

Università della Calabria

Dottorato di Ricerca in
Psicologia della Programmazione e Intelligenza artificiale
XXII Ciclo
Settore disciplinare: MAT/07

Tesi di Dottorato

Complessità e Musica

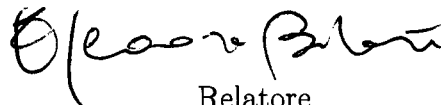
Candidato

Costantino Rizzuti



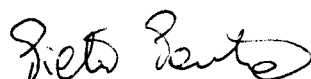
Coordinatore del Collegio dei Docenti

Prof.ssa Eleonora Bilotta



Relatore

Prof. Pietro Pantano



Anno Accademico: 2008/09
Rende, Novembre 2009

A Eugenia

Indice

1	Introduzione	1
2	Caos e Complessità	7
2.1	Sistemi dinamici	8
2.1.1	Linearità e non-linearità	10
2.1.2	Teoria qualitativa dei sistemi dinamici	12
2.2	La teoria del caos	14
2.2.1	Proprietà dei sistemi caotici	16
2.2.2	Esempi di sistemi caotici	22
2.3	Complessità	30
2.3.1	Auto-organizzazione	31
2.3.2	Fenomeni emergenti	32
2.4	Metodi evolutivi	34
2.4.1	Algoritmi genetici	34
3	Modelli fisico matematici applicati all'arte	38
3.1	Matematica e Arte	40
3.1.1	Musica: "Scientia Mathematica"	41
3.2	Modelli fisico matematici applicati all'Industria culturale	47
3.2.1	Informatica musicale	48
3.2.2	Computer grafica	49
3.2.3	Arte generativa	52
3.2.4	Video games ed edutainment	55
4	Complessità e Musica	57
4.1	La Complessità in Musica	58
4.2	Sinergie e interazioni possibili	61
4.2.1	Intelligenza artificiale	66
4.2.2	Vita artificiale	66
4.2.3	Metodi computazionali per l'analisi musicale	68
4.3	Musica algoritmica	70
4.3.1	Musica generativa	74
5	Metodi di rappresentazione uditiva	76
5.1	Il suono, la musica e il calcolatore	77
5.1.1	Il suono – l'acustica	78
5.1.2	La percezione del suono – la psicoacustica	81
5.1.3	La Musica	82

5.1.4	Informatica musicale	84
5.2	Spazi matematici, spazi sonori e musicali	88
5.2.1	Spazi sonori	90
5.2.2	Spazi musicali	94
5.3	Auditory Display – metodi di rappresentazione uditiva	97
5.3.1	Il suono: un fenomeno multidimensionale	99
5.3.2	Rappresentazioni uditive di sistemi dinamici	100
5.4	Sistemi di codifica	103
5.4.1	Mapping	105
5.4.2	Processi di codifica e codici	107
6	Musiche e suoni dal caos	114
6.1	Suoni	118
6.1.1	Sistemi di sintesi del suono	118
6.1.2	Rappresentazioni sonore	121
6.2	Musiche	125
6.2.1	Sistemi per la generazione di musiche	126
6.2.2	Rappresentazioni musicali	128
6.2.3	Tecniche di composizione	130
6.3	Nuovi strumenti musicali	131
6.3.1	Chaotic Synth	131
6.3.2	Timbralizer	133
6.3.3	Chaotic Modulator	137
6.4	Sistemi d’interazione per la musica generativa	138
6.4.1	ChaoticPerformer	142
7	Musica evolutiva	144
7.1	Evoluzione di melodie generative tramite algoritmi genetici	145
7.1.1	Funzione di Fitness	146
7.1.2	Risultati	149
7.2	Algoritmi genetici per l’imitazione di una melodia data	151
7.2.1	Esperimenti evolutivi e risultati	153
8	Ambienti Virtuali	156
8.1	Ambienti virtuali 3D	156
8.1.1	Definizione di una scena audio 3D	159
8.1.2	Simulazione dei fenomeni acustici	163
8.1.3	Spazializzazione 3D	165
8.1.4	Ambienti di rete distribuiti	167
8.1.5	Sistemi d’interazione	169
8.2	Ambienti virtuali per l’esplorazione dei sistemi complessi	170
9	Applicazioni artistiche	174
9.1	Composizioni musicali	175
9.2	Performance Live	175
9.3	Installazioni	176
9.3.1	Forme Caotiche	176
9.3.2	Memorie acustiche	178
10	Conclusioni	181

Sommario

L'attività svolta durante il corso di Dottorato in Psicologia della Programmazione e Intelligenza Artificiale è stata incentrata attorno al tema dei rapporti tra Complessità e Musica. Se si limita l'attenzione agli aspetti prettamente tecnici, questi due campi del sapere appaiono inevitabilmente distanti fra loro. Ma se, al contrario, si pensa alla Scienza e all'Arte come due mezzi complementari volti a investigare e svelare i misteri della vita e dei fenomeni del mondo naturale, può apparire chiaro come un approccio interdisciplinare conduca a scoprire paralleli e similitudini che, tramite la rottura delle usuali barriere e degli schemi consolidati, possono contribuire all'evoluzione del pensiero e del sapere.

I rapporti e le interazioni tra Complessità e Musica possono essere analizzati su diversi piani e con fini e approcci differenti. La ricerca è stata orientata all'individuazione e alla definizione di nuovi strumenti di rappresentazione, basati sull'impiego di musiche, suoni e ambienti virtuali multimediali, utili per l'analisi e la comprensione dei fenomeni complessi. Inoltre, l'attività è stata indirizzata ad applicare gli strumenti della ricerca scientifica per l'esplorazione di campi prossimi all'espressione artistica mediante la creazione di nuovi strumenti per la generazione di suoni e musiche, la realizzazione di brani musicali, installazioni multimediali e performace dal vivo.

Capitolo 1

Introduzione

Paleontologia, genetica, biologia, fisica, matematica, chimica, storia e scienze umane: queste sono le discipline che determineranno la formazione del musicista di domani. Cioè di colui che definisco “artista-ideatore”, di colui che è alla ricerca dell’ordine nascosto dietro ciò che appare un disordine universale, di colui che stabilisce un nuovo rapporto tra arte e scienza, e particolarmente tra arte e matematica.¹

Estremamente chiara e suggestiva la visione delineata da Xenakis in questo breve passo tratto dall’articolo *Sulla creatività dell’uomo* pubblicato nel 1994. In maniera sintetica e con la solita forza assertiva che caratterizza i suoi scritti, Xenakis delinea la nascita di una nuova figura, l’“artista-ideatore”, un soggetto che, fondando la propria ricerca su una base di conoscenze di natura profondamente interdisciplinare, riesce a svelare l’ordine nascosto dietro l’apparente disordine proprio grazie alla capacità e alla forza di superare le barriere tra i diversi campi del sapere. La visione di Xenakis trova un forte eco anche nelle nuove idee emerse in campo scientifico negli ultimi decenni per quanto riguarda l’esplorazione, lo studio e la comprensione dei fenomeni caotici e complessi. Nicolis e Prigogine [74], per esempio, esprimono nell’introduzione del loro libro *“La complessità”* il bisogno assoluto, per l’analisi e la comprensione dei fenomeni complessi, di rompere le barriere disciplinari e di avviare una ricerca di nuovi modi di considerare problemi anche molto annosi che siano basati su una visione di tipo multidisciplinare. Questo recente approdo del pensiero scientifico, storicamente basato invece sul riduzionismo da una parte e sul dualismo logico dall’altra, determina l’emergere di una nuova visione del mondo e della vita stessa che sembra avvicinarsi molto a ciò che da millenni sta alla base di molte filosofie e religioni orientali.

La non-dualità che emerge dall’impossibilità di risolvere alcuni paradossi logici, così come il bisogno di ricorrere ad approcci di natura olistica per poter cogliere aspetti e fenomeni non riconducibili alle singole parti di un tutto sono scoperte moderne del pensiero scientifico, che d’altra parte rappresentano anche l’intuizione fondante di antichissime discipline filosofiche e religiose quali lo Zen, l’Induismo, il Buddhismo e il Sufismo. Il bisogno di sposare un approccio

¹I. Xenakis, *Sulla creatività dell’uomo* in *Universi del suono*, Ricordi – LIM, Milano, 2003, p. 123.

monistico, determinato dalla constatazione che nel caso dei fenomeni complessi il tutto costituisce qualcosa di molto diverso dall'insieme delle sue singole parti, può essere ricondotto anche a una visione filosofica antica che può portare, lungo un percorso a ritroso, fino al pensiero del filosofo greco Parmenide.

Quali relazioni esistono tra Complessità e Musica? Che contributo può dare l'Arte e in particolare la Musica alla ricerca dell'ordine nascosto che sottende la realtà che viviamo? Xenakis, il cui pensiero è fortemente intriso dalle dottrine filosofiche della Grecia antica da Pitagora a Parmenide, delinea un'importante visione circa il ruolo della musica e della composizione musicale:

Che cos'è il fare musica, il comporre?

La musica è una matrice di idee, di azioni energetiche, di processi mentali, riflessi a loro volta nella realtà fisica che ci ha creati e che ci sostiene e del nostro psichismo chiaro o oscuro. Espressione delle visioni dell'universo, delle sue onde, dei suoi alberi, dei suoi uomini, alla stessa stregua delle teorie fondamentali della fisica teorica, della logica astratta, dell'algebra moderna, ecc. Filosofia, modo di essere individuale e universale. Lotte e contrasti, compromessi tra entità e processo messi a confronto: si è lontani dalla concezione antropocentrica del diciannovesimo secolo. Ideologicamente siamo nel pieno regno delle fisiche, delle cibernetiche e degli altri demoni moderni.²

La musica al pari della filosofia e della scienza esprime una visione dell'universo, costituisce un mezzo per rappresentare lotte, contrasti e compromessi tra entità e processi, tra essere e divenire. La musica è uno strumento d'indagine e di rappresentazione del mondo al pari di tutte le altre discipline, rimane, quindi, ancora attuale l'antica convinzione che la musica sia un mezzo per sondare l'armonia del mondo e per esplorare le profondità dell'animo e del pensiero umano. La novità del pensiero di Xenakis, probabilmente, consiste proprio nell'intuizione che il confronto e l'incrocio fra Scienza, Matematica e Musica possa ridare nuovo vigore al pensiero musicale al fine di spogliarlo dalle forme cristallizzate della tradizione per ricollocarlo nella natura. Soltanto così sarà possibile gettare le basi di una nuova alleanza fra Scienza e Musica che possa trasformare nuovamente la Musica in un mezzo d'indagine del pensiero umano posto al servizio della conoscenza. Tale intuizione emerge in maniera molto chiara dagli scritti di Xenakis:

Si è detto, probabilmente a torto, che la cibernetica è la punta massima dell'introspezione degli scambi energetici degli universi fisici e biologici. Per noi la musica è l'arte che prima di ogni altra arte opera un compromesso fondamentale tra il cervello astratto e la sua materializzazione sensibile, cioè ristretta entro limiti umani. Ritroviamo qui una convinzione antica: la musica è l'armonia del mondo ma omomorfizzata dal dominio del pensiero attuale. Questo significa che la musica sale fino ai livelli motori della matematica pura che ha sondato i rudimenti astratti delle nozioni e della fisica che scendono nell'abisso degli scambi proteiformi della materia. Assaliti dalle tempeste delle idee e dei processi della prima metà di questo secolo, dovevamo assolutamente ampliare i campi di indagine e di

²I. Xenakis, **Le tre parabole** in *Musica Architettura*, Spirali, Milano, 1982, p. 17.

*materializzazione della musica, farla uscire dalle serre atrofizzanti della tradizione e ricollocarla nella natura.*³

Il bisogno di una necessaria evoluzione del pensiero musicale, oltre che essere una profonda esigenza avvertita con improrogabile urgenza da numerosi compositori, potrebbe anche essere il mezzo con cui stimolare l'insorgere di intuizioni e scoperte significative che, come è già accaduto molte volte in passato, potrebbero contribuire a modificare ed estendere le attuali conoscenze e, più in generale, l'intera visione del mondo. Tutto ciò è accaduto molte volte in epoche passate, da qui dunque l'augurio di una nuova alleanza tra Arte e Scienza e più in dettaglio fra Musica e Matematica.

La musica ha la sua base nelle rappresentazioni mentali che ogni individuo costruisce a partire dalla percezione di un certo numero di fenomeni sonori. Il lavoro che è stato svolto nel corso del Dottorato di Ricerca in Psicologia della Programmazione e Intelligenza Artificiale ha come principio unificatore l'investigazione dell'impiego di **nuovi strumenti di rappresentazione uditiva** applicati allo studio dei sistemi dinamici caotici e complessi. Da questo nucleo fondante l'analisi è stata poi estesa, in una visione più generale, al tema delle relazioni e dei rapporti che intercorrono tra Complessità e Musica. Se ci si limita a considerare esclusivamente gli aspetti strettamente tecnici, questi due campi del sapere appaiono inevitabilmente molto distanti. Ma, se, al contrario, si sposa l'approccio finora descritto e si pensa alla Scienza e all'Arte come due mezzi complementari volti a investigare e svelare i misteri della vita e dei fenomeni naturali, può apparire chiaro come un approccio interdisciplinare possa portare a scoprire paralleli e similitudini utili per l'evoluzione del pensiero e del sapere.

I rapporti e le interazioni tra Complessità e Musica possono essere analizzati su diversi piani con fini e approcci differenti. È possibile, infatti, compiere un'analisi musicologica per studiare da un lato come le trasformazioni nei paradigmi scientifici abbiano influenzato e continuino a influenzare l'evoluzione del pensiero musicale, o d'altra parte come musicisti e compositori abbiano affrontato artisticamente problemi e aspetti legati all'esplorazione del mondo naturale. Su un altro piano, invece, gli strumenti sviluppati dalla ricerca scientifica possono essere impiegati in ambito musicale per esplorare le potenzialità offerte in domini sempre più prossimi alla pratica e all'espressione artistica.

Il lavoro svolto nel corso del dottorato si colloca in questo secondo settore. L'attività di ricerca è stata finalizzata in particolare all'individuazione e alla definizione di nuovi strumenti di rappresentazione, basati sull'impiego di musiche, suoni e ambienti virtuali multimediali, che possano essere utilizzati come mezzo di supporto all'analisi e alla comprensione dei fenomeni complessi. Alla definizione di un sistema di rappresentazione è strettamente legato il concetto di arbitrarietà. In altri termini, nel momento in cui si definisce una data tipologia di rappresentazione si effettuano delle scelte che rendono possibile utilizzare una serie di oggetti o fenomeni come strumento per rappresentare degli altri oggetti o fenomeni. La scelta del tipo di relazioni che è possibile instaurare sono, nella maggior parte dei casi, del tutto arbitrarie anche se, auspicabilmente, determinate in base a criteri e principi che consentano di realizzare una buona rappresentazione degli oggetti e dei fenomeni in esame. Nel seguito di questa tesi si cercherà di dimostrare che, nonostante esista sempre un certo grado di ar-

³Ibidem.

bitrarietà, le scelte compiute nella definizione di tali rappresentazioni non sono mai realizzate in maniera completamente libera e arbitraria.

Alcune ipotesi hanno guidato e orientato il lavoro di ricerca che sarà presentato nel seguito. La prima ipotesi consiste nel pensare la musica come uno strumento di rappresentazione, ossia come uno “schermo” capace di mettere in luce e far risaltare fenomeni e strutture utili per l’analisi e lo studio della complessità. Infatti, se si pensa che l’interesse maggiore della ricerca scientifica consiste nella comprensione di tutti quei fenomeni spesso sfuggenti e impalpabili legati all’emergenza e all’auto-organizzazione nei sistemi complessi, è possibile pensare alle rappresentazioni musicali come un mezzo specializzato nel cogliere e manifestare, anche tramite l’espressione artistica, ciò che per sua natura risulta essere sottile ed estremamente sfuggente. A partire da ciò, l’ipotesi successiva che si è avanzata consiste nel pensare che i sistemi di codifica, necessari per la realizzazione delle rappresentazioni uditive, siano realizzati mediante processi che, nel caso ideale, consentano di trasferire completamente immutato in campo musicale il contenuto informativo che caratterizza il comportamento di un dato modello matematico. La definizione di un tale sistema di codifica può contribuire dunque a identificare le leggi che sottostanno ai comportamenti complessi tramite l’individuazione di tutte quelle proprietà invarianti che possono essere rese manifeste anche tramite l’ascolto delle strutture musicali generate a partire da un dato modello matematico.

Per investigare entrambe le ipotesi sono state sviluppate delle applicazioni che impiegano i sistemi dinamici caotici per la generazione di suoni e musica. In tal modo si è cercato di valutare la qualità e le potenzialità offerte dai metodi di rappresentazione uditiva, cercando anche di affrontare, da un punto di vista teorico, le principali problematiche legate ai processi di codifica sonora e musicale. In questo ambito, è apparsa di grande importanza la definizione di sistemi di codifica che rendano possibile trasformare le strutture matematiche in strutture musicali lasciando inalterati tutti gli aspetti caratteristici del fenomeno complesso preso in esame. Ciò al fine di realizzare, tramite lo studio del sistema di codifica e del materiale musicale che si produce da un dato insieme di strutture matematiche, quel percorso inverso dalla Musica alla Matematica, fino alla Scienza che potrebbe contribuire a individuare e comprendere i diversi aspetti che caratterizzano le strutture matematiche d’origine.

Gli obiettivi che hanno spinto e motivato lo studio dei metodi di rappresentazione uditiva e le loro possibili applicazioni ai sistemi caotici e alla teoria della complessità sono sostanzialmente due:

- definire nuovi strumenti per lo studio e la comprensione dei sistemi complessi;
- sviluppare nuovi strumenti e tecniche che possano dare un contributo all’opera dei musicisti e dei compositori interessati a esplorare nuovi territori sonori e musicali.

Per quanto riguarda il primo obiettivo, sono stati definiti degli strumenti di rappresentazione uditiva che possono essere impiegati in maniera complementare alla visualizzazione 3D. La rappresentazione acustica di serie di dati numerici sembra essere particolarmente adatta per il riconoscimento di strutture e nell’analisi della ricorrenza di andamenti temporali caratteristici. Lo sviluppo di tali tecniche può costituire un importante strumento di supporto allo studio

e all'interpretazione dei sistemi complessi, poichè, tramite l'ascolto è possibile cogliere, in maniera qualitativa, informazioni sull'evoluzione temporale di serie complesse meglio di quanto sia possibile fare tramite la visualizzazione.

Per quanto riguarda il secondo obiettivo si è sperimentato l'impiego, a fini artistici, dei sistemi dinamici caratteristici delle ricerche sulla complessità e sul caos. Sono stati creati degli strumenti capaci di generare suoni, linee melodiche e strutture musicali più estese a partire dall'evoluzione temporale dei sistemi caotici. Inoltre, sono stati creati degli "*strumenti musicali*" innovativi che possono essere utilizzati per la produzione di brani musicali, per la realizzazione di performance e di installazioni multimediali. Tra le problematiche affrontate in questa direzione spicca la necessità di realizzare dei sistemi d'interazione fra musicista e strumenti musicali. Si è cercato di creare dei sistemi d'interazione che, da una parte, siano sufficientemente semplici da poter essere gestiti in tempo reale, mentre dall'altra siano anche capaci di fornire un controllo adeguato dell'espressività del materiale musicale prodotto. In entrambi i casi è stato fondamentale definire dei codici capaci di trasformare le serie temporali, ossia le sequenze di dati relative all'evoluzione nel tempo delle variabili che caratterizzano univocamente lo stato di un dato sistema dinamico, nella variazione di opportuni parametri sonori o musicali.

L'attività di ricerca svolta può essere collocata in un territorio intermedio fra Scienza e Arte spesso apparentemente dominato dall'arbitrarietà dello sperimentatore. Infatti se si sposa il punto di vista dello scienziato scettico, l'uso di questi metodi di rappresentazione basati su scelte profondamente arbitrarie potrebbe apparire del tutto futile poichè risulta difficile comprendere quale possa essere il contributo di tali attività al progresso scientifico. D'altra parte, se si sposa il punto di vista di un artista, molto probabilmente, si potrebbe essere portati ad affermare che l'Arte è tutt'altro che la generazione di forme o di musiche in maniera incontrollata e in qualche modo aleatoria o arbitraria. Un musicista affermerà con fermezza che la vera musica si colloca in territori lontanissimi dagli esiti, forse a volte stentati, prodotti da relazioni arbitrarie stabilite fra modelli matematici e parametri musicali.

Come sfuggire, quindi, a tutto ciò? E come poter valutare la qualità dei risultati ottenuti al termine della ricerca? Porsi nel mezzo di discipline diverse, rompendo barriere e divisioni consolidate, non significa sfuggire alla logica interna di ogni disciplina che consente di valutare la qualità e il valore di un percorso di ricerca. Al contrario, un percorso interdisciplinare probabilmente è soggetto a criteri di valutazione più articolati e restrittivi che insorgono dall'intersezione fra le diverse logiche interne che contraddistinguono le varie discipline coinvolte. Nel caso di un percorso, come quello presentato in questa tesi, che si muove tra Arte e Scienza, sarà necessario distinguere il caso in cui si considerino gli esiti artistici o quello in cui si concentri l'attenzione su quelli scientifici.

Un prodotto artistico dovrà dunque essere valutato e giudicato in base a considerazioni estetiche circa la capacità di suscitare emozioni, di evocare e trasmettere stati d'animo o visioni, di coinvolgere e attrarre l'attenzione del pubblico. Nel caso specifico di un prodotto musicale l'ascolto e la sua capacità di trasmettere emozioni saranno, dunque, gli unici aspetti che contano nella valutazione dei risultati. Il retroterra di conoscenze scientifiche e tecniche sicuramente avranno un importante ruolo, ma dovranno restare sempre sullo sfondo del processo di valutazione poichè la logica interna della musica e la sua validità da un punto di

vista qualitativo si basa esclusivamente sulla comunicazione mediante fenomeni sonori e sulla loro conseguente trasformazione in rappresentazioni mentali.

D'altra parte, nel caso di un lavoro di natura scientifica, il giudizio dovrà essere espresso in base alla sua capacità di riuscire a contribuire allo sviluppo e al consolidamento della conoscenza scientifica. Il rigore scientifico, il grado d'innovazione e la riproducibilità dei risultati saranno gli elementi di maggiore importanza in tal caso, mentre le ricadute e le applicazioni in campo artistico, anche se rilevanti, dovranno essere comunque tenute in secondo piano poichè meno determinanti alla valutazione della qualità scientifica.

Il seguito della tesi è strutturato nella maniera seguente: il capitolo successivo introduce la Teoria del caos e la Complessità, delineando il contesto scientifico di riferimento da cui ha avuto origine il lavoro condotto sulle rappresentazioni uditive dei sistemi dinamici. Nel terzo capitolo, con l'intento di porre le basi dei rapporti fra Arte e Scienza, si presenta una rassegna dello stato dell'arte sui modelli fisico matematici impiegati in campo artistico. In tal modo si delinea il quadro di riferimento per la trattazione successiva. Il capitolo quarto è dedicato all'analisi dettagliata dei rapporti e delle interazioni fra Complessità e Musica. Si delinea lo stato dell'arte su due nuovi fiorenti campi d'indagine recentemente sorti dall'intersezione fra ricerca musicale, Intelligenza artificiale e Vita artificiale. A partire da ciò si presentano le ipotesi e gli obiettivi che hanno spinto e motivato il presente lavoro di tesi. Nel capitolo quinto si affrontano i metodi di rappresentazione uditiva e si tratta il problema della codifica delle serie temporali, prodotte dall'evoluzione dei sistemi dinamici, in dati che possono essere rappresentati mediante suoni e musica. Il sesto capitolo illustra le applicazioni e i risultati ottenuti dalle ricerche sulla generazione di suoni e musica dai sistemi caotici. Si presentano alcune tecniche di rappresentazione uditiva applicate allo studio del comportamento di un sistema dinamico e gli strumenti musicali creati utilizzando i sistemi caotici. Nel capitolo settimo si descrivono le ricerche condotte sui metodi evolutivi per la generazione di musica. Il capitolo ottavo è dedicato alla presentazione degli ambienti virtuali multimediali per l'esplorazione dei sistemi complessi. Il capitolo nono presenta una rassegna delle applicazioni artistiche, brani musicali e installazioni, che sono state realizzate. Infine, nel decimo capitolo si riportano le conclusioni del lavoro e alcune riflessioni finali.

Capitolo 2

Caos e Complessità

La Scienza Classica, il cui paradigma può essere rappresentato in maniera esemplare dalla meccanica classica Newtoniana, è fondata sia su un approccio riduzionista, che tende a spiegare i vari fenomeni della natura a partire dall'analisi del comportamento dei loro componenti più semplici, sia sull'ipotesi che molti di questi comportamenti possono essere rappresentati, in modo sufficientemente completo, mediante modelli matematici deterministici e lineari. Il paradigma filosofico che ha ispirato lo sviluppo della Teoria della complessità, al contrario, si basa sulla consapevolezza che ciò è in generale del tutto impossibile. I sistemi complessi, infatti, mostrano *proprietà emergenti* che non possono essere ridotte, comprese e spiegate tramite l'analisi minuziosa delle varie proprietà che caratterizzano le numerose parti interagenti che costituiscono il sistema.

Due discipline hanno fortemente contribuito al manifestarsi di questo radicale cambiamento di visione legato allo sviluppo della Complessità: la fisica del non-equilibrio, che ha portato alla scoperta di nuove fondamentali proprietà della materia in condizioni lontane dall'equilibrio; la moderna teoria dei sistemi dinamici, la cui scoperta centrale consiste nella dimostrazione che l'instabilità e l'imprevedibilità possono manifestarsi anche in sistemi deterministici rappresentabili mediante modelli matematici piuttosto semplici. Quest'ultima disciplina, fortemente collegata inoltre alla nascita e allo sviluppo della Teoria del Caos, ha fornito un importante contributo al cambiamento di paradigma legato alla Complessità grazie alla dimostrazione che, in determinate condizioni, piccole modifiche nello stato iniziale di un sistema fisico possono amplificarsi determinando grandi cambiamenti nel suo stato finale.

Nel seguito si presenterà brevemente la teoria dei sistemi dinamici e le sue implicazioni nello sviluppo delle ricerche sul Caos Deterministico. Si provvederà, inoltre, a presentare i sistemi matematici caratterizzati da un comportamento caotico che sono stati impiegati per la generazione di suoni e musica. Si presenterà una breve introduzione alla Teoria della Complessità e alle proprietà dei sistemi complessi con l'intento di mettere in luce le loro caratteristiche e, in particolare, quelle di maggiore importanza per le applicazioni di tipo musicali. Infine si presenterà una rassegna di metodi evolutivi utili per la simulazione dei fenomeni legati all'evoluzione naturale. Tali metodi sono largamente impiegati, con finalità diverse, in vari contesti scientifici e possono anche essere applicati, in ambito musicale, per la generazione di suoni e musica.

2.1 Sistemi dinamici

La teoria dei sistemi dinamici è un'importante disciplina strettamente collegata con le principali aree della matematica e della fisica. I suoi concetti, i metodi e i paradigmi attualmente stimolano lo sviluppo della ricerca in molte aree delle scienze e, in particolare, in quei settori che si interessano dei fenomeni non lineari e della teoria del caos [95, 97]. Le fondamenta della moderna teoria dei sistemi dinamici si devono principalmente all'importante contributo fornito da Henri Poincaré, grande genio matematico vissuto a cavallo della fine del '800, che fu uno dei primi a esplorare i comportamenti che possono scaturire da equazioni non-lineari accoppiate.

Nella fisica matematica contemporanea il concetto di sistema dinamico nasce dall'esigenza di costruire un modello generale in grado di descrivere tutti i sistemi che evolvono nel tempo secondo opportune leggi che legano lo stato presente ai vari possibili stati futuri. In maniera sintetica, dunque, si può dire che un sistema dinamico è un insieme di elementi, le cui caratteristiche cambiano nel corso del tempo in funzione di un certo numero di parametri. Qualunque sistema dinamico si compone di due parti: le caratteristiche del suo stato (cioè le informazioni essenziali che determinano la configurazione del sistema) e la dinamica di evoluzione (una regola che descrive nel tempo l'evoluzione dello stato del sistema).

