

4.1 Introduzione

I recenti sviluppi applicativi del *design del suono* offrono opportunità notevoli al giovane che si avventuri nello studio di questa disciplina, opportunità che muovono dalla creazione artistica fino al *sound branding*, alla realizzazione di interfacce uditive per computer, giocattoli, dispositivi elettronici di ogni tipo, nonché alla scrittura di software per la generazione, il controllo, la manipolazione e la gestione del suono. Parallelamente a queste opportunità esiste tuttavia un problema di professionalità che, proprio in virtù degli spiccati legami con la musica e l'arte, fa del *sound designer* una figura poliedrica e di difficile collocazione: è dunque il *sound designer* un musicista, un artista in senso lato? È un esperto di utilizzo o di programmazione del calcolatore? Deve sapersi muovere con competenza in uno studio di registrazione, tra le centinaia di manopole e pulsanti posti sui pannelli delle effettiere e dei mixer? Deve conoscere persino il marketing di prodotto nel momento in cui si affida, al pari del designer grafico, a cataloghi di soluzioni con un focus nel settore in cui il brand deve essere valorizzato?

L'attività PLS di Sintesi ed elaborazione del suono propone, non provocatoriamente, un'ulteriore categoria: il sound designer è un *matematico*. Un suono, infatti, è certamente oggetto di manipolazioni, ricombinazioni e sovrapposizioni tanto più autorevoli quanto maggiori sono le conoscenze artistiche di chi lo rielabora, ma come nasce un suono di sintesi? Come si abilita una macchina, in particolare un computer, a sintetizzare un suono avente certe caratteristiche? In verità, tanto naturale è la generazione di un suono adoperando strumenti e oggetti concreti, quanto astrattamente matematica diventa la stessa attività nel momento in cui viene formalizzata nei modelli di sintesi.

L'attività PLS che è stata proposta puntava a fornire un'idea iniziale della complessità di questa astrazione.

4.2 Inquadramento storico

Il design del suono ha acquisito un'importanza via via crescente nella comunicazione contemporanea. Fino agli anni '80 è stato dominio esclusivo di un mondo prettamente artistico, impersonato da compositori, musicisti con la passione della tecnologia, rumoristi di cinema e di teatro capaci di realizzare nuovi suoni grazie a una profonda conoscenza della materia e dei suoi strumenti. Negli ultimi trent'anni, invece, il design del suono ha attraversato un imponente processo di volgarizzazione grazie all'avvento dell'elettronica a basso costo, che ha permesso a chiunque di accedere agli strumenti per la sintesi, il controllo e l'ascolto di suoni musicali e, con l'affermarsi



Figura 4.1: Anni '60: Studio di Fonologia RAI di Milano.

del personal computer, di avere accesso a generatori sonori in grado di sintetizzare in linea di principio *qualunque* suono possibile e immaginabile.

Gli effetti di questo processo sono stati oltremodo pervasivi: oltre alla nascita di una diffusa cultura della creazione musicale non più dominata solo dai grandi *studios* di produzione, il design del suono ha esteso la propria influenza in aree quali il marketing e il *branding*; gli stessi computer, che ne avevano sdoganato l'accesso a chiunque, presentano attualmente delle interfacce utente corredate da una miriade di icone uditive. Oggi esse sono più che mai alla ribalta, soprattutto a seguito della diffusione di smartphone, tablet e altri dispositivi mobili, in cui l'audio riveste un ruolo particolarmente rilevante per quanto riguarda l'interazione.

In definitiva possiamo tranquillamente affermare che una nuova epoca della comunicazione uditiva si è definitivamente affermata: i suoni di sintesi complementano costantemente e talvolta si sostituiscono al suono naturale con cui gli esseri umani hanno convissuto per millenni, intrattenendo un rapporto via via meno esclusivo man mano che la gamma di suoni artificiali e musicali si è arricchita. La vera e propria rottura risale all'inizio del secolo scorso, quando è iniziata la riproduzione artificiale del suono mediante l'altoparlante radiofonico, telefonico, stereofonico e infine televisivo, seguita a ruota dai primi esperimenti di musica elettronica, in cui il suono non è più necessariamente riconducibile a un oggetto sonante fisicamente esistente.

