

Sessione: DIGITAL SIGNAL PROCESSING I

Un modello semplificato del clarinetto mediante oscillatore non lineare

F. Balena, Giovanni De Poli

Csc - Istituto di Elettrotecnica ed Elettronica, Università di Padova

1. *Introduzione.* Le ricerche sulle tecniche di sintesi del suono tendono a trovare degli algoritmi semplici e versatili per la produzione del suono. Spesso essi poi vengono sperimentati simulando gli strumenti reali.

Generalmente si cerca di trovare un modello semplificato del segnale desiderato, senza fare ipotesi su come questo sia stato prodotto nella realtà. I parametri di queste tecniche possono poi essere estratti mediante analisi dei segnali originali secondo il modello individuato. Tecniche di questo tipo sono ad esempio la sintesi per forma d'onda fissa, la sintesi additiva e la sintesi con funzioni di Walsh.

Un'altra strada seguita consiste nell'impiego di formule matematiche che generano segnali complessi senza cercare di riprodurre direttamente i segnali reali. Le caratteristiche dei suoni prodotti dipendono solo dalle proprietà matematiche delle formule. I parametri di queste tecniche vengono quindi determinati sperimentalmente, in modo da raggiungere i risultati voluti. L'esempio più importante di questo tipo è la modulazione di frequenza.

Una terza via consiste nel cercare di fare un modello del meccanismo fisico di produzione del suono. In questo modo sono inserite direttamente nel modello le caratteristiche dinamiche del suono. Inoltre risulta più facile il controllo, in quanto è possibile dare un significato fisico preciso ai singoli parametri. In genere seguendo questa strada si arriva a modelli complessi e computazionalmente poco efficienti. Infatti queste ricerche sono rivolte più allo studio sulla fisica ed acustica degli strumenti che alla produzione numerica dei suoni. In questo lavoro si è tentato di rendere computazionalmente

efficiente il modello fisico. Si è considerato il modello teorico dell'oscillatore non lineare proposto da McIntyre-Schumacher-Woodhouse¹, lo si è rielaborato e ne è stata studiata un'implementazione numerica efficiente. Questo algoritmo è stato applicato in una simulazione semplificata del clarinetto.

Il lavoro è organizzato in questo modo. Viene inizialmente presentata una spiegazione qualitativa ed intuitiva dell'oscillatore non lineare come modello di interpretazione del funzionamento degli strumenti musicali. Segue poi una sezione dedicata all'illustrazione del modello computazionale usato. In particolare vengono illustrate le tecniche che sono state trovate per renderlo computazionalmente efficiente. Vengono poi illustrate le prove effettuate con l'implementazione di queste tecniche per la simulazione del clarinetto. Alla fine vengono discussi i risultati ottenuti, evidenziando vantaggi e problemi nell'uso dell'oscillatore non lineare come tecnica di sintesi.

2. *Lo strumento musicale come oscillatore non lineare.* In generale studiando gli strumenti musicali si è abituati a ragionare in termini di modi normali. Fare i calcoli nel dominio della frequenza è la cosa più semplice in questo caso. Questo metodo è potente e comodo in sistemi lineari e tempo invarianti. Nel caso di sistemi non lineari esso può portare a notevoli complicazioni, per cui l'analisi nel tempo può essere più istruttiva.

Un esempio tipico sui modi normali è la corda tesa posta in vibrazione. Si hanno allora le configurazioni della figura 1. In tutte le configurazioni ci sono dei punti fissi detti nodi e dei punti in cui la corda si allontana al massimo dalla posizione di equilibrio: questi sono detti ventri. Quindi la corda, tranne che nei nodi, oscilla su e giù passando per lo zero. Sembrerebbe che nulla si propaghi. Questa situazione si chiama onda stazionaria. L'onda stazionaria può essere pensata come un caso particolare di propagazione: infatti è il risultato di due onde che si propagano in versi opposti. Nella figura 2 è esplicitata la configurazione f_3 .

Le due onde propagantesi in versi opposti sono state "fotografate" in tre istanti diversi. Sommando punto per punto le due onde in ciascuno dei tre istanti si ottengono le tre situazioni dei ventri riportate in basso nella figura. Per continuità, si intuisce ora come mai i ventri pulsino su e giù. La domanda a questo punto è: da dove

¹ M.E. McINTYRE - R.T. SCHUMACHER - J. WOODHOUSE, *On the oscillations of musical instruments*, "Journal of the Acoustical Society of America", vol. 74, n. 5, pp. 1325-1345, 1983.

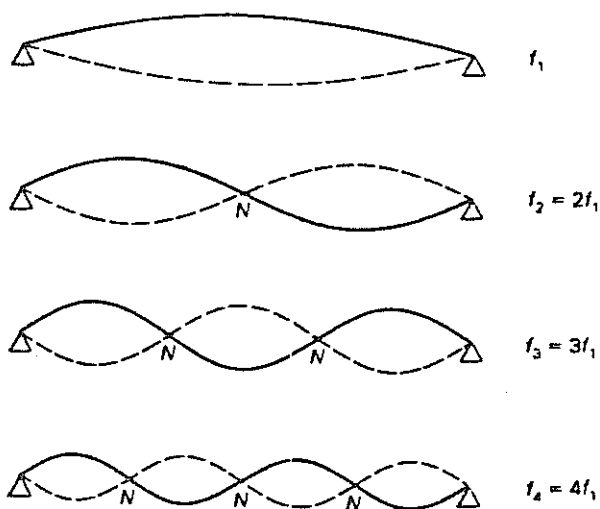


Figura 1

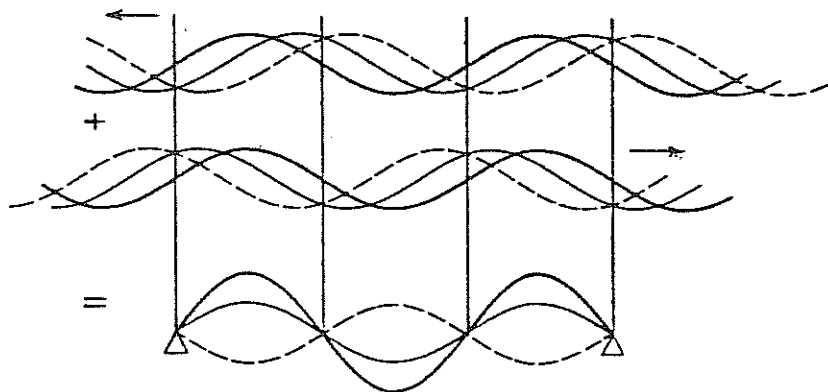


Figura 2

vengono queste onde? All'inizio, quando la corda viene eccitata, parte un'onda verso ogni estremo. Arrivata all'estremo dove è fissata la corda, si riflette e comincia a sovrapporsi all'onda diretta. Lo stesso accade all'altro estremo. A regime, quindi, ad un estremo arriva ciò che è stato riflesso dall'altro e viceversa. Nella realtà i sostegni alle

estremità delle corde non sono mai perfettamente rigidi per cui la riflessione non è mai totale. L'onda ad ogni riflessione perde di ampiezza e l'onda stazionaria risultante si smorza. In generale i sostegni si muovono di così poco da poterli considerare dei sistemi lineari. Ma si capisce bene che quando non è così, la situazione finora descritta si complica enormemente: l'onda che arriva ad un estremo, oltre a subire una riflessione ed uno smorzamento, subisce una distorsione; questa onda riflessa distorta dovrà poi fare i conti con l'altro estremo dove la distorsione sarà ancora più complicata, e così via. La conclusione è che, non appena esistono delle non linearità, l'approccio in termini di modi normali diventa insufficiente. Gli strumenti musicali hanno in genere forti non-linearità e notevoli tempovarianze. Un approccio nel dominio del tempo si impone se si vuol capire meglio il funzionamento fisico degli strumenti.

Negli strumenti a fiato le onde non sono da intendersi come spostamenti trasversali (come nel caso della corda), ma come onde longitudinali di pressione. In un'onda stazionaria i ventri sono da intendersi come punti in cui la pressione relativa è massima, e i nodi come punti in cui la pressione relativa è zero. La pressione è relativa alla pressione costante dell'ambiente (pressione atmosferica). Fatta questa precisazione, tutto quanto è stato detto sopra rimane valido, ed anzi le non-linearità al contorno sono da considerarsi macroscopiche e fondamentali, come vedremo.