Il concetto di stato di un sistema, in generale, può essere difficile da definire a causa dell'enorme varietà di forme che, a seconda dei casi, esso può assumere. Lo stato di un sistema, comunque, può essere definito tramite una sua descrizione sufficientemente esauriente che sia capace di rappresentare in maniera univoca tutte le sue configurazioni possibili. Tale rappresentazione coinvolgerà un certo numero di grandezze caratteristiche la cui definizione ne determina univocamente lo stato. Tali grandezze sono chiamate, usando la terminologia della meccanica classica, *parametri lagrangiani*, mentre il loro numero complessivo determina il numero di *gradi di libertà* del sistema.

Per quanto riguarda le dinamiche di evoluzione, invece, esse corrispondono in genere a modelli matematici, dipendenti dai parametri lagrangiani del sistema, la cui complessità nella maggior parte dei casi non permette di ottenere soluzioni in forma chiusa, ossia soluzioni esatte che possono essere ricavate tramite un rigoroso processo di calcolo matematico. L'impossibilità di determinare con esattezza le soluzioni analitiche dell'evoluzione di un'ampia gamma di sistemi dinamici ha spinto a definire metodi di visualizzazione dell'evoluzione dello stato in uno spazio astratto, noto come *spazio delle fasi*, nelle quali le coordinate rappresentano i parametri lagrangiani del sistema, ossia tutte le grandezze necessarie a definire in maniera univoca il suo stato. La dimensione dello spazio delle fasi è pari al numero di gradi di libertà, in tal modo lo stato istantaneo del sistema dinamico può essere individuato tramite un punto nello spazio delle fasi, chiamato *punto rappresentativo*. Le immagini riportate in figura 2.1 mostrano due diversi spazi delle fasi l'uno caratterizzato da due dimensioni, l'altro da tre dimensioni. Le due immagini mostrano anche, collocati in corrispondenza dell'origine degli assi coordinati, i punti rappresentativi che possono essere impiegati per studiare l'evoluzione dello stato di sistemi dinamici rappresentabili mediante due oppure tre parametri lagrangiani. Al variare del tempo, istante per istante, le diverse grandezze che definiscono lo stato del sistema variano determinando, dunque, lo spostamento del punto rappresentativo lungo una curva

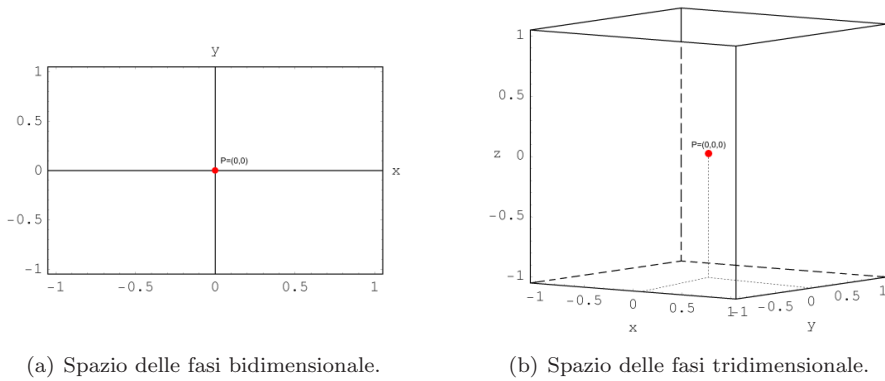


Figura 2.1: Spazi delle fasi a due e tre dimensioni.

definita come la *traiettoria* (o *orbita*) del sistema nello spazio delle fasi. Le immagini riportate in figura 2.2 mostrano due diverse traiettorie tracciate da sistemi dinamici che evolvono l'uno in uno spazio delle fasi a due dimensioni e l'altro in uno spazio a tre dimensioni. Nell'immagine *a* è stata riportata l'evoluzione della mappa di Hénon, il punto nero in basso a destra indica la posizione del punto rappresentativo alla fine della simulazione, mentre in basso a sinistra è possibile vedere l'inizio della traiettoria che corrisponde alla condizione relativa allo stato iniziale del sistema. Nell'immagine *b* è stata riportata la traiettoria descritta dal sistema di Lorenz, anche in questo caso il punto nero indica la posizione del punto rappresentativo al termine della simulazione. Entrambe i sistemi dinamici menzionati saranno presentati in dettaglio nella sezione 2.2.2.

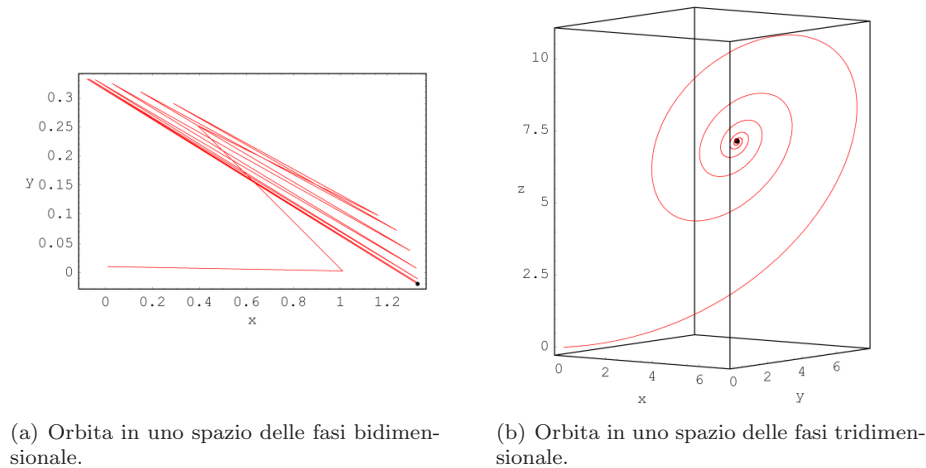


Figura 2.2: Orbite in spazi delle fasi a due e tre dimensioni.

Un *sistema dinamico* può essere pensato come un qualsiasi insieme di equazioni che fornisca l'evoluzione nel tempo dello stato di un dato sistema a partire dalla conoscenza dei suoi stati precedenti. Se si rappresenta il tempo mediante una variabile continua, un sistema di questo genere può essere rappresentato

tramite un insieme di equazioni differenziali del primo ordine. Sotto questa forma un sistema dinamico si può scrivere come:

$$\dot{X} = F(X, t, c_1, \dots, c_m) \quad (2.1)$$

dove $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ è un vettore costruito con le k variabili di stato del sistema; $F(X, t, c_1, \dots, c_m) = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ è un vettore che contiene k funzioni di X , di t , ossia del tempo, che in questo caso rappresenta la variabile indipendente, e degli m parametri di controllo del sistema c_1, \dots, c_m ; infine $\dot{X} = dX/dt$ rappresenta la derivata del vettore X rispetto al tempo. Dato un qualsiasi stato iniziale $X(0)$, in principio, è possibile risolvere l'equazione 2.1 per determinare in maniera univoca la traiettoria $X(t)$ del sistema per qualsiasi istante di tempo successivo. In questa rappresentazione la variabile t , che rappresenta il tempo, si assume essere di natura continua. Nel caso in cui il tempo compaia esplicitamente nella definizione delle funzioni F le equazioni differenziali si diranno *non autonome*, altrimenti, se il tempo non compare in maniera esplicita, tali equazioni si diranno *autonome*.

Spesso risulta utile anche prendere in considerazione sistemi dinamici in cui il tempo viene rappresentato mediante una variabile discreta. Sia n la variabile discreta relativa al tempo, essa può essere rappresentata mediante una sequenza crescente di numeri interi. In tal caso un sistema dinamico può essere definito mediante una *mappa* del tipo:

$$X_{n+1} = G(X_n, c_1, \dots, c_m) \quad (2.2)$$

in cui X rappresenta ancora un vettore costruito con le k variabili di stato del sistema, e $G(X_n, c_1, \dots, c_m)$ è un vettore composto da k funzioni di X e degli m parametri di controllo del sistema. Fissato un certo valore iniziale X_0 tramite la relazione 2.2 è possibile determinare $X_1 = G(X_0, c_1, \dots, c_m)$, e successivamente, in maniera iterativa, tutti gli altri valori $X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ che consentono di generare la traiettoria discreta del sistema.

Molti modelli fisici, biologici, meccanici, possono essere rappresentati da sistemi di questo tipo siano essi caratterizzati da un'evoluzione del tempo di tipo continua oppure di tipo discreta. Un *oscillatore armonico*, per esempio, può essere rappresentato, mediante il modello finora presentato, dal seguente insieme di due equazioni differenziali:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -kx_1 \end{cases} \quad (2.3)$$

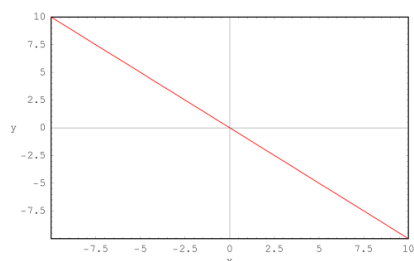
In questo caso, $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ rappresenta il vettore relativo alle variabili di stato del sistema, mentre k è il solo parametro di controllo del sistema. La soluzione del sistema di equazioni porta a individuare la traiettoria del sistema $X(t)$. Nel caso in cui si consideri esclusivamente una sola delle due variabili di stato del sistema il suo andamento nel tempo corrisponde all'evoluzione di una funzione di tipo sinusoidale.

2.1.1 Linearità e non-linearità

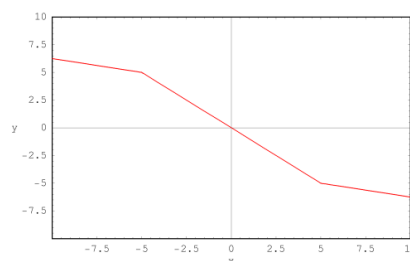
Di centrale importanza in Matematica, in Fisica, e nello studio dei sistemi dinamici, è il concetto di *linearità*. Questa proprietà svolge un ruolo fondamentale

in matematica per quanto riguarda la risoluzione delle equazioni differenziali poichè nel caso di equazioni lineari è dimostrabile che la somma di due qualsiasi soluzioni fornisce ancora una soluzione dell'equazione. Da ciò deriva che, in generale, risulta molto più semplice risolvere equazioni di tipo lineare rispetto a quelle di tipo non-lineare, poichè nel primo caso trovate due soluzioni è possibile ottenerne molte altre a partire dalla loro opportuna combinazione. Tale possibilità di risoluzione delle equazioni lineari ha spinto a sviluppare procedure di *linearizzazione* finalizzate a trasformare equazioni non-lineari, difficilmente risolubili per via analitica, in equazioni lineari. Ciò può essere compiuto individuando delle opportune condizioni e formulando delle ipotesi sullo stato del sistema che rendono possibile l'eliminazione dei termini responsabili dell'introduzione della non-linearità. Questa procedura risulta molto vantaggiosa in tutti quei casi in cui tali termini forniscono un contributo estremamente piccolo che può essere considerato trascurabile al fine dello studio dell'evoluzione del sistema.

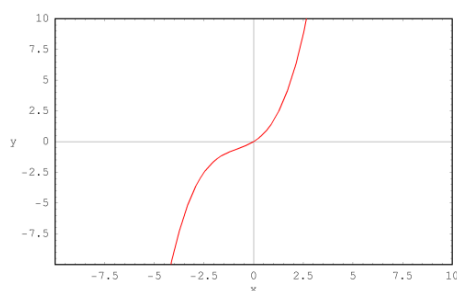
In ambiti diversi da quello matematico finora considerato, in cui la linearità è particolarmente legata alla risoluzione di equazioni differenziali, spesso la proprietà della linearità si associa al caso in cui si abbia che l'uscita fornita da un qualsiasi sistema è direttamente proporzionale alle sollecitazioni ricevute ingresso. Le immagini presentate nella figura 2.3 mostrano tre diverse caratteristiche che mettono in relazione le grandezze x e y .



(a) Grafico di una caratteristica lineare.



(b) Grafico di una caratteristica lineare a tratti.



(c) Grafico di una caratteristica non-lineare.

Figura 2.3: Caratteristiche lineari e non lineari.

Nell'immagine *a* si presenta una caratteristica *lineare*, nella seconda immagine (*b*) si presenta una caratteristica *lineare a tratti* che rappresenta una prima

semplice approssimazione matematica di un comportamento non-lineare, infine nell'immagine c si presenta una caratteristica non-lineare di tipo polinomiale. Nel caso in cui si prenda in considerazione un sistema lineare è possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti che, similmente a quanto accade nel caso delle equazioni differenziali, consente di scomporre un sistema oppure un dato problema in una somma di sotto-sistemi o sotto-problemi indipendenti tra loro che possono essere studiati e rappresentati singolarmente.

La possibilità di trattare e risolvere analiticamente i sistemi lineari ha spinto lo sviluppo della scienza classica verso lo studio esclusivo di fenomeni che potessero essere compresi e spiegati tramite modelli lineari. Soltanto recentemente le possibilità offerte dall'impiego dei calcolatori elettronici hanno aperto la strada all'indagine dei comportamenti legati alla non-linearità da cui derivano molte nuove scoperte che hanno contribuito in maniera significativa alla nascita della Teoria del Caos e della Complessità. Tale cambiamento ha portato a maturare la consapevolezza che la maggior parte dei sistemi reali non sono di natura lineare, e che inoltre le ipotesi di linearità o di quasi-linearità spesso risultano essere poco soddisfacenti, rendendo i metodi matematici tradizionali scarsamente utilizzabili in molte applicazioni.

Una delle maggiori differenze tra le leggi lineari e quelle non-lineari consiste nella validità o meno del principio di sovrapposizione degli effetti. Mentre in un sistema lineare l'effetto di un'azione combinata di due diverse cause è solamente la sovrapposizione degli effetti di ogni causa presa separatamente, in un sistema non-lineare una piccola causa può produrre dopo un certo intervallo di tempo effetti drammatici, non proporzionali alla sua ampiezza, che possono modificare in maniera radicale l'evoluzione complessiva del sistema. Per tale motivo lo studio dei fenomeni legati alla non-linearità ha assunto un'enorme importanza nello sviluppo della scienza contemporanea.

2.1.2 Teoria qualitativa dei sistemi dinamici

La dinamica globale di un sistema dinamico può essere analizzata mediante lo studio dell'evoluzione che subisce il punto rappresentativo del sistema all'interno dello spazio delle fasi. Poichè, per indagare il comportamento di un'ampia gamma di sistemi, i metodi analitici spesso si rivelano insufficienti, lo studio delle proprietà qualitative che caratterizzano le traiettorie e le configurazioni assunte nello spazio delle fasi permette sia di rappresentare i comportamenti globali del sistema sia di analizzare i cambiamenti indotti dalle variazioni dei parametri di controllo.

In genere la classificazione che si realizza all'interno della teoria qualitativa dei sistemi dinamici è basata sul tipo di comportamento che caratterizza l'evoluzione di un dato sistema dinamico. L'evoluzione di un sistema dinamico nello spazio delle fasi viene descritto mediante l'uso della nozione di *attrattore*, che rappresenta la configurazione di equilibrio verso cui il sistema tende dopo l'estinzione dei fenomeni transitori. Nel caso più semplice l'attrattore è costituito da un unico punto, questo tipo di attrattore è generalmente chiamato *punto fisso*, l'immagine riportata in figura 2.2 (b) mostra l'orbita descritta da un sistema dinamico che converge verso un punto fisso. In altri casi l'attrattore può essere costituito da una curva chiusa, in tal caso l'attrattore è chiamato *ciclo limite*. L'immagine in figura 2.4 (a) mostra un ciclo limite tracciato dall'oscillatore di Chua, questo sistema dinamico sarà presentato in dettaglio nella

sezione 2.2.2. Anche in questo caso il punto nero indica la posizione del punto rappresentativo dello stato del sistema al termine della simulazione, mentre al centro dell'immagine è possibile osservare il punto iniziale della traiettoria che corrisponde alla rappresentazione nello spazio delle fasi della condizione iniziale del sistema. Esistono anche i cosiddetti “*attrattori strani*”, la cui “stranezza” consiste nell'essere costituiti da geometrie di tipo frattale, dunque sostanzialmente differenti dalle geometrie classiche (punti, linee e curve). L'immagine in figura 2.4 (b) mostra uno degli attrattori strani prodotti dall'oscillatore di Chua, il cosiddetto attrattore “*Double Scroll*”.

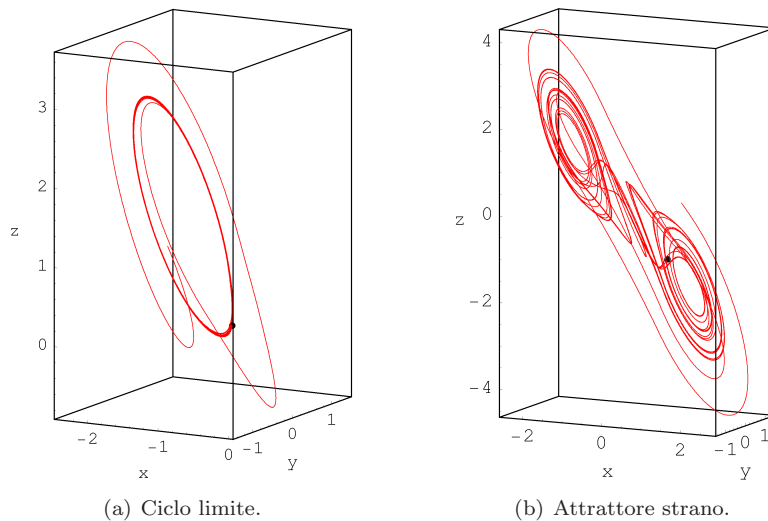


Figura 2.4: Attrattori.

La teoria qualitativa si basa sullo studio delle proprietà dei diversi attrattori con particolare attenzione all'analisi dei fattori che possono determinare la loro stabilità o instabilità. A tal fine, nel caso in cui nello spazio delle fasi coesistono simultaneamente più attrattori, spesso è importante studiare anche i *bacini di attrazione* dei diversi attrattori e le loro zone di confine. Il bacino di attrazione di un attrattore rappresenta una determinata zona dello spazio delle fasi caratterizzata dalla proprietà che tutte le traiettorie generate a partire da condizioni iniziali contenute nel bacino di attrazione convergono verso quel dato attrattore. L'individuazione degli attrattori e dei loro bacini di attrazione, assieme anche alla delimitazione dei confini che li separano, consente di ottenere un ritratto dello spazio delle fasi che rende possibile cogliere in maniera qualitativa tutte le varie caratteristiche che determinano la dinamica globale del sistema dinamico.

La modifica dei parametri di controllo di un sistema dinamico induce delle profonde trasformazioni sulle strutture che caratterizzano lo spazio delle fasi. In tal modo è possibile far sì che determinati attrattori appaiano o scompaiano, o, d'altra parte, si può indurre una modifica della natura stessa di un attrattore da condizioni di stabilità a condizioni d'instabilità o viceversa. I parametri di controllo hanno anche profondi effetti sulla forma e l'estensione dei bacini d'attrazione dei diversi attrattori. Dunque, lo studio degli effetti che la modifica dei parametri di controllo produce sulle diverse strutture che caratterizzano

il ritratto dello spazio delle fasi può consentire anche di cogliere in maniera qualitativa quali possano essere le modifiche indotte dai parametri di controllo sull'evoluzione temporale del sistema dinamico.

La rappresentazione dell'evoluzione temporale nello spazio delle fasi può comportare notevoli difficoltà per sistemi il cui stato è descritto da più di due variabili. Inoltre l'analisi delle strutture che caratterizzano l'evoluzione temporale dei sistemi nello spazio delle fasi generalmente non prende in considerazione il divenire dinamico del sistema al variare del tempo, ma, al contrario, considera il suo andamento come “congelato” in una rappresentazione spaziale statica. Il processo di continuo cambiamento legato all'evoluzione temporale non è colto dinamicamente, ma è visto come se fosse fissato momento per momento in una struttura spaziale. La multidimensionalità di molti sistemi dinamici rappresenta anche un ulteriore problema legato alla rappresentazione delle strutture che si formano nello spazio delle fasi. In presenza di sistemi con molti gradi di libertà è necessario rinunciare a delle rappresentazioni globali, mentre risulta indispensabile fare ricorso a proiezioni spaziali a due o tre dimensioni che portano a considerare più mappe bidimensionali o tridimensionali, facendo perdere il valore sinottico che potrebbe avere un'unica rappresentazione. L'uso dei calcolatori ha fornito, dunque, uno strumento fondamentale per superare tali problematiche, o quanto meno per affrontarle con strumenti adeguati che possano rendere possibile oppure semplificare lo svolgimento dei processi d'indagine.

2.2 La teoria del caos

La Teoria del caos è un settore della teoria matematica dei sistemi dinamici che si occupa dei cosiddetti sistemi caotici. Tradizionalmente all'interno della scienza classica, il caos è sempre stato per definizione assenza di ordine. A partire dagli anni '60 in poi, con alterne vicende, ha cominciato a prendere forma la teoria del caos con l'obiettivo di spiegare quegli aspetti irregolari e incostanti che si manifestano in fenomeni naturali anche molto diversi fra loro tradizionalmente ignorati dalla scienza classica. Come afferma Gleick nel prologo del suo celebre libro *Caos* [44]:

Dove comincia il caos si arresta la scienza classica. Finché il mondo ha avuto fisici che investigavano le leggi della natura ha infatti sofferto di una speciale ignoranza sul disordine presente nell'atmosfera, nel mare turbolento, nelle fluttuazioni delle popolazioni di animali e piante allo stato di natura, nelle oscillazioni del cuore e del cervello. L'aspetto irregolare della natura, il suo lato discontinuo e incostante, per la scienza sono stati dei veri rompicapo o peggio mostruosità.¹

La Teoria del caos è una teoria scientifica, nata su sperimentazioni fisiche, biologiche, matematiche, socio-economiche, che ha cambiato radicalmente l'intero panorama delle conoscenze scientifiche. Il suo sviluppo è stato fortemente determinato anche dalla fruttuosa sintesi fra la creatività matematica e la disponibilità di potenti calcolatori. Da questo incontro è emersa la possibilità di esplorare l'universo deterministico, fondato sulle leggi fondamentali della fisica, con l'intento di comprendere i meccanismi che sottostanno alla tipica predisposizione

¹J. Gleick, *Caos*, Superbur Scienza, Milano, 2000, p. 9.

al disordine, alla complessità, alla imprevedibilità di numerosissimi sistemi naturali. Attualmente, il caos non è più considerato come il regno del disordine nel quale non è possibile realizzare alcuna conoscenza scientifica, ma, in maniera opposta, è considerato una dimensione retta da leggi complesse difficilmente conoscibili. In tal modo, si è provveduto a sostituire al concetto di disordine quello molto più significativo di complessità [95].

L'apparizione di questo nuovo paradigma scientifico, battezzato "caos" da Jim Yorke [90], un matematico dell'Università del Maryland è stata fortemente spinta dallo studio di fenomeni fisici caratterizzati da imprevedibilità e da comportamenti apparentemente aleatori che possono essere spiegati dalla presenza di evoluzioni temporali con una dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali. Spesso infatti si parla di "caos deterministico" o di "rumore deterministico" per indicare oscillazioni irregolari apparentemente aleatorie, ma che sono prodotte da un meccanismo deterministico. Il grande cambiamento introdotto dal paradigma del caos consiste proprio nella presa di coscienza che nel caso dei fenomeni caotici l'ordine deterministico è all'origine di evoluzioni imprevedibili che apparentemente manifestano il disordine del caso. Di conseguenza, i sistemi caotici non possono più essere interpretati esclusivamente come imprevedibili anche se irregolari, allo stesso modo risulta fondamentale sottolineare che il caos non è sinonimo di caso (curiosamente suo anagramma nella lingua italiana) come potrebbe essere facile pensare. Infine la natura deterministica dei sistemi caotici rende impossibile parlare di completo disordine poichè tali sistemi risultano essere comunque prevedibili a breve termine e, dunque, si può paradossalmente affermare che nel caos in qualche misura è anche presente l'ordine. Alla luce di questo, la natura si presenta sempre più come una realtà difficilmente definibile e determinabile. La Teoria del Caos ha, infatti, messo in luce come possa essere vana la pretesa di una conoscenza completa della natura basata su modelli di spiegazione riduzionisti e ha suggerito una via differente tramite una ricerca aperta che tenga in maggiore conto tutti gli elementi che intervengono in un fenomeno. Come afferma Gleick:

i credenti nel caos meditano sul determinismo e sulla libertà del volere, sull'evoluzionismo, sulla natura dell'intelligenza cosciente. Essi pensano di stare voltando le spalle a una tendenza diffusa nella scienza: il riduzionismo, l'analisi di sistemi nei termini delle loro parti componenti: quark, cromosomi o neuroni che siano. Essi credono di stare cercando la totalità.²

E' impossibile prevedere il comportamento che un sistema caotico avrà dopo un intervallo di tempo anche piuttosto breve. Infatti, per calcolare il comportamento futuro del sistema, anche se descritto da un'equazione molto semplice, è necessario inserire i valori delle condizioni iniziali. D'altra parte, nel caso di un sistema complesso non-lineare, data la grande sensibilità del sistema alle sollecitazioni esterne, un piccolo errore nella misura delle condizioni iniziali, oppure una modifica apparentemente irrilevante dei dati immessi e, ovviamente, anche il loro successivo arrotondamento durante il calcolo farà crescere l'errore esponenzialmente con il tempo, producendo un radicale cambiamento dei risultati. Questo significa che i dati relativi alle condizioni iniziali dovrebbero

²Ibidem pp. 11-12.

essere misurati con un'accuratezza teoricamente infinita e ciò é praticamente impossibile.

La scoperta che il caos può essere prodotto anche dall'evoluzione di sistemi non-lineari caratterizzati da pochi gradi di libertà ha avuto un forte impatto sulla comunità scientifica. Questa classe di sistemi dinamici, pur essendo costituita da modelli completamente deterministici in principio, può produrre segnali che in apparenza, tramite le comuni tecniche di analisi delle serie temporali, risultano essere prodotti da sistemi completamente stocastici. La ragione di tale fenomeno può essere spiegata mediante la progressiva separazione che porta, al variare del tempo, traiettorie che iniziano da condizioni iniziali vicine ad allontanarsi fra loro in maniera esponenziale. Questa separazione esponenziale delle traiettorie può portare all'insorgere dell'apparente comportamento stocastico dei sistemi caotici.

Prima di tali scoperte, un segnale complesso era sempre considerato come il prodotto di un sistema complicato costituito da un elevatissimo numero di gradi di libertà attivi. Tutto ciò rendeva impossibile lo studio analitico o qualitativo di tali fenomeni, anche se in principio ciò poteva essere del tutto possibile poichè si trattava di sistemi deterministici. In questi casi l'unica via percorribile consisteva, dunque, nell'inevitabile studio di tali fenomeni mediante metodi stocastici. Attualmente, invece, se è possibile stabilire che un segnale, seppure altamente complesso, è prodotto da un sistema deterministico caratterizzato da pochi gradi di libertà è possibile per il suo studio impiegare diverse tecniche sviluppate per l'analisi dei sistemi caotici [97].

2.2.1 Proprietà dei sistemi caotici

I sistemi caotici in genere sono caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali;
- evolvere secondo attrattori strani;
- mostrare diverse strade verso il caos;
- i confini dei bacini di attrazione nello spazio delle fasi sono di tipo frattale.

Dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali

La *dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali* comporta che variazioni molto piccole delle condizioni iniziali possono produrre variazioni finite capaci di modificare in maniera sostanziale l'evoluzione complessiva del sistema. Se si considera l'evoluzione di un sistema dinamico nel suo spazio delle fasi, due traiettorie distinte, che hanno origine in punti inizialmente molto vicini fra loro, possono manifestare dopo un certo tempo andamenti molto differenti che le portano ad allontanarsi l'una dall'altra in maniera esponenziale. In virtù di tale proprietà, la modifica delle condizioni iniziali, anche se effettuata su una scala caratterizzata da un'ordine di grandezza di molto inferiore a quella del sistema in analisi, può portare a ottenere, dopo un tempo sufficientemente lungo, evoluzioni molto diverse fra loro che rendono estremamente difficile la possibilità di fare previsioni sull'evoluzione futura del sistema.