4.3 Descrizione

Nell'introduzione si è tentato di motivare l'attività del laboratorio di Sintesi ed elaborazione del suono all'interno del PLS di Matematica e Statistica. Concretamente, nel corso delle 16 ore previste per le attività si è posta enfasi sui fondamenti matematici che sono alla base delle tendenze più attuali della disciplina all'interno dell'informatica contemporanea. La progettazione di sistemi multimediali e la

realizzazione di interfacce impone infatti, in aggiunta alla tradizionale modalità visuale, lo sfruttamento di canali sensoriali alternativi quali quello uditivo. Secondo questa visione, l'importanza del suono come vettore di informazione deriva dal fatto che il sistema uditivo, diversamente da quello visivo, è un canale sempre aperto e naturalmente capace di discriminare o integrare eventi temporali. Inoltre questi eventi sono spesso correlati con informazioni di tipo tattile.

Nel corso del laboratorio sono state dapprima spiegate e successivamente applicate alcune metodologie di base per la sintesi e l'elaborazione del suono in tempo reale. In altre parole, esse garantiscono che il ritardo necessario per generare il suono a seguito di una richiesta al sintetizzatore sia talmente esiguo da non poter essere percepito dall'utilizzatore umano - si pensi ad esempio a un musicista che preme il tasto di un pianoforte digitale, che genera un suono già pronto all'uso nella memoria dello strumento, piuttosto che riprodurlo.

Alla spiegazione, perlopiù teorica, sono state dedicate 10 ore. Oltre alla lavagna, il docente ha fatto uso del testo *Introduction to Sound Processing* di Davide Rocchesso [38], reperibile anche pubblicamente nel web. Nello specifico queste ore sono state suddivise nel seguente modo:

- 2 ore di rudimenti di psicologia della percezione uditiva (psicoacustica) in cui si è posto l'accento, nell'ordine, sulla trasduzione del segnale di pressione sonora nel corrispondente meccanico da parte del timpano, e sulla successiva traduzione in perturbazione fluidodinamica all'interno della coclea. A questo punto si è insistito sul ruolo della membrana cocleare come analizzatore spaziale, in grado di rilevare l'evoluzione nel tempo delle diverse componenti frequenziali che compongono un suono.
- 2 ore in cui, facilitati dalle nozioni di psicoacustica, gli allievi hanno acquisito l'interpretazione matematica del segnale di pressione sonora come somma di una serie di componenti sinusoidali, avvicinandosi in tal modo in maniera semplificata alla più rigorosa decomposizione in serie di Fourier di una funzione periodica, attraverso un percorso concreto che ha condotto in pratica alla nozione di *spettro* di un segnale.
- 3 ore dedicate a un'introduzione ai segnali a tempo discreto, alla loro struttura e principali proprietà formali, e infine alla loro possibilità di rappresentare nel dominio digitale l'intera informazione contenuta in un segnale periodico a tempo continuo. In tal modo, ancora una volta si è tentato di motivare concretamente la capacità del calcolatore elettronico di immagazzinare in memoria una quantità di dati finita ma sufficiente a rappresentare il suono da riprodurre senza perdita d'informazione.

L'evidenza dell'equivalenza dell'informazione a tempo continuo con quella discreta è stata giustificata in termini di egua-

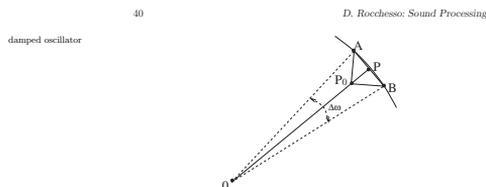


Figure 18: Graphic construction of the bandwidth. P_0 is the pole. $\overline{P_0P} \approx 1-r$.

The transfer function (39) can be expanded in partial fractions as

$$H(z) = \frac{G}{(1-re^{j\omega_0}z^{-1})(1-re^{-j\omega_0}z^{-1})} = \frac{G/(1-e^{-j2\omega_0})}{1-re^{j\omega_0}z^{-1}} + \frac{Ge^{-j2\omega_0}/(1-e^{-j2\omega_0})}{1-re^{-j\omega_0}z^{-1}} \quad (45)$$

and each addendum is the Z transform of a causal complex exponential sequence. By manipulating the two sequences algebraically and expressing the sine function as the difference of complex exponentials we can obtain the analytic expression of the impulse response⁷

$$h(n) = \frac{Gr^n}{\sin \omega_0} \sin(\omega_0 n + \omega_0) \quad (46)$$

The impulse response is depicted in fig. 19, which shows that a resonant filter can be interpreted in the time domain as a damped oscillator with a characteristic frequency that corresponds to the phase of the poles in the complex plane.