In genere si crede che lo strumento a fiato sia una canna in cui, in qualche modo, si immette un suono molto ricco in frequenza (una specie di pernacchia nella tromba, quasi rumore bianco nel flauto) su cui poi la lunghezza e la sagomatura della canna opera la selezione dei modi che oscillano. Un semplice esperimento prova che così non è. Se si toglie l'imboccatura di un comune flauto e si accoppia il resto della canna con un altoparlante attraverso il quale si trasmette un suono simile al soffio prodotto nell'imboccatura, si osserverà che il flauto non oscilla. E non oscillerà neanche se il soffio fittizio trasmesso dall'altoparlante ha intensità alquanto superiore all'intensità del soffio naturale. D'altronde, si sa bene quanto basti soffiare poco per mettere in oscillazione un flauto ben costruito. Anticipando, diciamo che nel nostro esperimento esso non oscilla perché la membrana dell'altoparlante è del tutto indipendente da ciò che accade nella canna.

Uno schema molto più realistico per un oscillatore musicale è quello in figura 3. Il nucleo del presente lavoro si basa su questo schema. Nel caso di uno strumento a fiato la sorgente di energia è il soffio del suonatore; l'elemento non lineare è l'ancia nel clarinetto, le labbra negli ottoni, una lingua d'aria nel flauto: $f(t)$ è il flusso d'a-

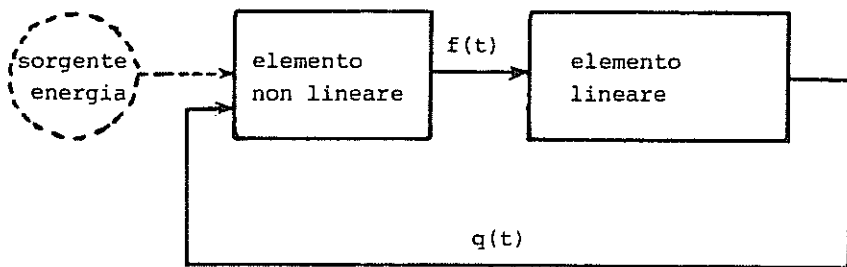


Figura 3

ria; l'elemento lineare è ciò che rimane dello strumento quando si toglie la imboccatura; $q(t)$ è la pressione acustica.

Si nota subito che il sistema è reazionato. L'elemento non lineare regola il flusso d'aria che va ad eccitare l'elemento lineare, ma a sua volta è la pressione acustica riflessa da quest'ultimo che va a comandare l'elemento non lineare.

Nel clarinetto il sistema beccuccio-ancia è un regolatore di flusso comandato dalla pressione: l'ancia si apre e si chiude più o meno in funzione della differenza tra la pressione che c'è nella bocca del suonatore e quella subito dietro l'ancia (nel beccuccio). Quando il suonatore inizia a soffiare, dal beccuccio parte un gradino di pressione, quando questo gradino arriva all'estremità opposta dello strumento, cioè alla fine della canna, esso incontra una discontinuità, e quindi viene in qualche grado riflesso. Il gradino di pressione riflesso sarà di segno opposto a quello originale, cioè sarà una "depressione"; quando questa depressione arriverà alla ancia, sarà aumentata improvvisamente la differenza di pressione bocca-beccuccio e l'ancia si chiuderà istantaneamente. A questo punto parte un'onda riflessa dall'ancia e tutto si ripete come prima solo che i segni delle pressioni sono invertiti e alla volta successiva all'ancia arriverà un'onda di pressione che la aprirà. Quanto detto dimostra non solo l'importanza dell'onda riflessa, ma spiega anche come un flusso costante (il soffio del suonatore) venga tramutato in oscillazioni di una colonna d'aria. Dopo mostreremo come il clarinetto non oscilli se si impedisce alla onda riflessa di raggiungere l'ancia: in tal caso l'ancia assume una posizione statica (eventualmente chiusa) in funzione di quanto il suonatore soffi. Il tempo impiegato dall'onda di pressione ad arrivare in fondo allo strumento (se tutti gli altri fori sono chiusi) e a tornare nel beccuccio produce la frequenza della nota che udiamo.

In una tromba il meccanismo di controllo del flusso consiste in due strisce di carne affacciate: le labbra. Il flusso d'aria emesso dal suonatore passa attraverso le sue labbra, che si aprono e chiudono regolarmente in risposta alle variazioni acustiche entro il bocchino: il flusso diventa così variabile e periodico. D'altra parte la colonna d'aria nello strumento è tenuta in oscillazione (nei suoi modi longitudinali) da questi impulsi periodici forniti dalle "valvole labbiali". Nel flauto e nella canna d'organo sembrerebbe che non vi sia nessun meccanismo di controllo del flusso. Vedremo che questo fatto, invece di indebolire la teoria secondo la quale l'onda riflessa è fondamentale negli strumenti a fiato, la rafforza.

L'imboccatura del flauto è disegnata in maniera tale che, quando si soffia, una sottile lingua d'aria va a frangersi contro un cuneo. Questa lingua d'aria costituisce allo stesso tempo sia il meccanismo di controllo del flusso, sia il flusso stesso. Lasciato a se stesso questo getto d'aria dovrebbe andare su e giù casualmente rispetto alla punta del cuneo, e si udrebbe solo il rumore tipico del soffio. Nello strumento, invece, esso si comporta come nella figura 4: va su e giù con la stessa frequenza della nota emessa. Ciò che fa "decidere" al getto se uscire o entrare nello strumento sono le condizioni di pressione nel beccuccio. Anche qui è l'onda acustica riflessa nella canna che rende possibile non solo l'oscillazione della "lingua", ma anche

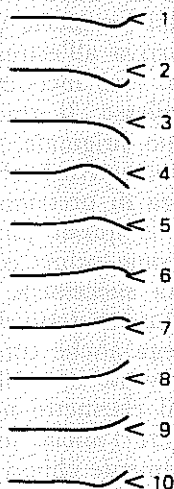


Figura 4

l'instaurarsi di una certa frequenza (come sappiamo essa è in relazione al tempo che l'onda impiega ad andare e tornare). La figura 5 è la fotocopia di una fotografia sperimentale² che mostra un getto di fumo in una canna d'organo. Si noti come la turbolenza sia a valle del cuneo. Sono queste turbolenze a produrre i residui di rumore tipici nella "voce" di questo strumento. Se le turbolenze si instaurassero a monte del cuneo, la lingua d'aria avrebbe un moto incollato e lo strumento non oscillerebbe. Il flauto traverso funziona sugli stessi principi, che anzi si applicano con maggior chiarezza.



Figura 5

Nel flauto trasverso, all'imboccatura, accadono esattamente le stesse cose che accadono alla sommità di un bottiglione quando viene fatto oscillare³. Soffiando in modo opportuno in un bottiglione esso oscilla. Nella parte superiore della figura 6 è illustrato come ciò avvenga. Parte il primo impulso d'aria che entra; arrivato in fondo si riflette; arrivato alla lingua d'aria la deflette fuori. Quando questo impulso si esaurisce il getto d'aria rientra dentro e ricomincia un altro ciclo. Sia nel flauto come nel bottiglione l'inclinazione delle labbra è essenziale per permettere alla lingua di funzionare come regolatrice di flusso. Nella parte inferiore della figura 6 è illustrata la fessura di ingresso del flauto trasverso.

Prima di costruire il modello matematico sullo schema di figura 3, dobbiamo dire qualcosa sull'elemento non lineare di uno strumento. Abbiamo detto che negli strumenti a fiato esso è la valvola di controllo del flusso comandata in pressione. Il funzionamento di que-

² D.E. HALL, *Musical acoustics*, Wadsworth Publ. Co., Belmont CA 1980.

³ A.H. BENADE, *Fundamentals of musical acoustics*, Oxford University Press, New York 1976.

