

Capítol 5

RESULTATS

5.1 Modelització d'un tub d'orgue

Es realitza una modelització unidimensional d'un tub cilíndric sense forats seguint l'esquema de la figura 4.5. Les dimensions del tub es mostren a la figura 5.1.

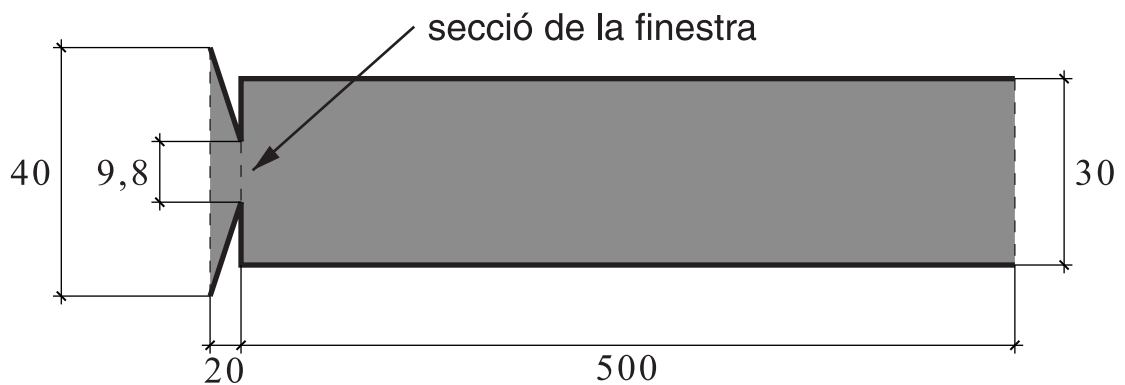


Figura 5.1: Dimensions del tub simulat en mil·límetres

Les dimensions de la finestra, així com els paràmetres necessaris per als càlculs de la deflexió del doll al bisell i dels increments de les ones propagatives, són els que es presenten a la taula 5.1. Es considera una interacció viscosa entre el doll i el camp acústic en la determinació de la deflexió del doll al bisell. En el càlcul dels increments de les ones propagatives només es té en compte la font de volum, ja que la font de quantitat de moviment és negligible (Coltman, 1976 i 1981). En la interacció entre el doll i la columna d'aire es considera una interacció estesa on el paràmetre τ_e , que dóna idea de la posició de la secció de màxima interacció, es pren funció de la velocitat de sortida del doll i de la longitud de la

finestra. Per a la descripció del tub s'utilitza el mètode de la multiconvolució presentat a l'apartat 3.1, i per a l'eliminació del component continu s'utilitza el mètode presentat en el capítol 4. El terme afegit a cadascuna de les funcions de reflexió de velocitat és el que es formula a l'equació 4.9, prenent una constant de temps τ_f igual a 100 vegades la constant de temps de la funció de reflexió original de la discontinuïtat.

Descripció	Símbol	Magnitud
obertura de la llum	$2l$	1 mm
longitud de la finestra	x_0	5 mm
amplada de la finestra	w	15 mm
distància entre la posició central de la llum i el bisell	η_0	0,1 mm
angle representatiu de la deflexió que sofreix el doll en entrar al tub	α	45 °
constant d'interacció viscosa entre el doll i el camp acústic	τ_d	0,1 ms
paràmetres d'interacció estesa entre el doll i la columna	λ τ_e	0,5 $\tau_e = \frac{x_0}{v_0}$

Taula 5.1: Paràmetres de la finestra utilitzats en la simulació

Els càlculs es realitzen amb un interval temporal de $\Delta t = 1/44100$ s, i es calcula un temps total de 200 ms. En els primers càlculs que es presenten s'utilitza el model d'activació lenta de la velocitat de sortida del doll, presentat en l'apartat 2.1, amb el paràmetre $\tau_b = 5$ ms. Així s'aconsegueix un creixement de la velocitat de sortida del doll típic en l'obertura manual de la vàlvula d'entrada d'aire (Verge, 1995). La figura 5.2 presenta els resultats de la pressió a la finestra, la deflexió del doll al bisell i el cabal total introduït en el tub per a una velocitat de sortida del doll $v_0 = 5$ m/s. Com es pot observar, després d'un transitori inicial s'estableix una oscil·lació estacionària controlada pel primer mode de la columna d'aire. En la gràfica de la deflexió del doll al bisell s'ha pres com a sentit positiu la deflexió del doll cap a l'interior del tub. La gràfica evidencia que la deflexió del doll presenta un component continu i que està centrada cap enfora del tub. L'existència d'aquest component continu en la deflexió del doll junt amb la no-existència de component continu en la pressió posen de manifest l'eficàcia del mètode de "filtratge" del component continu presentat en el capítol 4.

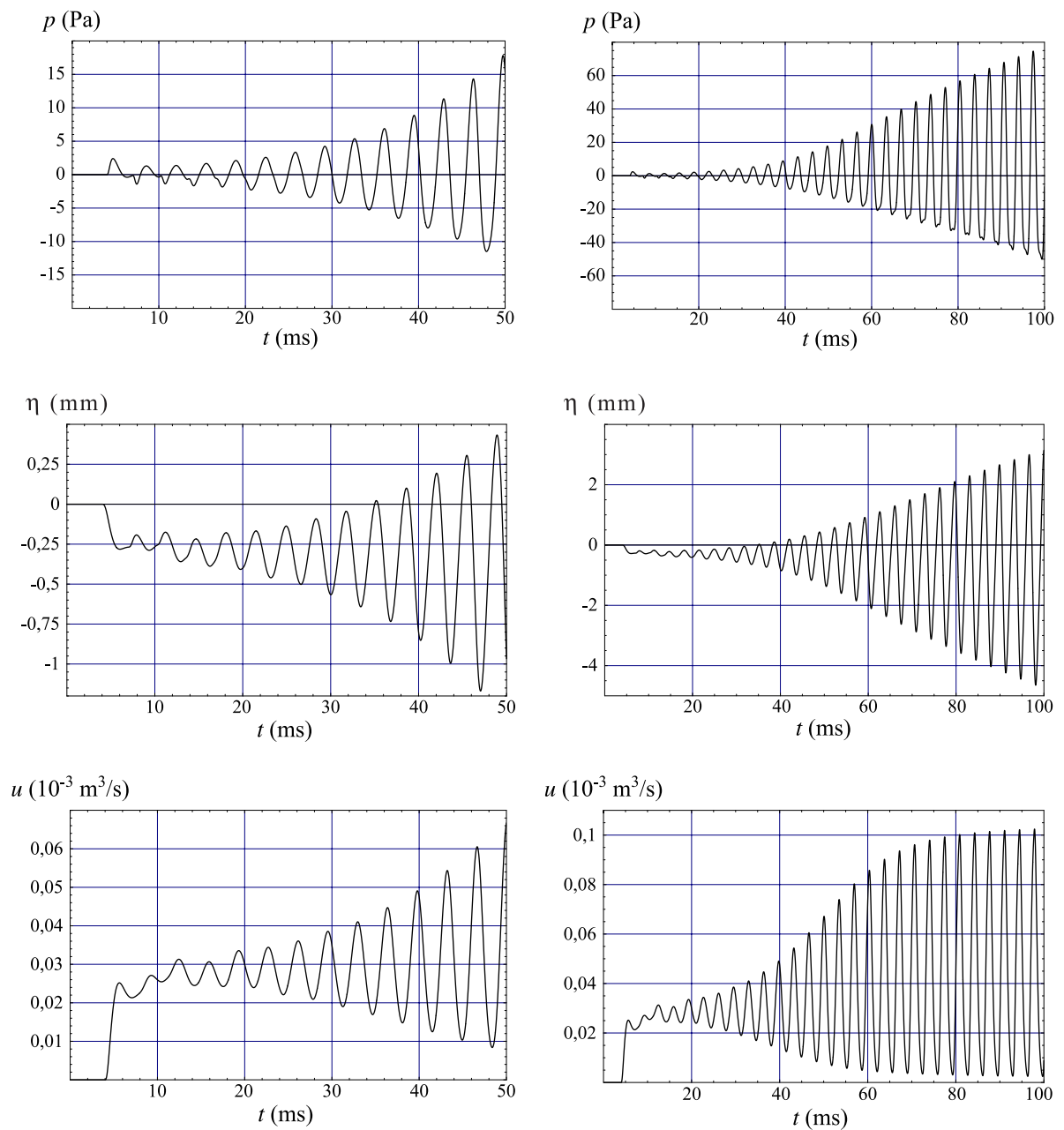


Figura 5.2: Pressió a la finestra, deflexió del doll al bisell i cabal introduït per a $v_0 = 5$ m/s

Les figures 5.3 i 5.4 presenten els resultats de la pressió a la finestra, la deflexió del doll al bisell i el cabal total introduït en el tub per a velocitats de sortida del doll de 10 m/s i 20 m/s, respectivament. Les oscil·lacions estacionàries establertes en aquests casos estan controlades pel segon i tercer mode de la columna d'aire, respectivament.

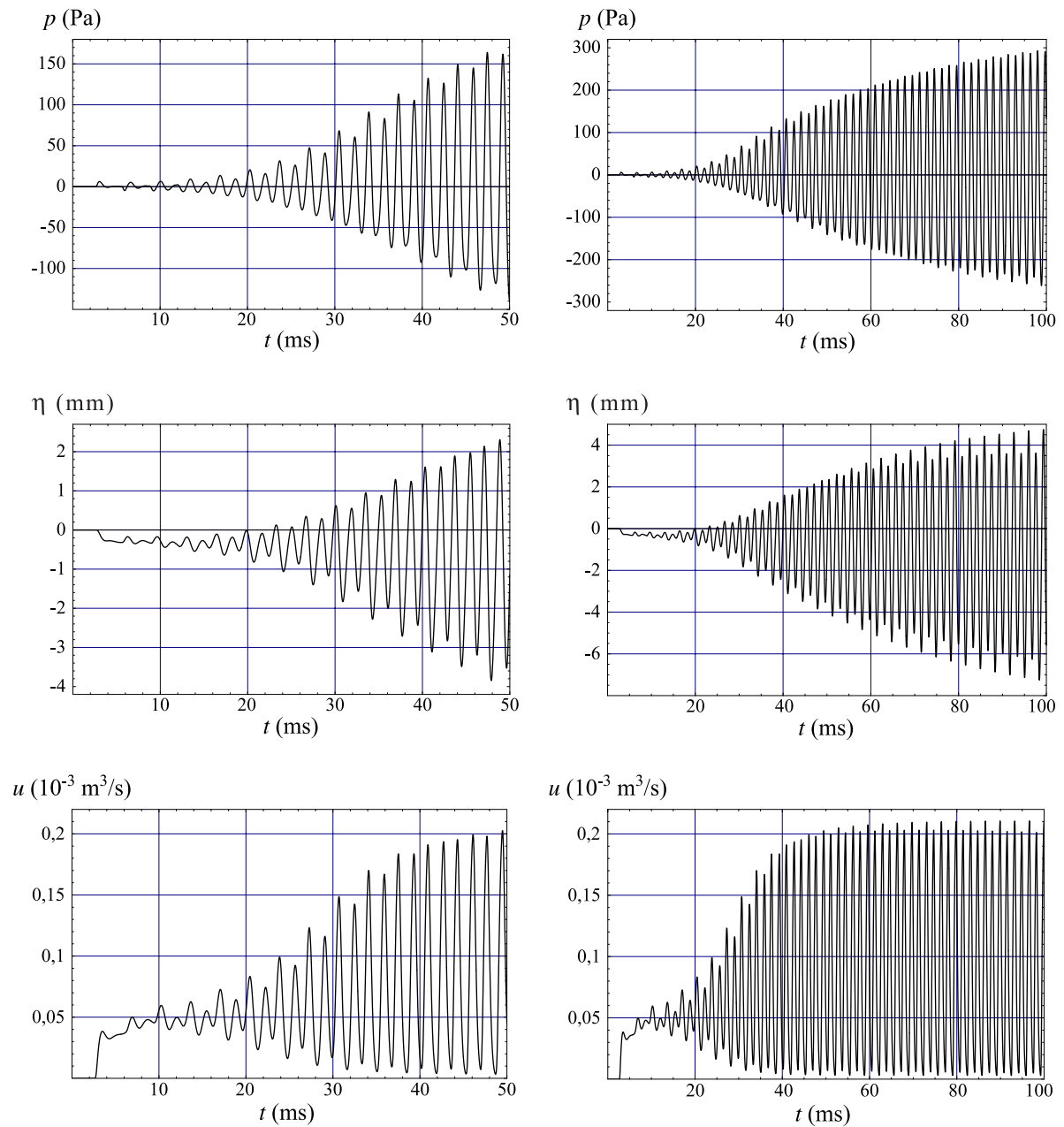


Figura 5.3: Pressió a la finestra, deflexió del doll al bisell i cabal introduït per a $v_0 = 10 \text{ m/s}$

Les figures 5.2, 5.3 i 5.4 també posen de manifest que el cabal total introduït dins el tub arriba a una saturació. A partir de l'equació 2.23 es pot veure que el cabal introduït dins el tub es mou entre $u = 0$, quan tot el cabal del doll surt fora del tub, i $u = 2 w V b$, quan tot el cabal del doll entra dins el tub. Per a les velocitats de sortida del doll de 5, 10 i 20 m/s, els valors màxims del cabal introduït són de $0,1125 \cdot 10^{-3}$, $0,225 \cdot 10^{-3}$ i $0,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, respectivament. Els valors extrems dels cabals introduïts que s'observen a les figures 5.2, 5.3 i 5.4 són propers als valors màxims respectius, fet que demostra que la saturació a què arriba la

gràfica del cabal introduït és fruit d'una oscil·lació de la desviació del doll prou gran perquè aquest passi d'entrar totalment al tub a sortir-ne totalment en cada oscil·lació. El temps que tarda a arribar a aquesta situació de saturació, com es pot observar, disminueix a mesura que augmenta la velocitat de sortida del doll.

