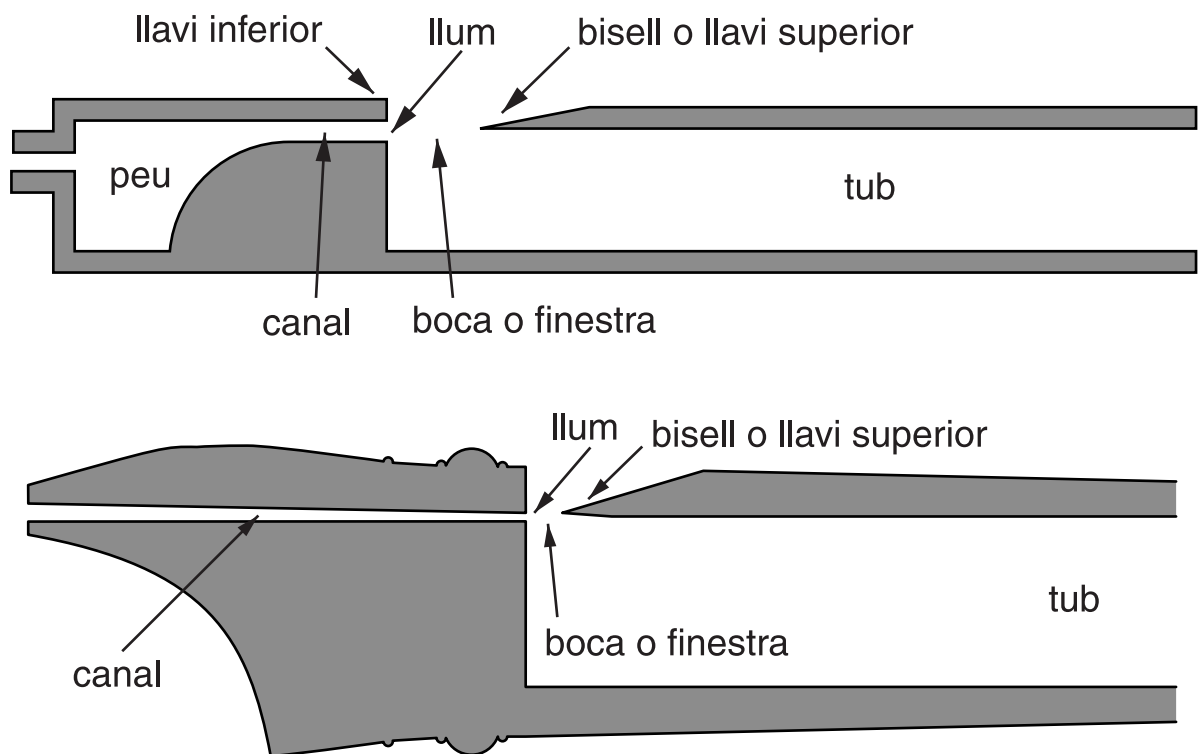


Figura 1.2: Secció d'un tub d'orgue de bisell i d'una flauta de bec

Excepte en el cas d'instruments que tenen tubs diferents per a cada nota com és el cas de l'orgue, en la resta d'instruments anomenats "de fusta" es dota el tub de forats per poder produir les diferents notes. Així les diferents notes s'aconsegueixen mitjançant diferents combinacions de forats tapats i oberts, que s'anomenen *digitació*, i la variació de la pressió de bufada. Algunes notes s'aconsegueixen quan l'ona estacionària que s'estableix en el tub està controlada pel primer mode propi de la columna d'aire. Són les notes anomenades *del primer registre*, i d'altres, quan el mode propi que controla l'ona estacionària és el segon o tercer harmònic, anomenades *notes del segon o tercer registre*, respectivament. El fet que s'estableixi el primer, segon o tercer registre és funció de la pressió de bufada. En alguns

casos, per facilitar l'establiment de notes de registres superiors, es dota el tub d'un forat de registre.