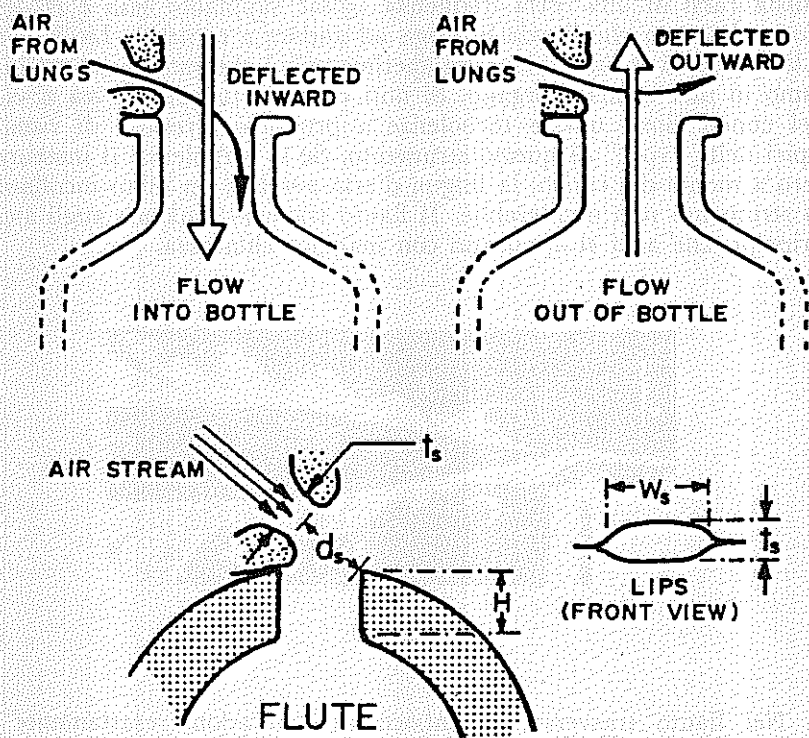


Figura 6

sta valvola è non lineare, cioè non c'è proporzionalità tra le due grandezze⁴. Per chiarezza nelle nostre applicazioni ci riferiremo al clarinetto. Nella figura 7 è riportata la sezione dell'imboccatura del clarinetto. La regolazione del flusso avviene tramite il moto dell'ancia. Un insieme di equazioni non lineari (integrale, differenziale, algebrica) governano il tutto⁵. Se si trascurano alcune grandezze dinamiche che governano l'ancia possiamo avere un approccio più pratico: tracciare la curva caratteristica della "valvola". Si tratta di trac-

⁴ J. BACKUS, *Small amplitude vibrations of the clarinet*, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 35, n. 3, pp. 305-313, 1963.

⁵ R.T. SCHUMACHER, *Self-sustained oscillations of the clarinet: an integral equation approach*, «Acustica», vol. 40, pp. 298-309, 1978.

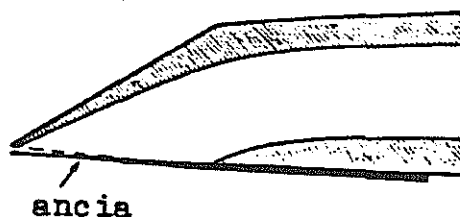


Figura 7

ciare sperimentalmente l'andamento del flusso in funzione della pressione. In figura 8 sono riportate due curve sperimentali del flusso in funzione di $P-p$; P è la pressione con cui si soffia, p è la pressione nell'imboccatura. La curva superiore si riferisce ad un'imboccatura "a labbra lasche", la curva inferiore ad un'imboccatura "a labbra strette". La curva caratteristica dell'elemento non lineare verrà usata nel modello matematico che illustreremo. Essa permette di alleggerire i calcoli di simulazione, ed inoltre cambiando curva caratteristica e pochi altri dettagli si cambia strumento.

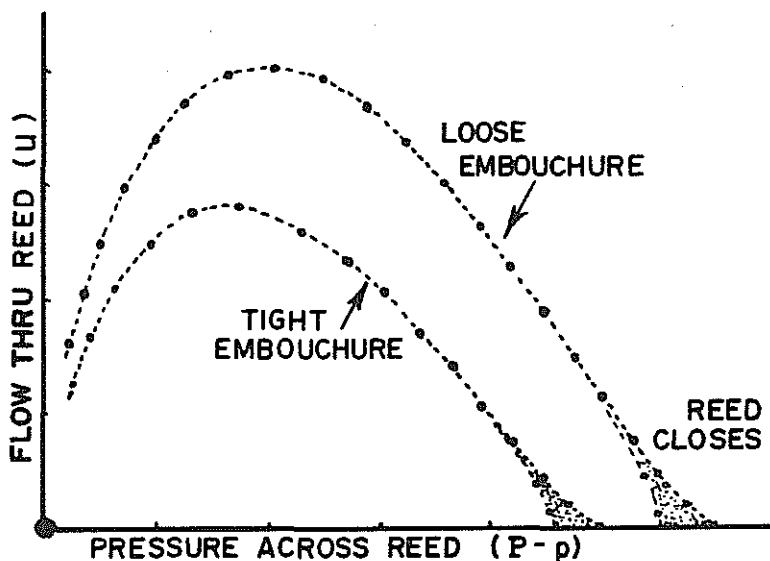


Figura 8

3. *Illustrazione del modello computazionale.* Nella simulazione degli strumenti con sintesi sottrattiva in genere si ipotizza un modello come quello di figura 9a in cui si distingue un generatore di segnali

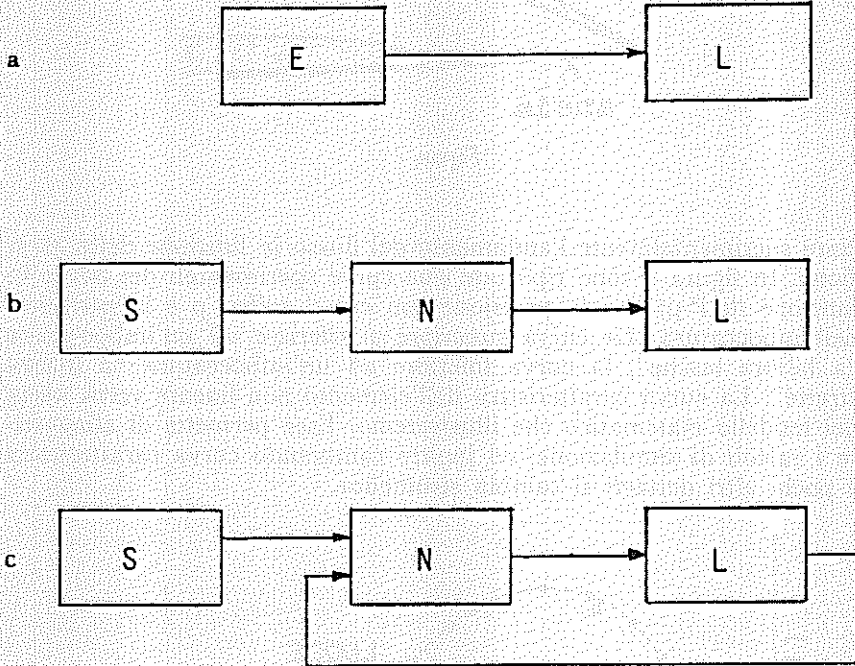


Figura 9

semplici o eccitazione e una trasformazione, in genere lineare. Il controllo si effettua indipendentemente sull'eccitazione e sulla trasformazione. Ad esempio la sintesi della voce mediante predizione lineare (LPC) prevede una eccitazione con treno di impulsi della frequenza voluta o con rumore bianco, seguito da un filtro a soli poli.

Volendo modellare meglio la eccitazione, esaminando il modello fisico si ha una sorgente di energia seguita da una trasformazione spesso non lineare e tempovariante (Fig. 9b). I parametri di questa trasformazione possono dipendere anche dalla uscita finale del sistema, per cui si giunge ad uno schema come quello di figura 9c. Questo schema è di non facile trattazione dal punto di vista matematico.

Ad esempio se si trascura la dinamica della trasformazione N e si considera costante la sorgente, l'effetto di N può essere descritto da una funzione $f(y)$. Se $g(t)$ è la risposta impulsiva (funzione di Green) della parte lineare L , l'uscita $y(t)$ risulta dalla relazione

$$y(t) = \int g(t') \cdot f(y(t-t')) dt'$$

che è un'equazione integrale non lineare di tipo di Volterra ($y(t') = 0$ per $t' < 0$).

Dal punto di vista computazionale il problema maggiore deriva dal fatto che non c'è ritardo nella reazione. Per calcolare l'eccitazione dell'elemento lineare bisogna conoscere il valore in quell'istante dell'uscita, non ancora calcolato. Una soluzione consiste nell'usare il valore calcolato precedentemente, eventualmente correggendo poi. In questo modo però si modifica il modello o lo si rende computazionalmente molto più complesso.

Un'altra soluzione consiste nel passare alle onde incidenti e riflesse, come si fa per i filtri d'onda digitali⁶. È quello fatto con successo da McIntyre e Woodhouse⁷ per gli strumenti a corda, da Schumacher⁸ per i legni e da loro generalizzati⁹ per vari strumenti.