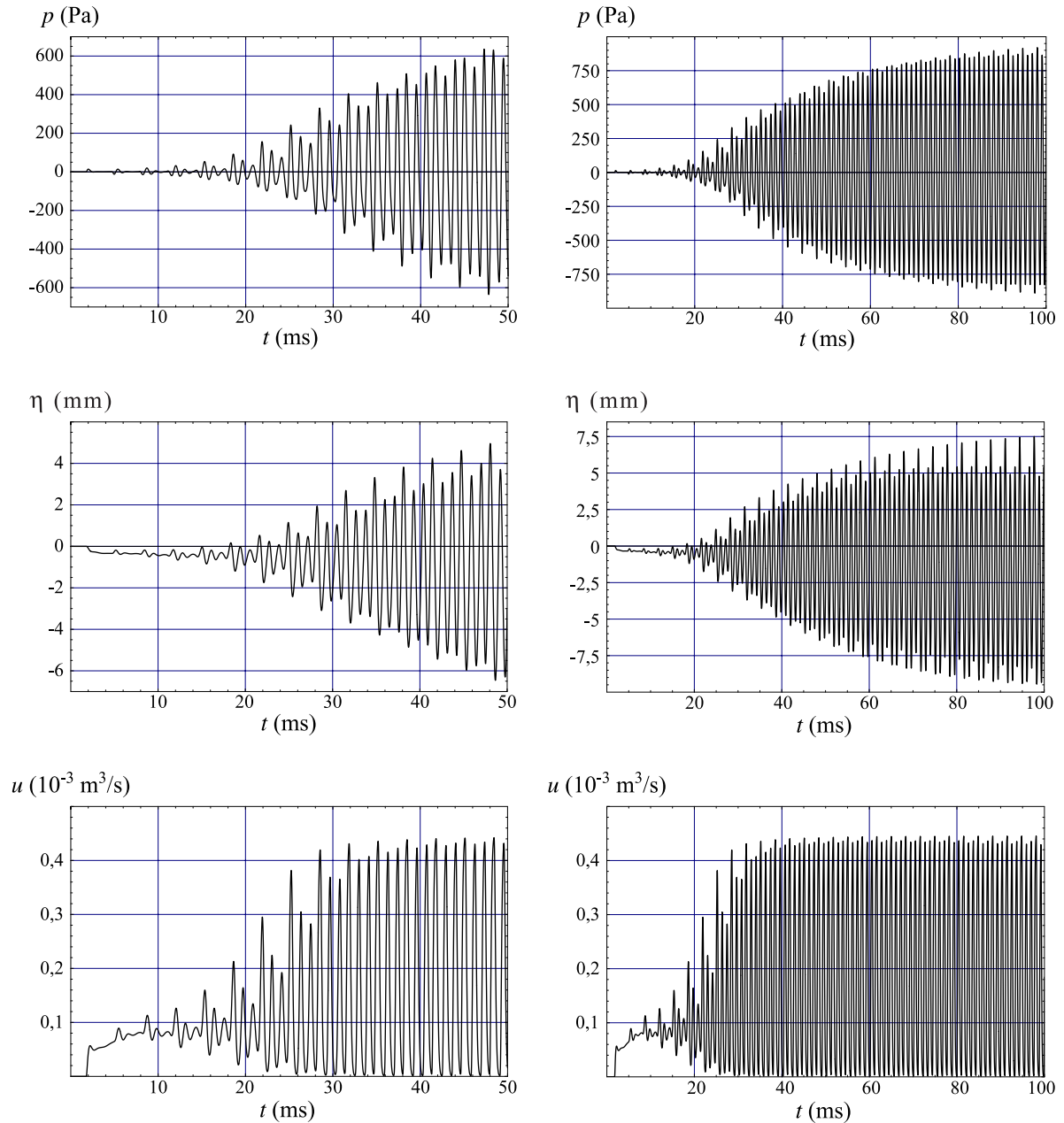


Figura 5.4: Pressió a la finestra, deflexió del doll al bisell i cabal introduït per a $v_0 = 20$ m/s

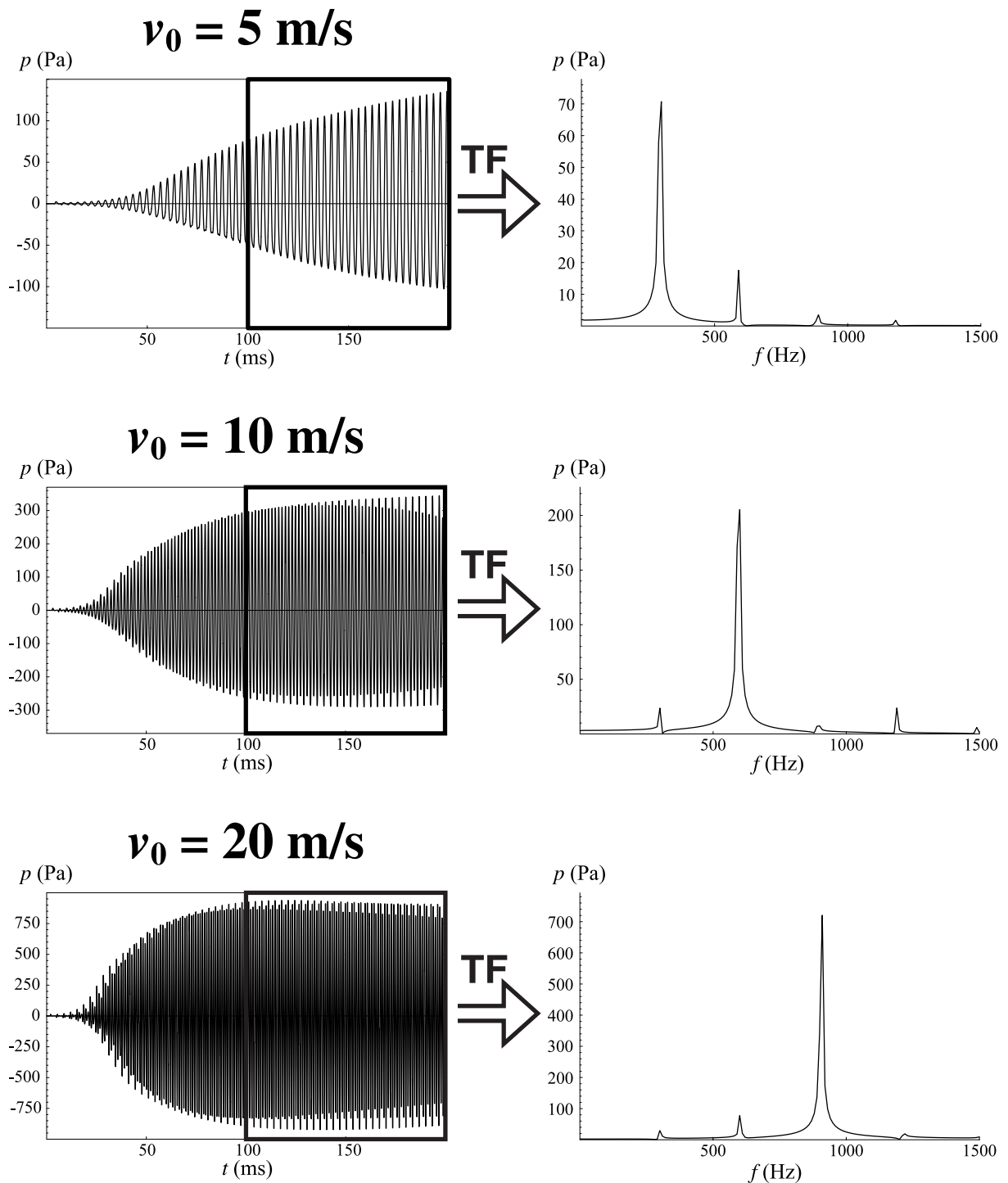


Figura 5.5: Anàlisi espectral de la pressió per a v_0 igual a 5 m/s, 10 m/s i 20 m/s

L'anàlisi espectral de les oscil·lacions de pressió que s'estableixen a la finestra permet determinar el contingut freqüencial i la participació relativa dels diferents modes propis de la columna d'aire. Aquesta anàlisi s'ha realitzat prenent només els resultats de la pressió en el

període temporal des dels 100 als 200 ms, per evitar la distorsió que representaria fer una anàlisi espectral en què intervingués el període transitori d'establiment de l'oscil·lació. Els resultats d'aquesta anàlisi per a v_0 igual a 5 m/s, 10 m/s i 20 m/s es mostren a la figura 5.5. Els valors màxims de l'espectre, que es produeixen en cadascun dels tres casos a les freqüències de 300 Hz, 600 Hz i 910 Hz, corresponen al primer, segon i tercer mode de la columna d'aire.

La presència de pics en l'espectre que no són harmònics del so fonamental, com, per exemple, el pic a 900 Hz de l'espectre per a $v_0 = 10$ m/s o els pics a 300 i 600 Hz de l'espectre per a $v_0 = 20$ m/s, posa de manifest el caràcter no lineal del sistema i el fet que, per a aquestes simulacions concretes, a part de no acabar-se d'establir un règim estacionari, hi ha una influència detectable dels modes diferents del mode que controla majoritàriament l'autoexcitació. Previsiblement es tendiria a un cicle límit amb presència, però, de doblament de període i d'altres efectes característics de la ruta vers el caos determinista.

En l'anàlisi anterior cal tenir en compte que, amb els valors de Δt i la longitud del registre temporal utilitzats per al càlcul de la transformada de Fourier, s'obté una resolució freqüencial de $\Delta f = 10$ Hz. Per analitzar per a quins valors de la velocitat de sortida del doll es produeix el canvi de registre s'han realitzat 24 simulacions amb velocitats de sortida del doll des d'1 m/s fins a 24 m/s. Les simulacions s'han calculat fins a 400 ms amb el mateix Δt anterior, i l'anàlisi freqüencial s'ha realitzat sobre la segona meitat de cada registre temporal de la pressió a la finestra. La resolució freqüencial obtinguda és, en aquest cas, de $\Delta f = 5$ Hz. La figura 5.6 mostra els valors de la freqüència dominant per a cadascuna de les simulacions, funció de la velocitat de sortida del doll i funció de la pressió de bufada. Aquests resultats són comparables amb els presentats per Coltman (1976), Valeriu (1992) i Fabre (1992), per bé que les dimensions dels tubs estudiats per ells no són exactament iguals a les del tub presentat. En les simulacions realitzades s'observa una tendència a canviar de registre per a valors més baixos de la pressió o de la velocitat de bufada.