La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali è concettualmente una scoperta molto importante. Infatti essa mette in luce il meccanismo secondo cui,

anche nel caso in cui si possano conoscere le leggi deterministiche che spiegano un dato fenomeno, la capacità di usare queste leggi per fare predizioni sulla sua evoluzione futura risulta fortemente limitata dall'impossibilità di conoscere in maniera precisa lo stato iniziale del sistema. In questa situazione, dunque, coesistono determinismo e imprevedibilità a lungo termine poiché la conoscenza della condizione iniziale è sempre affetta da una certa imprecisione, dunque, per lo stato iniziale si ammette sempre una piccola componente di casualità. Infatti, quando lo stato di un sistema nell'istante iniziale non può essere fissato in modo preciso, è possibile, comunque, assumere che esso sia distribuito secondo una certa distribuzione di probabilità. Dunque, anche in ogni altro istante di tempo il sistema avrà una distribuzione casuale che potrà essere dedotta dalla distribuzione relativa all'istante iniziale grazie alle leggi deterministiche che regolano l'evoluzione del sistema. La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali rende possibile che da questa piccola quantità iniziale di caso può conseguire, in un momento successivo, una grande quantità di caso o di indeterminazione. Da ciò appare evidente che il determinismo non esclude il caso, inoltre non esiste alcuna incompatibilità logica fra caso e determinismo fisico [90]. Quest'importante osservazione sulla possibilità di conciliare caso e determinismo grazie alle limitazioni relative alla conoscenza dello stato iniziale di un sistema era stata già compiuta da Poincaré che esprime tale concetto, così come riportato da Ruelle, affermando che:

*una causa molto piccola, che ci sfugge, determina un effetto considerevole che non possiamo non vedere, e allora diciamo che tale effetto è dovuto al caso.*³

La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, dunque, pone vincoli molto stretti alla prevedibilità dello stato futuro di un sistema, poiché la previsione dipende sensibilmente dall'accuratezza con cui si è in grado di misurare le condizioni iniziali. Infatti, se si prova a rappresentare sistemi che dipendono sensibilmente dalle condizioni iniziali mediante il calcolatore, fornendo equazioni e dati in ingresso, anche una semplice variazione nell'arrotondamento di una cifra decimale può modificare radicalmente l'evoluzione del sistema stesso. L'immagine in figura 2.5 mostra due differenti traiettorie di un sistema caotico tracciate a partire da due condizioni iniziali che differiscono fra loro per una quantità estremamente piccola.

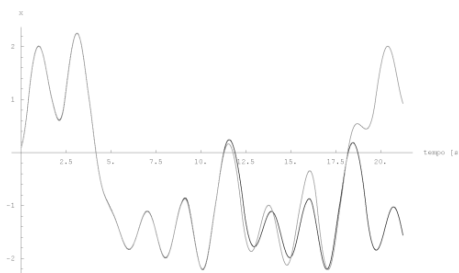


Figura 2.5: Dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali.

³D. Ruelle, *Caso e caos*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992, p. 56.

La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali è una proprietà che caratterizza in modo particolare i sistemi non-lineari, che, anche se in teoria perfettamente deterministici, molto spesso, manifestano dei comportamenti caotici. L'avvento dei calcolatori è stato fondamentale per le ricerche sul comportamento dei sistemi non-lineari poiché ha permesso di affrontare il loro studio sfruttando le potenzialità offerte dal calcolo. Storicamente, la risoluzione per via analitica di equazioni non-lineari ha rappresentato un insormontabile problema per i matematici; recentemente l'uso dei calcolatori ha consentito di simulare i processi descritti da tali equazioni, ottenendo così non più un'equazione della traiettoria, ma una sua approssimazione. Le soluzioni grafiche risultano spesso non solo praticamente sufficienti per le applicazioni, ma anche visivamente immediate per la comprensione del fenomeno.

Attrattori strani

Nella sezione relativa alla teoria qualitativa dei sistemi dinamici si è già introdotto il concetto di attrattore, ossia l'insieme di punti dello spazio delle fasi che definisce la traiettoria su cui si muove il punto rappresentativo di un sistema dinamico deterministico dopo che si sia atteso un tempo abbastanza lungo. L'attrattore descrive, dunque, la situazione di regime del sistema dopo la sparizione dei fenomeni transitori. Perchè questa definizione abbia un senso, è importante che le forze esterne che agiscono sul sistema siano indipendenti dal tempo. È importante anche che ci si interessi a sistemi fisici “*dissipativi*”, ossia a sistemi in cui esistano dei fenomeni o dei meccanismi capaci di dissipare energia. Infatti è proprio la dissipazione di energia che tende a fare sparire i fenomeni transitori spingendo il sistema a evolvere nello spazio delle fasi di dimensione infinita verso un insieme di punti, relativamente piccolo, che rappresenta l'attrattore.

La natura dissipativa dei sistemi caotici determina l'importante caratteristica di manifestare delle orbite nello spazio delle fasi che sono confinate in delle regioni limitate ben determinate. Da ciò deriva che il sistema manifesta un comportamento stabile cioè il sistema non diverge verso l'infinito.

Il punto fisso e il ciclo limite, quest'ultimo rappresentabile mediante una curva chiusa periodica, sono attrattori, così come già illustrato in precedenza. D'altra parte se l'evoluzione di un sistema dinamico in situazione di regime è caratterizzabile mediante un numero finito di modi, essa può essere descritta mediante un “*attrattore quasi periodico*” che matematicamente può essere rappresentato tramite un toro attorno a cui si avvolge la traiettoria del sistema nello spazio delle fasi. La figura 2.6 mostra una traiettoria nello spazio tridimensionale che si sviluppa secondo un toro. Questo tipo di attrattori non vengono denominati strani, poichè sono caratterizzati da geometrie abbastanza semplici, mentre gli attrattori che caratterizzano l'evoluzione dei sistemi caotici sono definiti “*strani*” poichè mostrano le seguenti caratteristiche, che non sono matematicamente equivalenti, ma che in pratica si presentano spesso assieme. Innanzitutto gli *attrattori strani*, dal punto di vista geometrico, hanno un aspetto irregolare: non sono curve o superfici lisce, ma oggetti di “*dimensione non intera*” o, come dice Benoit Mandelbrot [61] sono “*frattali*”. Inoltre, ed è la cosa più importante, il moto su un attrattore strano presenta il fenomeno della dipendenza sensibile alle condizioni iniziali. Infine, benchè gli attrattori strani siano di dimensione finita, la loro analisi in frequenze temporali rivela un “*continuo di frequenze*”.

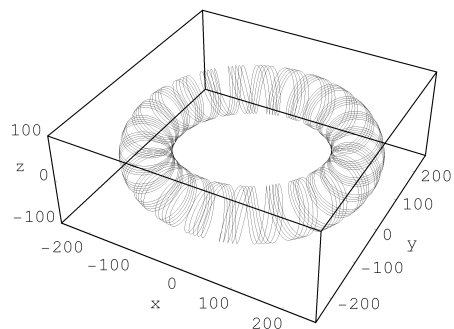


Figura 2.6: Toro limite.

La scoperta degli attrattori strani è stata resa possibile grazie all'impiego dei calcolatori elettronici per simulare l'evoluzione di sistemi dinamici usati per modellare fenomeni naturali. Il primo importante contributo fornito in tale direzione si deve a Edward Lorenz che studiando i fenomeni metereologici e i vari modelli matematici che consentivano di fare previsioni, sviluppò un modello semplificato per la convezione dell'aria nell'atmosfera. La simulazione numerica di tale modello portò Lorenz a scoprire e dimostrare il fenomeno della dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, inoltre egli scoprì che per dati valori dei parametri l'evoluzione del modello era caratterizzata da una ben determinata struttura riportata nella figura 2.7, in seguito nota come "*Farfalla di Lorenz*".

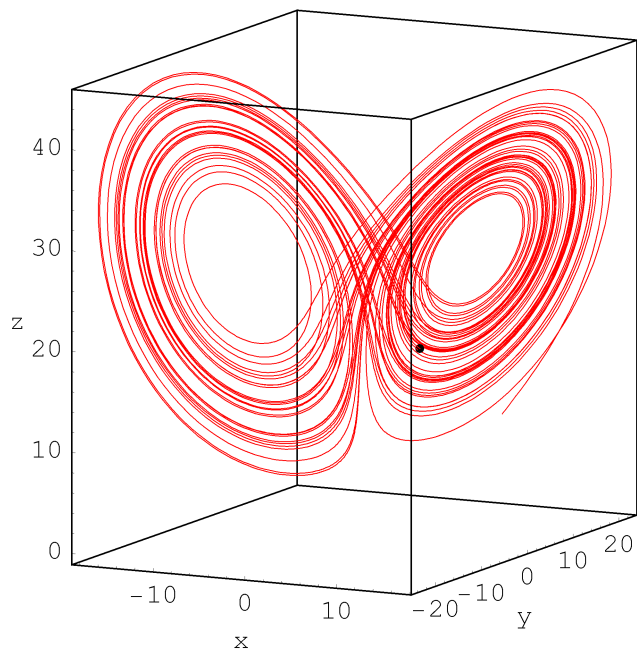


Figura 2.7: Attrattore strano di Lorenz.

L'attrattore strano di Lorenz è caratterizzato da due lobi o "orecchie". Nel corso dell'evoluzione temporale il punto rappresentativo dello stato del sistema che ha inizialmente preso l'avvio da un dato punto iniziale compirà un certo numero di giri attorno al lobo destro dell'attrattore, per poi passare varie volte attorno al lobo sinistro, e successivamente tornare sull'orecchia destra, e così via. Se la posizione del punto iniziale venisse modificata anche in maniera impercettibile, i particolari della figura ne verrebbero modificati totalmente. L'aspetto generale resterebbe uguale, ma i numeri di giri successivi a sinistra e a destra diventerebbero del tutto diversi. Ciò si deve al fatto che l'evoluzione temporale della figura dipende in modo sensibile dalle condizioni iniziali. Il numero di giri a sinistra e a destra è dunque irregolare, apparentemente aleatori, e comunque difficile da prevedere.

Strade verso il caos

Il comportamento caotico può insorgere all'interno di un sistema dinamico in modi diversi e a causa di differenti ragioni. I ricercatori che si occupano dello studio di tali fenomeni hanno identificato diverse strade verso il caos:

- raddoppiamenti di periodo in cascata;
- intermittenza;
- torus breakdown.

Le strade verso il caos rappresentano i meccanismi di fondo che determinano l'insorgere dei comportamenti caotici. La prima strada verso il caos consiste nella così detta cascata dei raddoppiamenti di periodo studiata da Feigenbaum. Al variare dei parametri di controllo di un sistema dinamico spesso si osservano fenomeni di biforcazione che determinano il raddoppiamento del periodo dell'orbita che descrive l'evoluzione del sistema. Un'orbita periodica è sostituita da un'altra, prossima alla prima, nella quale è necessario compiere due giri prima di tornare al punto di partenza: in altri termini, il periodo della nuova orbita è approssimativamente il doppio di quella precedente, così come è rappresentato nelle due immagini riportate in figura 2.8. L'aspetto interessante che è stato scoperto e analizzato da Feigenbaum consiste nella manifestazione a cascata di questo raddoppiamento di periodo che si produce in modo ripetuto, portando all'insorgere di orbite con periodo 4 volte maggiore alla prima, poi 8, 16, 32, 64, e così via. Feigenbaum, osservò che i successivi raddoppiamenti di periodo erano essenzialmente sempre lo stesso fenomeno che si manifestava su scale diverse che poteva essere dunque spiegato introducendo opportuni mutamenti di unità per i diversi parametri che intervengono nel problema [90, 95].

Un secondo modo di giungere al caos consiste nella così detta "*intermittenza*". Questa altra strada al caos può essere caratterizzata dal presentare evoluzioni in cui il sistema alterna intervalli di tempo in cui manifesta un comportamento periodico con altri intervalli in cui manifesta un comportamento caotico. Il termine intermittenza è stato impiegato appositamente per indicare questa alternanza. Il comportamento caotico comincia a insorgere alternato al comportamento periodico, con il procedere della transizione verso il caos, il fenomeno dell'intermittenza si riduce fino a scomparire nel momento in cui il comportamento caotico diventa del tutto predominante [97].

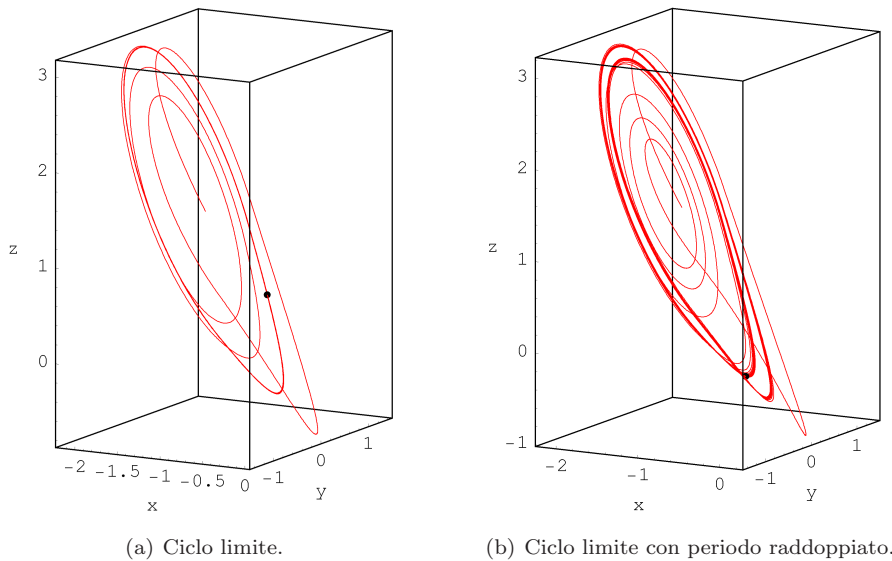


Figura 2.8: Raddoppio del periodo.

La terza strada può avvenire quando l'evoluzione di un sistema dinamico è caratterizzato da un numero finito di modi, in tal caso l'attrattore secondo cui evolve il sistema è quasi periodico e può essere rappresentato matematicamente tramite un toro attorno a cui si avvolge la traiettoria del sistema. La strada verso il caos chiamata "*torus breakdown*" avviene quando il toro perde di stabilità e dunque avviene la sua "rottura" che porta all'insorgere del comportamento caotico.

I confini dei bacini di attrazione nello spazio delle fasi sono di tipo frattale

I confini tra differenti bacini di attrazione nascono nei sistemi dinamici dissipativi quando due o più attrattori sono simultaneamente presenti nello spazio delle fasi. In questo caso, ogni attrattore ha una zona circostante dello spazio delle fasi che contiene tutti i punti che se assunti come condizioni iniziali del sistema determinano un'evoluzione temporale univocamente diretta verso quel dato attrattore. Il confine di un bacino di attrazione è costituito dall'insieme di punti che separano i bacini di attrazione di due attrattori diversi. Tali confini possono avere delle forme geometriche semplici, possono essere costituiti da curve o superfici, oppure possono avere delle forme molto complicate, spesso caratterizzate anche da strutture frattali. Queste complicate strutture sono anche causa dell'impossibilità di predire il comportamento a lungo termine del sistema. Risulta realmente difficile, infatti, stabilire a priori, data una condizione iniziale, caratterizzata da una precisione finita, a quale bacino essa appartenga se i confini fra i diversi bacini sono di natura frattale.

2.2.2 Esempi di sistemi caotici

Nel seguito di questa sezione si presenteranno alcuni dei sistemi dinamici che sono stati utilizzati nel corso del Dottorato di Ricerca per la generazione di suoni e musiche. Nella sezione 2.1 sono state presentate le due differenti rappresentazioni di un sistema dinamico nel caso in cui il tempo si consideri come una variabile di natura continua oppure discreta. Nel caso dei sistemi dinamici discreti la loro evoluzione può essere calcolata mediante il processo d'iterazione delle mappe che definiscono il loro modello matematico. In tal modo si può ricavare una successione ordinata di punti dello spazio delle fasi che descrivono la variazione nel tempo delle variabili di stato del sistema. D'altra parte nel caso dei sistemi dinamici continui tale evoluzione può essere ottenuta risolvendo il sistema di equazioni differenziali che costituisce il loro modello matematico. La risoluzione analitica di un sistema di equazioni differenziali risulta essere un compito attualmente molto complicato se non del tutto impossibile se si considera il caso dei sistemi non-lineari. Per tale motivo spesso si ricorre all'impiego di metodi di risoluzione numerica mediante calcolatore che consentono di simulare l'evoluzione del sistema dinamico tramite l'individuazione di una soluzione approssimata della traiettoria del sistema nello spazio delle fasi. Il processo di risoluzione numerica di un sistema di equazioni differenziali spesso viene indicato con l'espressione: *integrazione numerica* del sistema di equazioni differenziali. L'integrazione numerica del modello matematico di un sistema dinamico rende possibile individuare una sequenza discreta di punti che approssimano la traiettoria continua che è soluzione del sistema di equazioni differenziali. In tal modo, tramite l'impiego del calcolatore, è possibile tracciare una soluzione numerica approssimata dell'evoluzione che subisce nel tempo un qualsiasi sistema dinamico continuo.

Sistemi a una dimensione

La *mappa logistica* è un tipico esempio di un semplice sistema dinamico discreto non-lineare che, tramite un processo d'iterazione, riesce a produrre un comportamento caotico molto complesso. La mappa logistica è una mappa polinomiale resa popolare dal biologo Robert May che la impiegò come modello matematico per lo studio dell'evoluzione temporale di diverse popolazioni di specie biologiche. La mappa logistica può essere scritta in termini matematici come:

$$x_{n+1} = \alpha x_n(1 - x_n) \quad (2.4)$$

dove x_n e x_{n+1} sono definite nell'intervallo $[0, 1]$ e rappresentano lo stato della mappa in corrispondenza dell'iterazione n e $n + 1$, e $0 < \alpha \leq 4$ è il parametro di controllo del sistema che può variare nell'intervallo $(0, 4]$.

L'iterazione della mappa logistica porta a ottenere comportamenti molto differenti fra loro a seconda del valore assunto dal parametro di controllo α . Le immagini riportate in figura 2.9 mostrano alcune delle diverse traiettorie generate al variare del parametro di controllo della mappa logistica. Per $0 < \alpha \leq 1$ l'iterazione della mappa porta a evoluzioni che convergono al punto fisso $x = 0$, così come mostrato nell'immagine 2.9 (a). Per i valori del parametro contenuti nell'intervallo $0 < \alpha < 3$ le iterazioni convergono a un punto fisso di valore pari a: $1 - \frac{1}{\alpha}$, immagine 2.9 (b). Per $\alpha \geq 3$ il punto fisso ancora esiste, ma diviene instabile e dunque appare un ciclo limite che porta l'iterazione

a oscillare tra due distinti valori così come mostra l'immagine 2.9 (c). Per $\alpha = 3,449499$ il ciclo limite si biforca portando a un ciclo limite che oscilla fra quattro valori, immagine 2.9 (d); in seguito, per $\alpha = 3,544090$, questa evoluzione si biforca ulteriormente determinando l'insorgere di un ciclo limite che oscilla fra otto differenti valori, immagine 2.9 (e), infine al crescere del parametro si manifesta il fenomeno della cascata di raddoppiamenti del periodo che causa l'insorgere di evoluzioni caotiche che appaiono per valori del parametro superiori a $\alpha \geq 3,569946$. L'immagine 2.9 (f) riporta la traiettoria relativa a un'evoluzione di tipo caotico.

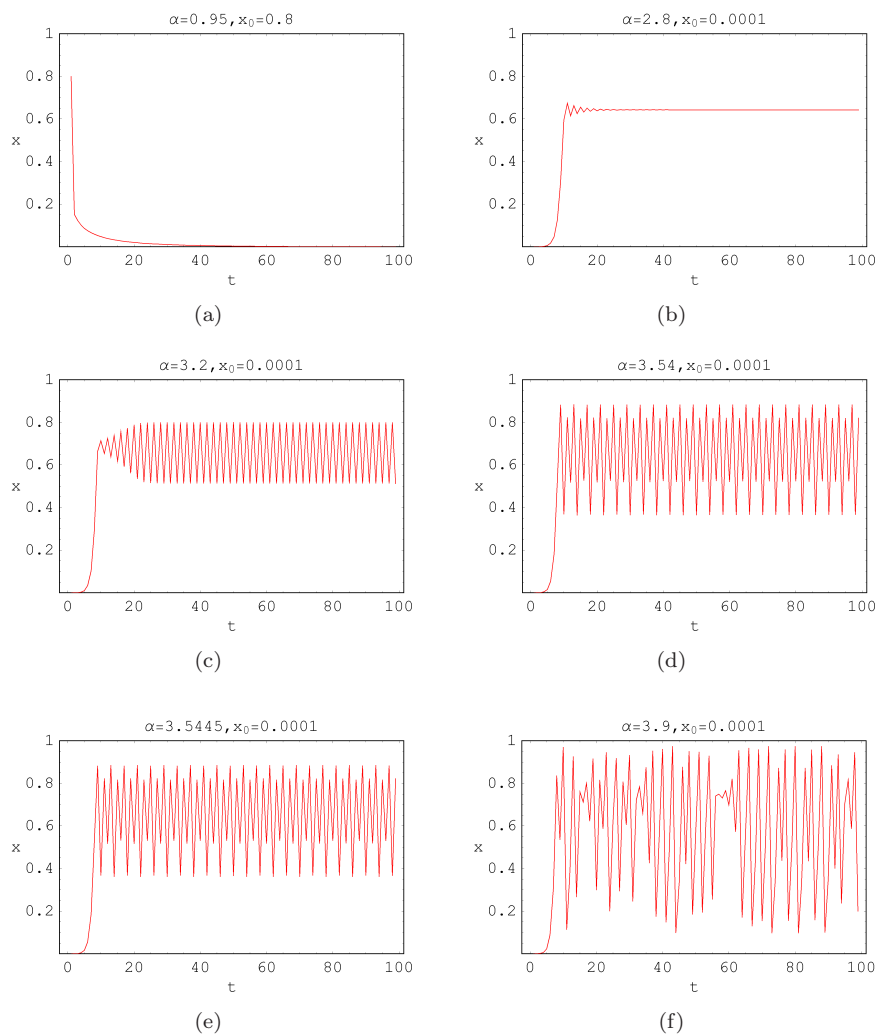


Figura 2.9: Differenti traiettorie tracciate dalla mappa logistica.

La *mappa di biforcazione* è un tipo di grafico che consente di rappresentare le modifiche che subisce il comportamento manifestato dal sistema dinamico al variare di un suo parametro di controllo. In figura 2.10 è riportata la mappa di biforcazione relativa alla mappa logistica. Nell'immagine è possibile individuare

i cambiamenti di comportamento appena illustrati e il fenomeno della cascata di raddoppiamenti del periodo nella zona destra del grafico.

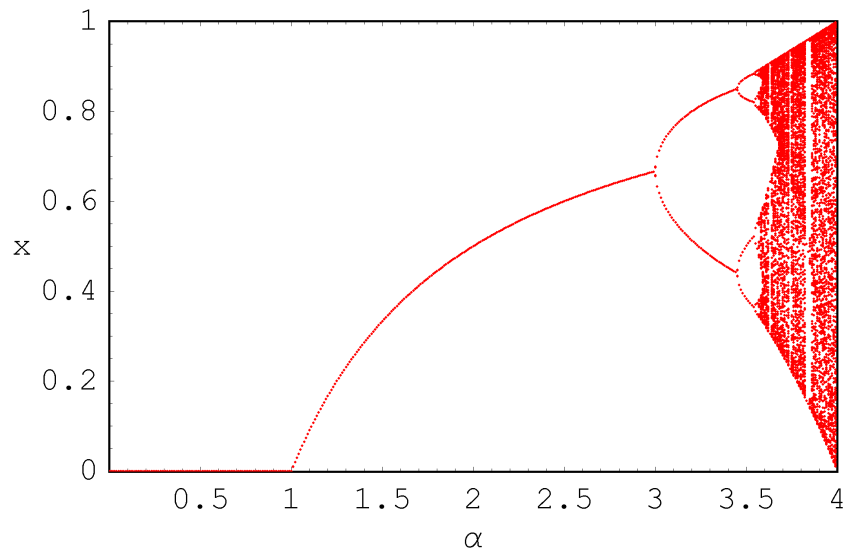


Figura 2.10: Mappa di biforcazione.

Sistemi a due dimensioni

La mappa di Hénon è una mappa discreta del piano Cartesino espressa mediante due equazioni alle differenze:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= y_n + 1 - Ax_n^2, \\ y_{n+1} &= Bx_n, \end{aligned} \tag{2.5}$$

dove A e B sono dei parametri positivi costanti e la sequenza di coppie di valori $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, che si ottengono dall'iterazione della mappa, costituiscono i punti del piano che rappresentano l'evoluzione temporale del sistema dinamico. La figura 2.11 mostra l'attrattore strano che si ottiene quando i valori dei due parametri di controllo sono pari a: $A = 1,4$ e $B = 0,3$.

Questa mappa rappresenta un semplice ed efficiente modello di un sistema dissipativo capace di mostrare un'evoluzione caotica. Il comportamento mostrato dall'iterazione della mappa dipende dai valori assunti dai due parametri, esso può passare da una condizione stabile caratterizzata da punti fissi e cicli limite fino a una condizione caotica caratterizzata da differenti attrattori strani. Le due immagini in figura 2.12 mostrano le mappe di biforcazione che si ottengono rispettivamente per la coordinata x e y quando il parametro A varia nell'intervallo fra 0 e 1,4, il parametro B è stato fissato pari a 0,3. Le due immagini mostrano un andamento molto simile a quello già presentato a riguardo della mappa logistica in cui è possibile riconoscere il fenomeno della cascata di raddoppiamenti del periodo.

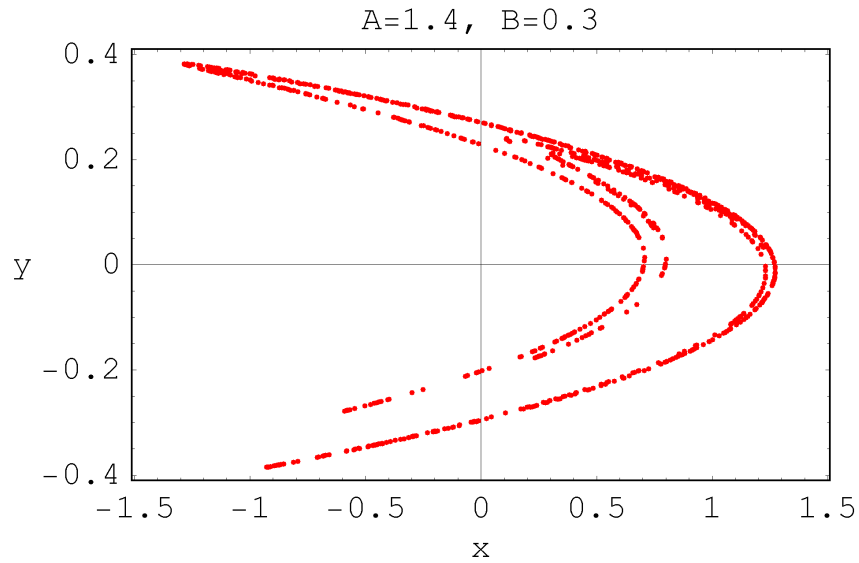


Figura 2.11: Attrattore strano della mappa di Hénon.