Vengono ora illustrate le relazioni matematiche che stanno alla base del modello semplificato che usa le onde incidenti e riflesse, facendo riferimento al clarinetto¹⁰. Chiamati p_i e p_r rispettivamente le pressioni dell'onda incidente e riflessa, Z l'impedenza caratteristica del clarinetto e f il flusso entrante, p la pressione appena dentro il beccuccio, si ha che

$$\begin{aligned} Zf &= p_i - p_r \\ p &= p_i + p_r \end{aligned}$$

La pressione riflessa può essere ricavata dalla pressione incidente tramite la convoluzione con la funzione di riflessione $r(t)$

$$p_2(t) = r(t) * p_1(t)$$

⁶ A. FETTWEIS, *Digital filter Structures related to classical filter networks*, Archiv Elektronik und Übertragungstechnik, vol. 25, n. 2, pp. 79-89, 1971.

⁷ M.E. McINTYRE - J. WOODHOUSE, *On the fundamental of bowed-string dynamics*. «Acustica», vol. 43, pp. 93-108, 1979.

⁸ R.T. SCHUMACHER, *Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet*, «Acustica», vol. 48, pp. 72-85, 1981.

⁹ Vedi nota 1.

¹⁰ Vedi nota 1.

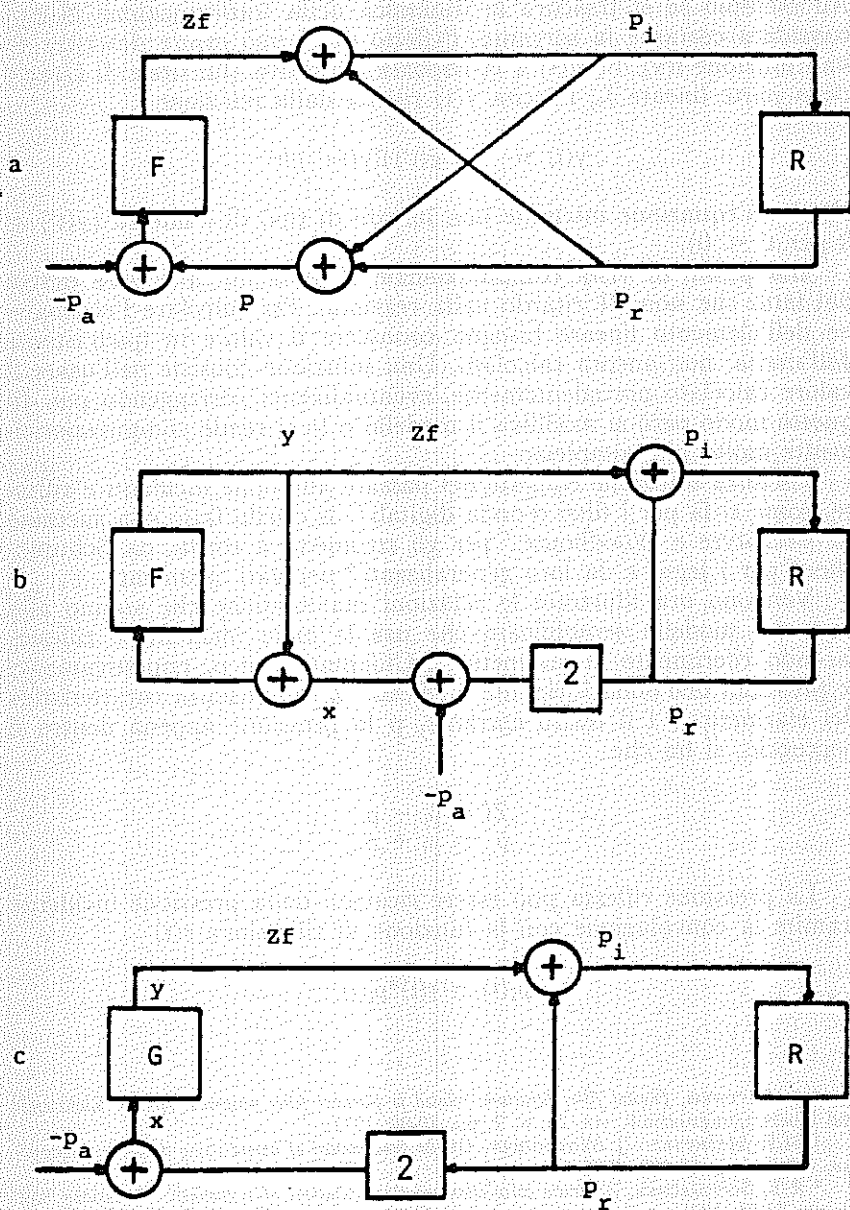


Figura 10

Si osservi che essendo il tubo aperto l'onda riflessa ha segno opposto all'onda incidente e $\int r(t)dt = -1$.

Trascurando la dinamica dell'ancia, la pressione del flusso entrante dipende solo dalla differenza di pressione tra l'interno (p) e l'esterno (p_a) dell'ancia

$$Zf = F(p - p_a)$$

Queste quattro relazioni descrivono il modello semplificato del clarinetto e sono illustrate nello schema di figura 10a. Spostando il sommatore nel ramo superiore a destra della derivazione si ottiene lo schema di figura 10b. Questo è lo schema usato da McIntyre et al. in ¹¹ per le loro simulazioni. Si noti inoltre che ad ogni campione essi calcolano esplicitamente l'integrale di convoluzione per la riflessione e risolvono il sistema non lineare per determinare il flusso entrante.

Quest'ultimo calcolo può essere evitato e fatto inizialmente una volta per tutte. Infatti chiamati x e y l'ingresso e l'uscita alla reazione senza ritardo (v. Fig. 10b) si ha che $y = F(x + y)$. Questa è una funzione implicita e si possono calcolare una volta per tutte e poi tabulare i valori di $y = G(x)$ in funzione di x , nel campo di interesse. In figura 11 è riportata la costruzione grafica che descrive questo passaggio. Dal punto di vista numerico si tratta di trovare la soluzione y dell'equazione $y = F(x+y)$ per vari valori di x , assunto come

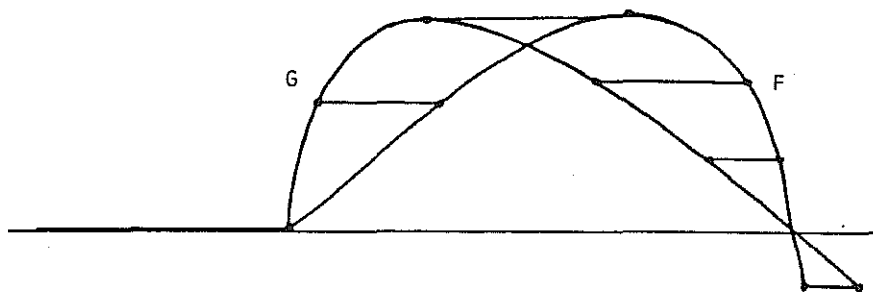


Figura 11

¹¹ Vedi nota 1.

parametro. Può succedere che questa equazione abbia più di una radice. Ciò corrisponde al caso di isteresi, illustrato in figura 12.

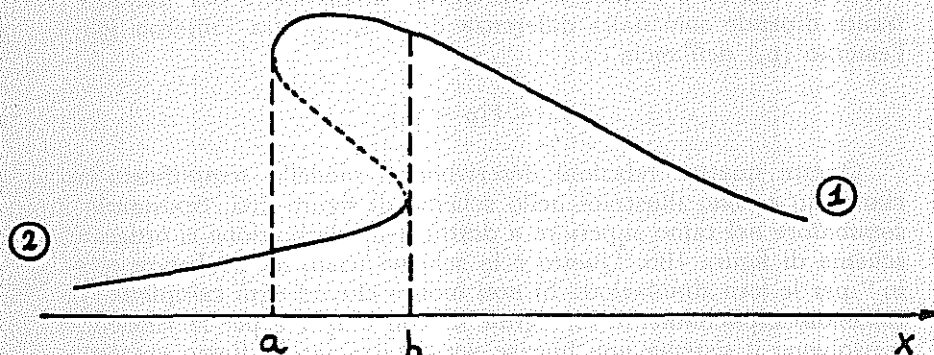


Figura 12

Questo fenomeno si verifica tipicamente negli archi, come evidenziato da Friedlander¹² e Keller¹³. Ad esempio nel caso illustrato, nell'intervallo in cui la funzione G ha più valori, si utilizzerà la parte superiore se si proviene da destra e la parte inferiore se si proviene da sinistra. Dal punto di vista computazionale occorreranno due funzioni tabulate e la possibilità di passare dall'una all'altra.