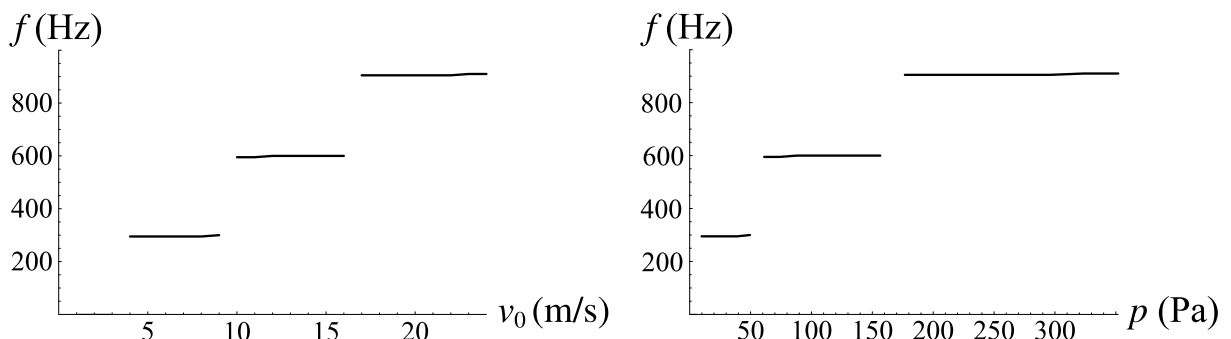


Figura 5.6: Variació de la freqüència dominant funció de la velocitat de bufada o de la pressió de bufada

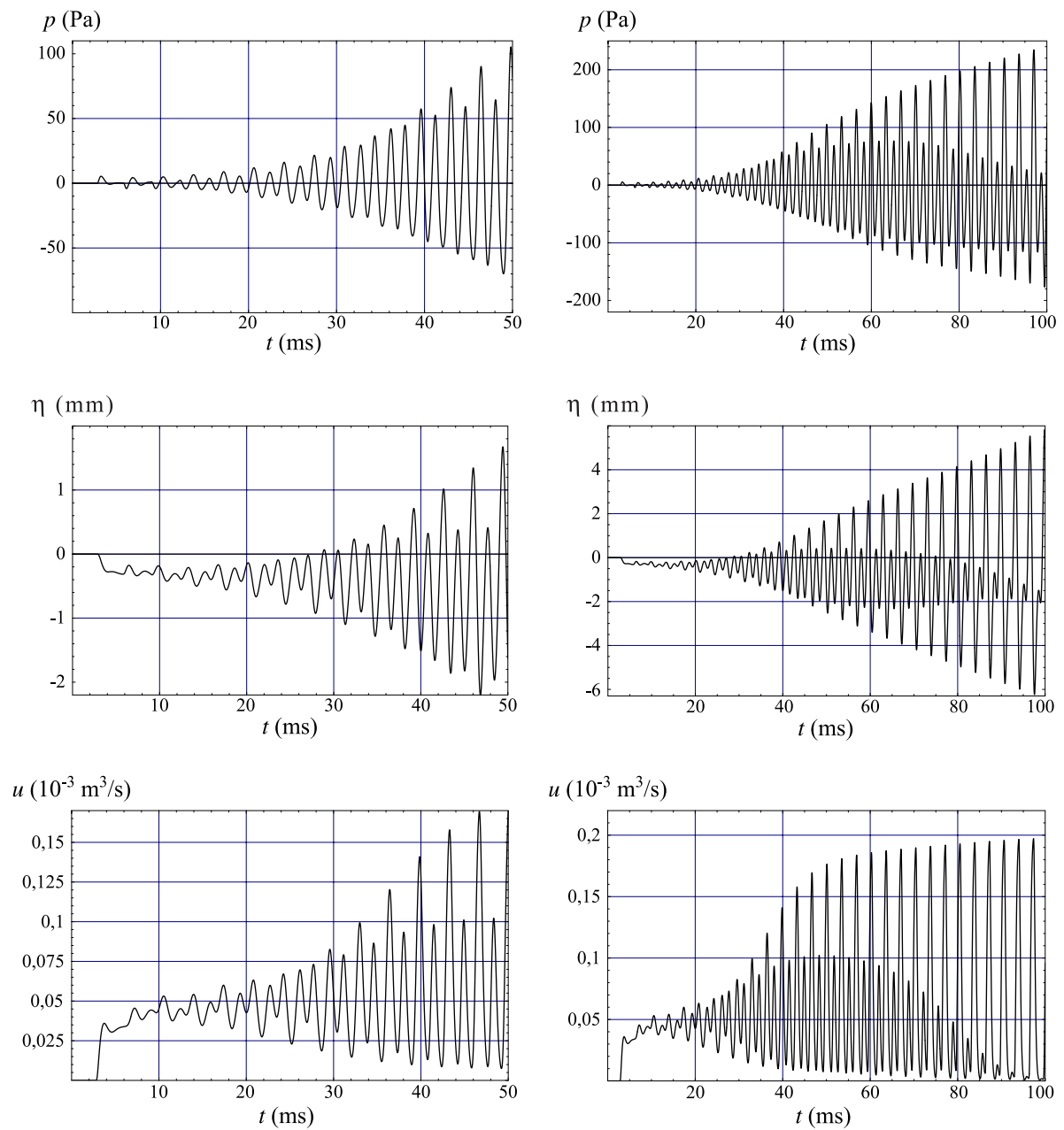


Figura 5.7: Pressió a la finestra, deflexió del doll al bisell i cabal introduït per a $v_0 = 9$ m/s

Quan la velocitat de sortida del doll és propera a un canvi de registre, les oscil·lacions que s'estableixen en el tub presenten inicialment components freqüencials de registres superiors que després no s'acaben imposant. Això és el que es pot observar a la figura 5.7, en què es presenten els resultats de la pressió a la finestra, la deflexió del doll al bisell i el cabal total introduït en el tub per a una velocitat de sortida del doll $v_0 = 9$ m/s.

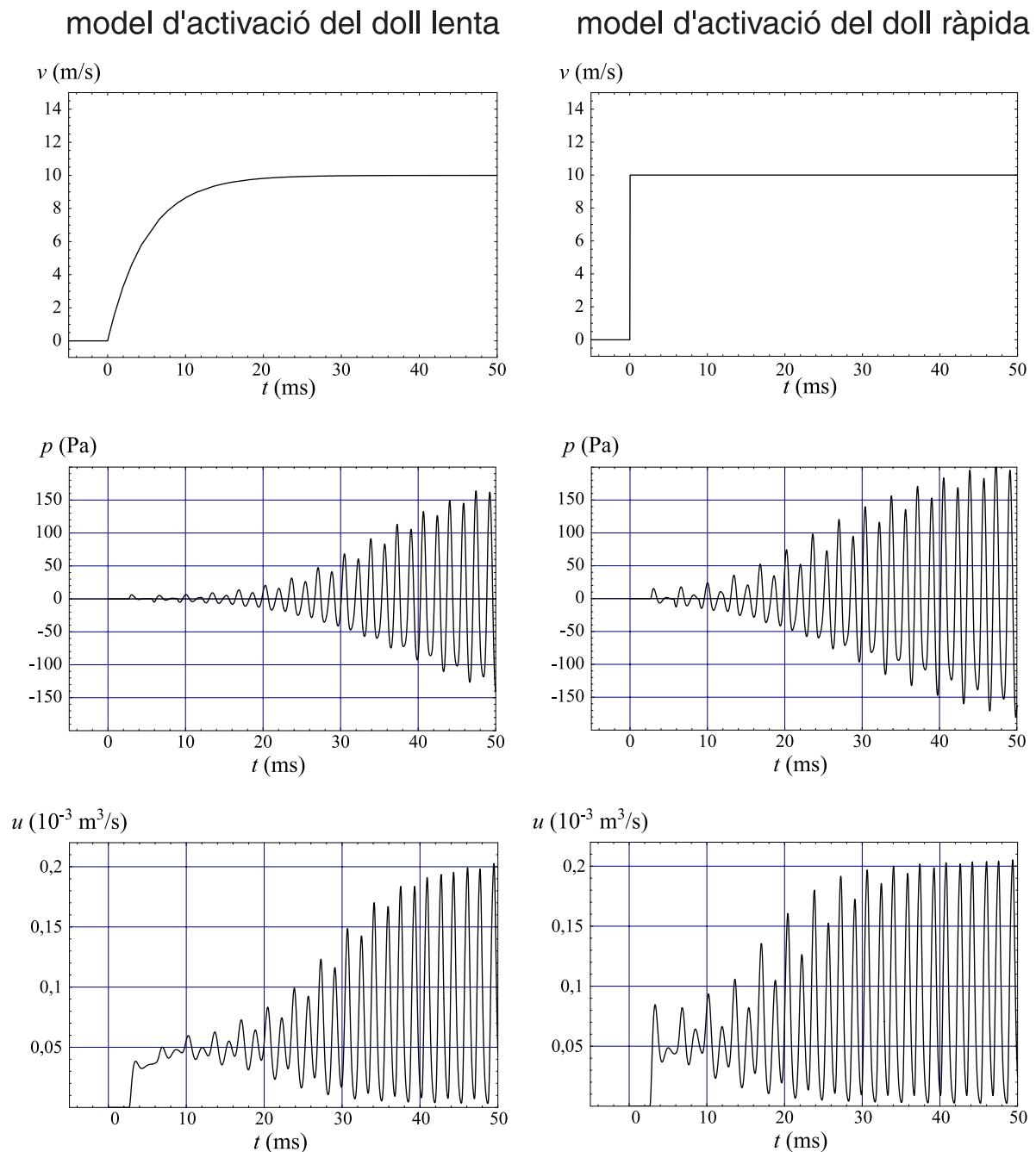


Figura 5.8: Comparació entre els models d'activació lenta i ràpida de la velocitat de sortida del doll

Els dos models d'activació de la velocitat de bufada presentats en l'apartat 2.1, el model d'activació ràpida i el model d'activació lenta, es comparen en les simulacions presentades en la figura 5.8. La figura mostra els primers 50 ms dels dos models de la velocitat de bufada funció del temps i la pressió a la finestra i el cabal introduït, en cadascun dels dos casos. El model d'activació ràpida presenta un creixement més ràpid de les

oscil·lacions i arriba més aviat a la situació de saturació del cabal introduït. Les oscil·lacions que s'estableixen finalment no presenten, però, variacions significatives.

5.2 Modelització d'una flauta de bec contralt

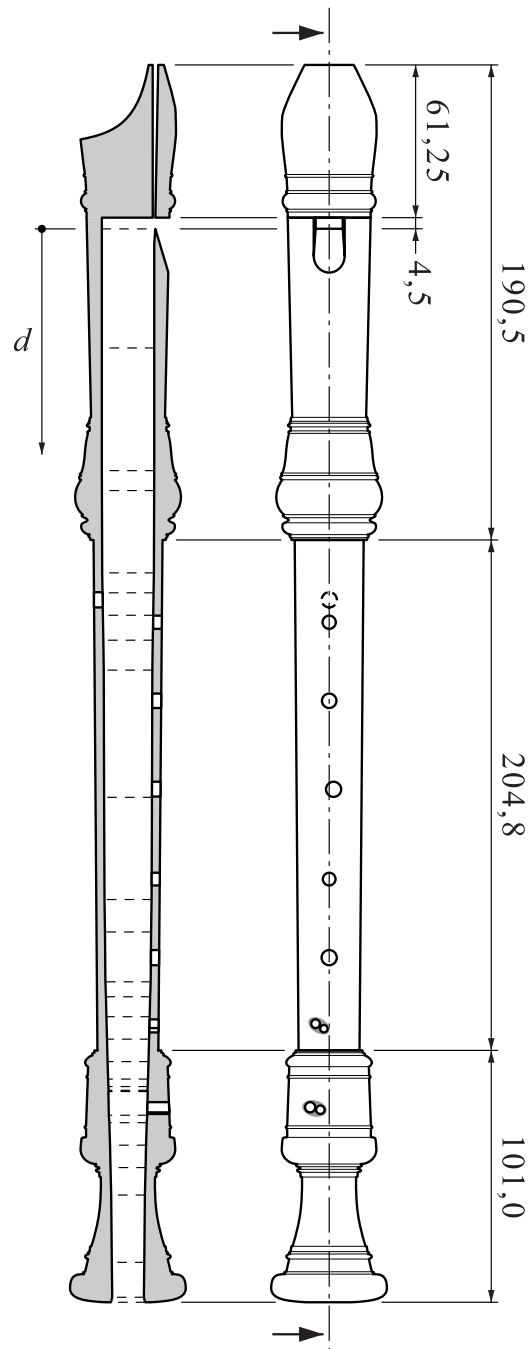


Figura 5.9: Flauta de bec contralt (model Bressan 5.5 construït per J. Tubau de Manresa).