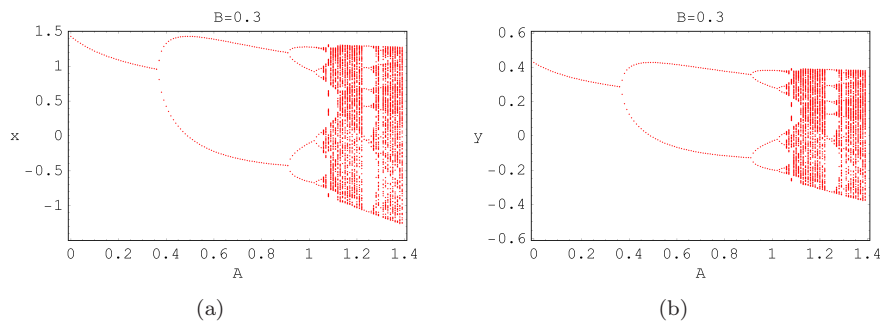


Figura 2.12: Mappe di biforcazione della mappa di Hénon.

Sistemi a tre dimensioni

I sistemi caotici a tre dimensioni sono generalmente continui e dunque rappresentabili tramite delle traiettorie costituite da curve continue nello spazio tridimensionale.

Il modello sviluppato da Lorenz per studiare in maniera semplificata la convezione nell'atmosfera è caratterizzato da un sistema di tre equazioni differenziali [60]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x), \\ \dot{y} = Rx - y - xz, \\ \dot{z} = xy - Bz, \end{cases} \quad (2.6)$$

dove σ , R e B sono dei parametri costanti positivi. Come anche nel caso degli altri modelli presentati finora la modifica dei valori dei parametri di controllo influisce sul comportamento a lungo termine del sistema. Per esempio per va-

lori del parametro R compreso fra 0 e 1 tutte le orbite indipendentemente dalla condizione iniziale sono attratte verso un punto fisso che è rappresentato dall'origine del sistema di coordinate $(0, 0, 0)$. Per valori di R compresi fra 1 e il *valore critico* pari a 27,74 le orbite convergono verso uno dei due punti fissi stazionari caratterizzati dalle seguenti coordinate $(\pm\sqrt{B(R-1)}, \pm\sqrt{B(R-1)}, R-1)$. Le due immagini in figura 2.13 mostrano due traiettorie che, partendo da condizioni iniziali differenti, convergono verso i due diversi punti fissi. Per valori del parametro R maggiori del valore critico i punti stazionari diventano instabili e repulsivi portando alle condizioni che fanno sorgere l'evoluzione caotica che conduce anche alla creazione del ben noto attrattore “a farfalla” mostrato in figura 2.7. L'attrattore strano appare quando i parametri di controllo del sistema assumono i seguenti valori: $\sigma = 10, R = 28, B = 8/3$. Come in molti altri sistemi caotici non tutte le traiettorie ottenute per valori del parametro R superiori al valore critico sono di natura caotica, esistono infatti delle finestre di comportamento periodico che spesso si trovano alternate alle regioni caratterizzate da evoluzioni caotiche.

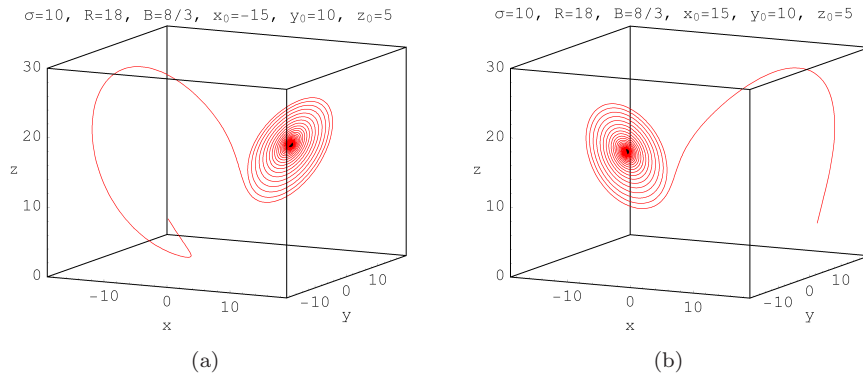


Figura 2.13: Punti fissi del sistema di Lorenz.

Il circuito di Chua [26] è un circuito elettronico non-lineare costituito da quattro elementi lineari (due condensatori, un'induttanza e una resistenza) e da un componente non-lineare chiamato *diodo di Chua*. La figura 2.14 mostra lo schema elettrico del circuito di Chua il componente sulla destra indicato con N_R rappresenta l'elemento non-lineare la cui caratteristica tensione-corrente è rappresentata in figura 2.15. Il circuito di Chua è un sistema dinamico non-lineare che rappresenta un paradigma universale per lo studio dei fenomeni caotici poiché dà luogo a un'ampia gamma di comportamenti diversi e di evoluzioni temporali che possono evolvere secondo un grande numero di attrattori strani. Il diodo di Chua può essere realizzato mediante una rete elettrica composta da alcune resistenze e da due amplificatori operazionali. La figura 2.16 mostra una fotografia del circuito di Chua, da sinistra a destra è possibile vedere l'induttanza, il resistore, i due condensatori e infine sulla destra la rete di resistenze che permettono di realizzare la caratteristica non-lineare del diodo. Nella fotografia non sono visibili gli amplificatori operazionali che sono stati collocati sul lato nascosto della piastra.

Dal circuito deriva l'omonimo oscillatore di Chua [26, 27], che differisce dal primo per l'aggiunta della resistenza R_0 in serie all'induttanza L . La figura 2.17

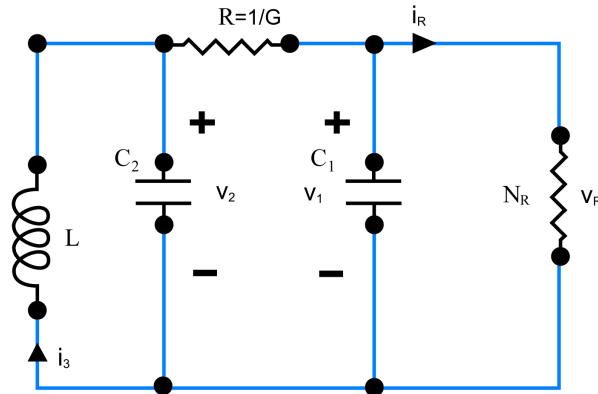


Figura 2.14: Schema del circuito di Chua.

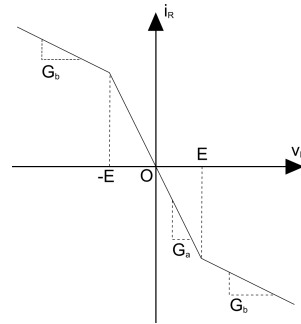


Figura 2.15: Caratteristica del diodo di Chua.

mostra lo schema elettrico dell'oscillatore di Chua in cui rispetto al circuito è stata aggiunta la resistenza R_0 .

Le equazioni di stato dell'oscillatore di Chua sono definite mediante il seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{C_1}[G(v_2 - v_1) - f(v_1)] \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{C_2}(G(v_1 - v_2) + i_3) \\ \frac{di_3}{dt} = -\frac{1}{L}(v_2 + R_0 i_3) \end{cases} \quad (2.7)$$

dove:

$$G = \frac{1}{R}, \quad (2.8)$$

e $f(v_1)$ rappresenta la caratteristica non-lineare del diodo che può essere definita tramite la relazione:

$$f(v_1) = G_b v_1 + \frac{1}{2}(G_a - G_b)\{|v_1 + E| - |v_1 - E|\}. \quad (2.9)$$

Da questo sistema di equazioni è possibile ricavare anche le equazioni di stato del circuito di Chua ponendo pari a zero il valore della resistenza R_0 . Dall'equazioni di stato dell'oscillatore è possibile ricavare anche un modello matematico

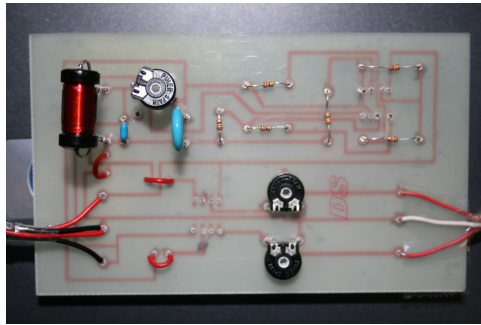


Figura 2.16: Fotografia del Circuito di Chua.

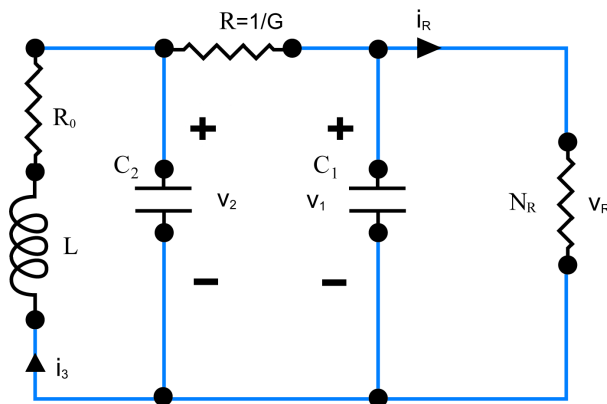


Figura 2.17: Schema dell'oscillatore di Chua.

adimensionale in cui non compaiono le varie grandezze fisiche dei componenti elettrici, ma si utilizzano sei parametri adimensionali. Questa seconda formulazione risulta essere particolarmente adatta alla simulazione dell'oscillatore di Chua mediante metodi numerici. Di seguito è riportato il sistema di equazioni differenziali relativo alla formulazione adimensionale:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \kappa\alpha[y - x - f(x)] \\ \frac{dy}{d\tau} = \kappa(x - y + z) \\ \frac{dz}{d\tau} = \kappa(-\beta y - \gamma z) \end{cases} \quad (2.10)$$

dove $f(x)$ è definito come:

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\} \quad (2.11)$$

Negli ultimi venti anni numerosi ricercatori hanno analizzato e studiato i vari fenomeni e comportamenti caotici manifestati sia dal circuito, sia dall'oscillatore di Chua. Questi due semplici circuiti elettronici, tramite studi empirici, simulazioni numeriche e dimostrazioni matematiche sono diventati un paradigma universale per lo studio dei fenomeni caotici. Numerose ricerche hanno

mostrato che entrambi i circuiti assieme ai relativi modelli matematici possono generare un'ampia gamma di attrattori strani e differenti strade verso il caos [17]. La figura 2.18 mostra le immagini di quattro diversi attrattori generati dall'oscillatore di Chua. Queste sono state ottenute utilizzando un visualizzatore 3D appositamente sviluppato per la rappresentazione grafica delle traiettorie in un spazio tridimensionale; il programma sarà presentato più in dettaglio nella sezione 8.1.4. La tabella 2.1 mostra i valori dei sei parametri del modello adimensionale dell'oscillatore di Chua relativi ai quattro attrattori riportati in figura.

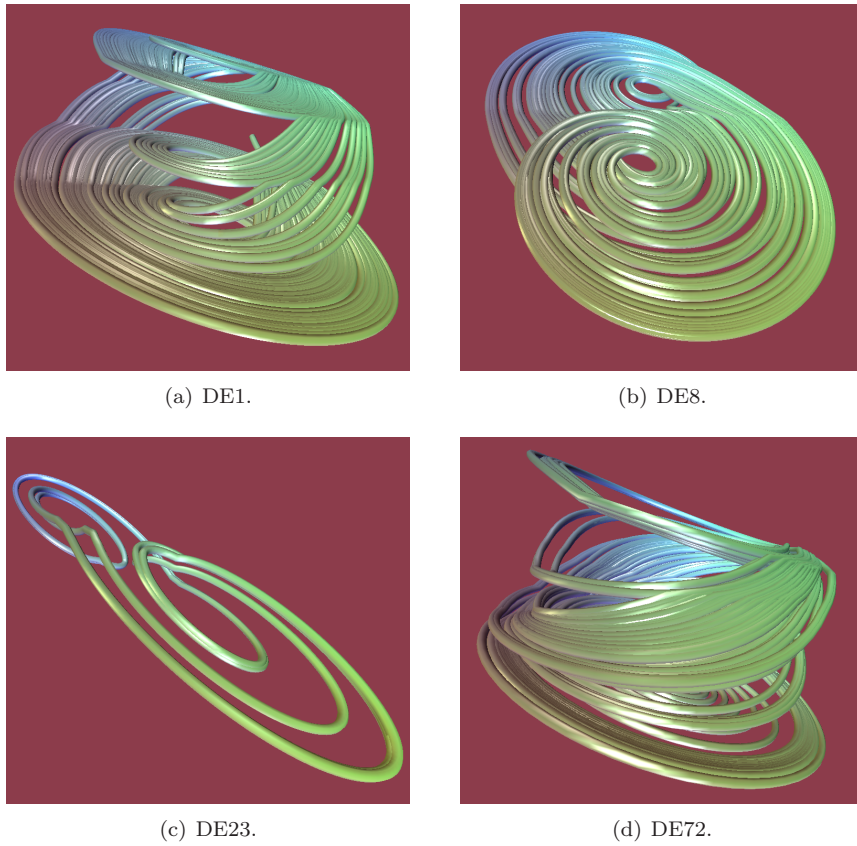


Figura 2.18: Attrattori generati dall'oscillatore di Chua.

	α	β	γ	a	b	κ
DE1	9,351591	14,790320	0,0160740	-1,138411	-0,722451	1
DE8	-4,898979	-3,624135	-0,00118088	-2,501256	-0,929720	1
DE23	-1,458906	-0,0930719	-0,321435	1,218416	-0,512844	-1
DE72	3,709100	24,079971	-0,859256	-2,764722	0,13	1

Tabella 2.1: Parametri attrattori.

2.3 Complessità

La complessità è una nozione che appartiene al vocabolario quotidiano, spesso se ne ha una conoscenza intuitiva specialmente in riferimento a tutto ciò che è più strettamente correlato ai fenomeni naturali e alle varie manifestazioni della natura. Nonostante ciò, ancora non è stata formulata una definizione sufficientemente rigorosa che renda possibile trattare questo concetto in termini scientifici.

Si può affermare che un oggetto, sia esso fisico oppure di natura intellettuale, è complesso se contiene informazioni difficili da ottenere. Così Ruelle [90] tenta di avviare una definizione del concetto di complessità, anche se in questa affermazione resta non precisato in alcun modo che cosa significhi “difficili da ottenere” rendendo tale definizione incompleta e senza un significato preciso. L’impiego di una lingua “naturale”, come l’italiano o qualsiasi altra lingua usata dagli uomini nella vita quotidiana, rende possibile formulare definizioni vaghe e imprecise, così come quella appena data. Quest’imprecisione a seconda dei casi può risultare un vantaggio più che un inconveniente, anche se nel caso in cui si voglia far progredire la conoscenza scientifica risulta assolutamente necessario essere più rigorosi e più formali definendo con maggiore dettaglio i termini del discorso. Poichè non esiste, ancora, una definizione completamente accettata di complessità, è necessario, a seconda del punto di vista, mettere in luce i diversi aspetti parziali dell’intero fenomeno che possono essere a seconda dei casi di maggiore interesse. In tal modo sono state proposte da differenti autori varie definizioni parziali di complessità. Come sottolineano Prigogine e Nicolis [74], probabilmente è più opportuno, e meno ambiguo, parlare di *comportamento complesso*, piuttosto che di sistemi complessi, poichè in molti casi uno stesso sistema può mostrare in determinate condizioni dei comportamenti “semplici”, mentre in altre condizioni, diverse dalle prime, può manifestare dei comportamenti complessi.

Anche se appare arduo dare una precisa definizione della complessità risulta abbastanza evidente che i comportamenti complessi debbano essere collocati in un territorio intermedio posto fra ordine e disordine, poichè sono caratterizzati da evoluzioni che non sono nè regolari e prevedibili, nè d’altra parte casuali o completamente caotiche. Un sistema che sia capace di mostrare dei comportamenti complessi è tipicamente costituito da una collezione di agenti distinti, caratterizzati da un elevato grado di autonomia, che sono opportunamente connessi fra loro da una serie di legami che introducono un certo grado di mutua dipendenza fra i diversi agenti. La natura delle interazioni che avvengono fra gli agenti è frequentemente di tipo non-lineare determinando, dunque, un’evoluzione del sistema tipicamente non predicibile e non controllabile. Le interazioni non-lineari fra i vari componenti di un tale sistema introducono fenomeni di *feedback* che possono essere sia di tipo *positivo*, rendendo il sistema estremamente sensibile alla variazione delle condizioni iniziali, poichè piccole perturbazioni possono essere amplificate fino ad avere effetti su scala globale, sia di tipo *negativo*, spingendo il sistema a manifestare comportamenti stabili tramite il progressivo smorzamento delle fluttuazioni dovute a perturbazioni esterne. L’evoluzione dinamica dei sistemi che mostrano tipicamente comportamenti complessi è caratterizzata dalla coesistenza di entrambe i tipi di feedback, in tal modo infatti è possibile conciliare la stabilità del sistema con la possibilità di stabilire interazioni non distruttive e dunque adattarsi ai cambiamenti che

avvengono nell'ambiente esterno.

I comportamenti complessi sono frequentemente caratterizzati da un elevato grado di imprevedibilità che coesiste con una naturale tendenza del sistema all'auto-organizzazione. Questa proprietà induce il sistema a dare vita spontaneamente a delle strutture organizzate su scala globale che sorgono a partire dalle interazioni tra agenti operanti su scala locale. I processi di auto-organizzazione trasformano l'insieme dei singoli agenti in tutto unico che manifesta delle proprietà, chiamate "*emergenti*", che non possono essere comprese e spiegate esclusivamente a partire dal comportamento dei singoli elementi che costituiscono il sistema. In tali circostanze i singoli elementi interagiscono tra loro su scala locale e la loro cooperazione, legata a fenomeni di sinergia, determina il comportamento globale del sistema fornendo anche proprietà che possono essere completamente estranee agli elementi singoli che costituiscono il sistema stesso.

2.3.1 Auto-organizzazione

L'auto-organizzazione può essere definita come l'emergenza spontanea di strutture globali a partire dalle interazioni che avvengono su scala locale. Il termine "spontaneo" in questo caso sta a indicare che non esiste alcun agente, sia esso interno oppure esterno al sistema, che è direttamente responsabile del controllo del processo di organizzazione. L'auto-organizzazione può essere spiegata considerando che le varie interazioni, che operano a livello locale, possono portare all'insorgere di sinergie e di fenomeni di organizzazione che tendono ad avere ripercussioni su scala globale tramite la costituzione di strutture o di comportamenti che coinvolgono l'intero sistema. I processi di auto-organizzazione rendono possibile la creazione di strutture ordinate a partire da sistemi dominati da evoluzioni caotiche, tali strutture sono dovute a processi collettivi poiché distribuiti su tutti gli agenti che compongono il sistema.

I fenomeni di auto-organizzazione rendono i sistemi particolarmente robusti e resistenti ad affrontare possibili danni e perturbazioni provenienti dall'ambiente esterno. La robustezza del sistema è dovuta principalmente alla sua natura distribuita che fa sì che non esistano componenti o parti fondamentali per il funzionamento complessivo, ciò è anche estremamente importante poiché rende possibile l'adattamento e l'evoluzione del sistema. Infatti, il manifestarsi di cambiamenti locali di funzionamento, indotti dall'esterno in alcuni elementi, non può spingere tutto il sistema verso l'instabilità, ma al contrario determinare una sua risposta che può portare verso l'adattamento a quel cambiamento oppure verso il controbilanciamento tramite un'opportuna modifica del proprio stato interno. L'adattamento, quindi, può essere spiegato come la ricerca di un equilibrio dinamico volto alla costante ridefinizione del rapporto tra il sistema e l'ambiente in cui esso si trova immerso.

L'auto-organizzazione, dunque, costituisce il meccanismo che rende possibile trasformare un insieme di singoli agenti in un tutto unico che manifesta delle proprietà emergenti, che possono essere completamente estranee agli elementi singoli che costituiscono il sistema stesso.

2.3.2 Fenomeni emergenti

L'insorgere di strutture imputabili a processi di auto-organizzazione determina la costituzione di proprietà emergenti che non possono essere spiegate in termini delle proprietà locali dei costituenti elementari. Infatti i singoli agenti che costituiscono il sistema perdono parte della loro autonomia per dare vita a una organizzazione che rappresenta un "*tutto unico*" che, proprio grazie alle proprietà emergenti, si è trasformato in qualcosa di più della somma delle varie parti che lo costituiscono. Un comportamento emergente compare, dunque, dall'interazione di un numero sufficiente di agenti che, in quanto collettività, danno origine a comportamenti più complessi. La proprietà stessa, che non è predicibile e non ha precedenti, rappresenta un nuovo livello di evoluzione del sistema. I comportamenti complessi non sono proprietà delle singole entità e non possono essere facilmente riconosciuti o dedotti dal comportamento di entità appartenenti al livello più basso. Una delle ragioni per cui si verifica un comportamento emergente è che il numero di interazioni tra le componenti di un sistema aumenta combinatoriamente con il numero delle componenti, consentendo il potenziale emergere di nuovi e più impercettibili tipi di comportamento. D'altro canto, non è di per sé sufficiente un gran numero di interazioni per determinare un comportamento emergente, perché molte interazioni potrebbero essere irrilevanti, oppure annullarsi a vicenda. In alcuni casi, un gran numero di interazioni può in effetti contrastare l'emergenza di comportamenti interessanti, creando un forte "rumore di fondo" che può annullare l'insorgere di proprietà emergenti. Dunque non è solo il numero di connessioni tra le componenti a incoraggiare l'emergenza, ma anche il modo e l'organizzazione delle varie connessioni che interconnettono la moltitudine degli elementi. Un'organizzazione gerarchica è un esempio di struttura che può contribuire a generare un comportamento emergente; ma, forse in maniera più interessante, un comportamento emergente può nascere anche da strutture organizzative molto più decentralizzate in cui è del tutto assente qualsiasi tipo di organizzazione gerarchica. In molti casi, comunque, il sistema deve raggiungere una certa soglia di combinazione di diversità, organizzazione e connettività prima che si possa presentare qualsiasi forma di comportamento emergente. Per tale motivo è abbastanza diffusa la convinzione che le proprietà emergenti possano essere modellate mediante i meccanismi studiati in fisica relativamente ai fenomeni delle transizioni di fase.

Dal punto di vista strettamente epistemologico, tutto ciò conduce a prediligere, per l'analisi di sistemi con molte componenti, una visione globale, principalmente ispirata a un approccio di tipo olistico, che è in netto contrasto con l'impostazione scientifica classica basata, invece, su un approccio riduzionista. L' "*emergenza*", dunque può essere definita come frutto di un processo di formazione di schemi complessi a partire dall'interazione di un insieme di agenti che operano secondo regole semplici. Un fenomeno, per essere definito emergente, deve essere inaspettato e imprevedibile se analizzato mediante lo studio delle proprietà degli elementi a un livello di osservazione più basso. Inoltre, il fenomeno deve coinvolgere l'intera collettività di agenti ed essendo intrinsecamente distribuito su tutta la collettività far sì che in molti casi il fenomeno globale non sussista o sia presente soltanto in piccole tracce ai livelli più bassi.

Alcune proprietà sono definite emergenti poichè a partire dai comportamenti semplici e ben definiti dei singoli componenti del sistema, nasce un comportamento globale non imputabile direttamente al funzionamento delle singole parti.

Le proprietà emergenti non sono attribuibili a un singolo evento, a una precisa regola opportunamente codificata nel sistema, o a qualche agente esterno che impartisce ordini e controlla il sistema. Un esempio biologico di tali proprietà può essere riscontrato in una colonia di formiche in cui nè la regina nè altri tipi di agenti impartiscono ordini; ogni singola formica reagisce esclusivamente a stimoli, in forma di odori chimici provenienti dalle larve, dalle altre formiche, da intrusi, cibo o altro. Ciascuna formica, a sua volta, lascia dietro di se una traccia chimica che serve da stimolo per tutte le altre. Ogni formica rappresenta dunque un'unità autonoma che reagisce solamente in relazione all'ambiente e alle regole genetiche della sua specie. Nonostante la mancanza di un ordine centralizzato, le colonie di formiche esibiscono un comportamento complesso e hanno dimostrato la capacità di affrontare problemi geometrici come per esempio, localizzare un punto alla distanza massima da tutte le entrate della colonia per disporvi i corpi morti. In maniera simile la forma e il comportamento di uno stormo di uccelli o di un branco di pesci sono buoni esempi di proprietà emergenti. Molte altre proprietà e strutture emergenti possono essere ritrovate sia in fenomeni naturali sia in campo fisico e biologico. Anche la struttura spaziale e la forma delle galassie è una proprietà emergente, che caratterizza la distribuzione su larga scala dell'energia e della materia nell'universo. I fenomeni meteorologici come gli uragani sono, per esempio, proprietà emergenti. Molti studiosi sostengono che la coscienza e la vita stessa siano proprietà emergenti di una vasta rete di interazioni, rispettivamente di neuroni e di molecole complesse. Secondo questa prospettiva l'intelligenza e la coscienza emergerebbero dalle connessioni tra i neuroni, senza la necessità di ipotizzare un'anima per spiegare come il cervello possa essere intelligente, mentre i singoli neuroni di cui esso è costituito non lo sono. La vita è la maggiore fonte di complessità e l'evoluzione è il principio fondamentale, la forza che guida la vita. In questa visione, l'evoluzione è la ragione principale della complessità crescente nel mondo naturale. Esiste anche una visione secondo cui l'inizio e lo sviluppo dell'evoluzione stessa possono essere considerati una proprietà emergente delle leggi fisiche del nostro universo.

I processi o comportamenti emergenti possono essere osservati ovunque, dagli organismi biologici pluricellulari, all'andamento del traffico nelle città o nelle simulazioni informatiche e infine negli automi cellulari. Il mercato della borsa valori è un esempio di emergenza su larga scala. Complessivamente regola i prezzi relativi delle compagnie del mondo, ma non ha leader, non esiste cioè un'entità che controlla il funzionamento dell'intero mercato. Gli agenti o gli investitori conoscono solo un limitato numero di compagnie nell'ambito del loro portafoglio e devono seguire le regole del mercato. Attraverso le interazioni dei singoli investitori emerge la complessità del mercato di borsa nel suo insieme. Alcuni esempi noti sono GNU/Linux ed altri progetti di software libero, il World Wide Web e l'enciclopedia online Wikipedia. Tali progetti decentralizzati e distribuiti non sarebbero possibili senza un gran numero di partecipanti, nessuno dei quali conosce e ha consapevolezza dell'intera struttura nel suo complesso. Ognuno ha la possibilità di operare e conoscere solo una parte, ma tutti hanno la sensazione di partecipare a qualcosa di più grande di loro. Il feedback dall'alto aumenta la motivazione e l'unità del progetto, mentre il contributo dal basso incrementa la varietà e la flessibilità del sistema.

2.4 Metodi evolutivi

In natura, le strutture biologiche che riescono ad adattarsi meglio al proprio ambiente sopravvivono e si riproducono con maggiore velocità. Queste strutture possono essere pensate, così come è stato delineato da Darwin, come il frutto dei processi di evoluzione e di selezione naturale che operano all'interno dell'ambiente per un certo periodo di tempo. Le strutture che è possibile osservare in natura sono dunque conseguenza diretta di un processo di adattamento basato sulla selezione naturale e sulla creazione di nuove strutture mediante la riproduzione e la mutazione.

I principi dell'evoluzione naturale possono essere applicati anche nello sviluppo di sistemi artificiali per la soluzione di un'ampia gamma di problematiche. Oggi, l'impiego di metodi evolutivi è molto diffuso in diversi campi: dall'informatica, all'apprendimento automatico, all'ottimizzazione di sistemi, allo studio dei sistemi sociali ed economici, fino al design e allo sviluppo di applicazioni creative e artistiche. Nell'informatica i metodi evolutivi sono utilizzati per la selezione di programmi che siano capaci di far svolgere ai calcolatori determinati compiti senza il bisogno di programmare esplicitamente il metodo da utilizzare per lo svolgimento, questo ambito di ricerca è comunemente chiamato “*Genetic Programming*” [53]. I metodi evolutivi, oltre che come strumento di ottimizzazione in vari campi dalla progettazione meccanica all'economia, possono anche essere utilizzati come mezzo di supporto alla creatività nel campo del design, dell'arte [6] e della musica [71].