1.4 Revisió bibliogràfica de les modelitzacions dels instruments de bisell

Els primers estudis sobre els mecanismes que intervenen en la generació i manteniment del so en els instruments de bisell es deuen a Helmholtz (1885) i Rayleigh (1896). Helmholtz modelitza el doll d'aire com una font que introdueix periòdicament una quantitat de volum d'aire dins el tub per mantenir el so. El tractament d'aquesta font com a monopolar és discutit per Rayleigh, que proposa un tractament dipolar, que és el que s'escau pels sons de bisell quan no tenen un tub ressonador acoblat. Ambdós treballs, però, estudien el sistema des d'un punt de vista qualitatiu.

Els primers a presentar un model global i quantitatiu dels instruments de bisell són Cremer i Ising (1967), que modelitzen també l'acció del bisell com una injecció de volum dins el tub. Coltman (1968) modelitza el doll com una impedància en sèrie amb la impedància del tub i suggereix que, a més a més de la injecció de volum, el doll també transfereix quantitat de moviment al tub ressonador. El mateix Coltman (1976, 1981) conclou, però, que el mecanisme d'injecció de volum és predominant respecte a la transferència de quantitat de moviment.

Elder (1973) introdueix el concepte de regió de mescla, que serà utilitzat posteriorment per altres investigadors. Elder defineix una zona d'acoblament, entre l'embocadura de bisell i el tub, en la qual aplica les lleis de conservació de la massa i de la quantitat de moviment. Així aconseguix una equació de regeneració en el domini freqüencial que inclou termes representatius de la injecció de volum i termes representatius de la transferència de quantitat de moviment. El mateix concepte de regió de mescla, però amb una geometria diferent, és utilitzat per Fletcher (1976a) per aconseguir una equació de regeneració més simple que la d'Elder. Aquest resultat, junt amb consideracions relatives a la propagació d'instabilitats al llarg del doll, serveixen a Fletcher (1976b) per obtenir valors de la freqüència del so generat i dels seus dos primers harmònics. Schumacher (1978) obté una solució basada en un mètode iteratiu del model descrit per Fletcher.

Nombrosos estudis apareixen posteriorment al model proposat per Fletcher per millorar-ne la descripció d'alguns aspectes com la propagació d'instabilitats al llarg del doll, la descripció del perfil de velocitats del doll o la interacció del doll amb el tub (Fletcher i Thwaites, 1979; Thwaites i Fletcher, 1980; Fletcher i Douglas, 1980; Thwaites i Fletcher, 1982; Thwaites i Fletcher, 1983). Nolle (1979, 1983) realitza estudis experimentals

encaminats a estudiar la importància d'alguns paràmetres geomètrics com les dimensions de la finestra o l'alineament entre la llum i el bisell.

McIntyre, Schumacher i Woodhouse (1983) introdueixen un primer model temporal per a diferents instruments autoexcitats. El model, pel que fa als instruments de bisell, es basa en la descripció de la interacció entre el doll i el tub feta per Fletcher i la descripció del tub mitjançant una funció de reflexió gaussiana. Gairebé tots els models apareguts amb posterioritat parteixen del model proposat per McIntyre, Schumacher i Woodhouse amb la pretensió de millorar-ne algun aspecte. Valeriu (1992) recupera la idea de definir una regió de mescla, ara, però, per realitzar una anàlisi temporal. Nolle i Finch (1992) realitzen un estudi experimental sobre els transitoris d'atac i proposen una simulació numèrica en què modelitzen el tub com un conjunt de ressonadors. Coltman (1992*a*, 1992*b*) substitueix la funció de reflexió gaussiana per una funció empírica més realista i revisa la descripció del doll. Fabre (1992) i Verge (1995), juntament amb el laboratori de dinàmica de fluids de la Universitat Tecnològica d'Eindhoven (Verge *et al.*, 1994; Verge *et al.*, 1997*a*; Verge, Hirschberg i Caussé, 1997*b*) realitzen nombrosos treballs, tant teòrics com experimentals, sobre l'evolució del doll d'aire i la formació de remolins per comprendre millor els transitoris d'atac.