Les dimensions són en mil·límetres

En aquest apartat es presenta la modelització d'una flauta de bec contralt. Les característiques geomètriques, que corresponen al model Bressan 5.5 (La 4 415), han estat proporcionades pel constructor de flautes Josep Tubau de Manresa. La figura 5.9 mostra les dimensions globals de la flauta, la figura 5.10 presenta un detall de l'embocadura amb les dimensions de la finestra i la figura 5.11 presenta la digitació proposada pel mateix constructor. Per a la descripció del tub de l'instrument s'utilitzen les dades del diàmetre interior del tub, que es presenten a la taula 5.2, i les dades relatives als forats, que es presenten a la taula 5.3.

No es disposa del valor de la distància η_0 entre la posició central de la llum i el bisell, ni de l'angle α representatiu de la deflexió que sofreix el doll en entrar al tub. A partir d'informació obtinguda de la bibliografia (Fletcher i Douglas, 1980; Martin, 1994) es decideix prendre η_0 igual al 10 % de l'obertura de la llum i l'angle α igual a 45° .

Per a la modelització de l'acoblament entre el bisell i el tub s'utilitzen els mateixos paràmetres i les mateixes aproximacions utilitzades en l'apartat 5.1: interacció viscosa de constant $\tau_d = 0,1$ ms per determinar la deflexió del doll al bisell, consideració només de la font de volum i interacció estesa en el càlcul dels increments de les ones propagatives. Les constants utilitzades per la interacció estesa són $\lambda = 0,5$ i $\tau_e = x_0 / v_0$, on x_0 és la longitud de la finestra i v_0 és la velocitat de sortida del doll.

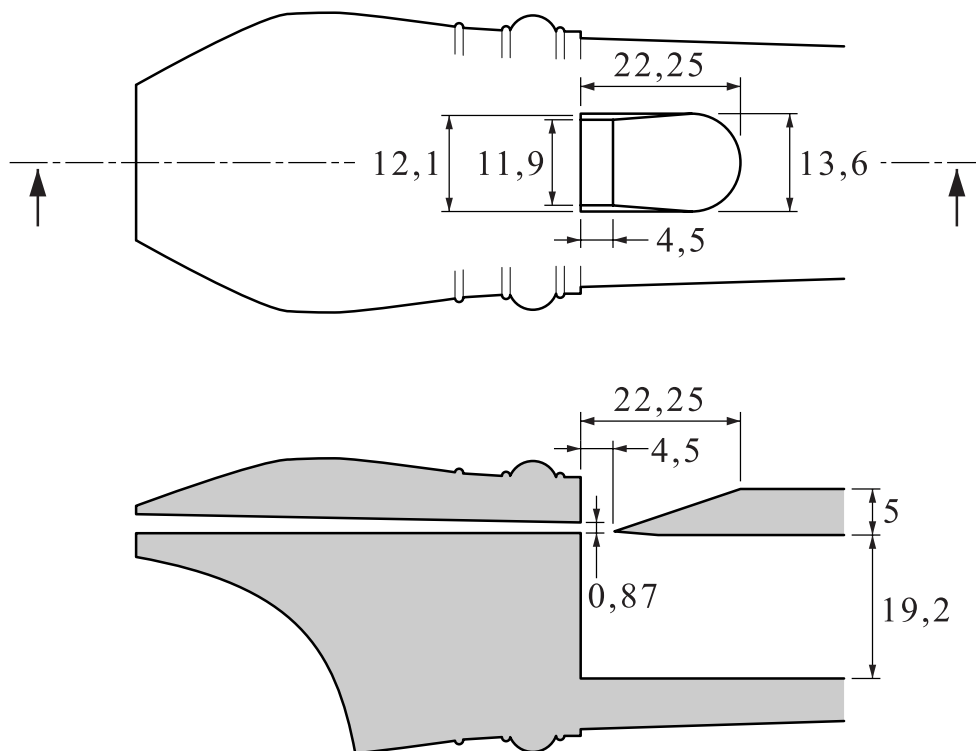


Figura 5.10: Embocadura (model Bressan 5.5 construït per J. Tubau de Manresa).

Les dimensions són en mil·límetres

The figure displays four systems of musical notation, each corresponding to a different note in the model Bressan 5.5. Each system includes a musical staff with a treble clef, a 'Mode' row, a 'Digitació' row (finger diagrams), and a note name row.

System 1:

- Staff: F_4 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Fa

System 2:

- Staff: $\text{F}_4^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Fa # / Sol b

System 3:

- Staff: G_4 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Sol

System 4:

- Staff: $\text{G}_4^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Sol # / La b

System 5:

- Staff: A_4 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: La

System 6:

- Staff: $\text{A}_4^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: La # / Si b

System 7:

- Staff: B_4 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Si

System 8:

- Staff: C_5 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Do

System 9:

- Staff: $\text{C}_5^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Do # / Re b

System 10:

- Staff: D_5 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Re

System 11:

- Staff: $\text{D}_5^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Re # / Mi b

System 12:

- Staff: E_5 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Mi

System 13:

- Staff: F_5 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Fa

System 14:

- Staff: $\text{F}_5^\#$ (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Fa # / Sol b

System 15:

- Staff: G_5 (quarter note)
- Mode: 1
- Digitació: 1 (index finger)
- Note: Sol

System 16:

- Staff: $\text{G}_5^\#$ (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: Sol # / La b

System 17:

- Staff: A_5 (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: La

System 18:

- Staff: $\text{A}_5^\#$ (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: La # / Si b

System 19:

- Staff: B_5 (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: Si

System 20:

- Staff: C_6 (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: Do

System 21:

- Staff: $\text{C}_6^\#$ (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: Do # / Re b

System 22:

- Staff: D_6 (quarter note)
- Mode: 2
- Digitació: 2 (middle finger)
- Note: Re

System 23:

- Staff: $\text{D}_6^\#$ (quarter note)
- Mode: 3
- Digitació: 3 (ring finger)
- Note: Re # / Mi b

System 24:

- Staff: E_6 (quarter note)
- Mode: 3
- Digitació: 3 (ring finger)
- Note: Mi

System 25:

- Staff: F_6 (quarter note)
- Mode: 3
- Digitació: 3 (ring finger)
- Note: Sol

System 26:

- Staff: $\text{F}_6^\#$ (quarter note)
- Mode: 4
- Digitació: 4 (pinky finger)
- Note: Sol

Figura 5.11: Digitació (model Bressan 5.5 construït per J. Tubau de Manresa)

<div style="display: inline-block; width: 45%; text-align: center;"> distància d des de la secció del bisell (mm) </div> <div style="display: inline-block; width: 45%; text-align: center;"> diàmetre del tub (mm) </div>			<div style="display: inline-block; width: 45%; text-align: center;"> distància d des de la secció del bisell (mm) </div> <div style="display: inline-block; width: 45%; text-align: center;"> diàmetre del tub (mm) </div>		
1	0,00	19,20	15	324,95	15,40
2	96,95	19,20	16	333,95	15,00
3	104,95	19,15	17	340,95	14,60
4	137,95	18,95	18	343,95	14,40
5	145,95	18,70	19	345,45	14,20
6	154,95	18,45	20	345,95	14,40
7	164,95	18,10	21	355,45	14,10
8	176,95	17,80	22	358,45	13,70
9	227,95	17,55	23	367,45	13,20
10	268,95	17,25	24	376,45	12,85
11	281,95	16,90	25	387,45	12,35
12	301,95	16,60	26	414,45	11,90
13	307,95	16,20	27	428,45	11,60
14	315,95	15,85	28	430,45	12,50

Taula 5.2: Dades del diàmetre del tub (model Bressan 5.5 construït per J. Tubau de Manresa)

	<div style="display: inline-block; width: 30%; text-align: center;"> distància d des de la secció del bisell (mm) </div>	<div style="display: inline-block; width: 30%; text-align: center;"> diàmetre exterior del forat (mm) </div>	<div style="display: inline-block; width: 30%; text-align: center;"> gruix de la paret en el forat (mm) </div>
1	148,75	6,1	4,6
2	157,75	5,3	4,6
3	189,25	5,8	4,6
4	224,75	6,1	4,5
5	260,75	5,1	4,3
6	292,25	6,1	4,3
7	318,75	3,5	4,0
8	320,75	3,0	4,0
9	352,25	4,1	8,5
10	353,25	3,4	8,5

Taula 5.3: Dades dels forats (model Bressan 5.5 construït per J. Tubau de Manresa)

L'instrument es separa, per modelitzar-lo, en dues parts: l'embocadura i el tub. La modelització es realitza seguint l'esquema de la figura 4.5, en què les funcions de reflexió R^B representen de manera global el tub. La modelització de l'embocadura es realitza mitjançant la transformació geomètrica en un tub cilíndric, tal com es mostra a la figura 5.12. Aquesta transformació es realitza mantenint les àrees de la secció A de sortida del doll i de la secció A' de l'extrem obert superior. Així s'aconsegueix un model unidimensional de la descripció de l'embocadura. La descripció matemàtica de les discontinuïtats d'aquesta part de l'instrument es realitza analíticament mitjançant les funcions de reflexió temporals presentades a l'apartat 3.1. Així s'obté un model de l'embocadura vàlid per a qualsevol digitació.

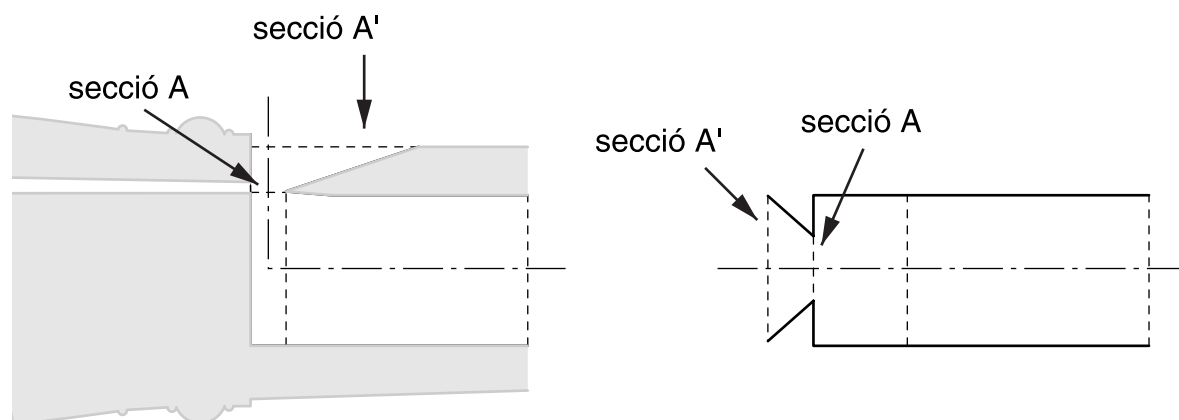


Figura 5.12: Transformació de l'embocadura en un tub cilíndric

Les funcions de reflexió que descriuen el tub de manera global es calculen numèricament mitjançant el mètode de les matrius de transferència, presentat a l'apartat 3.2, amb una discretització del número d'ona de $\Delta k = 0,1 \text{ m}^{-1}$ i un valor màxim de 200 m^{-1} . Així s'obté una funció de reflexió temporal global del tub per a cada digitació amb un interval temporal de $\Delta t = 46,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ i un temps total de 184,8 ms.

El mètode d'eliminació del component continu, presentat en el capítol 4, s'utilitza en les funcions de reflexió usades en la simulació. El terme que s'afegeix a les funcions de reflexió de velocitat és el descrit en l'equació 4.9, en què el valor de τ_f es pren igual a 100 vegades la constant de temps de la funció de reflexió original de la discontinuïtat. Per a la funció de reflexió global del tub, de la qual es té només una formulació numèrica, es calcula la constant de temps prenent com a base el valor màxim de la funció de reflexió i fent una analogia amb el càlcul de la constant de temps d'una funció exponencial decreixent. Es pren, com a constant de temps de la funció de reflexió, la posició temporal de valor igual al màxim

dividit pel número e , i que no presenta cap valor superior per a temps posteriors. El valor temporal obtingut es multiplica per 100 per obtenir el valor de τ_f a utilitzar en el terme de filtratge del component continu afegit a la funció de reflexió de velocitat. Les figures 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 i 5.17 presenten les funcions de reflexió de velocitat del tub per a diferents digitacions i el procediment de càlcul per al filtratge del component continu.