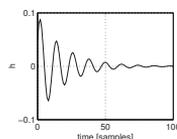


Figure 19: Impulse response of a second-order resonant filter

⁷The reader is invited to work out the expression (46).

Figura 4.2: Estratto dal libro di testo (sezione sui risonatori digitali) [38].

gianza degli spettri dei segnali nei diversi domini temporali. Ciò ha richiesto di caratterizzare, a valle di quello a tempo continuo, lo spettro del segnale digitale, conducendo di conseguenza alla nozione di componente sinusoidale discreta, di trasformata di Fourier a tempo discreto e infine di trasformata di Fourier discreta (senza insistere eccessivamente sugli aspetti formali).

Ancorché la presentazione non fosse completamente rigorosa, è stato questo il momento in cui agli studenti è apparso più chiaro il significato della tradizionale catena ingresso-uscita di audio digitale, la quale:

- i) in ingresso, partendo dall'acquisizione microfonica del segnale di pressione ne effettua una conversione analogico/digitale e successivamente quantizza i campioni nella memoria del calcolatore;
- ii) in uscita inizialmente legge i dati in memoria e, dopo averli interpolati in un segnale continuo attraverso una conversione digitale/analogica, provvede ad amplificarli e infine a riprodurli nuovamente come segnali di pressione sonora mediante un altoparlante.

- 3 ore sono state infine dedicate alle manipolazioni di segnale

che hanno per oggetto i dati presenti nella memoria del calcolatore. La ricchezza e la complessità delle tecniche di elaborazione del segnale audio digitale non poteva che essere minimamente sfiorata in un simile lasso temporale. Nondimeno, agli studenti sono stati presentati gli elementi fondamentali utilizzati rispettivamente nel *filtraggio* e nella *sintesi additiva* di audio digitale. Ciò ha permesso di apprezzare in buona misura le potenzialità del trattamento dei suoni nel dominio discreto.

Per quanto riguarda il filtraggio, si è illustrato come lo spettro di un segnale digitale possa essere agevolmente sagomato attraverso opportuni filtri. Tra i possibili modelli, particolare enfasi è stata posta sui *risonatori* come blocchi di filtraggio in grado di selezionare specifiche componenti frequenziali di segnale, governandone nel contempo il decadimento. A questo scopo sono stati chiariti i meccanismi relativamente intuitivi alla base della possibilità di accordare detti filtri, ottenendo una serie di effetti variabili anche in base al tipo di sollecitazione effettuata al loro ingresso.

Per quanto riguarda la sintesi, l'argomento è stato affrontato con sforzo tutto sommato relativo sulla base delle nozioni di filtraggio appena acquisite. In particolare, l'accento è stato posto sulla possibilità di realizzare degli *oscillatori* come caso particolare dei filtri risonanti; parimenti si è spiegato come un risonatore diventi di fatto un generatore di suono non appena esso venga sollecitato con un ingresso *impulsivo* ovvero *rumoroso*.

Con ciò si è concluso l'apprendimento teorico di base degli studenti.

Nelle successive 6 ore gli allievi hanno potuto osservare e successivamente applicare gli strumenti concettuali precedentemente acquisiti all'interno dei laboratori del Dipartimento di Matematica e Informatica. In particolare:

- 3 ore sono state dedicate a presentare i risultati allo stato dell'arte nella sintesi del suono, tra cui alcuni ottenuti nel Laboratorio HCI dipartimentale di cui il docente fa parte.

Dapprima si sono mostrate delle realizzazioni di oscillatori e banchi di filtri sviluppate attraverso gli ambienti di programmazione visuale Max/MSP e Puredata. Esse hanno evidenziato come la programmazione di sistemi e modelli per la sintesi risulti notevolmente semplificata se si svolge all'interno di ambienti di alto livello, specificatamente volti a creare un punto di contatto tra il designer di suoni e il materiale acustico, risolvendo in modo automatico il problema dell'ingegnerizzazione del software deputato alla sintesi.