Agulló i Puig (1995) presenten un model unidimensional, descrit totalment en el domini temporal, que millora la descripció tant de la deflexió del doll al bisell com del tractament del component continu del cabal. Aquest article va ser el punt de partida d'aquesta tesi. Skodos (1995) fa un model tridimensional dels instruments de bisell mitjançant mètodes d'elements finits i l'aplicació de les equacions de la dinàmica de fluids. Aquest treball requereix una gran capacitat de càlcul que l'allunya de qualsevol possible utilització per a la síntesi sonora en temps real. Posteriorment, apareixen models simplificats d'instruments musicals (Grand, Gilbert i Laloë, 1997; Barjau, Gibiat i Grand, 1997*a*; Barjau i Gibiat, 1997*b*; Barjau i Gibiat, 2003) que descriuen l'instrument mitjançant equacions amb retards o equacions diferencials no lineals. Aquests formalismes permeten analitzar l'estabilitat del sistema, així com observar l'aparició de fenòmens característics de dinàmica caòtica. La utilització d'aquests formalismes en instruments de bisell resta, però, per explorar. Castellengo (1999) realitza un estudi experimental dels transitoris d'atac i compara els sons obtinguts utilitzant només el mecanisme de bisell amb els obtinguts utilitzant tot l'instrument. I finalment Dequand *et al.* (2003) presenten un model simplificat, basat en els estudis previs amb participació del laboratori de dinàmica de fluids de la Universitat Tecnològica d'Eindhoven, que permet estudiar la influència de la geometria del bisell en l'estabilitat del sistema i en la riquesa harmònica del so generat.

Altres models encaminats a obtenir un so de característiques similars al dels instruments de bisell, però sense pretendre simular estrictament els mecanismes reals de generació del so, han estat implementats per diversos autors (Välimäki *et al.*, 1992; Ystad i Kronland-Martinet, 1995).

8 INTRODUCCIÓ

Paral·lelament a aquests treballs, que modelitzen tot l'instrument de bisell complet o bé la seva part més característica, l'embocadura de bisell, hi ha hagut altres treballs encaminats a descriure les característiques del tub. Aquests estudis, evidentment, són d'aplicació en tots els tipus d'instruments que tenen un tub d'aire com a element ressonador. Munjal (1987) descriu la resposta freqüencial dels tubs mitjançant el mètode de les matrius de transferència que relacionen la pressió i el cabal d'un tram del tub en els seus dos extrems. A aquest mètode cal afegir-hi les millores introduïdes, especialment pel que fa a la descripció dels forats, per Keefe (1982a, 1982b, 1983, 1990) i la descripció de l'extrem obert feta per Levine i Schwinger (1948) i per Morse (1948). Un altre mètode de descripció del tub que resulta especialment interessant a l'hora de realitzar una anàlisi temporal és el descrit per Martínez i Agulló (1988a) i Martínez, Agulló i Cardona (1988b). El càlcul de la resposta impulsional del tub es realitza a partir de les funcions de reflexió descrites per a cada tipus de discontinuïtat i mitjançant un mètode iteratiu de càlcul anomenat *multiconvolució*. Aquest mètode ha estat millorat per Cardona, Barjau i Puig (1992b) i Barjau, Keefe i Cardona (1999) per fer possible que les diferents discontinuïtats del tub puguin estar situades arbitràriament.

Diversos estudis apareguts darrerament utilitzen el formalisme del processament digital de senyals per descriure el tub de l'instrument (Välimäki, 1995; Scavone, 1997; Ducasse, 2002; van Walstijn i Campbell, 2003; Välimäki, 2004).

1.5 Objectius de la tesi

L'objectiu central d'aquesta tesi, partint del model de doll establert per Fletcher i Thwaites (1979) i del model temporal establert per McIntyre, Schumacher i Woodhouse (1983), és el desenvolupament d'un model complet per als instruments de bisell que sigui prou realista per poder relacionar alguns paràmetres del model amb la realitat física però prou simple per poder ser utilitzat per a la síntesi sonora per modelització física. Això obligarà a mantenir un cert equilibri entre la utilització de paràmetres relacionats directament amb aspectes geomètrics de l'instrument i paràmetres d'ajust empíric, i entre la utilització de models estrictament realistes i modelitzacions *ad hoc*. No obstant això, aquestes aportacions empíriques i models *ad hoc* són susceptibles de ser reemplaçats en un futur per models més realistes.