Utilizzando la funzione G corrispondente, il modello si trasforma in quella di figura 10c. In esso la moltiplicazione per 2 può essere inglobata in G e la reazione di p_r in G o in R . Ad esempio ponendo $p_i = G(2p_r - p_a) + p_r = N(p_r, p_a)$ si ottiene lo schema di figura 13. In esso la pressione applicata p_a , se è costante, può essere inclusa direttamente in N , che può quindi essere direttamente tabulata nel campo dei valori di interesse di p_a .

Per il calcolo della riflessione, non occorre eseguire ogni volta la convoluzione; infatti essa può essere schematizzata con un ritardo e un filtro numerico passabasso con inversione di segno. Il ritardo complessivo sarà pari ad un semiperiodo del suono risultante. Il modello di sintesi pertanto è costituito da una funzione non lineare tabulata, da una linea di ritardo e da un filtro numerico. I parametri di questo modello sono la funzione non lineare, la riflessione, e l'in-

¹² F.G. FRIEDLANDER, *On the oscillations of a bowed string*, «Proceedings of the Cambridge Philosophical Society», vol. 49, pp. 516-530, 1953.

¹³ J. KELLER, *Bowing of violin string*, «Communications of Pure Applied Mathematics», vol. 6, pp. 483-495, 1953.

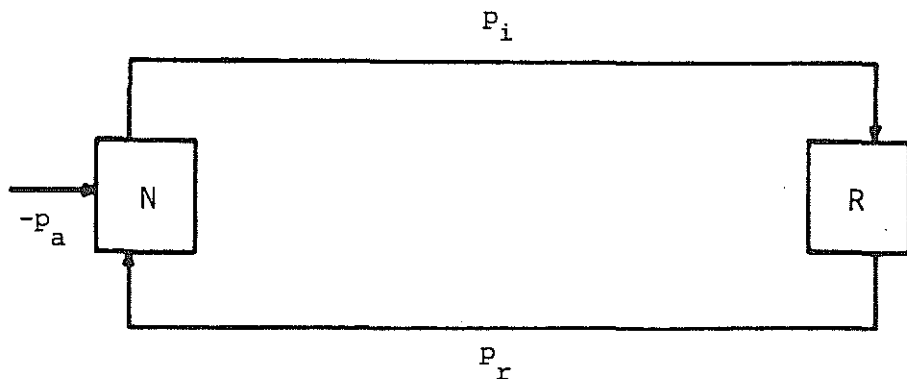


Figura 13

gresso. La funzione non lineare F può essere misurata nello strumento fisico, poi da essa si ricavano G e N con il procedimento visto sopra. Essa costituisce il meccanismo di regolazione dell'ampiezza e deve assicurare una certa stabilità alle oscillazioni. È difficile in generale predire il comportamento di una funzione qualsiasi. Se la frequenza è molto alta si possono trarre delle indicazioni trascurando il filtro. In questo caso il valore dell'uscita resta costante per ogni semiperiodo e varia secondo la relazione $x_{K+1} = N(x_K, p_r)$ dove x_K è il valore del K -esimo semiperiodo. Studiando quindi questa relazione si può vedere se le oscillazioni sono stabili, a quali valori si assestano, e in quanto tempo, se si smorzano o aumentano senza limite, se presentano periodicità a lunga durata, ecc.

Facendo il grafico dei valori di questa successione si ottiene l'inviluppo del segnale. In figura 14a sono mostrati alcuni di questi grafici per valori crescenti dell'ingresso a partire da un valore normale. Si ricordi che l'ingresso corrisponde alla pressione applicata all'ancia dal suonatore. Si può osservare come aumenti l'ampiezza dell'oscillazione e la rapidità dell'attacco.

In figura 14b si vedono i grafici per valori decrescenti. La durata del transitorio aumenta via via fino ad arrivare alle condizioni limite per l'innesco delle oscillazioni. Per valori inferiori esse si smorzano sempre più rapidamente. Le ampiezze dei vari grafici sono normalizzate nel valore massimo e quindi sono su scale leggermente diverse. I punti segnati con $+$ si riferiscono a condizioni per cui il flusso nell'ancia inverte segno, uscendo quindi dall'imboccatura. I punti separati $-$ si riferiscono a valori di pressione per cui l'ancia è chiusa. È questo meccanismo di controllo che consente stabilità alle oscillazio-

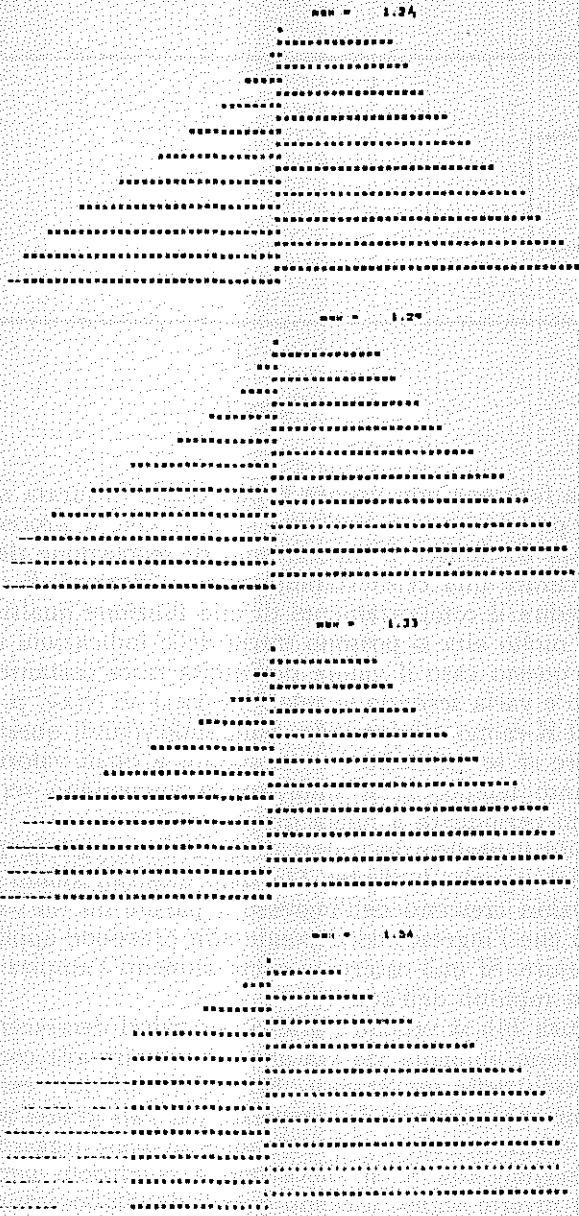


Figura 14a

ni. Differenti funzioni non lineari che modellino il comportamento dell'ancia presentano transitori un po' diversi, ma sempre dello stesso tipo.

Per quanto riguarda la riflessione, si può regolare l'attenuazione complessiva. In un tubo aperto essa è pari a -1 ; nel modello essa può essere inferiore. La frequenza del suono dipende dal ritardo complessivo. Il fatto che la linea di ritardo sia discreta, crea una granulosità fastidiosa particolarmente alle alte frequenze. Si può ovviare con l'inserzione di un filtro *all-pass* per una regolazione fine del ritardo come si fa nella simulazione della corda pizzicata¹⁴.

L'ingresso corrisponde all'intensità del soffio. Sotto o sopra certi valori le oscillazioni si smorzano rapidamente o addirittura non si innescano. La durata del transitorio e la forma d'onda finale dipendono dall'intensità del soffio. Infatti se questa è appena superiore all'intensità critica che fa iniziare le oscillazioni, è necessario un certo numero di periodi per fornire l'energia corrispondente all'ampiezza massima. Per valori superiori dell'ingresso questa può essere raggiunta quasi immediatamente. L'ampiezza massima stessa dipende, oltre che dalla funzione, anche dall'ingresso. Si può in questa maniera regolare il transitorio. Inoltre è possibile variare durante il suono l'ingresso e il modello risponderà all'incirca come un clarinetto reale. Ad esempio modificando di poco aleatoriamente l'ingresso, si possono simulare le fluttuazioni di soffio del suonatore, oppure produrre particolari effetti.

Si osservi che c'è un'analogia tra variazione del valore dell'ingresso e quella dell'*offset* nella sintesi per distorsione non lineare. In entrambi i casi si trasla la funzione non lineare. In questo caso però la presenza della reazione assicura un comportamento dinamico del modello di sintesi in qualche modo coerente con le variazioni effettuate. Se quindi si ha presente il significato fisico dei parametri su cui si agisce, si può prevedere l'effetto della propria azione. Nella distorsione non lineare invece non c'è reazione; per cui l'azione si ripercuote immediatamente nell'uscita e dipende solo dalle proprietà matematiche dei polinomi usati¹⁵.