Successivamente si è presentato un sofisticato sistema software per la sintesi di suoni di pianoforte in tempo reale, corredato da un modulo parimenti elaborato per il controllo dei parametri di sintesi. Questo sistema ha costituito la base per lo sviluppo di un pianoforte digitale di fascia professionale attualmente in

commercio: attraverso la comprensione di alcune tra le sue molteplici funzioni, gli studenti hanno potuto comprendere meglio l'eccezionale complessità di cui si compone un'applicazione allo stato dell'arte per l'intonazione e la taratura fine di un modello per la sintesi digitale di suoni musicali.

- le 3 ore conclusive sono trascorse dando la possibilità agli studenti di programmare esplicitamente un banco di risonatori, al fine di far eseguire al calcolatore una semplice melodia, simile a quelle prodotte da un telefono portatile di vecchia generazione durante l'arrivo di una chiamata. In pratica il docente ha realizzato un semplice modello per la sintesi all'interno dell'ambiente di programmazione Matlab, che propone un approccio basato su linguaggio di *scripting*, sollevando nel contempo il programmatore dall'accedere alle risorse di basso livello quali la scheda audio e i suoi driver. Ciò ha permesso agli studenti di istanziare i parametri significativi dei risonatori e successivamente di far eseguire la melodia al sistema di sintesi, interagendo attraverso un'interfaccia puramente testuale.

Qui sotto si riporta parte del codice Matlab che è stato messo a disposizione degli studenti per creare le loro composizioni:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Lab. PLS Suoni 5/3/2012
% Sintesi mediante banco oscillatori smorzati
% https://www.dimi.uniud.it/Members/federico.fontana/
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;          % inizializza lo stato del sistema

n_res = 4;         % numero di filtri risonatori nel sintetizzatore

time_s = 7;       % durata del tune

Fs = 44100;       % frequenza di campionamento DEL SISTEMA

samples = Fs * time_s; % campioni d'uscita

res_param = zeros(3*n_res,samples); % tabella dei parametri [[A,f,tau],...,[A,f,tau]]' dei risonatori

bo = zeros(n_res,samples); % tabella dei coefficienti bo dei risonatori
a1 = zeros(n_res,samples); % tabella dei coefficienti a1 dei risonatori
a2 = zeros(n_res,samples); % tabella dei coefficienti a2 dei risonatori

x = zeros(n_res,samples); % ingressi ai risonatori (solo impulsi; si potrebbe generalizzare)
y = zeros(n_res,samples); % uscite dai risonatori (di cui si adoperano anche i valori passati)

% codifica dello score (spartito)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% IL "COMPOSITORE" INTERVIENE QUI
% regola: ripetere le righe di codice qui sotto
% ordinate per tempi t crescenti
%
% A OGNI modifica di t, res, e/o param
% anche congiunti ACCODARE SEMPRE LE RIGHE
% res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' + ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
% x(res,ceil(t*Fs)) = 1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% t = 0.05 s

t = 0.05;          % al tempo t = 0.05 s...

res = 1;           % ...per il risonatore 1...
param = [1,1175,0.1]; % ...[A,f,tau] = [1,1000,1]

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' + ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

```

```

res = 2; % ...per il risonatore 2...
param = [1,1760,0.1]; % ...[A,f,tau] = [1,1000,1]

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

% t = 1 s

t = 0.10; % al tempo t = 1 s...

res = 1; % ...per il risonatore 1...
param = [1,1175,0.1]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

res = 2; % ...per il risonatore 2...
param = [1,1397,0.1]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

t = 0.50;
res = 3; % ...per il risonatore 3...
param = [1,1976,0.8]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

res = 4; % ...per il risonatore 4...
param = [1,1397,0.8]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

t = 0.70;
res = 1; % ...per il risonatore 3...
param = [1,1319,0.8]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

res = 2; % ...per il risonatore 4...
param = [1,1319,0.8]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

t = 0.90;

[...]

RESTO DELLA MELODIA

[...]

res = 4; % ...per il risonatore 4...
param = [1,1760,0.8]; % ...[A,f,tau] = ...

res_param(3*(res-1)+1:3*(res-1)+3,ceil(t*Fs):ceil(time_s*Fs)) = param' * ones(1,ceil(time_s*Fs)-ceil(t*Fs)+1);
x(res,ceil(t*Fs)) = 1;

% t = ? s ...