Els aspectes que aquesta tesi pretén millorar són la modelització de la deflexió del doll –per a la qual la majoria d'autors utilitzen el model d'alt guany–, el tractament del component continu del cabal –que la majoria d'autors eliminen completament d'arrel en contra de la seva realitat física– i la interacció doll-columna d'aire, de la qual es proposa eliminar qualsevol vestigi d'anàlisis freqüencials prèvies. També es planteja l'aplicació de mètodes més acurats en la descripció del tub que els utilitzats fins ara per als instruments de bisell. Aquests darrers mètodes ja han estat aplicats amb èxit en altres tipus d'instruments per personal del Laboratori

de Mecànica i Vibracions del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Politècnica de Catalunya.

1.6 Metodologia

Per evitar una complexitat inviable en els càlculs s'utilitza un model unidimensional de la columna d'aire. Aquesta simplificació es justifica pel fet que l'aportació dels modes transversals acostuma a ser poc significativa en el manteniment de l'excitació a causa de la notable esveltesa que presenten la majoria de les columnes d'aire dels instruments de bisell.

En el segon capítol es descriu el doll mitjançant el perfil de velocitats i la seva variació a mesura que el doll avança (Fletcher i Thwaites, 1979). Es proposa un model de deflexió del doll basat en una analogia mecànica. Així s'obté una equació diferencial, que es converteix posteriorment en una equació de convolució, del moviment transversal de la línia central del doll funció del desplaçament acústic de la columna d'aire a la finestra. Es descriu l'aportació, tant de volum com de quantitat de moviment, que rep la columna d'aire del doll. I es descriu el sistema dinàmic del model complet de l'instrument en què la columna d'aire es representa mitjançant una funció de reflexió temporal.

En el tercer capítol es presenten dos mètodes per obtenir la funció de reflexió temporal que representa la columna d'aire. El mètode de la multiconvolució descriu, sense apartar-se del domini temporal, la participació de totes les discontinuïtats en la funció de reflexió del tub mitjançant un conjunt d'equacions de convolució que admeten una resolució iterativa. El mètode de les matrius de transferència descriu, ara en el domini freqüencial, els diferents trams de tub com a matrius de transferència que relacionen la pressió i el cabal en els dos extrems del tram. El producte d'aquestes matrius per als diferents trams del tub, la utilització de la funció de reflexió d'extrem obert i la posterior transformació de Fourier per obtenir el resultat en el domini temporal proporcionen un altre mètode d'obtenir la funció de reflexió temporal que representa el comportament dinàmic de la columna d'aire.

En el quart capítol es presenten els problemes que plantegen els mètodes de descripció de la columna d'aire si s'utilitza com a entrada un senyal amb component continu. En el cas dels instruments de bisell amb extrem obert, com és el cas de les flautes, la formulació usual de les funcions de reflexió dóna lloc a un creixement secular del component continu que no s'adiu amb la realitat física. Aquests problemes apareixen perquè els diferents mètodes per obtenir la funció de reflexió temporal del tub parteixen de les equacions de l'acústica lineal que no preveuen l'existència de component continu. Per oferir una solució més realista que el simple filtratge del component continu del senyal d'entrada es proposa redefinir la funció de reflexió temporal tot afegint-hi una funció que permeti l'existència de component continu en

10 INTRODUCCIÓ

el senyal d'entrada al tub i la seva radiació a través dels extrems oberts de l'instrument. Això obliga a redefinir, en certa manera, el sistema dinàmic de l'instrument complet.

I finalment, en el cinquè capítol, s'apliquen els models formulats en els capítols anteriors al cas d'un tub d'orgue i d'una flauta de bec contralt. Els resultats obtinguts es comparen amb els resultats, tant experimentals com teòrics, de la bibliografia.

En el model que es presenta en aquesta tesi s'han obviat intencionadament les aportacions sobre descripció del doll i formació de remolins, així com sobre diversos aspectes de dinàmica de fluids, fetes per Fabre (1992), Verge (1995) i Dequand *et al.* (2003), tot i reconèixer la seva vàlua i sense descartar incorporar-les en futurs models. La causa n'ha estat el manteniment de la simplicitat del model i la necessitat de centrar-se en altres aspectes de la simulació dels instruments de bisell.