En les flautes de bec, la longitud del canal, comparativament més llarga que en altres instruments de bisell, fa que la relació de l'equació 2.1 entre la pressió de bufada i la velocitat de sortida del doll a la llum no sigui aplicable (Martin, 1994). Una nova relació es pot obtenir fent una estimació de les pèrdues de càrrega que es produeixen en el canal, mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach (Munson, Young i Okiishi, 1994):

$$p = \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \Delta p, \tag{5.1}$$

amb

$$\Delta p = f \frac{l_0}{D_e} \rho \frac{v_0^2}{2}, \tag{5.2}$$

on f és el factor de fricció, l_0 és la longitud del canal i D_e és el diàmetre equivalent.

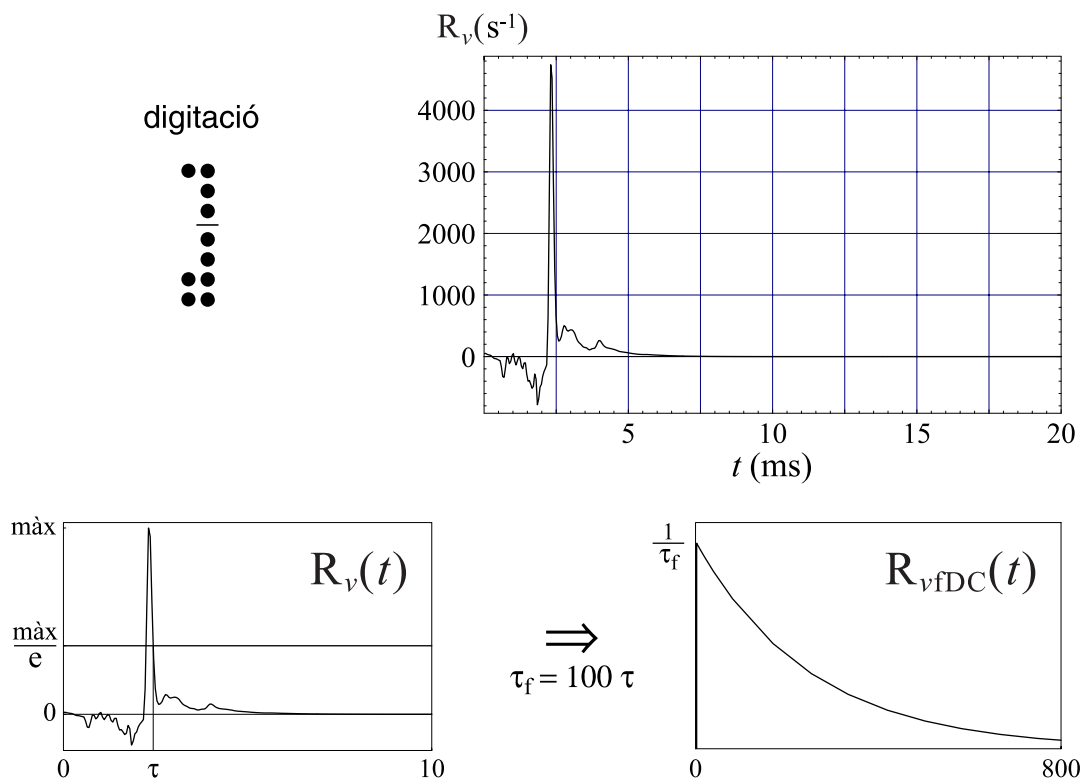


Figura 5.13: Funció de reflexió del tub per a la digitació corresponent a la nota Fa 4

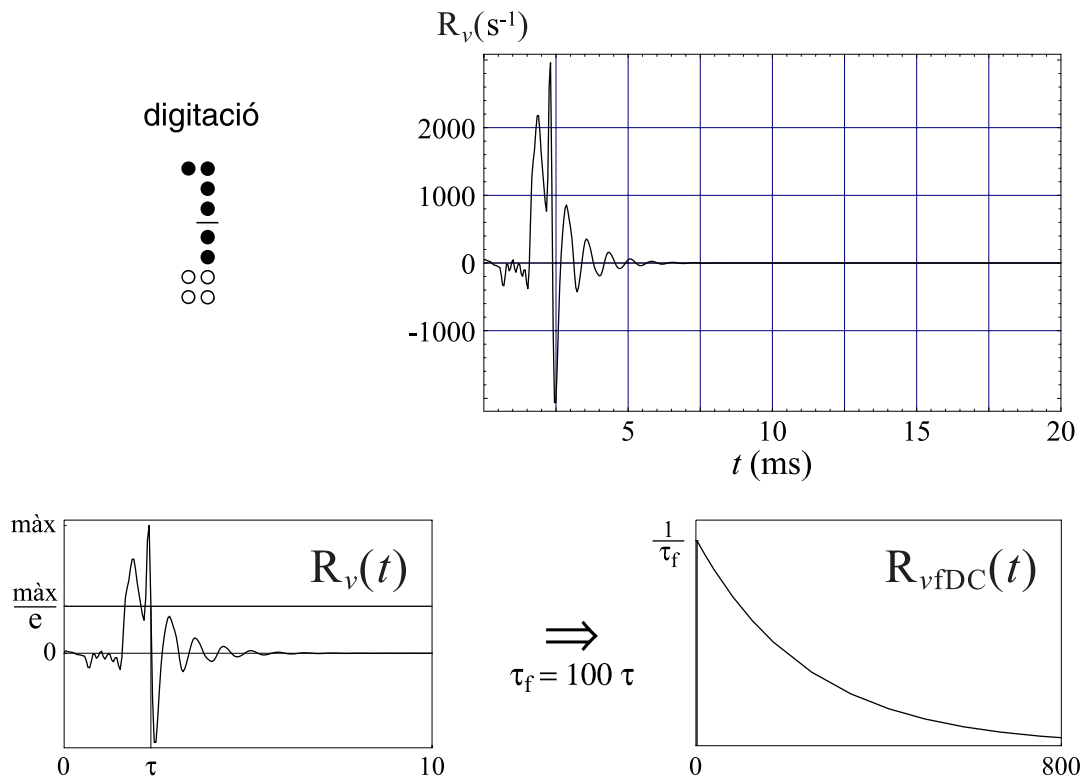


Figura 5.14: Funció de reflexió del tub per a la digitació corresponent a la nota La 4

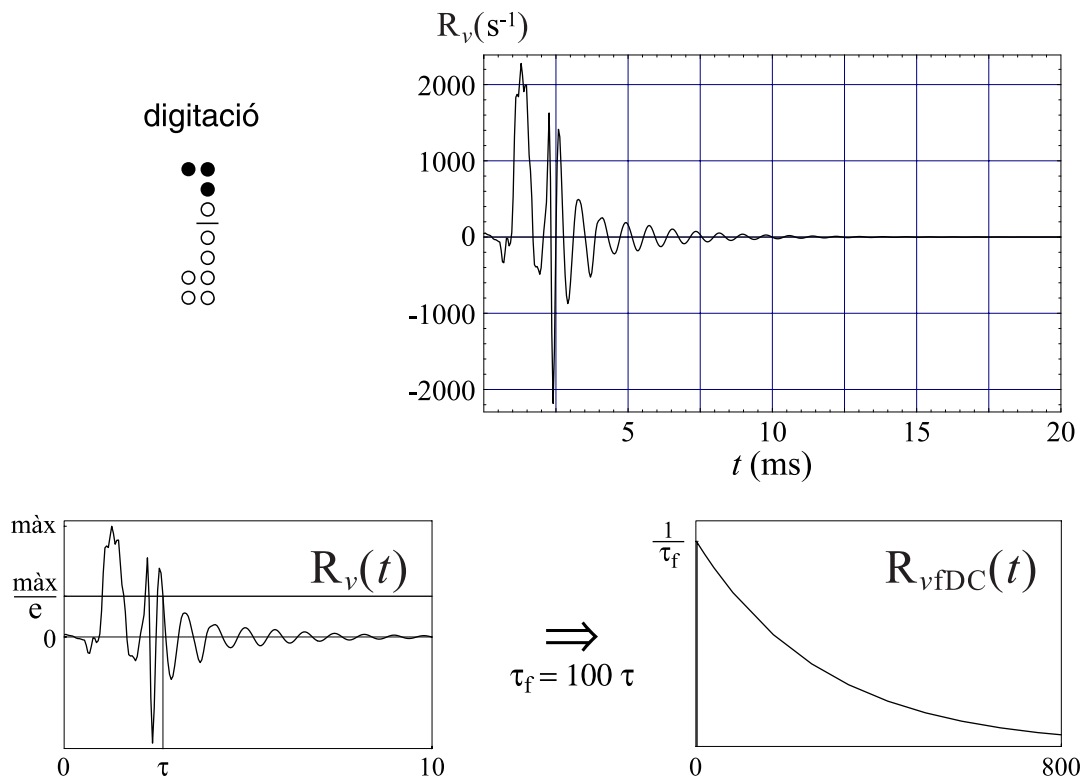


Figura 5.15: Funció de reflexió del tub per a la digitació corresponent a la nota Re 5

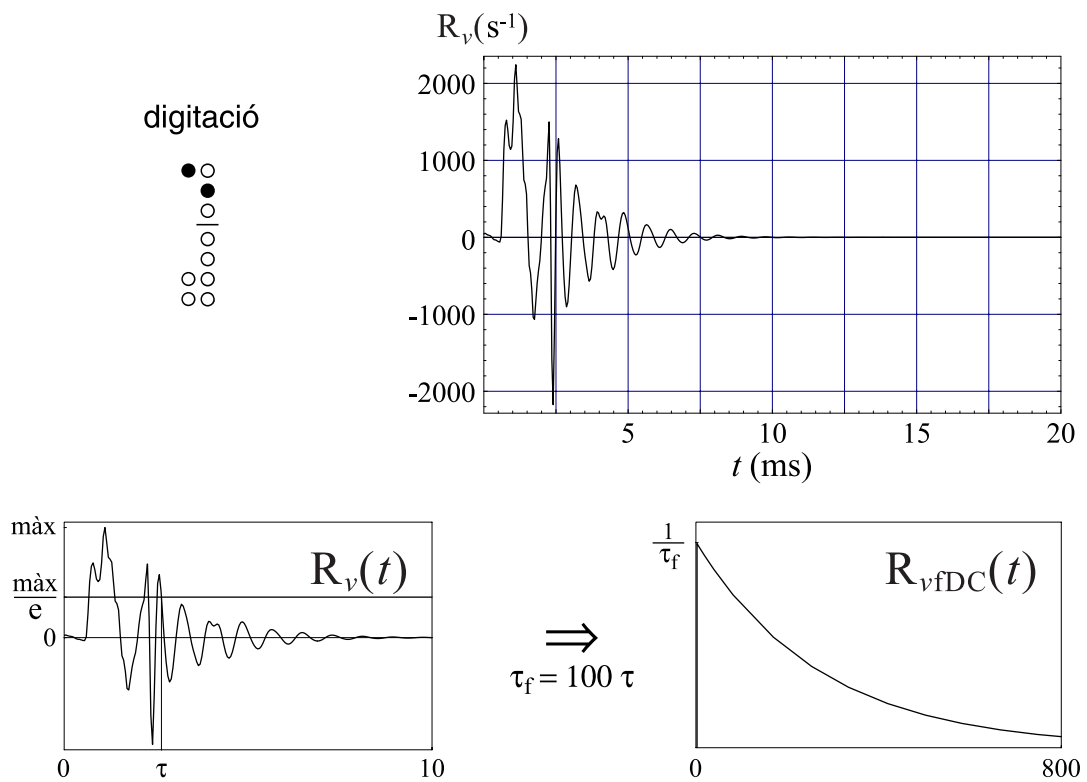


Figura 5.16: Funció de reflexió del tub per a la digitació corresponent a la nota Fa 5