% calcolo dei coefficienti preliminare all'esecuzione

bo = res_param(1:3:3*n_res,:) .* exp(-1./(Fs*res_param(3:3:3*n_res,:))) .* sin(2*pi*res_param(2:3:3*n_res,:)/Fs);
a1 = -2 .* exp(-1./(Fs*res_param(3:3:3*n_res,:))) .* cos(2*pi*res_param(2:3:3*n_res,:)/Fs);
a2 = exp(-2./(Fs*res_param(3:3:3*n_res,:)));

% esecuzione (offline oppure REAL TIME) da parte del computer

y(:,1) = bo(:,1) .* x(:,1);
y(:,2) = bo(:,2) .* x(:,2) - a1(:,2) .* y(:,1);

for n = 3:ceil(time_s*Fs)
    y(:,n) = bo(:,n) .* x(:,n) - a1(:,n) .* y(:,n-1) - a2(:,n) .* y(:,n-2);
end

wavwrite(sum(y)/max(abs(sum(y)))/1.001, Fs, 'tune.wav');

```

Quest'ultima fase ha visto un attento e sincero coinvolgimento da parte degli studenti. Incentivando la classe attraverso una competizione che prevedeva un premio simbolico, le ultime ore di laboratorio hanno evidenziato una sorprendente ricettività del gruppo nei confronti di una serie di concetti di non immediata comprensione, testimoniando in definitiva il pieno successo dell'iniziativa.

4.4 La voce della scuola

La scuola ha fatto sentire la propria "voce" in primo luogo attraverso il lavoro finale della classe; la significatività delle composizioni degli studenti dipende specialmente dai rudimenti di lettura e composizione di brani musicali in loro possesso. Le composizioni stesse possono essere scaricate all'indirizzo <https://www.dimi.uniud.it/scuole/pls/moduli/matematica-per-la-sintesi-di-suoni/>.

Il laboratorio ha visto la partecipazione delle classi di Marina Adriano e Anna Maria Orlandi, entrambe insegnanti di Matematica presso il Liceo delle Scienze Applicate di Udine. Le docenti hanno per prima cosa tratteggiato il contesto delle rispettive classi in termini di retroterra culturale e disponibilità all'apprendimento. In base a questi assunti sono state pianificate le attività di apprendimento teorico e applicativo: in particolare, la proposta di collegare l'attività di valutazione delle capacità acquisite dagli studenti alla creazione di semplici "phone tunes" ottenuti mediante controllo in tempo e frequenza di un piccolo banco di oscillatori progettato durante il laboratorio è stata della professoressa Anna Maria Orlandi.

4.5 Conclusioni

Il Laboratorio di Sintesi ed elaborazione del suono ha offerto un approccio complementare alla tradizione del PLS: partendo dalla generazione del suono, la quale si configura inizialmente come un fenomeno perlopiù empirico e dalle connotazioni soprattutto artistiche, il laboratorio ha gradualmente portato gli studenti a scoprire una serie di risultati rigorosi che sono alla base della sintesi nel dominio digitale. Giunti in possesso di un bagaglio minimale di nozioni, gli stessi studenti hanno potuto applicarle in maniera proporzionalmente collegata alle loro conoscenze musicali e soprattutto alla loro creatività.

Da questo punto di vista il Laboratorio di Sintesi ed elaborazione del suono ha centrato l'obiettivo di far comprendere come matematica e creatività non viaggino mai scorrelate tra loro, e come l'utilizzo della seconda all'interno degli ambiti precisi segnati dalla prima possa portare a risultati di estremo interesse applicativo, artistico e non solo.

4.6 Ringraziamenti

L'autore ringrazia i tecnici del Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università di Udine, i quali hanno dato un contributo fondamentale al funzionamento delle postazioni di laboratorio utilizzate nella realizzazione dell'attività conclusiva.

Riferimenti bibliografici

- [38] D. Rocchesso. *Introduction to Sound Processing*. Online available at <http://www.faqs.org/docs/sp/>. Florence, Italy: Mondo Estremo, 2003.