4. *Implementazione e risultati.* Sono ora descritte le prove effettuate e i risultati sonori presentati durante il 6° Colloquio di Informatica Musicale.

¹⁴ D.A. JAFFE - J.O. SMITH, *Extensions of the Karplus Strong plucked-string algorithm*, «Computer Music Journal», vol. 7, n. 2, pp. 56-59, 1983.

¹⁵ G. DE POLI, *Tecniche numeriche di sintesi della musica*, «Bollettino LIMB», n. 1, pp. 12-44, 1981.

Per l'implementazione si è partiti dallo schema di figura 10c, in cui però la moltiplicazione per 2 è stata inglobata in G come illustrato in figura 15.

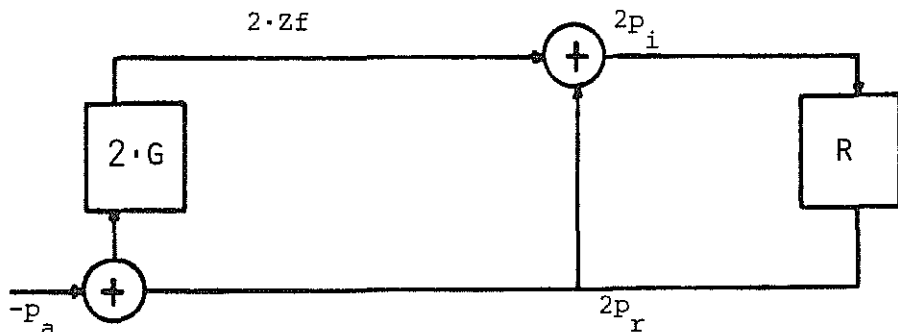


Figura 15

È stato realizzato uno strumento Music 360 per la sintesi, nonché un generatore di funzioni che tabuli la G . Nelle prove effettuate si sono unite varie funzioni non lineari F ; la più semplice, una parabola, è troppo irrealistica. È stata usata quindi una cubica descritta dall'equazione

$$F(p) = kf(p_a - p)(p - p_c)(p + p_a - 2p_c)$$

dove p_c è la pressione critica che fa chiudere l'ancia e p_a è la pressione applicata all'imboccatura. La funzione G risultante è illustrata in figura 16. Il guadagno K è stato scelto in modo che Z , impedenza caratteristica, sia unitaria. Per la riflessione è stata usata una linea di ritardo di lunghezza dipendente dalla frequenza e un filtro ricorsivo del 2° ordine.

In figura 17 viene presentato il *flow-chart* dei programmi che sono stati usati negli esperimenti al calcolatore al Csc di Padova. Si tratta essenzialmente di una lettura di tabella con reazione. I simboli sono di chiara identificazione: $PH = 2p_2$; $PI2 = 2p_i$; $ZG2 = 2Zf$.

È stato necessario dare un *offset* Ors all'ingresso X della tabella per posizionare correttamente $PH = 0$ e per il controllo dell'ingresso. Come *output* per i campioni sonori sono stati presi i valori PH . Lo schema di figura 17 è stato via via complicato senza, tuttavia, intaccare la sostanza. Per esempio si è "agganciata" la frequenza di taglio del filtro f_T al ritardo, per simulare in qualche modo la maggiore o minore lunghezza della canna.

FUNCTION NO. 2 HAS BEEN GENERATED AT TIME 0.0, AND PRODUCES THE CYCLE SHOWN BELOW.

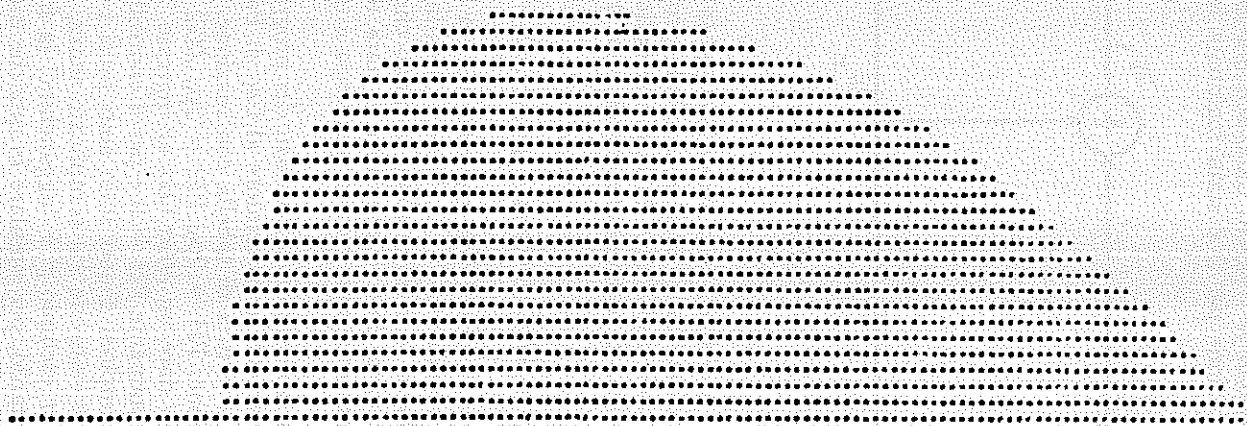


Figura 16

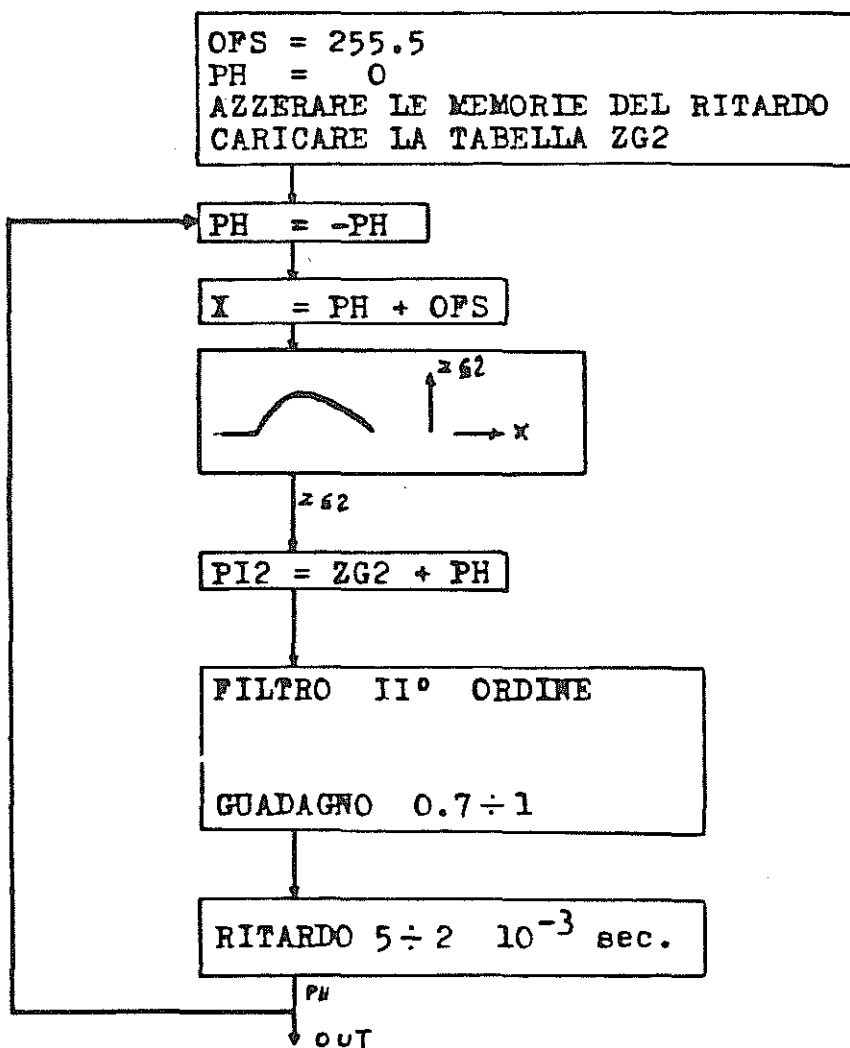


Figura 17

In figura 18 compare lo spettro di un suono prodotto con questo programma, in cui il filtro usato nella reazione è un passabanda avente i seguenti parametri: frequenza centrale $FC = 1000$ Hz, lar-

ghezza di banda LB = 1000 Hz. Esso si riferisce al suono nella canna del clarinetto. La nota è un LA3 (220 Hz).