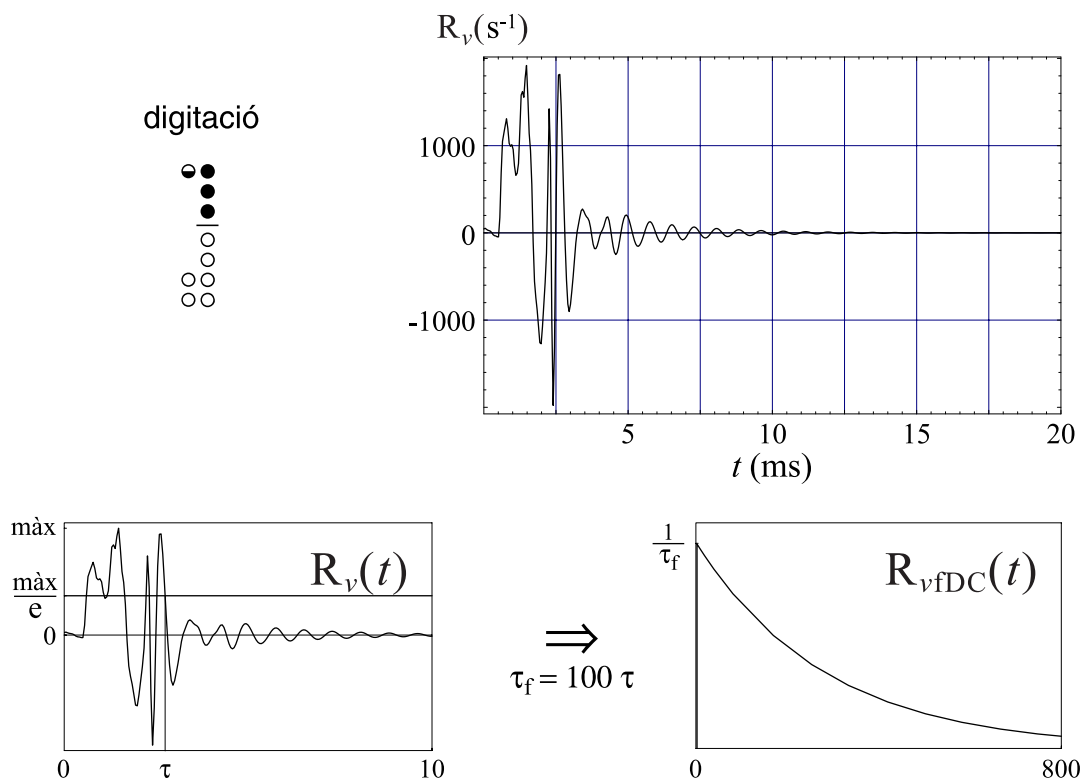


Figura 5.17: Funció de reflexió del tub per a la digitació corresponent a la nota Do 6

Per a un conducte de secció rectangular ($S = a b$) els valors de f i D_e es poden obtenir a partir de les següents equacions (Rodríguez, 2002):

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \left[0,9 + 0,6 \left| \frac{a-b}{a+b} \right| \right], \quad D_e = \frac{2ab}{a+b}, \quad (5.3)$$

on Re és el número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{v_0 D_e}{\nu}. \quad (5.4)$$

La simulació de l'instrument complet es realitza amb un interval temporal de $\Delta t = 46,2 \cdot 10^{-6}$ s i es calcula un temps total de 184,8 ms. S'utilitza el model d'activació lenta de la velocitat de sortida del doll, tal com correspon a l'activació humana de l'entrada d'aire en el canal, amb el paràmetre $\tau_b = 5$ ms. Es realitza l'anàlisi espectral de les oscil·lacions de pressió que s'estableixen a la finestra prenent només la segona meitat del registre temporal de pressió per evitar, en la mesura del possible, el règim transitori. Així s'obté el contingut freqüencial de l'ona estacionària establerta i el valor de la freqüència de la nota en execució. Per als valors utilitzats en el càlcul de la transformada de Fourier, s'obté una resolució freqüencial de $\Delta f = 10,82$ Hz.

Les figures 5.18, 5.19 i 5.20 presenten els resultats de la pressió a la finestra, la deflexió del doll al bisell, el cabal total introduït en el tub i el contingut freqüencial de l'ona de pressió establerta quan les velocitats de sortida del doll són de 5 m/s, 10 m/s i 14 m/s, respectivament, i la flauta es fa sonar amb tots els forats tapats. Tal com es pot observar, només variant la pressió de bufada, s'aconsegueix que l'ona de pressió establerta estigui governada pel primer, segon i tercer mode respectivament. Les simulacions de les figures 5.18, 5.19 i 5.20 mostren que les freqüències dels pics dominants, que poden ser considerades com les dels tres primers modes, són respectivament $f_0 = 324,5$ Hz, $f_1 = 681,5$ Hz i $f_2 = 1070,9$ Hz. Si es calculen les diferències entre dos modes successius,

$$f_1 - f_0 = 1,1 f_0 \quad \text{i} \quad f_2 - f_1 = 1,2 f_1, \quad (5.5)$$

s'observa un eixamplament de la distància entre harmònics. Aquest eixamplament ja ha estat previst per alguns autors (Benade, 1959 i 1976; Coltman, 1990) en tubs amb secció decreixent en allunyar-se de l'extrem d'excitació, com és el cas del tub objecte de simulació.

La presència de pics en l'espectre de la figura 5.20 que no són harmònics del so fonamental respon al fet que la velocitat de bufada escollida, tot i establir una pertorbació pràcticament governada pel tercer mode, no acaba d'establir un règim periòdic i la influència del segon mode hi és present. Si la intervenció del segon mode fos més intensa el so produït es podria qualificar de multifònic.

Fa 4

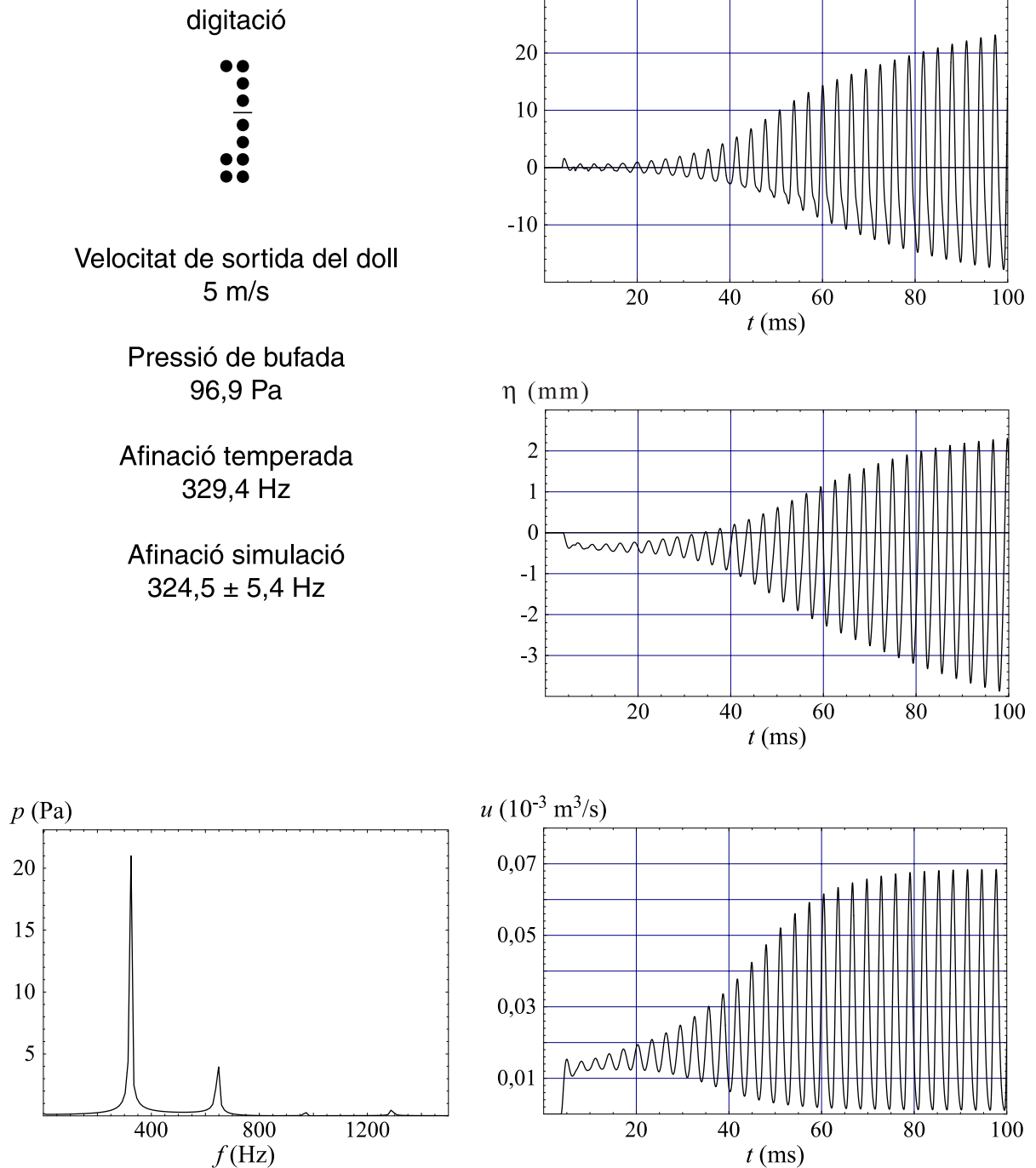


Figura 5.18: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 5$ m/s i digitació corresponent a la nota Fa 4

Fa 4 (segon mode)

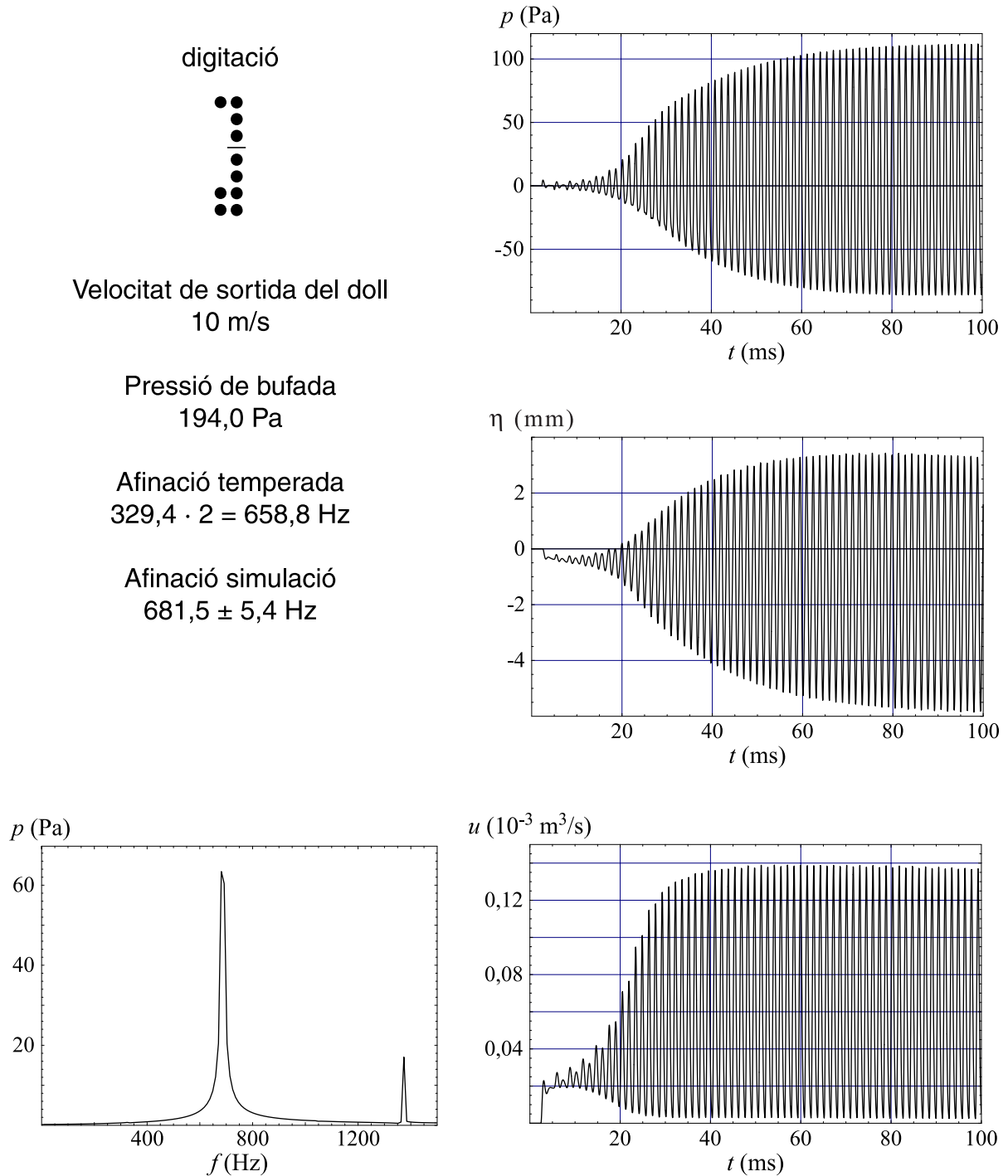


Figura 5.19: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 10 \text{ m/s}$ i digitació corresponent a la nota Fa 4