2.4.1 Algoritmi genetici

Gli “*Algoritmi Genetici*” [31] rappresentano il primo metodo di calcolo, inventato da Holland nei primi anni '70, ispirato ai principi dell'evoluzione naturale. Anche se tutti i meccanismi che guidano l'evoluzione naturale non sono ancora stati completamente compresi è diffusamente accettata la convinzione che in natura l'evoluzione operi sui *cromosomi* che rappresentano il mezzo tramite cui viene codificata l'informazione biologica relativa a una data specie vivente. Un essere vivente si sviluppa a partire da un processo di decodifica del cromosoma. La selezione naturale rappresenta il mezzo che consente di mettere in relazione il cromosoma con il grado di adattamento che le strutture decodificate hanno con l'ambiente esterno. La selezione naturale, infatti, fa sì che le strutture che nascono dalla decodifica dei cromosomi abbiano maggiori o minori possibilità di sopravvivere e di riprodursi a seconda del maggiore o minore grado di adattamento all'ambiente esterno. Il processo di evoluzione ha luogo grazie proprio alla riproduzione che, assieme al fenomeno della mutazione, porta alla creazione di nuovi cromosomi che possono generare delle strutture con un grado di adattamento maggiore rispetto a quello dei genitori.

Ispirandosi ai principi dell'evoluzione naturale, gli algoritmi genetici basano il proprio funzionamento sull'evoluzione di un “*cromosoma artificiale*” che codifica la soluzione di un dato problema sotto forma di una stringa di simboli, detto anche genoma o genotipo. L'informazione può essere codificata nel genoma mediante un semplice codice binario o, come proposto più recentemente, tramite un codice alfanumerico o composto da numeri reali. Il processo evolutivo si realizza su di una popolazione di individui, di dimensione costante, ciascuno dei quali è caratterizzato da una propria stringa che definisce il suo genoma. Ogni

individuo della popolazione rappresenta, quindi, una possibile soluzione del problema. Come in natura, il processo evolutivo procede senza alcuna conoscenza diretta dello specifico problema da risolvere operando esclusivamente sulla ricombinazione del materiale genetico tramite i meccanismi tipici dell'evoluzione biologica.

Lo spazio di tutte le possibili soluzioni del problema è comunemente indicato come lo *spazio delle soluzioni* (*search space*). In genere gli algoritmi genetici sono applicati a problemi in cui lo spazio delle soluzioni è troppo ampio per essere esplorato per intero poichè le potenzialità che caratterizzano i metodi evolutivi consentono di individuare in maniera sufficientemente rapida soluzioni ottime o pseudo-ottime al problema. Un algoritmo genetico standard procede nel seguente modo: una popolazione di individui viene generata in modo casuale o in base a informazioni note. Per ogni successivo passo evolutivo, comunemente chiamata generazione, tutti i genomi degli individui contenuti nella popolazione vengono decodificati e valutati secondo una particolare funzione dipendente dal problema in esame detta *funzione di fitness* che valuta ciascun individuo in base al suo adattamento alla soluzione del problema. La fase successiva consiste nella selezione degli individui che mostrano il maggiore grado di adattamento. In tal modo si cerca d'individuare i genomi che dopo la decodifica generano le soluzioni migliori al problema. La selezione è strettamente legata al processo di creazione della nuova popolazione poichè ai genomi, che codificano soluzioni con un elevato grado di adattamento, viene attribuita una maggiore probabilità di essere scelti come genitori per la creazione della nuova generazione. Il criterio di Holland per esempio rappresenta uno dei metodi più utilizzati per realizzare ciò, in questo caso si attribuisce una probabilità di scelta proporzionale al grado di adattamento. Grazie al meccanismo della selezione, solo gli individui migliori hanno la possibilità di riprodursi e quindi di trasmettere il loro genoma alle generazioni successive. Per la creazione di nuovi individui ad ogni generazione si utilizzano due operazioni ispirate dall'evoluzionismo biologico: l'incrocio (crossover) e la mutazione. Una volta individuati una coppia di genitori con il meccanismo della selezione, i loro genomi possono essere utilizzati per creare due nuovi cromosomi tramite le due operazioni genetiche.

Quando due genitori vanno incontro a crossover, il loro genoma viene scambiato da un certo punto in poi creando due nuovi cromosomi che successivamente possono essere soggetti a mutazione secondo una certa probabilità stabilita. Il classico meccanismo d'incrocio, conosciuto come *one point crossover*, si realizza, a partire da due genomi, tagliando le stringhe in una posizione scelta a caso e producendo due segmenti "testa" e due segmenti "coda". I segmenti coda sono poi scambiati per produrre due nuovi cromosomi di lunghezza completa. Ciascuno dei figli eredita alcuni geni da ognuno dei due genitori.

La mutazione consiste nel cambiamento casuale di un simbolo all'interno del genoma. I due individui che si ottengono così, rappresentano i discendenti (*offspring*) dei due genitori e prenderanno il loro posto nella prossima generazione. Si ripete il processo fino a ottenere un numero di discendenti uguale a quello dei genitori. Ottenuta la nuova generazione, si ripete il processo un certo numero di volte, creando di volta in volta una popolazione che nella maggior parte dei casi è caratterizzata da un livello di adattamento crescente. Quando si crea una nuova popolazione attraverso crossover e mutazioni si ha una grande probabilità di perdere il miglior cromosoma. L'elitismo è un metodo attraverso cui si risolve questo problema perché prevede che, prima di proseguire nella ricerca

delle soluzioni, si effettui una copia del miglior cromosoma (o i pochi migliori) nella popolazione successiva. E' chiaro come, grazie a questa tecnica, si assicuri una rapida crescita della performance dell'algoritmo.

Se l'algoritmo genetico è correttamente implementato, la popolazione evolverà in molte generazioni in modo che la fitness del miglior individuo e la media in ciascuna generazione cresca verso l'ottimo globale. La convergenza rappresenta una misura del progresso di una popolazione verso uno stato di crescente uniformità attorno a una soluzione ottima del problema. La crescita dell'adattamento medio della popolazione è dovuto al processo evolutivo che consente di selezionare e di generare nuovi genomi che codificano delle soluzioni sempre più prossime alla soluzione ottima del problema. Tuttavia, bisogna tenere presente che, essendo un processo essenzialmente stocastico, non è garantita né la convergenza, né il raggiungimento della soluzione ottima. Spesso infatti la popolazione si stabilizza su ottimi locali che possono differire da quello assoluto.

A questo riguardo bisogna sottolineare che non esistono dei risultati teorici certi sul funzionamento e sulla convergenza degli algoritmi genetici. Non c'è una teoria generalmente accettata che spieghi esattamente perché una metodologia simile presenti determinate proprietà, ma sono state fatte alcune ipotesi che possono parzialmente spiegarne il successo ed essere tenute in considerazione per implementare un buon algoritmo. Molta della ricerca sugli algoritmi genetici si è concentrata nell'individuare regole empiriche capaci di fornire risultati soddisfacenti in un'ampia gamma di applicazioni. In generale non esistono neanche metodi teorici che possano essere utilizzati per definire i valori dei vari parametri che guidano il processo evolutivo, come per esempio il numero ottimale di individui che costituiscono la popolazione, o le diverse probabilità degli operatori genetici. In genere questi parametri vengono scelti per via empirica a seconda delle caratteristiche del particolare problema.

Il teorema dello schema di Holland è la prima rigorosa spiegazione del perché gli algoritmi genetici funzionino. Uno schema è un modello di rappresentazione delle combinazioni dei valori dei diversi geni che compongono il genoma che può essere rappresentato tramite una stringa di caratteri. Il Teorema dello schema spiega la potenza di un algoritmo genetico in termini di quantità di schemi processati. Poiché agli individui della popolazione viene data la possibilità di riprodursi in maniera proporzionale al proprio valore di fitness, gli individui migliori contribuiscono maggiormente alla scrittura dei geni nelle generazioni successive. Un alto valore di fitness implica il possesso di schemi maggiormente adatti alla soluzione del problema che, dunque, hanno maggiore probabilità di passare alla generazione successiva facendo aumentare le possibilità di trovare soluzioni sempre migliori.

La ricerca genetica realizza un compromesso tra "sfruttamento" (*exploitation*) delle migliori soluzioni disponibili ed "esplorazione" (*exploration*) dell'intero spazio di ricerca [46]. Lo sfruttamento delle soluzioni disponibili corrisponde alla ricerca locale attorno a zone dello spazio delle soluzioni che hanno mostrato di fornire buoni risultati. D'altra parte l'esplorazione dello spazio delle soluzioni spinge a effettuare una ricerca globale che tende a evitare l'eccessivo sfruttamento di una soluzione che può portare l'algoritmo a convergere ad una soluzione non ottimale poiché la ricerca resta intrappolata in un ottimo locale. D'altra parte un eccessivo sbilanciamento verso la ricerca globale può tendere a non dare il giusto peso allo sfruttamento appropriato delle soluzioni già disponibili rendendo il processo di ricerca molto lento come per esempio avviene nel caso

della ricerca casuale. Gli operatori genetici possono essere pensati come sistemi per svolgere le due operazioni di ricerca. Infatti, la mutazione accoppiata alla selezione rappresenta lo strumento per compiere lo sfruttamento dello spazio delle soluzioni già esaminato in maniera da accumulare l'informazione acquisita attraverso la selezione delle soluzioni migliori, mentre il crossover assieme alla selezione costituisce il mezzo essenziale per effettuare l'esplorazione globale dello spazio di ricerca.

Le operazioni preliminari che è necessario compiere perché un algoritmo genetico possa funzionare consistono in un'adeguata codifica (*representation*) del problema in esame e nella opportuna definizione della funzione fitness, che renda possibile valutare la bontà dell'adattamento dei vari individui alla risoluzione del problema. Dato un particolare cromosoma, la funzione fitness restituisce un singolo valore numerico che fornisce una misura del grado abilità o di utilità dell'individuo a risolvere il problema assegnato. In analogia a ciò che avviene in natura il problema rappresenta l'ambiente esterno e la funzione di fitness fornisce una misura dell'adattamento di ogni individuo all'ambiente. Per ciascun problema, dunque, deve essere costruita una specifica funzione fitness che guiderà l'evoluzione degli individui alla soluzione di quel problema specifico. Un algoritmo genetico può essere considerato come una procedura di ricerca iterativa il cui scopo è l'ottimizzazione della funzione di fitness. Gli algoritmi genetici rappresentano un esempio di metodi evolutivi computazionali che può essere impiegato anche per supportare la creatività e la produzione in campo artistico e musicale.

Capitolo 3

Modelli fisico matematici applicati all'arte

La Fisica matematica può essere definita come quella disciplina scientifica che si propone di descrivere in termini matematicamente rigorosi i fenomeni fisici. La Fisica matematica copre un ampio numero di argomenti caratterizzati dall'unione fra la Fisica e il rigore dei metodi matematici. Da un lato, dunque, la Fisica matematica si occupa dello studio delle applicazioni della Matematica ai problemi della Fisica, dall'altro, è finalizzata allo sviluppo di metodi matematici adatti alla formulazione di teorie fisiche e all'analisi dei risultati e delle loro applicazioni.

La ricerca in Fisica matematica si articola in tre fasi, che possono avere di volta in volta peso diverso, ma la cui presenza caratterizza tale disciplina e la distingue da altre branche della Fisica e della Matematica.

La prima fase consiste nella costruzione di un modello finalizzato a cogliere nel fenomeno fisico in esame alcuni aspetti che si considerano importanti. Un modello è una struttura data in termini matematici il cui scopo consiste nel mettere in relazione enti del linguaggio matematico con le varie componenti di un fenomeno fisico e con i differenti rapporti esistenti fra esse. Il modello non è una rappresentazione fedele della realtà, ma ne costituisce un'approssimazione. Nella costruzione dei modelli si parte in generale da strutture semplici che vengono via via modificate con l'intento di trovare un equilibrio tra le difficoltà poste dalla risoluzione dei problemi matematici che caratterizzano il modello e l'accuratezza con cui il modello rappresenta il sistema fisico in esame. Per definizione, nessun modello coglie tutti gli aspetti della realtà, dunque, il ricercatore deve essere capace di cogliere esclusivamente le componenti più significative del fenomeno in esame. Da ciò deriva che, a partire da un primo semplice modello, spesso risulta possibile rappresentare un numero crescente di aspetti del fenomeno fisico tramite l'affinamento, l'estensione e la verifica del modello.

La seconda fase della ricerca in fisica matematica consiste nel risolvere il modello che si è costruito. Poiché il modello viene scritto in caratteri matematici, utilizzando strutture che possono essere anche molto diverse tra loro, la soluzione del modello può di volta in volta significare cose abbastanza diverse. Nei modelli meccanici, per esempio, il modello comprende due componenti principali: i possibili stati del sistema e l'equazione di evoluzione. In questo caso, la soluzione

del modello consiste nel dimostrare che, in corrispondenza a ciascun dato iniziale, esiste una e una sola soluzione dell'equazione di evoluzione ed eventualmente nel descrivere almeno in modo qualitativo le sue proprietà. In altri modelli come quelli che sono adottati in meccanica statistica o nella descrizione dell'equilibrio dei corpi elastici, la soluzione del modello consiste nell'individuazione di configurazioni che minimizzano una quantità opportuna che empiricamente viene considerata rilevante. In questa seconda fase, si utilizzano strumenti matematici di varia natura che appartengono a diversi campi della Matematica. Questa seconda fase si conclude con l'enunciazione e la dimostrazione di risultati certi, ossia teoremi matematici.

La fase finale della ricerca in Fisica matematica consiste nell'utilizzare i risultati matematici ottenuti per dedurre stime e previsioni sul comportamento del sistema fisico in esame.

Archimede (288 a.C.-212 a.C.) può essere considerato il primo fisico matematico della cui produzione scientifica si abbiano tracce rilevanti. Nei suoi trattati sulla quadratura della parabola e sulla misura della lunghezza di un'arco di circonferenza, Archimede utilizza il metodo logico-deduttivo già introdotto da Euclide e da Eudosso per dedurre risultati certi espressi mediante stime per eccesso e per difetto arbitrariamente accurate. Archimede applica questo rigore matematico anche alla soluzione di alcuni dei maggiori problemi posti dalla fisica del suo tempo, dalla meccanica, all'idrostatica e alla relazione tra volume e area della superficie in un corpo solido. Nel Rinascimento una parte di assoluto rilievo in Fisica matematica va attribuita a Galileo Galilei (1564-1642). L'opera di Galileo, fortemente innovativa e originale, ha lasciato un'impronta importante sulla ricerca scientifica nei secoli successivi. La storia della Fisica matematica, infatti, può essere ricondotta all'indietro fino ad arrivare alle origini del metodo scientifico rintracciabili nell'affermazione di Galileo che il mondo naturale va descritto mediante il suo linguaggio, questo linguaggio consiste proprio nella Matematica. Inoltre, l'importante idea di affermare quale compito della scienza la descrizione delle leggi che governano i fenomeni fisici fu in seguito ripresa da Isaac Newton e da allora venne posta alla base del pensiero scientifico.

I campi di ricerca in cui si concentrano le attività dei fisici matematici sono attualmente numerosi e tra loro molto vari. Tra questi alcuni dei principali sono:

- teoria quantistica dei campi;
- meccanica statistica;
- meccanica quantistica;
- teoria dei sistemi dinamici non lineari;
- teorie relativistiche del campo gravitazionale.

Nel seguito di questo capitolo si presenterà una rassegna di diversi campi d'applicazione di modelli fisico matematici per l'Arte e per l'Industria culturale. Si affronterà il tema dei rapporti fra Matematica e Arte e, più in dettaglio, si concentrerà l'attenzione sui rapporti storici e sulle interazioni possibili fra Musica, Matematica e Scienza.

3.1 Matematica e Arte

La Matematica può e deve essere considerata come uno strumento essenziale non solo per le discipline scientifiche e tecnologiche ma anche per le discipline umanistiche ed in particolare per quelle artistiche. Sin dagli inizi della civiltà, infatti, l'umanità ha cercato di dominare lo spazio tramite la sua ricostruzione e la sua rappresentazione. A tal fine è stato necessario compiere un notevole sforzo per definire delle idee sullo spazio e simultaneamente sviluppare delle tecniche per rappresentarlo. La Matematica si è caratterizzata in questo percorso come uno strumento d'indagine privilegiato.

Nella storia di tale disciplina, infatti, esistono diversi filoni di pensiero che affermano con profonda convinzione che la Matematica stessa sia la vera Arte. Tale convinzione basa le sue origini sulla constatazione delle caratteristiche che accomunano Matematica e Arte: entrambe si basano sull'interpretazione della realtà, sulla derivazione e la dimostrazione di idee e concetti e sulla ricerca di leggi e principi che siano universali e permanenti nel tempo. Esempi di tale visione possono essere facilmente ritrovati nella civiltà classica greca in cui uno dei principali canoni a cui doveva sottostare l'opera d'arte consisteva nel rispetto formale della teoria delle proporzioni che allo stesso tempo costituiva la base fondante della geometria e dell'intera scienza greca [91].

La ricerca di canoni per definire concetti come la bellezza, l'armonia tra le singole parti di un tutto ha portato numerosi matematici e filosofi greci a osservare e studiare la natura e i fenomeni naturali al fine di definire principi fondanti relativi all'organizzazione e al rapporto tra le parti. Questi studi, che risultano essere principalmente di natura matematica e geometrica, sono stati finalizzati alla definizione di teorie volte a definire concetti di simmetria e di armonia. In questo percorso i matematici e i filosofi greci hanno creato e definito oggetti matematici, come per esempio i cinque solidi regolari dello spazio, detti solidi Platonici poichè descritti per la prima volta nel Timeo di Platone, a cui sono state assegnate anche proprietà estetiche dovute alle simmetrie e all'armonia che caratterizza la loro forma. Tali oggetti matematici per secoli sono stati ritenuti oggetti belli e identificati come simbolo della bellezza classica. Queste idee hanno percorso diversi secoli subendo modifiche, stravolgimenti o ampliamenti; durante il Rinascimento, ad esempio, la riscoperta e la rinascita della geometria e della matematica riportano tali teorie a rifiorire causando un radicale cambiamento del modo di vedere sia il mondo, sia l'arte. Gli artisti di tale periodo saranno, da Brunelleschi ad Alberti, a Leonardo da Vinci, a Durer, a Piero della Francesca, anche i matematici dell'epoca. Sino ad arrivare dalla rivoluzione della prospettiva alla formalizzazione rigorosa della geometria proiettiva.

In tempi più recenti, se avviene una separazione netta tra la figura del matematico e quella dell'artista, comunque restano profondi i legami e le influenze reciproche che collegano lo sviluppo della scienza allo sviluppo dell'arte. Anche se manifestata sotto forme esteriormente molto diverse la visione e l'interpretazione della realtà sembra accomunare molto Matematica e Arte. Ad esempio, da un punto di vista matematico l'idea di spazio muta profondamente nella seconda metà dell'Ottocento. Le nuove geometrie non euclidee, la geometria della quarta dimensione sembrano influenzare profondamente gli artisti delle avanguardie del primo Novecento, dai cubisti a futuristi e alle successive avanguardie. Ma, anche nel caso in cui queste influenze non possono essere stabilite e dimostrate in maniera rigorosa, risulta comunque sorprendente come in settori diversi del

sapere umano, apparentemente anche molto lontani fra loro, sono avvenute, in maniera pressochè simultanea, delle radicali trasformazioni che hanno sovvertito le teorie e le pratiche fino a quel punto consolidate. Spesso può risultare arduo, se non addirittura impossibile, stabilire in maniera precisa influenze dirette e relazioni di dipendenza all'interno dell'evoluzione del sapere umano. Appare d'altra parte evidente che spesso una rivoluzione di pensiero si manifesti nella visione del mondo e nell'agire di diverse persone in maniera pressochè simultanea, inoltre tutto ciò può realizzarsi in ciascuno sotto forme inconse oppure dislocate su diversi gradi di coscienza. Ciò determina, dunque, che la manifestazione del cambiamento emerga su diversi livelli tramite linguaggi e forme espressive appartenenti a campi del sapere umano anche molto differenti fra loro.

Lo sviluppo della Computer graphics, a partire dalla fine degli anni sessanta, ha infine sancito una fortissima ripresa dei rapporti tra Matematica e Arte che hanno ripreso a svilupparsi in maniera simbiotica così come avvenne nel Rinascimento e nella Grecia Classica tramite figure di ricercatori che riescono a unire in se conoscenze matematiche, tecnologiche e artistiche.

Attualmente la Matematica assume un ruolo importante in tutte le forme d'arte, siano esse figurative, plastiche, visive, acustiche o costruttive.¹ Teorie e metodi dell'Analisi e della Geometria possono essere utilizzati per generare forme d'Arte e Musica con l'ausilio di calcolatori e di dispositivi elettronici. Il concetto di simmetria, la cui origine si perde nel tempo e che ha assunto nelle varie epoche significati diversi – da quello di “armonia” e “proporzione” nel mondo e nell'arte antica fino a quello di “uguaglianza delle parti” nell'accezione moderna – ha da sempre affascinato gli artisti nella realizzazione delle proprie opere. L'arte antica basava il proprio *canone di bellezza* sulla teoria delle proporzioni; l'arte moderna, al contrario, subisce il fascino della *simmetria infranta o nascosta* che costituisce un nuovo potente strumento per l'esplorazione di nuovi linguaggi dell'espressività artistica.

3.1.1 Musica: “Scientia Mathematica”

I legami tra Scienza e Musica sono antichi e profondi. In diverse epoche, infatti, il progresso in campo scientifico e tecnologico ha consentito la nascita e l'evoluzione di nuove forme musicali, così come, d'altra parte, il consolidamento e la formalizzazione di pratiche e teorie formulate dalla pura intuizione artistica di compositori e teorici musicali ha influenzato lo sviluppo del pensiero scientifico moderno [85]. Fin dall'antichità, l'esistenza della musica è sempre stata divisa fra due polarità: lo studio empirico della realtà sonora sensibilmente percepita, l'intuizione e la formulazione di teorie astratte basate sulla proporzionalità numerica e sui rapporti matematici.

Aristosseno (IV sec. a.C.) è forse l'esponente di spicco della prima scuola di pensiero. Egli, uno dei primi teorici della musica antica, concentrò la propria attenzione, tramite un'approccio puramente empirico, sul contenuto dell'esperienza melodica e sulla sua natura di fenomeno percepito da un orecchio ben addestrato. Per quanto riguarda la seconda scuola, invece, bisogna risalire alle

¹Per lo studio e l'analisi di tali relazioni è di notevole interesse la conferenza *Matematica e Cultura* organizzata ogni anno dal 1997 presso l'Università Ca' Foscari di Venezia i cui atti sono pubblicati da Springer Verlag nella omonima collana curata da Michele Emmer.

teorie di Pitagora (VI sec. a.C.) che, stabilendo la base dei legami fra Matematica e Musica, portarono alla formulazione della prima teoria sulla consonanza fra suoni, fondamento dell'armonia classica. La teoria della consonanza sviluppata da Pitagora nasce a partire dall'applicazione di principi aritmetici allo studio dei fenomeni naturali: gli intervalli musicali privilegiati corrispondono a rapporti semplici nella lunghezza delle corde sulla lira o sul monocordo. L'apparente validità di questa teoria conferma ulteriormente, nel pensiero pitagorico, il dogma secondo cui “*i numeri governano il mondo*” sia per quanto riguarda la musica delle sfere celesti, sia per quanto concerne la musica e l'armonia dei suoni nel mondo terreno. Platone (428-348 a.C.) inserisce il legame tra Musica e Matematica definito da Pitagora in una visione cosmologica ancora più ampia che costituì la fortuna della tradizione matematico-musicale pitagorica e platonica che rappresentò per secoli un forte fattore di unificazione fra discipline matematiche e musicali. Così è possibile constatare che in tutte le epoche storiche successive lo sviluppo delle conoscenze musicali è stato spesso orientato verso un mondo di pure forme intellettuali, in cui le teorie matematiche e le conoscenze scientifiche svolgono un ruolo cruciale. Un chiaro esempio di ciò può essere riscontrato nella posizione in cui è stata collocata la Musica all'interno della concezione medievale della conoscenza universale. Il *quadrivium*, stadio superiore della scienza che assieme al *trivium* costituiva la formazione scolastica propedeutica all'insegnamento della teologia e della filosofia, comprendeva quattro discipline attribuite alla sfera matematica quali: *Aritmetica*, *Geometria*, *Astronomia*, e *Musica*. D'altra parte, l'orientamento proposto da Aristosseno, basato sui fenomeni della percezione uditiva e sull'impiego di termini qualitativi per esprimere le differenze fra suoni, passò per secoli in secondo piano schiacciato dalla visione pitagorica e platonica che privilegia il ruolo dell'interpretazione intellettuale dei rapporti numerici e matematici alla percezione uditiva e al giudizio di un orecchio ben addestrato.

La visione medievale della musica, profondamente intrisa della concezione platonica e pitagorica, può essere facilmente ritrovata nelle opere di numerosi teorici musicali, così come nei lavori di eminenti filosofi e matematici dei secoli successivi. Secondo Jean de Garlande, teorico della musica del XIII secolo, “*la musica è la scienza del numero riferito ai suoni*”,² mentre secondo Leibniz “*la musica è un nascosto esercizio aritmetico eseguito dall'anima inconsapevole del proprio calcolare*”.³ In questa affermazione risalta sia la natura profondamente matematica della musica, sia il mistero e il fascino che ha sempre avvolto e celato l'espressione musicale. Questo mistero, che probabilmente possiamo pensare strettamente legato ai fenomeni della percezione musicale per lo più ancora da scoprire, potrebbe risalire, nella visione di Leibniz, alla natura totalmente inconsapevole dell'esercizio matematico che compie l'animo umano nell'atto dell'ascolto musicale. La divisione fra le due antiche scuole di pensiero si trova anche riflessa nella netta distinzione che nel mondo medievale e in quello rinascimentale opponeva i musicisti teorici, ossia i teorici della musica, ai musicisti pratici, compositori ed esecutori la cui attività musicale restava sempre legata esclusivamente alla musica considerata come fenomeno sensibile.

Lo studio e lo sviluppo della teoria della consonanza e del temperamento, spinti dal consolidamento della polifonia e dell'armonia, rappresentano storica-

²J.C., Risset, **Calcolare il suono musicale**, in *Matematica e cultura 2001*, Springer Verlag, Milano, 2001, p. 103.

³Ibidem.

mente uno dei terreni di maggiore incontro tra teoria musicale, Matematica e Fisica. Numerosi musicisti e scienziati, nei secoli, hanno affrontato tale problematica cercando di superare le limitazioni caratteristiche della teoria pitagorica e degli altri sistemi sviluppati successivamente per tentare di risolvere il problema dello sfasamento inevitabile esistente tra i rapporti acustici naturali e gli intervalli musicali definiti all'interno di un dato sistema musicale. Sono tre i sistemi di temperamento principalmente adottati in occidente nel corso delle varie epoche: il sistema basato sulla scala pitagorica, quello basato sulla scala zarliniana ed il sistema temperato. Quest'ultimo, tuttora correntemente utilizzato, fu codificato per la prima volta da Werckmeister verso la fine del secolo XVII stabilendo una suddivisione dell'ottava in intervalli eguali. Il pensiero estetico del musicista e teorico tedesco è interessante poiché sostanzialmente contrassegnato da due poli: l'impianto di base matematico (principalmente concentrato sui rapporti fra intervalli) e la rappresentazione degli affetti, secondo la quale la musica deve destare, elevare, modificare e placare i moti dell'animo. Werckmeister si mosse principalmente alla ricerca delle cause dell'effetto magico della musica, tale ricerca lo indusse a individuare le cause nei rapporti fisici che intercorrono tra i suoni e a definire la musica come una *scientia mathematica*.