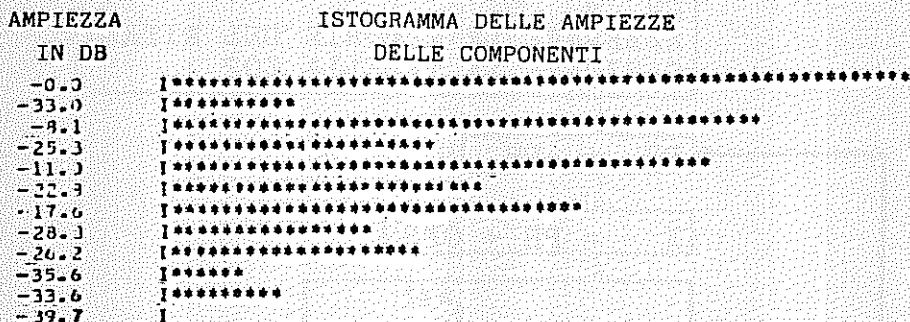


Figura 18

Per confronto in figura 19 compare lo stesso segnale filtrato in uscita con un passa alto per rendere conto, in maniera semplificata, dell'effetto di radiazione verso l'esterno della campana del clarinetto.

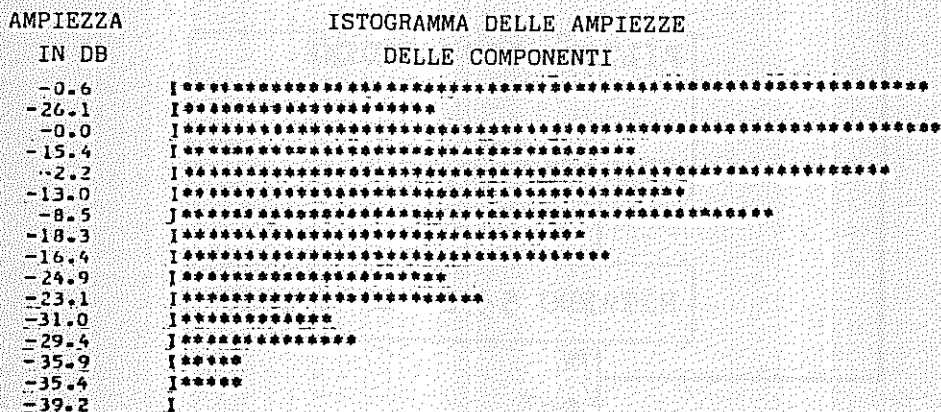


Figura 19

La frequenza di taglio FT è stata posta a 500 Hz. Questo spettro ha più armoniche significative ed è più brillante del precedente, ma si noti soprattutto come in entrambi i casi le armoniche pari siano attenuate rispetto a quelle dispari, come si verifica nel clarinetto reale.

In figura 20 compare un'altra nota (Sol# 2, 103.8 Hz) prodotta nelle stesse condizioni della precedente, cioè: filtro passabanda nella reazione con $FC = 1000$ Hz, $LB = 1000$ Hz; filtro passa alto sul segnale in uscita con $FT = 500$ Hz. Si noti come per questa nota



Figura 20

più "grave" lo spettro si sia notevolmente allargato - fenomeno tipico negli strumenti reali - pur mantenendo le caratteristiche generali (per esempi la similitudine tra gli involucri delle ampiezze).

Sono stati fatti altri esperimenti in cui si variavano le caratteristiche del filtro di reazione. Per esempio in figura 21 e in figura 22 compaiono gli spettri del suono interno della stessa nota (Fa#, 185 Hz) in cui però il filtro di reazione è un passabasso, nel primo caso con $FT = 1000$ Hz, nel secondo caso con $FT = 1250$ Hz. Le differenze tra i due spettri sono sensibili anche se la FT dei filtri è stata cambiata di poco.

AMPIEZZA
IN DB

ISTOGRAMMA DELLE AMPIEZZE
DELLE COMPONENTI

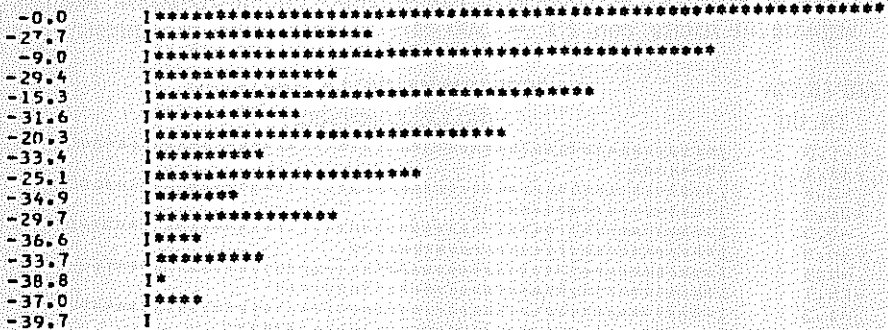


Figura 21

AMPIEZZA
IN DB

ISTOGRAMMA DELLE AMPIEZZE
DELLE COMPONENTI

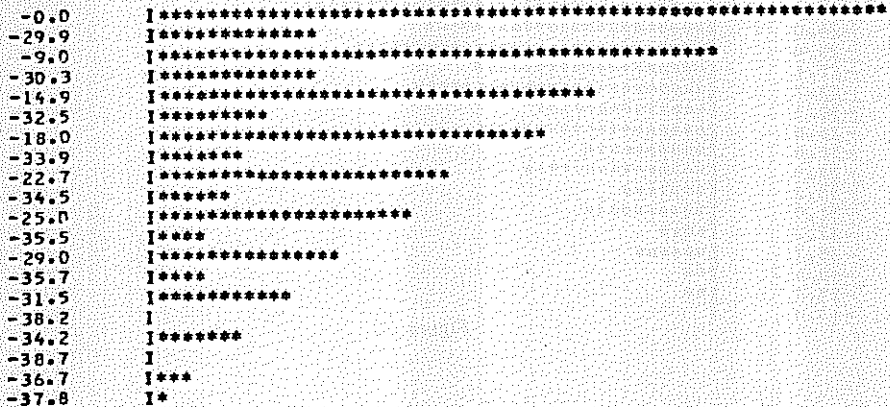


Figura 22

In figura 23 compare un'altra nota (Re_3 , 146.8 Hz) sempre con frequenza di taglio del filtro passabasso a 1250 Hz come nel caso di figura 22. Anche qui compare il fenomeno dell'allargamento dello spettro col calare della fondamentale.

Per simulare la non costanza del soffio del suonatore è stato aggiunto all'*offset* Ors una leggera fluttuazione casuale subsonica con

AMPIEZZA
IN DB

ISTOGRAMMA DELLE AMPIEZZE
DELLE COMPONENTI

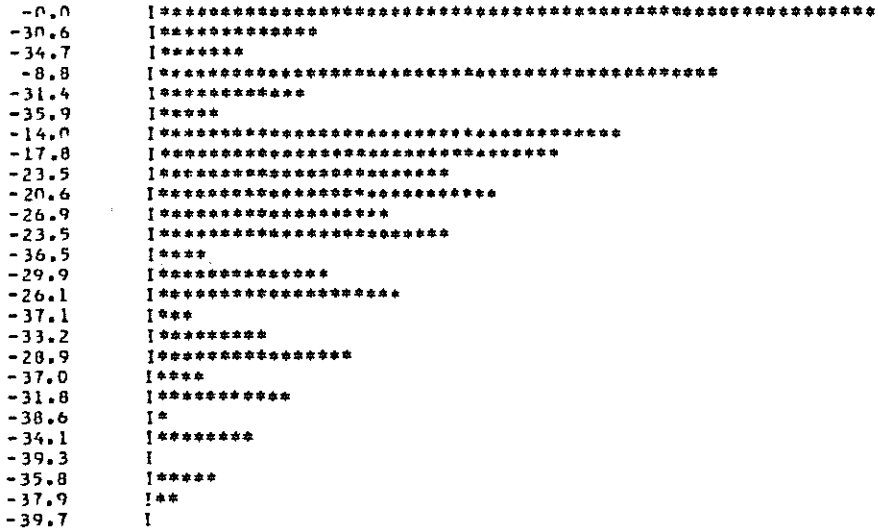


Figura 23

frequenza 5 Hz. Per quanto riguarda l'ampiezza, usando valori di $5 \div 10$ unità, confrontati con $Ors = 255$ unità e $p_a - p_c = 424$ unità, si ottengono i risultati migliori, aggiungendo realismo alla simulazione. Aumentando questi valori si sono ottenuti risultati sorprendenti, in quanto il clarinetto simulato devia dal funzionamento normale per produrre effetti sonori imprevisti.