Fa 4 (tercer mode)

digitació



Velocitat de sortida del doll
14 m/s

Pressió de bufada
271,5 Pa

Afinació temperada
 $329,4 \cdot 3 = 988,2 \text{ Hz}$

Afinació simulació
 $1070,9 \pm 5,4 \text{ Hz}$

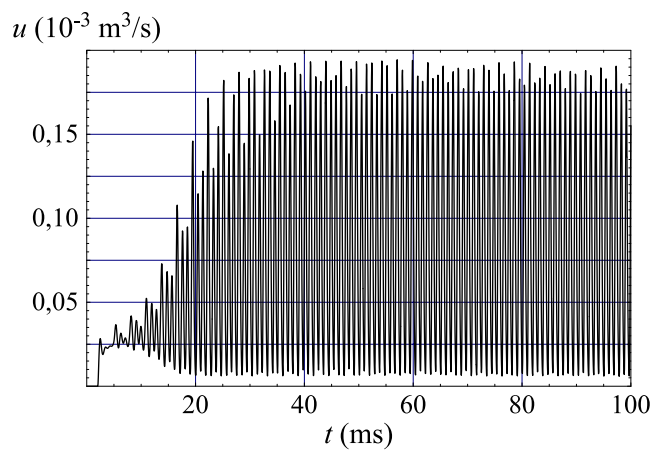
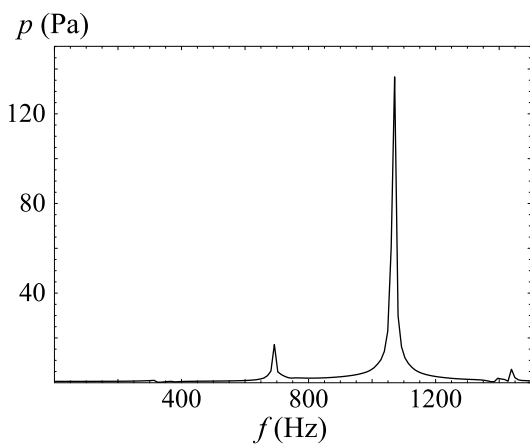
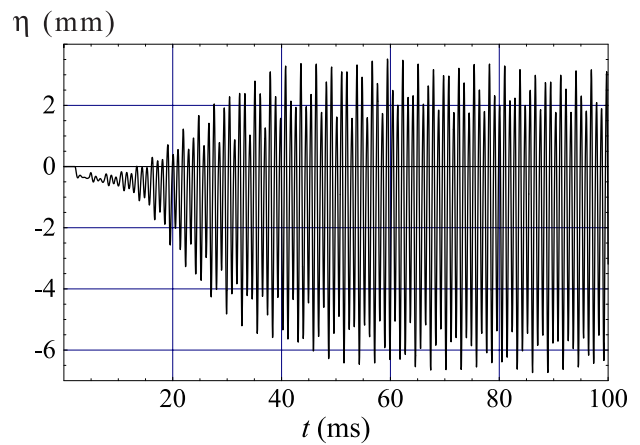
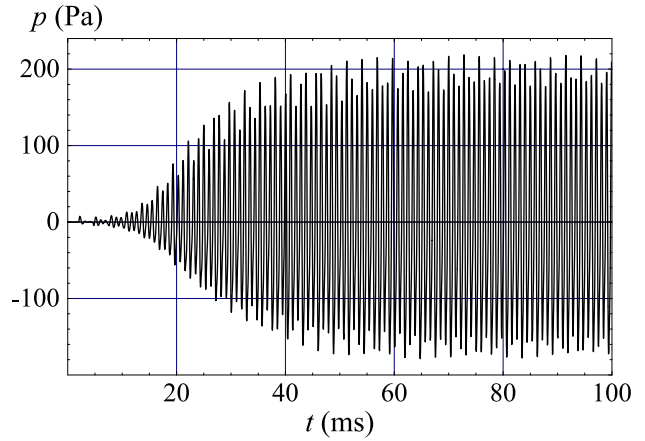


Figura 5.20: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 14 \text{ m/s}$ i digitació corresponent a la nota Fa 4

La 4

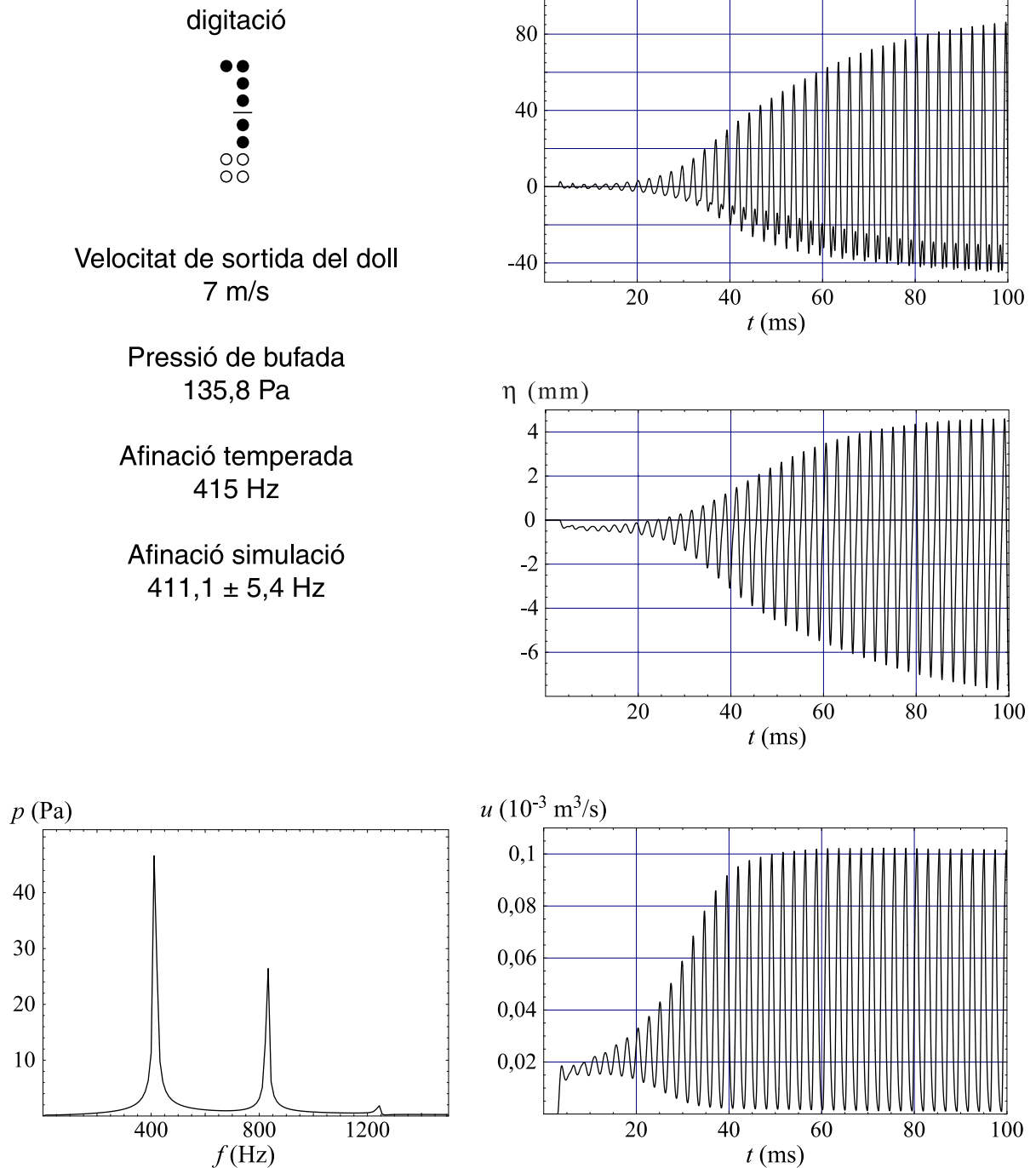
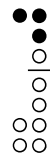


Figura 5.21: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 7$ m/s i digitació corresponent a la nota La 4

Re 5

digitació



Velocitat de sortida del doll
10 m/s

Pressió de bufada
194,0 Pa

Afinació temperada
554,0 Hz

Afinació simulació
 $562,5 \pm 5,4$ Hz

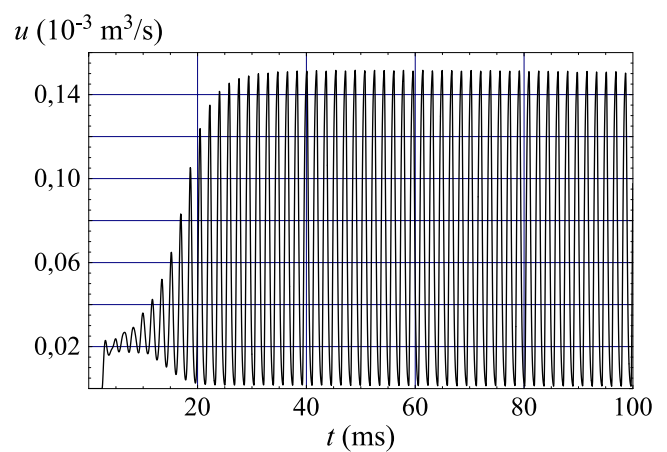
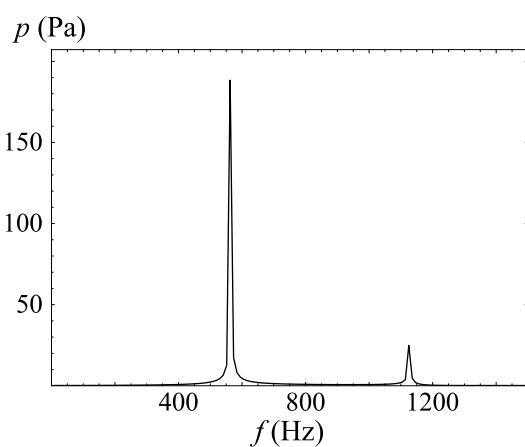
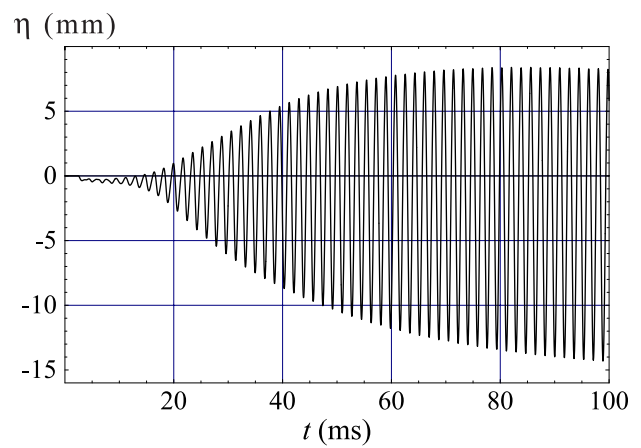
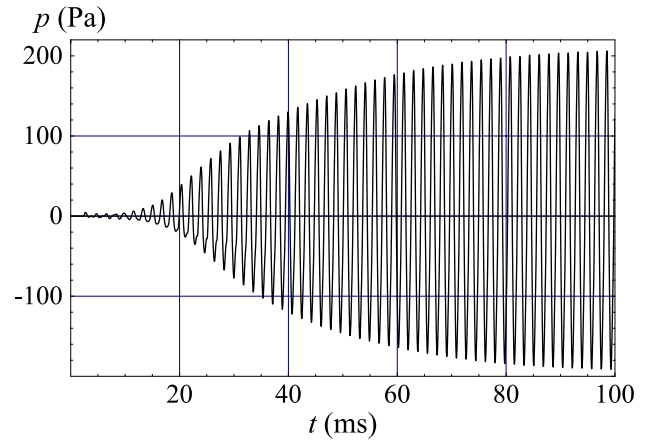
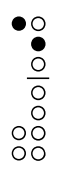


Figura 5.22: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 10$ m/s i digitació corresponent a la nota Re 5