La diffusione e l'accettazione del sistema ben temperato proposta da Werckmeister è uno dei fattori che ha maggiormente contribuito allo sviluppo dell'armonia e della polifonia a partire dagli inizi del Settecento. Anche in questo nuovo sviluppo del pensiero musicale la visione platonica pitagorica rimane alla base del pensiero dei teorici musicali così come sottolinea Nicolas Meeùs [67] nell'Enciclopedia della Musica a riguardo della polifonia e dell'armonia:

da quando Rameau [1722] ha creduto di rintracciare nella serie degli armonici il modello dell'accordo perfetto, si è ricercato nel fenomeno della risonanza il fondamento "naturale" della tonalità.⁴

Quest'atteggiamento viene visto in perfetta continuità con quello che caratterizzava i filosofi di scuola pitagorica secondo cui il fondamento della musica andava ricercato nei numeri che per essi rappresentavano il modello di tutte le cose, nonché gli elementi costitutivi della materia. Dunque, continua Meeùs:

è alla possibilità stessa di avere un fondamento naturale, aritmetico o acustico, che la musica deve il fatto di essere stata ben presto considerata come una disciplina scientifica, molto prima della maggior parte delle altre discipline oggi annoverate fra le scienze umane.⁵

In questa fase della storia della musica occidentale lo sviluppo dei processi tecnologici ha giocato anche un ruolo profondo nell'influenzare lo sviluppo musicale. Infatti, il perfezionamento tecnologico dei processi di costruzione e accordatura degli strumenti musicali, parallelamente al consolidamento teorico dell'armonia tonale, ha fornito, negli ultimi anni del settecento, un forte impulso alla nascita e allo sviluppo della forma musicale sinfonica e alla transizione dalla musica da camera, scritta per pochi strumenti, alla musica orchestrale dedicata ad un numero sempre crescente d'elementi.

Oltre ai problemi teorici legati al temperamento e ai sistemi d'accordatura, forti legami fra Musica e Matematica si ritrovano anche nell'applicazione del

⁴N. Meeùs, **Scale, polifonia, armonia**, in L'Enciclopedia della Musica Vol.II - Il sapere musicale, Einaudi, Torino, 2002, p. 73.

⁵Ibidem.

concetto di simmetria ai processi di composizione musicale. Del resto, lo stesso concetto di armonia pitagorica, basata sulle proporzioni, può essere visto come una forma elementare di simmetria. In “*L’arte della fuga*” il grande musicista J. S. Bach (1685-1750) applicò tecniche compositive che possono essere interpretate mediante trasformazioni geometriche. Nel *Contrapunctus 12 (rictus et inversus)* si può notare come le partiture dei due brani siano tra loro simmetriche rispetto ad un asse orizzontale; in *Contrapunctus 5*, Bach applica invece una glissosimmetria⁶ al primo rigo della partitura per ottenere il terzo rigo che appare, rispetto al primo, capovolto e traslato. Questi esempi confermano l’opinione comune che la matematica è fortemente presente nella musica e che la musica è una sorta di “*gioco matematico*”. Dunque, la musica è in qualche modo in rapporto con la razionalità, mentre, d’altra parte, la creatività, l’originalità e l’irrazionale sono profondamente legati all’Arte [33, 94].

La storia della musica è ricca d’esempi in tal senso; inoltre, con il trascorrere del tempo, i rapporti esistenti tra musica e scienza sono sempre diventati più stretti e indissolubili. Questi rapporti, assieme al continuo progredire della ricerca compositiva, volta a individuare sempre nuovi metodi nell’espressività musicale, potrebbero avere determinato, per esempio, la particolare evoluzione/evoluzione che la musica ha subito lungo tutto il corso del secolo novecento. La musica del XX secolo, infatti, si è fortemente riavvicinata alla matematica e alla scienza più in generale. La musica seriale, alla ricerca di una novità radicale che fosse capace di realizzare il rifiuto e il superamento della tradizione legata alla composizione tonale, fonda parte della sua sintassi sul calcolo combinatorio e sull’uso consapevole nella composizione musicale del concetto di simmetria e di trasformazione di una data serie di note. La matematica ha anche costituito un significativo ruolo di ispirazione poetica per compositori come Varèse, Ligeti e Xenàkis. Quest’ultimo risulta essere sicuramente il compositore che maggiormente ha fatto ricorso all’impiego di modelli matematici per la creazione di brani musicali. La musica “*stocastica*” di Xenàkis si basa infatti sull’impiego di distribuzioni di probabilità e di metodi stocastici per il controllo statistico dei parametri musicali.

Lo sviluppo della Musica elettronica e dell’Informatica musicale

In tempi più recenti, a partire dalla seconda metà del Novecento, il linguaggio musicale si è profondamente trasformato anche tramite l’impiego dei nuovi strumenti offerti dallo sviluppo tecnologico. Il grande sviluppo dell’elettronica, infatti, ha fornito ai compositori, nei primi anni cinquanta dello scorso secolo, nuovi strumenti per generare ed elaborare i suoni. Il progresso tecnologico ha aperto nuovi spazi inesplorati nel campo della composizione musicale, ha fornito nuovi strumenti e nuovi punti di vista a una generazione di giovani compositori consapevoli della necessità di mettere in atto un forte rinnovamento delle prassi compositive. Molti giovani compositori intuirono che l’unica strada, per poter mettere realmente in atto quel processo di rinnovamento delle pratiche compositive avviato da Schönberg con il metodo dodecafonico, poteva consistere nello sfruttare le possibilità di generazione e di manipolazione dei suoni, offerti dai mezzi elettronici. Lo sviluppo in questi anni della Musica elettronica ha radicalmente trasformato le forme, il linguaggio e le tecniche di composizione

⁶Una glissosimmetria è una trasformazione composta dalla successiva applicazione di una simmetria assiale e di una traslazione lungo un vettore parallelo all’asse di simmetria.

musicale. L'impiego di strumenti elettronici per la generazione, l'elaborazione e la registrazione dei suoni ha aperto la possibilità di esplorare nuovi territori musicali, inducendo numerosi compositori a esplorare nuovi percorsi di ricerca [25, 62, 82].

Il rapido sviluppo tecnologico ha profondamente influenzato il processo di evoluzione dei linguaggi e delle forme caratteristiche della Musica elettronica. Inoltre parallelamente allo sviluppo della Musica elettronica in Europa, negli Stati Uniti, a partire dalla fine degli anni '50, si è avviata un'intensa attività di ricerca, nelle università e in centri specializzati, sulle possibilità d'impiego dei calcolatori per l'elaborazione e la sintesi di suoni e di musica. Il rapido sviluppo di macchine e programmi finalizzati alla generazione ed elaborazione di suoni ha portato alla nascita e al consolidamento di un settore di ricerca all'interno del più ampio panorama della Musica elettronica comunemente chiamato Computer music [38, 89]. Lo sviluppo della Computer music⁷ ha ulteriormente stretto i legami fra ricerca musicale e sapere scientifico. Questa disciplina, sin dalle sue origini, è stata caratterizzata da un forte sviluppo interdisciplinare che ha affascinato e attratto sia musicisti sia scienziati poiché, per sua natura, essa abbraccia, in maniera trasversale, numerosi campi del sapere: da quello scientifico a quello artistico-umanistico. Gli ambiti di ricerca in questo settore sono molteplici e differenti tra loro. Le prime ricerche in questo campo, sviluppate nell'ambito di progetti legati allo studio dell'Intelligenza artificiale (Artificial Intelligence – AI), sono state finalizzate alla simulazione e alla realizzazione di processi computazionali per la composizione musicale; successivamente, a questo settore si è affiancato quello relativo alla sintesi e l'elaborazione del suono che ha avuto come naturale sbocco l'industria degli strumenti musicali e dei sistemi di telecomunicazione.

Le ampie potenzialità offerte dall'uso del calcolatore elettronico per applicazioni musicali ha attratto numerosi compositori e ricercatori interessati a investigare nuovi territori musicali. Come afferma Max Mathews, uno dei pionieri dell'uso del calcolatore per la sintesi del suono [64]:

*tutti i suoni sono caratterizzati da una funzione di pressione, e ogni suono può essere prodotto generando questa funzione di pressione. Perciò se costruiamo una sorgente in grado di generare qualunque funzione di pressione essa sarà in grado di produrre qualunque suono, compresi la parola, la musica e il rumore. Un elaboratore elettronico, più un programma, più un convertitore digitale-analogico, più un altoparlante si avvicinano molto a questa capacità.*⁸

Questa affermazione dimostra come fossero seducenti e affascinanti le possibilità che in linea di principio il calcolatore elettronico offriva ai primi sperimentatori che si cimentavano con la sintesi digitale di qualunque tipo di suono. Ciò è avvalorato anche dalla forte idea espressa John Chowning, uno dei primi sperimentatori nel campo e inventore della tecnica di sintesi per modulazione di frequenza, che definisce la sintesi digitale del suono come il ponte che consente di collegare tutto ciò che può essere immaginato con ciò che può essere ascoltato. Negli anni, le ricerche hanno mostrato che l'enorme potenzialità di plasmare il

⁷Nel seguito della trattazione si è scelto di utilizzare al posto di questo termine inglese l'espressione italiana "Informatica musicale".

⁸M. Mathews, **Tecnologia della musica di elaboratore**, in *La musica elettronica* a cura di Henri Pousseur, Feltrinelli, 1976, p. 187.

suono a proprio piacimento mediante il calcolatore elettronico si scontra sempre con l'immensa complessità dei fenomeni acustici naturali e con la grande sensibilità dell'orecchio umano che si dimostra molto capace a riconoscere la più o meno sottile innaturalità di un suono di sintesi generato.

Lo sviluppo di tale disciplina ha rappresentato uno dei fattori determinanti per la nascita di nuove figure nel panorama musicale, quale per esempio: il "compositore-scienziato", esperto di musica, acustica, elettronica e informatica. Se la musica del '900 è fortemente influenzata dal progresso scientifico e tecnologico avvenuto durante tutto il secolo, in particolare, le ricerche sul caos, la complessità e la geometria frattale, a partire dagli anni '80, hanno determinato la nascita di nuovi campi di indagine nella composizione musicale. Così oggi sembrano ritornare attuali le teorie pitagoriche e medioevali, in cui la Musica rappresentava una delle quattro Ars che consentono all'uomo di interpretare e conoscere a pieno l'Universo. Tramite quel sottile equilibrio tra ripetizione e novità tipico della musica, sembra manifestarsi, dunque, che l'intuizione creativa in campo artistico e scientifico rappresenti il culmine di un processo di conoscenza e d'interpretazione del reale, indipendente dal contesto storico e sociale.

Esiste un confine tra Scienza e Musica?

I legami tra Scienza e Musica appaiono in maniera chiara da quanto è stato presentato finora. Bisogna notare, però, che la maggior parte degli esempi si riferiscono principalmente alla teoria musicale piuttosto che alla pratica. Considerando ciò, può essere legittimo avanzare delle riserve sul rischio di ridurre i processi della composizione e della percezione della musica a delle mere operazioni matematiche. Sono in molti [40, 85] ad affermare che esiste una specificità del musicale per la quale le pratiche e i processi compositivi possono essere verificati soltanto "dall'interno", ossia sul piano dell'ascolto e della comprensione musicale. Esiste, quindi, un confine tra Scienza e Musica? Anche se uno sviluppo sinergico e interdisciplinare è fortemente auspicabile, comunque, con molta probabilità questo confine esiste anche se molto sottile. Infatti, come affermava già nell'antichità Aristosseno: "*la giustificazione della musica è nell'orecchio piuttosto che in un principio matematico*".⁹ Ciò risulta in netto contrasto con la tradizionale visione platonica pitagorica poichè pone al centro dell'attenzione l'orecchio e tutti i fenomeni legati all'ascolto. La visione di Aristosseno sembra acquistare un importante significato nell'attuale fase della ricerca musicale poichè lascia intendere che il giudizio finale sul valore artistico di un'opera musicale deve fondarsi esclusivamente sia sulla sua resa acustica sia sulle sensazioni, cioè sui fenomeni percettivi ed emotivi che riesce a indurre negli ascoltatori. Il confine, dunque, se esiste, consiste proprio nel rispetto di quella logica interna della composizione musicale che rende comprensibile e intelligibile lo sviluppo di un'opera esclusivamente mediante l'ascolto.

⁹Risset J. C., op.cit, p. 105.

3.2 Modelli fisico matematici applicati all'Industria culturale

L'espressione "*Industria culturale*" viene creato da Adorno ed Horkheimer per definire la produzione di materiale d'intrattenimento nella società massificata. Nel XX secolo due fattori hanno profondamente influenzato l'industria culturale: le nuove possibilità espressive liberate dalle tecnologie della comunicazione e dell'innovazione, nonché l'enorme aumento della domanda di beni d'arte, di design e di spettacolo. In particolare, le innovazioni tecnologiche hanno reso l'arte ubiqua nel tempo e nello spazio. Come afferma Morin [73] sono state necessarie alcune invenzioni tecniche perché la nascita e lo sviluppo della industria culturale fosse possibile. Egli fa principalmente riferimento a due differenti invenzioni: il cinematografo, come macchina capace di registrare e riprodurre il movimento, finalizzata allo spettacolo, all'evasione e al tempo libero, e il telegrafo senza fili, da cui deriva la nascita delle trasmissioni radiofoniche. Quest'ultima invenzione tecnologica, da un primo uso prettamente finalizzato alla comunicazione a distanza per uso principalmente militare e aereo-navale, si è trasformato in uno strumento finalizzato al divertimento e all'intrattenimento in cui la musica ha trovato uno spazio molto ampio. Tali considerazioni inducono Morin ad affermare che nel corso del XX secolo ha avuto inizio la seconda industrializzazione, definita "*industrializzazione dello spirito*", principalmente rivolta alle immagini e ai sogni, accompagnata inoltre dalla "*seconda colonizzazione che concerne ormai l'anima*".

Lo sviluppo tecnologico legato al cinema, alla radio, all'industria discografica e ai mezzi di comunicazione di massa più in generale ha presto determinato, intorno a primi decenni del '900, la presa di coscienza in diversi filosofi, intellettuali e artisti dell'avvento di un'era in cui risulta possibile riprodurre tecnicamente persino l'opera d'arte. Ciò che fino ad allora era considerato l'unico per eccellenza, il capolavoro, diventa oggetto di riproduzione e di rapida offerta a un vastissimo pubblico. Anche la fotografia, così come le registrazioni discografiche rappresentano esempi di questo processo di moltiplicazione dell'opera d'arte grazie alla tecnologia. Il tema della riproducibilità dell'opera d'arte è stato profondamente affrontato da Walter Benjamin [5], filosofo tedesco vicino agli studiosi della Scuola di Francoforte. Benjamin individua nella riproducibilità tecnica dell'opera d'arte un cambiamento di prospettiva nel rapporto fra masse e arte, nonché nella stessa natura dell'oggetto artistico divenuto bene di consumo da esporre e fruire.

L'Industria culturale ha subito una rapidissima crescita a partire dai suoi primi sviluppi tecnologici che ne hanno consentito la nascita e la prima diffusione. L'irrompere delle nuove tecnologie ha creato nuovi settori in cui si produce cultura con mezzi espressivi rivoluzionari, come per esempio, tra i più significativi per rilevanza sociale ed economica: cinema, televisione, videogiochi, design, editoria libraria, fotografia. Negli ultimi anni la sempre più rapida crescita delle tecnologie digitali ha fortemente influenzato lo sviluppo dell'Industria culturale nelle sue varie forme. Grazie a questa rapidissima crescita, tale settore economico si è venuto affermando come uno dei motori trainanti dell'economia mondiale contemporanea. Le tecnologie digitali, inoltre, hanno modificato in modo rilevante le fasi di produzione dei prodotti culturali e comunicativi, oltre che i processi di distribuzione e di fruizione. La crescita esponenziale delle reti

telematiche assieme al rapido aumento del numero di utenti hanno determinato la nascita di nuovi canali di diffusione e lo sviluppo di modi innovativi di fruizione di prodotti culturali che si affiancano e si intrecciano a quelli di tipo più tradizionale.

Negli ultimi anni, in questo contesto, é possibile registrare un crescente interesse nello sviluppo di applicazioni delle conoscenze fisico matematiche all'Industria culturale. Esempi di ciò possono essere riscontrati sia nel campo della Computer grafica (Computer graphics), che nel campo dell'Informatica musicale in cui numerosi ricercatori esplorano le possibilità offerte dall'utilizzo di modelli matematici per la simulazione di fenomeni naturali o per la generazione di prodotti artistici. É possibile delineare diversi filoni di sviluppo inerenti alle relazioni fra Fisica Matematica e Industria Culturale:

- Informatica musicale;
- Computer grafica;
- Arte generativa;
- Video games ed edutainment.

Nel seguito si presenteranno una serie di applicazioni di modelli fisico matematici in questi campi. Questa breve rassegna, sicuramente non esaustiva per rappresentare le diverse possibilità applicative sperimentate nel corso degli anni, è finalizzata a delineare per grosse linee lo stato dell'arte da cui ha preso le mosse il lavoro svolto nel corso del Dottorato di Ricerca.

3.2.1 Informatica musicale

In precedenza si è presentata una breve introduzione storica ai rapporti fra lo sviluppo del sapere musicale e quello relativo al sapere scientifico. A partire dalla seconda metà del Novecento l'affermazione dei calcolatori elettronici ha favorito la nascita e la crescita di settori innovativi di ricerca dedicati a investigare le possibilità di utilizzare tali tecnologie a scopi musicali. In questo ambito, sono state sviluppate numerose tecniche e applicazioni che consentono di analizzare, generare ed elaborare sia musiche che suoni mediante l'impiego di modelli e metodi matematici. In alcuni casi quest'attività si incrocia in maniera stretta con altri importanti settori di ricerca quali, per esempio, la Teoria del caos, la Complessità, la Vita artificiale (Artificial Life – AL) e l'Intelligenza artificiale. Infatti, se la musica del '900 è stata notevolmente influenzata dal progresso scientifico e tecnologico avvenuto durante tutto il secolo, le ricerche sul caos, la complessità e la geometria frattale, a partire dagli anni '80, hanno determinato, in particolare, la nascita di nuovi campi di indagine nella composizione musicale. In quest'ambito, il lavoro svolto da Voss e Clarke [98], verso la metà degli anni '70, sull'analisi della correlazione temporale fra gli eventi sonori di brani musicali è stato uno dei primi a segnare l'evoluzione delle ricerche successive. Questo effetto può essere riscontrato, soprattutto, per quanto riguarda la ricerca finalizzata all'individuazione di metodi automatici per la composizione musicale. Nel corso degli anni successivi, infatti, sono stati numerosi i ricercatori e i compositori che si sono dedicati a investigare le possibilità di impiego di sistemi dinamici non lineari e di frattali per la generazione di suoni e musiche [12, 22, 35, 36, 37, 45, 49, 59, 83, 101]. Nel capitolo successivo si

affronterà con maggior dettaglio l'analisi dei lavori presenti in letteratura con l'intento di delineare lo stato dell'arte sui rapporti che intercorrono fra Scienza della complessità e Musica.

3.2.2 Computer grafica

A partire dalla fine degli anni '60 lo sviluppo della Computer grafica ha rappresentato un importante fenomeno che ha innovato e ampliato molto i settori di applicazione dei calcolatori elettronici. La capacità d'impiegare i calcolatori per la visualizzazione, la grafica e le animazioni ha dato luogo da una parte alla nascita di nuove discipline legate alle possibilità applicative in diversi settori della ricerca e dell'economia, dall'altra parte ha spinto fortemente la ricerca scientifica e tecnologica a sviluppare metodi e sistemi capaci di soddisfare le varie esigenze applicative. Lo sviluppo dell'animazione computerizzata, del CAD (Computer Aided Design), della grafica tridimensionale ha avuto notevoli ripercussioni sia nel campo della ricerca scientifica che nel campo delle applicazioni industriali.

Lo sviluppo della Computer grafica si è basato, tra i diversi fattori, anche su un crescente impiego di modelli matematici per la creazione e la simulazione di oggetti e fenomeni reali e non mediante l'uso del calcolatore. Questa esigenza ha spinto in maniera notevole lo sviluppo della ricerca nel campo delle applicazioni legate alla visualizzazione e alla grafica. Diversi temi caratterizzano gli studi nel campo della Computer grafica; in generale tutti risultano finalizzati al miglioramento e allo sviluppo di tecniche per la visualizzazione di oggetti o per la simulazione di fenomeni ed effetti ottici e visivi. Tra queste, alcuni filoni mostrano un alto grado di affinità con le ricerche della Fisica matematica poiché sono finalizzati all'applicazione e allo sviluppo di modelli fisico matematici capaci di simulare fenomeni reali in ambienti grafici creati artificialmente. Esempi di ciò possono essere ritrovati nella definizione di metodi per effettuare l'illuminazione realistica delle scene virtuali. A tal fine s'impiegano metodi di "ray tracing" per determinare la quantità di luce incidente sui diversi oggetti, modelli per la simulazione degli effetti di riflessione della luce, modelli per la simulazione delle diverse tipologie di materiali e stati superficiali degli oggetti. Un'altro interessante campo è relativo alla creazione di effetti di rendering come ad esempio la generazione delle ombre e la produzione di effetti chiaro scuro. Inoltre, in questo ambito molta attenzione viene posta sull'impiego di sistemi particellari per la simulazione di fenomeni naturali come le fiamme, la pioggia, il movimento dell'acqua, gli effetti del vento e tutti i fenomeni atmosferici.

Un altro interessante campo di sviluppo in cui è possibile trovare un fruttuoso incontro fra Fisica matematica e Computer grafica consiste nelle ricerche relative alla simulazione di oggetti reali caratterizzati da forme altamente complesse come per esempio: piante, alberi, foglie, sistemi di vene, oppure strutture inorganiche quali: i terreni, le montagne, i delta dei fiumi o i fiocchi di neve, o, infine, fenomeni naturali e atmosferici come: le nuvole, la foschia e la nebbia, la schiuma. In questo ambito trovano grande applicazione i frattali e i sistemi caotici che consentono di riprodurre in maniera soddisfacente le irregolarità e la complessità che caratterizza gli oggetti naturali. La modellazione geometrica di oggetti complessi risulta essere un processo estremamente difficile, tra i concetti matematici che sembrano mostrare il maggiore potenziale in questa direzione i frattali sicuramente occupano il ruolo di maggiore importanza. Il concetto geometrico di "frattale" proposto da Mandelbrot [61], assieme alla sua principale

proprietà della “*auto-somiglianza*”, costituisce uno dei paradigmi principali per lo studio delle strutture del mondo naturale. L’*auto-somiglianza* è una proprietà che si manifesta tramite l’invarianza delle strutture e dei dettagli della forma di un oggetto al variare delle scale di osservazione. In altri termini un oggetto è *auto-somigliante* se i dettagli che caratterizzano l’oggetto su scale grandi sono in qualche misura simili a quelli che è possibile rilevare quando ci si sposta su scale di osservazione sempre più piccole. Mandelbrot ha messo in luce che la relazione fra strutture su larga scala e dettagli su scale via via sempre più piccole rappresenta uno dei principali aspetti che caratterizzano i fenomeni naturali. Tali relazioni, strettamente legate ai concetti di *auto-somiglianza* e di *ricorsione*, caratterizzano gli oggetti frattali che, in modi diversi, mostrano tutti un certo grado di invarianza delle strutture con il cambiamento di scala secondo cui li si osserva. Lo sviluppo e la diffusione della geometria frattale ha contribuito anche a far maturare nel mondo scientifico la consapevolezza della presenza e dell’importanza dei processi ricorsivi all’interno dei fenomeni naturali. Numerosi algoritmi per la simulazione di oggetti e forme naturali sono stati realizzati sfruttando sistemi di generazione ricorsiva. Nel caso in cui i parametri utilizzati per controllare il processo di generazione restano costanti si ottiene un modello molto regolare caratterizzato dalla proprietà dell’*auto-somiglianza*. Se invece i parametri vengono fatti variare, nel corso del processo di generazione, in maniera casuale attorno a un valore medio e con un ben preciso valore di deviazione standard si otterrà un modello non più regolare. L’irregolarità nella struttura del modello geometrico dipenderà principalmente dai valori fissati per le deviazioni standard dei diversi parametri, poiché maggiore è la deviazione standard maggiore è la probabilità di avere variazioni casuali sensibilmente diverse dal valore medio. In questo caso il modello geometrico ottenuto non sarà più *auto-somigliante* in senso stretto, ma sarà piuttosto statisticamente *auto-somigliante*. Diversi motivi spingono all’impiego di questo approccio stocastico per la generazione, per esempio, dei modelli di piante. L’introduzione di fluttuazioni casuali nei parametri consente di ottenere modelli di piante più realistici poiché in tal modo si riescono a simulare quelle irregolarità intrinseche agli oggetti naturali. Inoltre, tramite questo approccio è possibile simulare la diversità, largamente presente in natura, che determina l’esistenza di oggetti estremamente simili fra loro, ma ciascuno leggermente diverso, in qualche aspetto, da tutti gli altri. Il principale vantaggio offerto da questo approccio consiste nella possibilità di generare delle strutture altamente complesse da un nucleo relativamente semplice e ristretto di dati che può essere creato con estrema semplicità. Probabilmente, la complessità in natura si è evoluta perché può fornire benefici a un organismo, ma così come vale anche nel campo dei programmi per calcolatori, la complessità non può diventare un carico eccessivo. Da ciò deriva che strutture altamente complesse possono essere descritte da una quantità limitata di DNA. Ciò induce a formulare una spiegazione del perché la *auto-somiglianza* abbonda nel mondo naturale poiché l’evoluzione ha permesso di risolvere il conflitto tra complessità e semplicità allo stesso modo di come si è cercato di fare nell’informatica tramite l’impiego di algoritmi ricorsivi per la generazione di frattali. Nel mondo naturale, così come nell’informatica, la *ricorsione* e l’*auto-somiglianza* possono essere due fattori essenziali che consentono un uso parsimonioso e oculato dell’informazione.

In questo ambito, la generazione di modelli grafici di terreni risulta essere un importante problema affrontato da un ampio numero di ricercatori. L’esigenza

di creare dei modelli grafici sufficientemente complessi caratterizzati da una resa visiva sufficientemente convincente si scontra soprattutto con l'inevitabile bisogno di raggiungere un alto livello di dettaglio nel modello grafico. Tutto ciò determina, dunque, sia un'elevata complessità dei modelli di generazione sia un notevole impegno di risorse computazionali per la generazione e l'elaborazione di tali modelli. Diversi metodi basati sui frattali sono stati proposti per la generazione di terreni. Questi metodi offrono il vantaggio di creare dei modelli sufficientemente convincenti a partire da un limitato insieme di dati di partenza mediante un processo di amplificazione dei dati basato sull'uso di generatori casuali [68].

Diversi autori [2, 3, 32] hanno proposto approcci differenti utili per la generazione di immagini e di oggetti grafici mediante l'impiego di frattali. Tra questi, il metodo principalmente utilizzato è basato sull'impiego del Iterated Function System (IFS) definito come la combinazione di un qualsiasi insieme di mappe lineari (trasformazioni affini) e di un insieme di probabilità a loro associate. Un qualsiasi IFS possiede un unico attrattore, in genere costituito da un insieme frattale, che può essere utilizzato per produrre oggetti estremamente complessi. La creazione è piuttosto semplice, basata sulla definizione di un piccolo numero di mappe e sullo sfruttamento delle potenzialità offerte dai processi ricorsivi. Le dinamiche caotiche, infatti, che spesso caratterizzano gli oggetti frattali, possono essere utilizzate sia per modellare forme a due o tre dimensioni, sia per realizzare texture da utilizzare per la costruzione di immagini digitali. Tramite questo approccio è possibile definire degli algoritmi per la creazione di immagini sintetiche relative a fenomeni e oggetti naturali, quali per esempio: le nuvole, la nebbia e la foschia, la schiuma, le foreste e le piante. L'approccio usato dalle IFS è molto differente da quello impiegato nel caso della produzione di oggetti frattali mediante processi casuali. Quest'ultimo approccio è basato su un algoritmo ricorsivo di affinamento che consente di modellare terreni, nuvole, piante che è basato su delle procedure casuali. In questo caso il prodotto finale dell'algoritmo di generazione del frattale dipende esclusivamente dall'esatta sequenza di risultati generata durante l'esecuzione dell'algoritmo stesso. L'uso del IFS, che impiega anche informazioni estratte da fotografie reali, consente un maggiore controllo sui risultati ottenuti poiché piccoli cambiamenti nei parametri del sistema influiscono poco sul risultato finale dell'algoritmo di generazione. Tramite tale approccio è possibile generare immagini altamente complesse a partire da un insieme molto piccolo di dati iniziali. L'impiego del IFS, infine, consente anche di poter risolvere il problema inverso, ossia, a partire dalla geometria che caratterizza un dato oggetto determinare un IFS che in maniera approssimata possa generare l'oggetto di partenza.