Con un'ampiezza della deviazione *random* superiore a 25 unità, in alcuni provini si può sentire il "clarinetto" che inizia normalmente con una nota, poi dopo alcuni secondi "l'ancia" si inceppa, ha delle esitazioni e lo strumento perde l'intonazione salendo tipicamente di una quinta e cambiando registro. Si ha l'impressione di sentire un suonatore poco esperto (o molto bravo!). Imponendo invece un'ampiezza di *random* uguale a 40 unità lo strumento perde quasi istantaneamente l'intonazione, ma all'inizio si può udire chiaramente il "battito dell'ancia". Il suono è così realistico che sembra concreto. Inoltre spesso compare un soffio-rantolo altrettanto realistico, che deriva da instabilità nello strumento simulato creata dal *random* subsonico applicato all'ingresso.

Un'ulteriore sperimentazione, come già accennato, ha riguardato l'ampiezza del *random* aggiunto all'*offset* Ors. Nella figura 24 sono

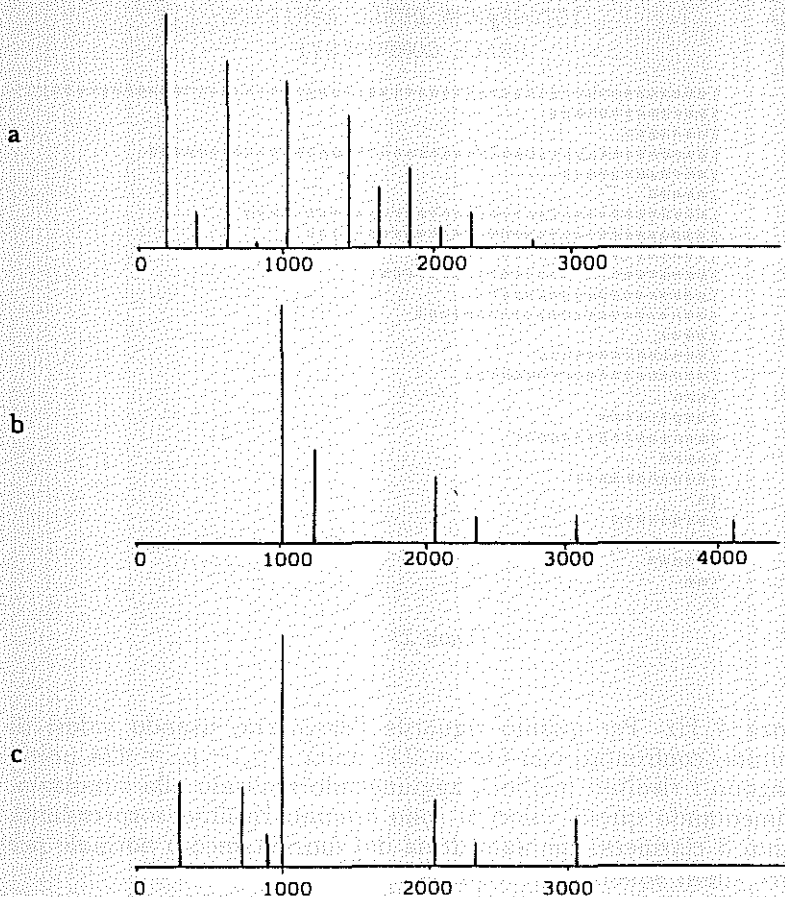


Figura 24

riportati gli spettri della stessa nota (La3) con *random* crescenti. In figura 24a il *random* è di 15 unità. Lo si può agevolmente confrontare con altri spettri della stessa nota presenti in questo lavoro. Gli spettri di figura 24b e c riguardano un *random* di 30 e di 40 unità rispettivamente. Siamo nel caso delle instabilità e si può notare la inarmonicità degli spettri e la prevalenza della quinta armonica.

Infine è stato fatto un esperimento in cui è stata usata nella tabella una "spezzata" generica e, abolito il filtro. Il segnale in uscita dalla tabella veniva sommato all'ingresso ritardato e rispedito indie-

tro senza cambiarlo di segno, moltiplicando per un guadagno minore di uno. Il risultato sonoro produce un timbro completamente differente da quello del clarinetto ed indica chiaramente come con questo algoritmo si possono creare, con poco sforzo computazionale, suoni molto ricchi timbricamente.

5. *Conclusioni.* L'idea di simulare gli strumenti musicali è stata presente sin dalle prime applicazioni degli elaboratori alla musica con due obiettivi di fondo: conoscere meglio la fisica dello strumento e confrontare le tecniche di sintesi, via via proposte, con un riferimento preciso. Da una parte si sfrutta la sintesi come aiuto nell'analisi, dall'altra si utilizzano i risultati dell'analisi per la scelta dei parametri della sintesi. Il primo approccio però porta a modelli computazionalmente molto complessi, mentre il secondo a modelli troppo semplificati. Questo lavoro si inserisce nella tendenza ad avere modelli abbastanza semplici, ma che facciano riferimento ad un modello fisico¹³⁻¹⁷.

Fra i vantaggi di questo approccio si può citare il fatto che la struttura del modello è derivata dall'osservazione della realtà. Si può attribuire un significato fisico preciso ai parametri del modello, prevedendo quindi il risultato di ogni scelta. Questo evidentemente aiuta molto chi deve poi usare l'algoritmo in un contesto compositivo. Forse l'aspetto più interessante sta nel fatto che il modello è dinamico. Esso quindi segue le variazioni dei parametri di ingresso con un transitorio che è tipico dello strumento simulato. Vengono così naturalmente riprodotti l'attacco, il decadimento, le articolazioni ecc. Se le variazioni sono piccole il modello si comporta naturalmente in modo coerente, migliorando così notevolmente la qualità del timbro. È infatti molto importante che il modello abbia un comportamento fisicamente e percettivamente coerente specie alle piccole variazioni e questo può essere ottenuto nelle tecniche di sintesi tradizionali spesso solo con complicati controlli dei parametri¹⁸. Si può infine citare la possibilità di estendere e variare le caratteristiche dello strumento e di ottenere modi di funzionamento non convenzionale.

¹⁶ C. CADDOZ - A. LUCIANI - J. FLORENS, *Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanism: the Cordis system*, «Computer Music Journal», vol. 8, n. 3, pp. 60-73, 1984.

¹⁷ K. KARPLUS - A. STRONG, *Digital synthesis of plucked-string and drum timbres*, «Computer Music Journal», vol. 7, n. 2, pp. 43-55, 1983.

¹⁸ A. RIOTTE, *Un modele informatique pour la transformation continue de sons inharmoniques*, «Proceedings of ICMC '84», pp. 43-51, 1984.

Questa tecnica di sintesi presenta anche dei problemi, sia teorici che pratici. È infatti difficile prevedere dal punto di vista matematico, l'effetto preciso della scelta di una funzione qualsiasi o di una reazione arbitraria. Non ci sono cioè mezzi semplici, come le funzioni di Bessel per la modulazione di frequenza o i polinomi di Chebyshev per la distorsione non lineare, che consentono di calcolare rapidamente lo spettro risultante. Questo forse non è un grosso problema per l'utente se impiega un modello già sperimentato. Dal punto di vista pratico si può osservare che spesso i dati sulla fisica dello strumento sono imprecisi e non facilmente disponibili. Inoltre bisogna valutare le semplificazioni introdotte in modo da rendere conto dei fenomeni percettivamente più significativi, e cercare di semplificare al massimo gli altri. Bisogna poi calibrare con cura il modello e determinare significato e campo di variabilità dei valori numerici dei parametri. Nel modello qui usato inoltre c'è da fare attenzione al controllo della frequenza, che dipende dal ritardo complessivo della reazione. Spesso i parametri si influenzano a vicenda, per cui si può affermare in definitiva che per un uso efficace bisogna imparare e suonare lo strumento simulato, così come si impara a suonare gli strumenti reali.

¹⁹ J.O. SMITH, *Techniques for digital filter design and system identification with application to the violin*, Ph.D. Diss., Stanford University, Stanford CA, 1983.

²⁰ J.M. ADRIEN - X. RODET, *Physical models of instruments: a modular approach, application to strings*, «Proceedings of ICMC '85», pp. 85-90, 1985.

²¹ G. DE POLI, *A tutorial on digital sound synthesis techniques*, «Computer Music Journal», vol. 7, n. 4, pp. 8-26, 1983.