Fa 5

digitació



Velocitat de sortida del doll
12 m/s

Pressió de bufada
232,8 Pa

Afinació temperada
658,8 Hz

Afinació simulació
 $670,7 \pm 5,4$ Hz

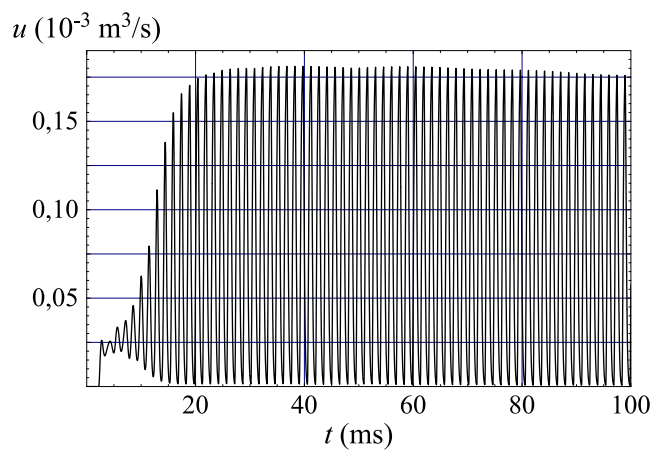
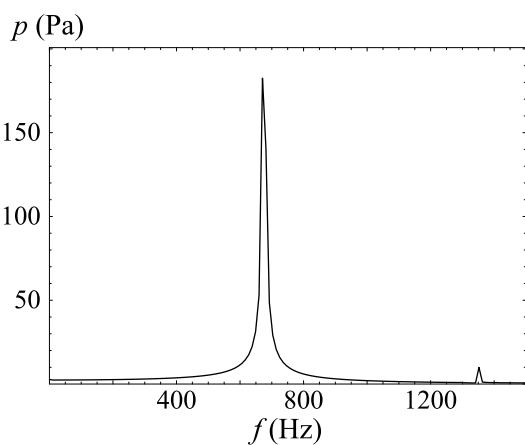
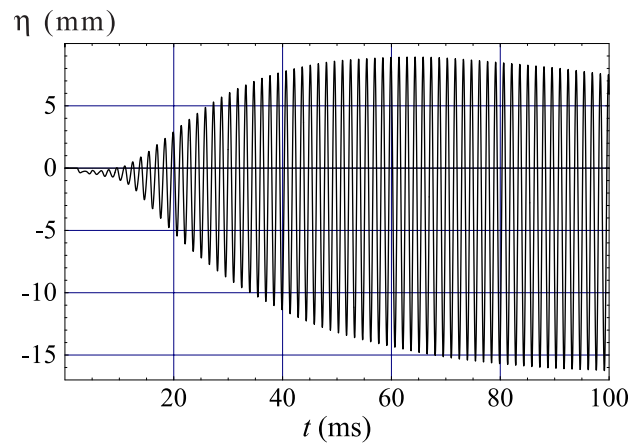
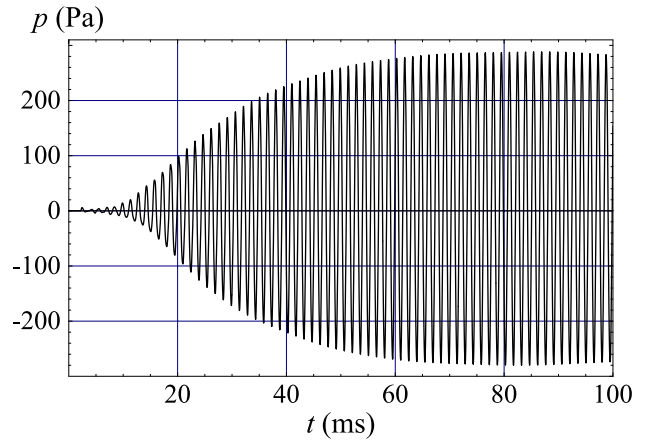
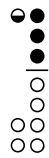


Figura 5.23: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 12$ m/s i digitació corresponent a la nota Fa 5

Do 6

digitació



Velocitat de sortida del doll
17 m/s

Pressió de bufada
329,7 Pa

Afinació temperada
987,0 Hz

Afinació simulació
 $1006,0 \pm 5,4$ Hz

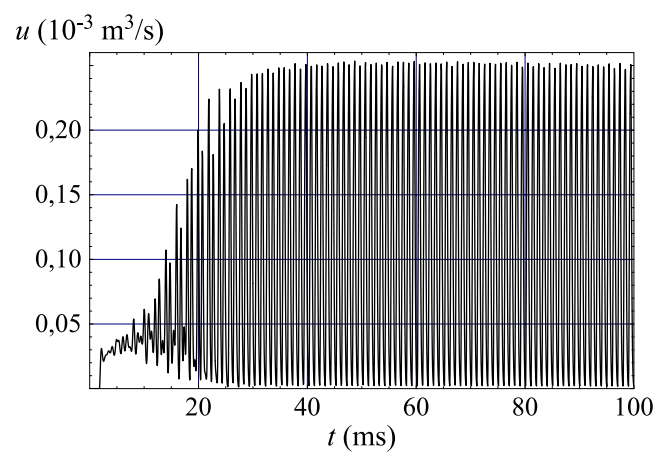
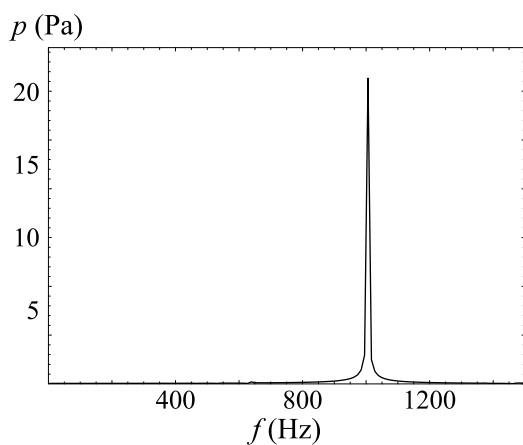
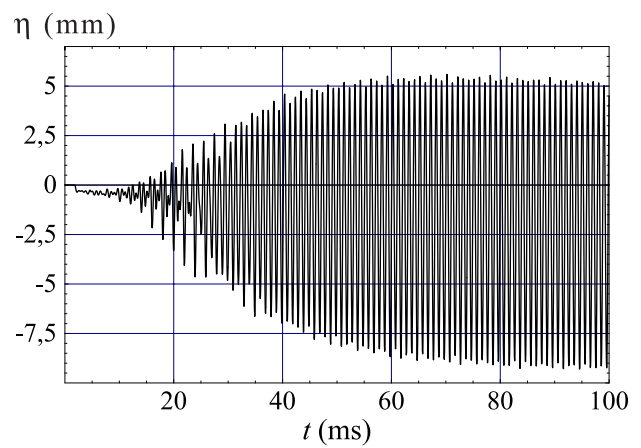
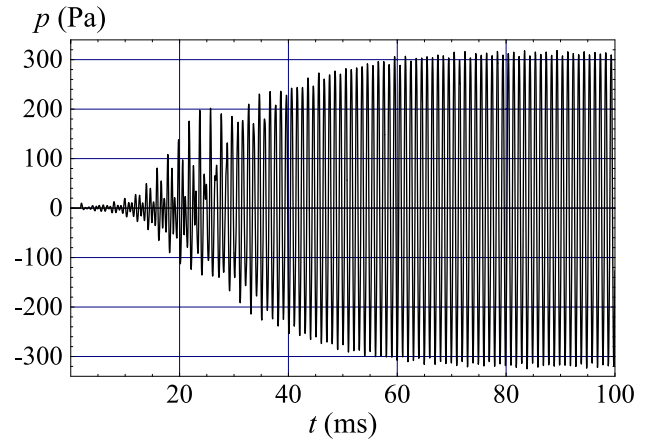


Figura 5.24: Resultats de la simulació de la flauta per a $v_0 = 17$ m/s i digitació corresponent a la nota Do 6

Les figures 5.21, 5.22, 5.23 i 5.24 presenten els resultats de la pressió a la finestra, la deflexió del doll al bisell, el cabal total introduït en el tub i el contingut freqüencial de l'ona de pressió establerta per a les digitacions corresponents a les notes La 4, Re 5 i Fa 5 del primer registre, i la nota Do 6 del segon registre, respectivament. En cada cas s'ha escollit una velocitat de sortida del doll que fa que l'ona estacionària establerta estigui governada pel primer mode propi. La presència important del segon harmònic en la simulació de la nota La 4 (figura 5.21), cosa atípica en els sons de les flautes de bec, és indicativa de la proximitat a la transició del control del règim vibratori del primer al segon mode. En les condicions de la simulació, l'oscil·lació del segon mode és intensa, però encara està enclavada en fase amb la del primer mode, que és el que governa el cicle límit. En simulacions fetes per a velocitats de sortida del doll lleugerament més petites, la presència del segon harmònic era significativament inferior i no era visualment apreciable en la forma d'ona de la pressió.

La simulació de la nota Do 6 (figura 5.24), que s'obté mitjançant la utilització del forat de registre, presenta en el transitori d'atac una presència important d'oscil·lacions associades al primer mode. Aquest és el que s'establiria si el forat de registre estigués totalment tancat, però la digitació utilitzada, amb el forat de registre mig obert, en esmoreir intensament el primer mode fa que finalment sigui el segon mode el que acaba predominant en el control del règim vibratori. La presència del primer mode en el transitori d'atac no es veu reflectida en la gràfica del contingut freqüencial de l'ona de pressió, ja que aquesta ha estat obtinguda utilitzant només la segona meitat del registre temporal de pressió.

	afinació teòrica (Hz)	afinació simulació (Hz)	diferència (cents)
Fa 4	329,4	324,5	-26
La 4	415,0	411,1	-16
Re 5	554,0	562,5	26
Fa 5	658,8	670,7	31
Do 6	987,0	1006,0	33

Taula 5.4: Comparació entre les freqüències de les notes obtingudes en la simulació i les teòriques (afinació temperada)

En la taula 5.4 es comparen les freqüències de les notes que s'obtenen en la simulació amb l'afinació teòrica de la nota corresponent a l'afinació temperada. Les diferències estan dins del rang de valors obtinguts per Lyons (1981) en mesures experimentals fetes per a una flauta de bec contralt. Cal, però, tenir en compte que la resolució freqüencial obtinguda en la

simulació i el fet que l'afinació de la nota obtinguda, tant en la simulació com en una flauta real, es pugui variar variant la pressió de bufada (Fletcher i Rossing, 1991) fan que els resultats tinguin caràcter orientatiu.

Finalment, per comparar els valors de la pressió de bufada utilitzats en la simulació amb valors obtinguts experimentalment, s'utilitza el gràfic de les mesures obtingudes per Martin (Fletcher i Rossing, 1991) en el cas d'una flauta de bec contralt. La figura 5.25 presenta aquest gràfic, al qual s'han sobreposat els valors de pressió de bufada de les simulacions corresponents a les notes Fa 4, La 4, Re 5, Fa 5 i Do 6. Tal com es pot observar, tots els valors de pressió de bufada de les simulacions estan dins del rang de valors possibles, tot i que queden per sota del valor de pressió que Martin indica com a pressió de bufada normal (0 cents).

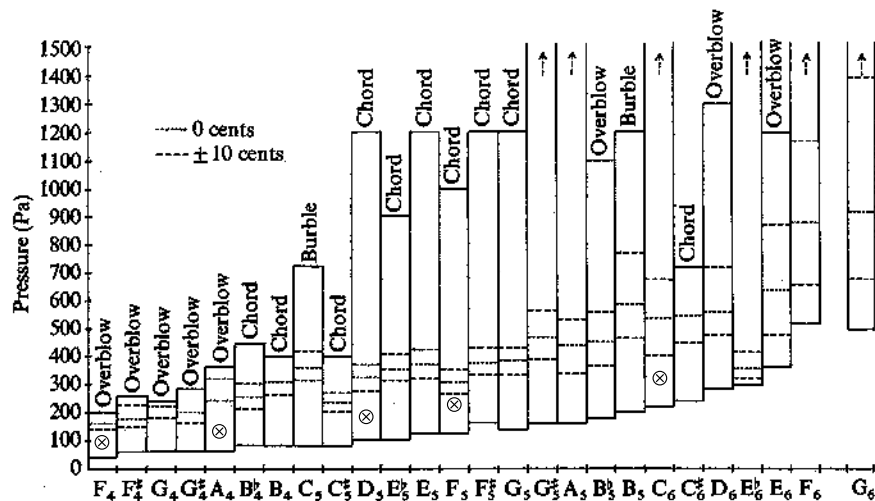


Figura 5.25: Rang de les possibles pressions de bufada segons Martin (Fletcher i Rossing 1991). El símbol ⊗ indica la pressió de bufada utilitzada en la simulació realitzada per a la nota corresponent