L'obiettivo della scienza consiste nel comprendere il perché del manifestarsi dei diversi fenomeni naturali. I programmi per calcolatore che cercano di simulare i fenomeni naturali tramite l'emulazione della logica della natura, cercano di cogliere l'essenza fondamentale degli oggetti naturali. Per tale motivo le ricerche nel campo dell'Intelligenza artificiale e della Vita artificiale fanno largo ricorso all'impiego di tali simulazioni come uno dei possibili strumenti per lo sviluppo della conoscenza scientifica. Inoltre, poiché questi strumenti consentono di esprimere l'essenza dei fenomeni naturali sotto forma di prodotti visivi, essi possono essere anche impiegati come strumenti per la creazione di prodotti artistici. Mentre nel campo degli oggetti naturali la selezione è effettuata in base alla capacità di sopravvivenza, nel caso della Computer grafica la selezione

viene realizzata sulla base di principi estetici e di somiglianza alle forme della natura. Nel campo della Computer grafica si é, quindi, affermato un nuovo sistema per la valutazione della validità dei modelli predittivi che basa il successo di un modello principalmente sulla sua capacità di creare immagini che assomiglino quanto più possibile agli oggetti reali da simulare. Se si riesce a modellare un oggetto complesso mediante delle regole semplici significa che si é riusciti a comprendere e padroneggiare la complessità dell'oggetto in studio. La prova finale della validità e dei limiti di un dato modello, anche se estremamente soggettiva, alla fine risiede nelle immagini e nei modelli geometrici che si é capaci di generare mediante il suo impiego [76].

3.2.3 Arte generativa

Non esiste ancora una definizione precisa e univocamente accettata per il termine “*Arte generativa*”.¹⁰ Esiste al contrario una vasta gamma di possibili definizioni che spesso riescono a mettere in luce soltanto alcuni aspetti parziali di un fenomeno multiforme. Tra le tante, quella che sembra cogliere sufficientemente tutti i vari aspetti di questo nuovo approccio definisce l'arte generativa come: qualsiasi pratica basata sull'impiego di un sistema, caratterizzato da un certo grado di autonomia, che possa essere opportunamente messo in azione al fine di contribuire in maniera parziale o totale alla creazione di un prodotto artistico. Il processo di creazione può essere realizzato impiegando sistemi diversi: delle regole espresse in un linguaggio naturale, un programma per calcolatore, una macchina, o un qualsiasi altro tipo di procedura [42]. Così definito il termine arte generativa indica esclusivamente il modo tramite cui si realizza l'opera d'arte, inoltre, la definizione non dipende in alcun modo dalla natura o dal tipo di tecnologie utilizzate nel sistema generativo. Infatti, l'aspetto principale che contraddistingue l'arte generativa consiste proprio nell'impiego di un sistema dotato di un sufficiente grado di autonomia che possa essere opportunamente attivato per la creazione di prodotti artistici. Uno dei principali effetti di questo tipo di pratiche consiste nella completa ridefinizione della figura e del ruolo dell'autore. Allo stesso tempo il rapporto fra autore e opera d'arte si trova a essere completamente stravolto rispetto al passato poiché nel caso dell'Arte generativa l'atto creativo viene sdoppiato e spostato su due diversi livelli temporalmente e gerarchicamente differenti. Da ciò deriva che è possibile pensare alla coesistenza di due distinti autori che operano in momenti e su scale gerarchiche differenti: sul livello gerarchico superiore si trova collocato l'*autore* che concepisce, progetta e realizza il sistema di Arte generativa; sul livello gerarchico inferiore si trova l'*autore materiale* dell'opera generativa ossia la persona o il dispositivo (nella maggior parte dei casi un calcolatore) che mette in funzione il sistema generativo al fine di creare un prodotto finito.

Questa suddivisione di ruoli porta a dover riconsiderare il ruolo dell'autore che risulta essere notevolmente differente da quello ricoperto nelle pratiche artistiche tradizionali. Nel caso dell'Arte generativa l'artista incarna il ruolo del “*Creator*”, in maniera simile a quanto avviene nell'arte tradizionalmente intesa, ma egli risulta essere anche una sorta di “*Semi-divinità*” capace di creare un mondo artificiale che opportunamente attivato è capace di seguire una propria evoluzione e un proprio sviluppo autonomo. Da ciò emerge che nell'Arte

¹⁰Per maggiori approfondimenti si veda il sito della conferenza *Generative Art* che annualmente si svolge presso il Politecnico di Milano: <http://www.generativeart.com>.

generativa il ruolo dell'artista consiste nel creare un dispositivo, un "*ambiente di sviluppo*" nel quale deporre un "*seme*" che avrà la capacità di svilupparsi in maniera indipendente. Completata la creazione del mondo artificiale l'artista non può fare altro che diventare osservatore e assistere alle forme e al modo sotto cui prende vita e si sviluppa il frutto della sua opera.

Diverse tipologie di processi generativi sono stati introdotti e utilizzati negli ultimi anni per la creazione automatica o semi-automatica di prodotti artistici basati sull'utilizzo di forme di espressione artistica tradizionali. Per esempio è possibile utilizzare l'approccio generativo nel campo delle arti visive per la creazione d'immagini o di animazioni e di effetti visivi; in campo letterario è possibile definire delle procedure automatizzabili per la creazione di testi e di poesie; infine, in ambito musicale è possibile impiegare un'ampia gamma di processi generativi per la creazione di suoni e musiche. In genere uno dei principali obiettivi di tali pratiche consiste nel creare dei prodotti artistici caratterizzati da una certa similarità, ma diversi fra loro poiché ottenuti da differenti esecuzioni della procedura generativa. Inoltre è fortemente auspicabile che i diversi prodotti siano tutti esteticamente interessanti e sufficientemente distinguibili gli uni dagli altri.

L'approccio generativo è spesso basato sull'impiego di processi casuali per introdurre variabilità e indeterminazione nella procedura creativa. Ciò non rappresenta una totale novità poiché la casualità è stata spesso utilizzata in diverse epoche storiche come strumento al servizio della creatività artistica. Diverse tecniche aleatorie sono state utilizzate per la creazione di poesie, storie, musica e disegni. Le motivazioni all'impiego di tali pratiche sono state numerose e di natura anche molto diversa: per alcuni artisti, come per esempio i Dadaisti, l'impiego della casualità rappresenta un modo per ribellarsi a norme e pratiche accademiche troppo restrittive, mentre per altri, per esempio i Surrealisti, la casualità rappresenta un mezzo per superare l'influenza limitante della coscienza, delle conoscenze assimilate e della pratica artistica finora maturata. In campo musicale John Cage rappresenta l'icona del compositore che, nell'intento di mettere in pratica quest'ultimo filone di pensiero, impiega e adotta un'ampia gamma di pratiche e metodi aleatori sia nella composizione sia nell'esecuzione dei propri brani musicali. Mentre molti dei sistemi generativi finora concepiti funzionano in maniera completamente autonoma, esistono anche alcuni approcci generativi che incorporano dei sistemi d'interazione che consentono agli utenti o alle informazioni provenienti dall'ambiente esterno di intervenire nello sviluppo del processo generativo alterandone in qualche modo il suo normale corso.

Anche se l'approccio generativo non è in alcun modo vincolato all'impiego di mezzi e di conoscenze scientifiche e matematiche, l'uso dei calcolatori elettronici per la realizzazione di procedure generative risulta essere uno dei principali terreni di sviluppo di questo nascente settore artistico. Molto frequentemente tali procedure sono basate sull'impiego di conoscenze scientifiche e di modelli matematici sviluppati in campi di ricerca molto diversi e distanti fra loro. Oltre all'impiego di generatori di numeri casuali e di tecniche probabilistiche è possibile utilizzare differenti tipologie di sistemi all'interno di procedure generative, come ad esempio: gli automi cellulari, i sistemi caotici, i frattali, le grammatiche generative, le reti neurali, gli algoritmi genetici.

La ricerca scientifica offre dunque un'ampia gamma di teorie, di conoscenze e di modelli che possono trovare facilmente applicazione in contesti artistici. Tutto ciò apre nuovissime possibilità interessanti sia in campo artistico, sia in

campo scientifico e tecnologico. In campo artistico ciò comporta un arricchimento e un'estensione degli strumenti, delle tecniche a disposizione degli artisti per l'esplorazione di nuove forme di espressività. Inoltre l'impiego di conoscenze e modelli relativi a fenomeni naturali, a ricerche sull'origine e l'evoluzione della vita, sulla Intelligenza e la Vita artificiale fornisce agli artisti la possibilità di percorrere nuove strade, ancora quasi del tutto inesplorate, alla ricerca di risposte alle domande che sin dalle origini hanno animato la Filosofia, l'Arte e la Scienza quali ad esempio: l'origine e il fine della vita, il rapporto fra uomo e natura, il bello in natura e nelle opere dell'ingegno umano. Tutto ciò può avere, inoltre, anche importanti ricadute in campo scientifico poiché l'espressione artistica, generalmente più libera e meno ristretta sotto forme rigorosamente codificate, può stimolare l'insorgere di nuove intuizioni e di collegamenti sorprendenti fra aspetti apparentemente distinti di uno stesso fenomeno, può, inoltre, indurre a riflettere, in maniera consapevole oppure in modo del tutto inconscio, su similitudini e relazioni fra mondi, realtà e visioni che la conoscenza consolidata e la pratica quotidiana considerano del tutto separati e differenti.

L'arte generativa e la riproducibilità tecnica dell'opera d'arte

L'Arte generativa può svolgere un importante ruolo nel cambiare il rapporto fra uomo e Arte. Ciò soprattutto per quanto riguarda l'importante aspetto dell'unicità e della riproducibilità tecnica dell'opera d'arte. Se a partire dai primi del Novecento il progresso tecnologico ha fornito strumenti per rendere riproducibile un'ampia varietà di oggetti artistici, a partire dagli ultimi anni di questo stesso secolo l'Arte generativa ha cominciato a sviluppare paradigmi e sistemi per superare tutto ciò.

In campo musicale, la tecnologia ha rivoluzionato il rapporto fra l'uomo e il suono. Prima del Novecento, infatti, il suono e gli eventi musicali a lui legati costituivano qualcosa di unico e irripetibile. La musica rappresentava qualcosa di impalpabile e intangibile la cui esistenza era legata alla presenza e all'ascolto diretto di una esecuzione. Dunque, anche la notazione musicale più rigida e precisa non poteva garantire l'esatta duplicazione di un'opera. I dispositivi per la registrazione e la riproduzione del suono hanno rotto tale vincolo, distruggendo l'antico legame tra produzione del suono e suo ascolto. Con il trascorrere degli anni il suono è diventato riproducibile e duplicabile in maniera sempre più facile ed economica, fino ad arrivare al paradosso dei nostri giorni in cui il silenzio e l'assenza di suoni musicali rappresenta una condizione eccezionale, difficilmente ottenibile, e idealmente auspicata da poche persone dalle orecchie veramente stanche.

La musica generativa potrebbe ristabilire un equilibrio in tutto ciò, riportando l'opera d'arte a riconquistare la sua unicità, anche grazie alla non riproducibilità. L'impiego di processi generativi, infatti, rende possibile la creazione automatica o semi-automatica di prodotti artistici caratterizzati da una certa similarità, ma diversi fra loro poiché ottenuti da esecuzioni differenti di una stessa procedura generativa. Uno degli obiettivi estetici maggiormente auspicabile in opere generative consiste nel riuscire a rendere tutti i prodotti sufficientemente interessanti, ma anche distinguibili gli uni dagli altri. Ciò, infatti, garantirebbe un certo grado di non riproducibilità nell'opera in maniera simile a quanto avveniva prima della rivoluzione tecnologica d'inizio Novecento. L'unicità sarebbe garantita dall'impossibilità tecnica di ricreare, tramite la stessa procedura, due

prodotti del tutto identici. Ogni esecuzione di un'opera generativa rappresenta quindi un unico, che anche se tecnicamente riproducibile all'infinito, non è altro che soltanto uno dei possibili frutti all'interno di una moltitudine di suoi simili.

3.2.4 Video games ed edutainment

Il mercato mondiale dei videogiochi è in continua espansione e con il tempo sta tendendo a superare anche le cifre d'affari del cinema. I maggiori produttori mondiali di console per video giochi agli inizi degli anni ottanta erano le giapponesi Sega e Nintendo, a cui in seguito si sono aggiunte nel mercato delle piattaforme per videogiochi anche Sony e Microsoft. Il settore dei videogiochi è economicamente di grande importanza, perchè lo sviluppo di un gioco di gamma alta può arrivare a costare anche circa 10 milioni di dollari, comparabile dunque al costo di un film, inoltre il successo commerciale si raggiunge solo con vendite tra 1 e 3 milioni di copie. Esiste un'ampia gamma di attori differenti che partecipano alla filiera produttiva di un videogioco; alcuni dei principali sono: i costruttori di piattaforme, gli sviluppatori software, i designer, i grafici, gli editori, i distributori, i pubblicitari. Questa industria, dunque, può avere forti ripercussioni economiche e occupazionali in settori produttivi anche non strettamente a lei legati. In questo ambito il panorama italiano è estremamente deludente poichè l'Italia non produce tali prodotti ma li consuma voracemente con 24 milioni di persone che giocano alla console. Recentemente nuovi promettenti mercati si stanno sviluppando in relazione sia alla diffusione dei videogiochi per i telefoni cellulari e per dispositivi "mobile", sia allo sviluppo e alla crescita dei "serious games" e di applicazioni di Edutainment finalizzate a scopi didattici, educativi e formativi.

In questo settore le possibili applicazioni della Fisica Matematica riguardano in parte quelle già presentate in precedenza relative alla computer grafica e alle tecniche di visualizzazione e di rendering, in parte campi, strettamente più legati allo sviluppo di video giochi quali per esempio tra i principali la simulazione dei fenomeni fisici, la simulazione del movimento dei personaggi. La simulazione dei fenomeni fisici occupa un importante ruolo nello sviluppo di molti video giochi. Esistono attualmente numerosi "Motori Fisici" (Physics Engine), ossia librerie o API (Application Programming Interface), che consentono di simulare i fenomeni fisici all'interno di ambienti virtuali. La realizzazione di un ambiente di gioco virtuale, dotato di caratteristiche fisiche che approssimano bene quelle del mondo reale, risulta essere molto spesso uno degli aspetti determinanti per il successo del video gioco. La simulazione della fisica molto spesso viene realizzata su diversi livelli. A un primo livello la simulazione fisica viene strettamente affiancata alla parte di computer grafica principalmente per la gestione delle collisioni fra gli oggetti grafici. Questa funzione è di estrema importanza poichè consente di evitare che nell'ambiente di gioco virtuale gli oggetti tridimensionali possano compenetrarsi l'un l'altro, inoltre, tale funzione consente di simulare gli urti, lo scorrimento e il moto relativo in presenza o in assenza di attrito, che caratterizza il fenomeno del contatto fra corpi.

I nuovi mezzi di comunicazione hanno fortemente modificato le modalità di comunicazione e di espressione degli esseri umani. Queste trasformazioni sono avvenute nel modo di comunicare, di esprimersi, di socializzare, di pensare e anche nelle modalità secondo cui si svolge l'apprendimento e l'educazione. L'attitudine ad apprendere è la più singolare caratteristica umana. Si può apprendere

tramite differenti modalità: ascoltando, vedendo, studiando, costruendo e manipolando. L'apprendimento degli esseri umani è anche di natura socio-culturale, dunque è fortemente influenzato dall'interazione con gli altri e da fattori sociali e culturali in cui la persona si trova immersa. Gli esseri umani imparano interagendo direttamente con i loro simili tramite l'imitazione del comportamento, l'ascolto, l'obbedienza a istruzioni e precetti, oppure, indirettamente, interagendo con opere prodotte da altri esseri umani quali per esempio opere letterarie, artistiche e musicali.

L'espansione dell'industria dei video giochi dimostra quale sia l'impatto che essi hanno all'interno della nostra società e della nostra cultura. Ciò vale in ambito generale, anche se bisogna sottolineare che se si concentra l'attenzione esclusivamente sulle fasce più giovani della società la diffusione dei video giochi risulta essere veramente importante e significativa. Inoltre il gioco, oltre ad essere un importante ambito di sviluppo della creatività, costituisce anche un valido strumento di supporto ai processi di apprendimento. Il gioco comporta, infatti, l'attivazione e l'impiego simultaneo di differenti capacità da quelle motorie, emotive, intellettuali, a quelle relazionali e sociali. La diffusione dei video giochi tra i più giovani ha determinato la nascita di un nuovo settore finalizzato alla produzione di giochi con intenti educativi e didattici in cui l'apprendimento e l'intrattenimento rivestono entrambi un ruolo significativo. L'uso di questo nuovo paradigma comunemente chiamato Edutainment, basato sulla fusione tra gioco, intrattenimento ed educazione si sta diffondendo in maniera abbastanza massiccia. Esiste un'ampia letteratura che analizza le opportunità offerte dall'integrazione di giochi all'interno di ambienti educativi.¹¹

La motivazione è uno dei fattori più importanti per l'apprendimento; numerose ricerche mostrano che l'apprendimento tramite metodi non convenzionali basati sulla manipolazione e sulla sperimentazione diretta risulta essere una esperienza positiva che produce buoni risultati soprattutto poichè riesce a stimolare fortemente la motivazione degli studenti. L'impiego di ambienti di gioco rende possibile trasformare lo studente in un soggetto attivo capace di agire, interagire e imparare attraverso il suo rapporto con l'ambiente. Da ciò deriva che tutti i giochi sono utili all'apprendimento poichè per esempio stimolano la capacità di coordinazione fra occhi e mani, o perchè stimolano lo sviluppo di capacità legate alle rappresentazioni visivo-spaziale. Ma al contrario, non tutti i giochi sono caratterizzati da finalità educative e ciò consente di distinguere fra giochi finalizzati al puro intrattenimento e quelli con finalità educative.

Un crescente numero di giochi educativi viene sviluppato e prodotto per realizzare degli strumenti capaci di supportare l'insegnamento di discipline complesse. Tutto ciò è motivato dalla constatazione che i seguenti fattori possono contribuire a migliorare la qualità dell'apprendimento: l'uso di un approccio diretto basato sull'esperienza e sull'azione piuttosto che sulla spiegazione, lo stimolo delle motivazioni personali mediante lo sforzo nel riuscire in una serie di compiti, la necessità di utilizzare stili di apprendimento differenti che determina un rinforzo simultaneo di capacità cognitive differenti. Inoltre un crescente settore di ricerca si concentra sulla definizione di strategie e teorie educative basate sull'impiego di questi nuovi mezzi, a ciò si affianca anche lo studio, l'analisi e la progettazione di nuovi giochi con scopi educativi.

¹¹Per approfondimenti si consultino gli atti della conferenza annuale Technologies for E-Learning and Digital Entertainment – Edutainment i cui atti sono pubblicati da Springer Verlag nella collana Lecture Notes in Computer Science.

Capitolo 4

Complessità e Musica

La Musica è un fenomeno complesso? Quali similitudini, quali paralleli è possibile stabilire tra la Musica e la Teoria della Complessità? In che modo ciò può contribuire ad ampliare il sapere in campo musicale e in campo scientifico? È possibile utilizzare gli strumenti matematici tipici della Scienza della complessità per l'analisi della musica e dei materiali sonori? In che modo i metodi computazionali applicati allo studio della musica possono contribuire a migliorare l'analisi e la comprensione delle sue caratteristiche più profonde? Queste, le questioni che verranno affrontate nel seguente capitolo con l'intento di mettere in luce i numerosi benefici che possono derivare da un approccio alla ricerca di natura interdisciplinare.

Se, per cominciare, si concentra l'attenzione sull'evoluzione del pensiero musicale contemporaneo è possibile osservare alcuni interessanti fenomeni che aprono la strada alle problematiche affrontate nel corso di questo capitolo. Orcalli, a tal proposito, in un saggio dal titolo "Complessità e non-linearità nel pensiero musicale contemporaneo" [78] afferma che il termine "*complessità*" viene spesso usato anche per caratterizzare alcune tendenze compositive attuali come, per esempio, la musica stocastica di Xenakis, le ricerche sulla strutturazione timbrica della scuola spettrale e il discorso polifonico di Ferneyhough. Tralasciando le analogie terminologiche, l'autore pone al centro del proprio interesse l'indagine di quanto possa essere proficuo prendere in considerazione il crescente interesse per i sistemi complessi e non lineari per lo sviluppo di un confronto utile con il pensiero musicale. L'analisi dell'evoluzione del pensiero musicale contemporaneo consente di mettere in luce diversi esempi che inducono a confermare il valore di tale approccio. Le argomentazioni principali si basano su diverse considerazioni: in Musica, così come avviene anche in molte discipline scientifiche, il tema del rapporto ordine-complessità occupa un importante ruolo nel pensiero dei compositori contemporanei; l'ampliamento del campo d'indagine, la ricerca sulla natura dei materiali musicali, lo sviluppo di strumenti innovativi, suggerisce nuovi modelli di rappresentazione e nuovi modi di pensare e organizzare il suono; la presa di coscienza che suono e rumore sono inscindibilmente legati, maturata grazie allo studio dei suoni di sintesi e di quelli prodotti dagli strumenti musicali tradizionali, spinge verso l'integrazione del rumore nel processo compositivo motivando l'interesse per oggetti instabili, complessi dotati di un ordine non immediatamente percettibile. Da ciò l'attività di composizione risulta notevolmente modificata rispetto al passato. Attualmente, infatti,

sono in molti ad affermare che la composizione possa essere sempre più intesa come un'attività di modellizzazione di esperienze musicali condotta mediante un lavoro empirico e di introspezione. L'impiego di modelli, metodi e schemi matematici per la composizione musicale favorisce lo stabilirsi di similitudini e parallelismi (isomorfismi – usando un termine più strettamente matematico) fra il dominio musicale e territori lontani della conoscenza umana che possono unificare campi fra loro molto differenti, ma supposti isomorfi, ossia con forma o natura simile. Così, inizialmente, può essere avanzato un parallelismo tra composizione musicale e ricerca scientifica, sia per quanto riguarda i metodi d'indagine sia a proposito degli strumenti e delle tecniche impiegate.

Oltre tutte queste problematiche di carattere teorico e generale, alcune altre domande hanno indirizzato e motivato l'attività svolta durante il Dottorato di Ricerca. È possibile utilizzare modelli matematici relativi a sistemi dinamici non lineari, caotici e complessi per la composizione musicale e la sintesi del suono? In che modo tali modelli possono essere impiegati in maniera creativa all'interno dei processi compositivi per l'esplorazione di nuove forme di espressione artistica? Può l'impiego artistico di tali conoscenze contribuire all'ampliamento del sapere scientifico? Nel seguito si definirà in dettaglio il contesto di riferimento in cui è stata sviluppata l'attività di ricerca svolta lungo l'intero corso di Dottorato. Si analizzeranno, inoltre, le problematiche finora illustrate con l'intento di delineare alcune possibili risposte. Per la profondità che le caratterizza, probabilmente, parte di esse potranno rimanere ancora aperte o soltanto parzialmente affrontate e risolte.

4.1 La Complessità in Musica

La Musica è un fenomeno complesso? Diversi autori [13, 14] sostengono che la Musica possa essere assimilata a un sistema complesso la cui evoluzione dinamica è influenzata nel tempo da diversi processi di adattamento, quali per esempio: i comportamenti individuali dei vari soggetti coinvolti (musicisti, compositori, ascoltatori); i processi culturali legati all'apprendimento, alla comunicazione e alla ricerca in campo artistico; i processi di evoluzione sociale e tecnologica che influenzano sia i rapporti fra gli individui sia le relazioni, le pratiche e i mezzi legati alla produzione e alla fruizione della musica; e, infine, i processi di evoluzione biologica. Miranda [70], per esempio, afferma che la musica può essere modellata tramite un sistema adattivo di suoni usati da un certo numero di individui coinvolti in un'esperienza collettiva legata alla pratica musicale. In questa esperienza alcuni di loro possono svolgere un ruolo passivo che li porta a essere esclusivamente ascoltatori (pubblico), mentre alcuni altri possono essere completamente coinvolti nel processo di produzione dei suoni (musicisti – esecutori). L'ipotesi avanzata in questi studi consiste nell'affermare che la musica emerga a partire dalle interazioni che avvengono tra i diversi agenti coinvolti con ruoli diversi all'interno di una certa esperienza musicale. In tal modo è possibile cominciare a delineare una risposta positiva alla prima domanda, anche se finora non è stata definita ancora in maniera precisa e rigorosa la natura stessa dell'oggetto in esame: la Musica. In realtà appare evidente che parlare di Musica nel senso più generale possibile risulterebbe qualcosa di troppo ampio e dispersivo che, anche se permettesse di formulare una risposta positiva alla domanda, potrebbe, infine, risultare operativamente del tutto sterile e inefficace

per la quantità e la natura stessa delle implicazioni e dei fattori da prendere in considerazione.

Dunque, appare necessario definire innanzitutto che cosa s'intende per "Musica". Potrebbe essere molto utile per iniziare l'analisi concentrare l'attenzione su alcuni dei tanti elementi fondamentali che la costituiscono, quali per esempio: le teorie e le prassi compositive, le pratiche esecutive, l'analisi, l'ascolto e la fruizione delle opere musicali. Inoltre, poichè la musica si connota sostanzialmente come un fatto sociale, che in epoche, luoghi e ambiti culturali diversi assume scopi, linguaggi, tecniche, ma anche fondamenti differenti appare interessante determinare degli ambiti geografici e temporali bene definiti e soffermarsi su di un genere musicale o su un insieme di pratiche di riferimento.

Tali considerazioni non devono essere assunte come il tentativo di introdurre un approccio di tipo riduzionista finalizzato esclusivamente a introdurre delle semplificazioni all'interno di problematiche vaste e intricate. Al contrario, l'attenta definizione dell'oggetto in esame, tramite la definizione dettagliata dell'ambito di riferimento che, a seconda dei casi, può essere cronologico, geografico, culturale, risulta essenziale per circoscrivere un contesto all'interno del quale muoversi in maniera unitaria senza il bisogno di introdurre forzature e credenze dogmatiche che potrebbero risultare invece necessarie per la definizione di un insieme di fondamenti universali della Musica.

L'analisi attenta dei differenti fattori che svolgono ruoli importanti in campo musicale mostra che è possibile considerarli tutti come elementi caratteristici di un fenomeno complesso. Se si considera esclusivamente l'ascolto e la fruizione di opere musicali, per esempio, tutto ciò che la musica suscita in ogni ascoltatore emerge spontaneamente dall'interazione simultanea di processi percettivi, cognitivi e culturali. Come accade spesso nello studio dei sistemi complessi, in cui comportamenti prevedibili e imprevedibili possono essere manifestazioni di uno stesso sistema che evolve in condizioni differenti, così la reazione di un ascoltatore posto di fronte un brano musicale può essere, a seconda dei casi, sia prevedibile che imprevedibile.

Se invece si concentra l'attenzione esclusivamente sul materiale musicale in sè, prescindendo dai processi legati alla sua composizione o alla fruizione, si può notare che esso è costituito da elementi molto diversi (melodia, ritmo, armonia, etc ...) che interagiscono fra loro in maniera più o meno costruttiva. Le proprietà emergenti caratteristiche del materiale musicale derivano dalle interazioni simultanee fra i suoi diversi costituenti. Tali interazioni innescano l'emergere di nuove proprietà che rendono possibile la trasformazione del tutto in qualcosa di profondamente differente dalla semplice somma delle diverse componenti. Questa idea è stata profondamente sottolineata anche da Arnold Schönberg nel suo saggio *Composizione con dodici note* [93] in cui, pur non immaginando neanche lontanamente i possibili sviluppi futuri della Scienza della complessità, egli afferma:

*un'idea musicale, dunque, pur essendo composta di melodia, ritmo e armonia, non è né l'una cosa, né l'altra, né l'altra ancora, ma le tre cose assieme.*¹

Inoltre, Schönberg continua sostenendo che in ogni composizione musicale dovrebbe esistere un unico spazio musicale che garantisca unità e coesione al flui-

¹A. Schönberg, **Composizione con dodici note**, in *Stile e Idea*, Feltrinelli, Milano, 1975, p. 112.

re temporale del discorso musicale. Questo spazio deve essere manipolato dal compositore in maniera da introdurre al suo interno alcune caratteristiche fondamentali che, grazie alle nostre conoscenze attuali, sappiamo essere tipiche dei sistemi complessi, che consentano di attribuire anche agli eventi che avvengono in contesti locali e su piccole scale la possibilità di determinare, dopo un certo periodo di tempo, effetti rilevanti su scale differenti e ben più grandi. Schönberg, infatti, affrontando il problema dell'interazione ad alto livello fra diverse idee musicali e allo stesso tempo, su un livello gerarchico inferiore, ponendosi la questione dei rapporti fra i diversi elementi che costituiscono una singola idea musicale, afferma:

è bensì vero che gli elementi di queste idee appaiono separati e indipendenti all'occhio e all'orecchio, ma essi scoprono il loro vero significato solo nel momento in cui cooperano fra di loro, proprio come una sola parola non può esprimere un pensiero se non entra in rapporto con altre parole. Qualsiasi evento accada in un punto qualsiasi di questo spazio musicale provoca un effetto non ristretto alla sua area immediata, ossia non agisce soltanto sul suo piano specifico, ma opera in ogni direzione e su tutti i piani estendendo la sua influenza fino ai punti più lontani.²

La composizione musicale affronta, tra i temi di maggior rilievo, il problema dell'organizzazione delle idee musicali così come la ricerca di relazioni e strutture che siano capaci di fornire unità e organicità al fluire del discorso musicale. Così Schönberg continua affermando che:

nelle arti, e soprattutto nella musica, la forma tende soprattutto alla comprensibilità. Il senso di distensione e di soddisfazione che un ascoltatore avverte quando riesce a seguire un'idea, il suo sviluppo e le ragioni di quello sviluppo, sono in stretta relazione psicologica con il sentimento di bellezza.³

Così, le forme musicali più interessanti spesso basano il proprio fascino su un sottile equilibrio fra ripetizione e novità, ordine e disordine, fra la ferrea organizzazione di una struttura e l'imprevedibilità di un lampo di genio. Inoltre, la composizione musicale si confronta anche spesso con il bisogno di innescare fenomeni emergenti generalmente prodotti mediante l'attenta organizzazione dei diversi elementi del materiale musicale. Spesso la capacità di un compositore di riuscire a realizzare un equilibrio simile risulta essere uno dei fattori di maggiore importanza per il successo di un'opera.

D'altra parte, se si concentra l'attenzione sull'atto dell'esecuzione di un'opera musicale, appare evidente che un musicista nell'atto di suonare il proprio strumento ha la necessità di controllare simultaneamente un grande numero di parametri diversi che contribuiscono, ciascuno in maniera differente, alla buona riuscita dell'esecuzione. La capacità di un musicista di coinvolgere emotivamente il proprio pubblico, spesso avvertita come qualcosa di misterioso e magico, probabilmente, è qualcosa che emerge in maniera spontanea e del tutto naturale dal controllo, maturato grazie a una lunga pratica, che il musicista esercita simultaneamente su tutti i diversi parametri a sua disposizione.

²Ibidem.

³Ibidem, p.106.

Questi e molti altri fenomeni legati agli aspetti sociali e culturali della musica che, per brevità, non possono essere presi qui in analisi inducono ad affermare che la Musica è un fenomeno complesso. Inoltre, un'attenta analisi dell'evoluzione storica che hanno subito le diverse tradizioni musicali del mondo, condotta alla luce delle attuali conoscenze sviluppate dalla Scienza della complessità, porterebbe a individuare numerosi fenomeni di emergenza e di auto-organizzazione simili a quelli riscontrati in tanti altri sistemi complessi siano essi biologici, fisici, o legati alle scienze sociali ed economiche. Dunque, analisi simili potrebbero individuare similitudini e paralleli tra i sistemi complessi e i fenomeni legati all'evoluzione della musica e contribuire, da un lato, a chiarire molti nodi ancora dibattuti all'interno della comunità dei musicologi e dei compositori e, d'altra parte, fornire anche un nuovo terreno di sperimentazione dei paradigmi e delle teorie sviluppate nella comunità scientifica che studia la complessità.

4.2 Sinergie e interazioni possibili

La ricerca in campo musicale, oltre che concentrarsi su argomenti di natura storica e teorica, cerca anche di trovare risposte relative alla natura della musica in sé, alle basi biologiche del suo sviluppo, alla sua funzione e al suo significato all'interno della cultura e della società umana. Numerose ricerche sono state condotte in queste direzioni, ma ancora molti interrogativi restano insoluti, così come numerosi fenomeni legati alla musica restano del tutto sconosciuti. Per tale motivo, lo studio di fenomeni legati alla musica basato sui paradigmi e sui metodi che caratterizzano la Scienza della complessità può aiutare a gettare nuova luce su tali problemi contribuendo alla formulazione di risposte adeguate a tali quesiti. Nel quadro del vasto panorama di discipline inerenti alla Scienza della Complessità esistono alcuni ambiti di ricerca specialistici, seppur ancora molto ampi, quali per esempio l'Intelligenza artificiale, la Vita artificiale, la Teoria del caos e dei sistemi dinamici, che offrono un'ampia gamma di modelli matematici, di metodi e di paradigmi d'indagine che possono essere impiegati in maniera fruttuosa anche per la ricerca in ambito musicale.

Queste alcune delle questioni scientifiche relative alla Musica che i diversi settori della Scienza della complessità possono contribuire ad affrontare:

- lo studio dei processi creativi nella composizione musicale;
- lo studio dell'origine e dell'evoluzione delle pratiche musicali;
- l'analisi delle dinamiche che hanno contribuito alla formazione e alla diffusione di differenti culture musicali in contesti sociali fra loro diversi;
- l'individuazione e l'analisi di fenomeni emergenti e di auto-organizzazione all'interno dell'evoluzione storica della musica nelle varie culture.

Molti di questi ambiti d'indagine spesso coincidono, o hanno numerosi aspetti in comune, con quelli relativi allo studio del linguaggio, anche se alcune questioni più strettamente musicali possono interessare la definizione del significato e delle emozioni in musica e lo studio dei processi che presiedono la creatività artistica.

La specificità dei processi creativi legati alla composizione musicale, assieme alla possibilità di modellare e codificare tali processi sotto forma di algoritmi eseguibili mediante il calcolatore elettronico, hanno reso la Musica il principale

settore di applicazione delle ricerche finalizzate a investigare la natura dei processi creativi. Motivate dalla volontà di studiare la creatività umana, forse la più sorprendente fra le capacità della mente umana, molte di tali ricerche sono state condotte principalmente con l'intento di definire metodi e modelli capaci di simulare i processi creativi mediante l'uso dei calcolatori elettronici [109]. Da ciò sono scaturite in seguito varie applicazioni artistiche basate sull'impiego a fini creativi e compositivi di modelli e metodi caratteristici della ricerca scientifica più avanzata. Infatti, in questo ambito, è stato dedicato molto interesse sia al problema della composizione algoritmica finalizzato alla definizione di metodi e modelli capaci di automatizzare i processi tipici della composizione di suoni e di musica, sia al problema della composizione assistita dal calcolatore il cui obiettivo consiste nel definire tecniche e strumenti automatici che possano assistere i processi di composizione musicale. Nella sezione successiva 4.3 si affronteranno in dettaglio le varie problematiche strettamente connesse a tali applicazioni musicali.

Numerosi modelli matematici, provenienti da campi diversi della ricerca scientifica, sono stati impiegati nel corso degli anni all'interno dei processi di composizione musicale. Tra le prime applicazioni compaiono quelle proposte da Pressing [83] finalizzate all'esplorazione dell'impiego di sistemi dinamici e di mappe non-lineari per la generazione di materiali musicali. Pressing afferma che gli elementi generali che rendono questi oggetti matematici potenzialmente interessanti come generatori di forme musicali consistono nella compresenza, nella loro evoluzione temporale, di fenomeni di diversa natura, quali punti fissi, cicli limite ed evoluzioni caotiche. Questi oggetti, per il comportamento che li caratterizza, costantemente in equilibrio fra ordine e disordine, fra periodicità e imprevedibilità, sembrano essere molto adatti alla generazione di sequenze musicali. In particolare, la loro ricchezza di comportamenti può essere messa in relazione con il concetto di variazione musicale, vista come la continua trasformazione o distorsione di un'entità musicale in cui i dettagli cambiano, mentre la struttura di base rimane immutata. Le evoluzioni temporali delle mappe non-lineari, in cui si alternano comportamenti caotici a comportamenti periodici o quasi-periodici, probabilmente possono essere un mezzo adatto per simulare tali processi.

Bayles [11] investiga i processi creativi legati alla composizione musicale. L'impiego dei sistemi dinamici caotici viene proposto come un mezzo per superare le limitazioni degli approcci alla composizione automatica basati sulle grammatiche generative, sui sistemi esperti e basati sulla conoscenza. Bayles afferma che la creatività può essere vista come un processo di ricerca all'interno di un ampio spazio di soluzioni. La composizione musicale può essere quindi assimilata a un processo di esplorazione di uno spazio di ricerca con l'intento di individuare strutture musicali che, soddisfacendo un certo numero di vincoli e di proprietà, risultano essere esteticamente interessanti. In maniera simile ai sistemi dinamici complessi, la creatività è caratterizzata dall'imprevedibilità, dalla non-linearità e da un sottile equilibrio fra ordine e disordine. I sistemi dinamici appaiono, dunque, promettenti per la composizione musicale proprio perché l'ampia gamma di comportamenti, la flessibilità e le capacità di adattamento e di risposta alle variazioni delle condizioni ambientali costituiscono delle proprietà importanti per la realizzazione di un sistema di composizione automatica. Le ricerche svolte da Bayles sono state concentrate prevalentemente sull'impiego di automi cellulari all'interno di processi compositivi e d'interazione musicale.

Gogins [45] propone una nuova tecnica per la composizione assistita dal calcolatore (CAC – Computer-Assisted Composition) basata sull’impiego della misura degli attrattori generati dall’iterazione di un sistema di funzioni per la generazione di partiture musicali. Questa tecnica, chiamata “*Iterated Functions Systems Music*”, viene presentata come più generale e potente dei metodi proposti in precedenza finalizzati alla generazione di sequenze musicali a partire dai frattali, dalla distribuzione $1/f$ o da sistemi dinamici non-lineari. Gogins dimostra che la tecnica IFS, in linea di principio, è capace di produrre qualsiasi tipo di partitura musicale tramite la definizione di altezza e durate, in questo modo è dunque possibile far sì che la composizione assistita dal calcolatore si avvicini molto a un importante obiettivo, ossia, la definizione di un algoritmo universale di composizione dotato di una coerente mappa dei parametri.

Bidlack [12] afferma che l’impiego dei sistemi dinamici non-lineari nella generazione di musica mediante calcolatore è estremamente interessante e ricco di potenzialità poiché fornisce ai compositori un mezzo per introdurre nella musica così generata delle caratteristiche di naturalezza non ottenibili in maniera diversa. Bidlack suggerisce che l’approccio migliore per trasformare l’evoluzione di un sistema dinamico in una sequenza musicale consiste nell’assegnare a ciascuna dimensione dello spazio delle fasi un differente parametro musicale. Nel caso di sistemi dinamici bidimensionali è possibile, per esempio, assegnare l’asse x al parametro altezza in maniera che l’evoluzione del sistema dinamico venga trasformata in una sequenza di note definite in un determinato registro musicale (per esempio quattro ottave centrate attorno al Do centrale), mentre, l’asse y può essere assegnato a un parametro come l’intensità, la durata o un controllo che consente di modificare il timbro del suono. Nel caso di sistemi tridimensionali è possibile associare simultaneamente ognuna delle tre dimensioni dello spazio delle fasi del sistema con tre differenti parametri musicali come ad esempio l’altezza, l’intensità e la durata.

Successivamente Little [59] presenta un insieme di tecniche compositive basate e/o ispirate sui concetti fondamentali della Teoria del caos da lui impiegate per la realizzazione di brani musicali. In particolare, per la composizione di un brano anche Little impiega del materiale musicale prodotto mediante l’uso della funzione logistica. Little afferma che i valori ottenuti dall’iterazione di questa mappa non lineare sono stati codificati sotto forma di dati MIDI relativi all’altezza, alla durata e all’intensità delle note. La codifica dei valori della variabile della mappa logistica in uno dei parametri musicali non è né di tipo diretto, né proporzionale o lineare, al contrario. È possibile ottenere risultati molto più interessanti con delle trasformazioni “un po’ disordinate” in cui si usano delle scale parzialmente disordinate o soltanto con alcuni elementi o con un insieme di elementi pesati. Inoltre, Little afferma che in seguito alla generazione delle sequenze di eventi MIDI egli ha provveduto a modificare le sequenze in maniera da inserirle all’interno di una partitura musicale con l’intento di realizzare delle strutture di tipo frattale.

Harley [49] insiste sul parallelo fra Musica e sistemi dinamici. Poiché il materiale musicale può essere considerato come un segnale che evolve nel tempo caratterizzabile tramite opportuni strumenti di analisi, come per esempio l’autocorrelazione. Egli afferma che la composizione musicale mediante sistemi dinamici può essere fondata sulla ricerca di insiemi di equazioni che forniscono evoluzioni temporali caratterizzate da opportuni comportamenti interessanti dal punto di vista musicale. In questo processo, si comincia, quindi, a intravedere

l'importanza dei processi di “*mapping*” che svolgono un ruolo fondamentale nella trasformazione che trasferisce l'evoluzione dei sistemi dinamici nella corrispondente variazione dei parametri musicali. A questi importanti strumenti, Harley affianca anche strumenti di analisi e di riorganizzazione dei dati musicali che a suo parere svolgono un importante ruolo di supporto all'opera del compositore che impiega i sistemi dinamici non-lineari per la creazione di musica.

D'altra parte diversi autori in campo scientifico propongono metodi che prevedono l'impiego di suoni e musica per l'analisi e lo studio di sistemi complessi, caotici e per la comprensione dei fenomeni emergenti. Per la complessità insita in tali sistemi, infatti, l'impiego dei metodi tradizionali della matematica, per quanto essi possano essere sofisticati, non porta a risultati soddisfacenti; ciò spinge, dunque, numerosi ricercatori a sviluppare degli approcci che, seppur di natura qualitativa, consentano di studiare e comprendere l'evoluzione di tali sistemi. Da un differente punto di vista, dunque, diversi ricercatori si sono dedicati alla creazione di rappresentazioni uditive di insiemi di dati vasti e caratterizzati da un alto grado di complessità. Witten [101], ad esempio, propone l'impiego di metodi di rappresentazione uditiva poiché sostiene che molto spesso le serie di dati impiegate in campo scientifico sono vaste ed estremamente complesse e ciò ne rende difficile la comprensione tramite la semplice visualizzazione. Questa attività di ricerca è particolarmente incoraggiata dall'ipotesi, inizialmente avanzata da Pressing, che sfruttando le proprietà caratteristiche dell'udito probabilmente le rappresentazioni uditive rendono possibile seguire e distinguere l'evoluzione di dati caratterizzati da più di tre dimensioni in maniera più facile che tramite l'impiego della visualizzazione tridimensionale. Lo sviluppo di questi nuovi campi di ricerca tende a rafforzare ulteriormente i legami tra musica e scienza facendo sì che le relazioni, già storicamente forti, diventino legami bidirezionali in cui la musica e la scienza del suono forniscono alla scienza strumenti utili per studiare, comprendere e interpretare la complessità dei fenomeni.

Bilotta et al. hanno pubblicato diversi lavori [15, 16, 21] in cui propongono di impiegare le rappresentazioni musicali dei sistemi complessi come uno strumento capace di fornire una “semantica” alla complessità. In particolare, tali ricerche si concentrano sulla realizzazione di rappresentazioni musicali dell'evoluzione degli automi cellulari, modelli matematici discreti capaci di simulare comportamenti complessi simili a quelli riscontrabili in natura in molti sistemi fisici e biologici. L'idea di fondo che ispira questa ricerca consiste nella convinzione che sia possibile creare degli universi artificiali che possono essere studiati e compresi tramite la musica. In questo processo svolge un ruolo chiave la codifica che consente di trasformare le strutture matematiche prese in esame in qualche altra forma differente di linguaggio, la musica nel caso specifico. Tramite il processo di codifica è possibile realizzare il trasferimento delle strutture matematiche in strutture musicali, appare chiaro, d'altra parte, che questo processo risulta essere assolutamente arbitrario in tutti i suoi aspetti così la natura del materiale musicale ottenuto potrà essere molto differente a seconda delle scelte fatte nella definizione del meccanismo di trasferimento. Questa naturale arbitrarietà del processo di trasformazione dal campo delle strutture matematiche a quello delle strutture musicali impone una doverosa cautela poiché di fronte a un'ampia gamma di possibilità e di approcci differenti risulta necessario definire in maniera chiara gli obiettivi da perseguire e i criteri più opportuni per la valutazione dei risultati. Nel capitolo successivo si presenteranno differenti

metodi di rappresentazione uditiva e s'illustreranno in dettaglio diversi sistemi di codifica che possono essere utilizzati per trasferire l'evoluzione temporale di sistemi dinamici in strutture sonore e musicali.

Le applicazioni musicali finora descritte possono assumere un valore che va oltre quello che esse hanno se considerate esclusivamente all'interno dell'Informatica musicale, loro naturale ambito di appartenenza. Infatti, la creazione di prodotti musicali realizzati mediante la rappresentazione musicale di sistemi complessi può contribuire a chiarire e ispirare la ricerca scientifica realizzando un percorso inverso che partendo dalle strutture musicali torna indietro nel regno dei modelli e delle strutture matematiche per fecondare nuovi sviluppi della ricerca. Da queste interazioni fra problemi e applicazioni di natura scientifica e artistica può emergere un circolo virtuoso che può condurre a chiarire e ispirare a vicenda le diverse attività di ricerca in entrambe i settori. Allo stesso tempo, però, è anche molto importante mantenere distinte le problematiche scientifiche da quelle artistiche o almeno cercare di delinearle e renderle riconoscibili in maniera da avere sempre chiaro quale sia la specifica questione che si sta affrontando. L'emergere di un tale ciclo virtuoso, fondato sull'interazione costruttiva tra arte e scienza, è estremamente auspicabile poichè probabilmente risulta essere l'unico strumento disponibile al pensiero umano per comprendere a pieno gli aspetti fondanti finora nascosti e apparentemente inspiegabili legati al nostro essere e alla realtà che ci circonda. Musica e Matematica sono entrambe espressioni del pensiero creativo dell'uomo, inoltre la Musica, come già affermato, può essere considerata, sotto molti aspetti, un fenomeno complesso. L'ipotesi che ha guidato il lavoro svolto nel corso del Dottorato di Ricerca considera la Musica come uno strumento di rappresentazione, come uno schermo che consente di studiare la Complessità. Infatti, se si pensa che l'interesse maggiore della ricerca scientifica consiste nella comprensione di tutti quei fenomeni spesso sfuggenti e impalpabili legati all'emergenza e all'auto-organizzazione nei sistemi complessi è possibile pensare alle rappresentazioni musicali come a uno strumento specializzato nel cogliere e manifestare tramite l'espressione artistica ciò che per sua natura risulta essere sottile ed estremamente sfuggente.

Tutto ciò può essere realizzato soltanto tramite la definizione di opportuni sistemi di codifica che siano capaci di trasformare le strutture matematiche in strutture musicali lasciando inalterati tutti gli aspetti caratteristici del fenomeno complesso preso in analisi. In tal modo tramite lo studio del sistema di codifica e della natura del materiale musicale, che è capace di produrre a partire da un dato insieme di strutture matematiche, è possibile realizzare quel percorso inverso dal campo musicale a quello matematico che può contribuire a individuare e comprendere i diversi aspetti che caratterizzano le strutture matematiche d'origine. Così il processo di codifica musicale può essere pensato come un processo che nel caso ideale consenta di trasferire completamente immutato in campo musicale il "grado di complessità" caratteristico del comportamento di un dato modello matematico. La definizione di un tale sistema di codifica può contribuire dunque a identificare le leggi che sottostanno ai comportamenti complessi tramite l'individuazione di tutte quelle proprietà invarianti che possono essere rese manifeste anche tramite l'ascolto delle strutture musicali generate a partire da un dato modello matematico.

4.2.1 Intelligenza artificiale

L'*Intelligenza artificiale* può essere definita come quel campo di ricerca finalizzato a studiare, progettare e realizzare “*agenti intelligenti*”, ossia sistemi capaci di percepire le condizioni e le circostanze relative all'ambiente in cui operano e realizzare delle azioni che massimizzano le proprie possibilità di successo nella realizzazione di un dato compito. Questo settore, quindi, può essere definito come la scienza e l'ingegneria finalizzate alla creazione di macchine intelligenti. Da ciò l'Intelligenza artificiale, tra tanti altri obiettivi, cerca anche di comprendere e spiegare che cosa sia l'intelligenza e come essa si manifesti tramite le diverse espressioni del pensiero umano [51]. I metodi impiegati in questo ambito di ricerca sono tutti basati sulla logica, sull'impiego di modelli matematici e sulla simulazione mediante calcolatore di comportamenti ritenuti intelligenti.

La musica senza dubbio rappresenta una delle più intriganti attività frutto dell'intelligenza umana. Per questo motivo la musica rappresenta un ambito d'investigazione particolarmente stimolante per i ricercatori che si occupano di Intelligenza artificiale. D'altra parte numerosi musicisti impegnati nel settore dell'Informatica musicale si sono avvicinati alle tecniche dell'Intelligenza artificiale per lo sviluppo di sistemi di composizione musicale mediante calcolatore elettronico. Infatti lo studio e l'analisi di modelli di tale attività può portare a decifrare i numerosi misteri che avvolgono la musica e l'intelligenza [56].

Uno dei maggiori problemi che affligge le ricerche sull'Intelligenza artificiale consiste nella comune tendenza a non considerare più come intelligente una qualsiasi attività che si riesca a far eseguire a delle macchine opportunamente costruite. Ciò comporta che l'intelligenza, per quanti sforzi si possano compiere, rimane sempre legata a un insieme di aspetti sconosciuti che non sono stati ancora compresi a pieno e dunque risultano impossibili da simulare. Così anche in musica la ricerca degli aspetti fondanti porta continuamente a spostare il confine fra ciò che è automatismo e ciò che rientra nel campo della musicalità nel suo senso più profondo del termine. Nonostante queste inevitabili limitazioni le ricerche in questo settore forniscono un enorme contributo ai musicisti sia tramite lo sviluppo di nuovi strumenti e nuove tecnologie applicate nel campo della pratica musicale, sia contribuendo alla formulazione di nuove visioni e nuove teorie relative alla musica [69].

4.2.2 Vita artificiale

L'espressione “*Vita artificiale*” indica un campo di ricerca finalizzato a investigare sistemi realizzati dall'uomo, caratterizzati da alcune delle proprietà fondamentali che connotano la vita naturale [39, 55]. La comprensione di tali proprietà essenziali della vita propone una serie di questioni e d'interrogativi collegati in primo luogo ai fenomeni biologici, naturali e allo studio dei sistemi complessi. La ricerca nel campo della Vita artificiale si concentra sia sulla definizione di modelli matematici capaci di riprodurre le proprietà essenziali dei fenomeni naturali legati alla vita biologica, sia sullo studio di tali modelli mediante la loro simulazione generalmente eseguita tramite l'impiego del calcolatore elettronico. In questo settore la ricerca è spesso volta alla creazione di “universi artificiali” in cui lo sperimentatore può compiere esperimenti controllando in maniera dettagliata tutte le caratteristiche dell'ambiente, dei fenomeni e degli oggetti presi in analisi. Infatti, eseguire un programma di computer è

più che realizzare un esperimento. Contrariamente agli oggetti fisici in un esperimento convenzionale, gli elementi in una simulazione computerizzata non sono connessi attraverso le leggi della natura, in quanto essi seguono le leggi incorporate nel programma del computer. La computazione, in tal modo, estende il regno della scienza sperimentale: permette che esperimenti siano eseguiti in un universo ipotetico.

La tesi comune che soggiace a questo campo di ricerca consiste nell'idea che strutture complesse possano emergere dalla ripetuta applicazione di un limitato insieme di semplici regole e dar vita a proprietà emergenti. I modelli matematici presi in esame sono, in generale, sistemi dinamici, come per esempio gli automi cellulari, che possono essere utilizzati per studiare le caratteristiche dei fenomeni biologici in vitro, o meglio "*in silicio*", ossia, mediante simulazione sul calcolatore elettronico. Numerosi sistemi dinamici anche se caratterizzati da semplici relazioni matematiche riescono a produrre forme complesse che richiamano in tutta la loro bellezza forme viventi tramite il meccanismo della ricorsione, cioè dell'applicazione ripetuta della stessa regola. Il dualismo legato alla semplicità delle regole produttive e alla complessità e diversità delle forme generate richiama immediatamente alla mente il rapporto fra fenotipo e genotipo tipico della vita e degli organismi viventi.

L'impiego di modelli di Vita artificiale per la creazione di musica offre un'ampia gamma di metodi creativi basati sull'uso di meccanismi derivati dai principi dell'evoluzione naturale. Tramite questi strumenti, musicisti e ricercatori hanno la possibilità di creare universi artificiali finalizzati alla produzione di suoni e musiche che possono essere utilizzati sia per scopi artistici, sia per condurre ricerche in campo musicale e scientifico.⁴ Alcune delle più importanti applicazioni in campo musicale delle ricerche sulla Vita artificiale possono riguardare: la creazione di mondi virtuali in cui evolvono creature artificiali capaci di produrre suoni o musica, l'evoluzione di materiale musicale o di interi brani mediante l'uso di algoritmi genetici, lo sviluppo basato su reti neurali o sulla programmazione genetica di modelli che caratterizzano i processi creativi tipici della composizione musicale, lo sviluppo di agenti intelligenti per la generazione di suoni e musica, l'uso di automi cellulari per la generazione di musica. Queste applicazioni rappresentano degli strumenti di ricerca che possono essere utilizzati per lo studio e la comprensione di diversi fenomeni. Per esempio la creazione di modelli di agenti autonomi capaci di generare melodie o suoni tramite un opportuno codice genetico che definisce in maniera univoca il sistema di generazione del materiale sonoro o musicale [70]. L'evoluzione di questi agenti accoppiata con l'imposizione di regole di comportamento e di vincoli che limitano o indirizzano il processo evolutivo può rappresentare uno strumento per lo studio dei processi evolutivi e dei fattori che possono influenzare il loro svolgimento. In tal modo risulta possibile compiere, per esempio, l'analisi delle conseguenze globali imputabili a interazioni locali in un ambiente complesso. Inoltre applicazioni simili possono contribuire a investigare i processi di evoluzioni strettamente legati alla

⁴Su questo argomento è possibile fare riferimento ai workshop Artificial Life Models for Musical Applications ALMMA I e ALMMA II, il primo organizzato all'interno della 6h European Conference on ARTIFICIAL LIFE 2001 e il secondo svolto nell'ambito della 8th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALife VIII) 2002 i cui atti possono essere reperiti ai seguenti indirizzi:

<http://galileo.cincom.unical.it/esg/Music/workshop/workshop.htm>

http://galileo.cincom.unical.it/esg/Music/ALMMAII/ALMMAII_file/programme.htm.

musica così come possono portare alla definizione e alla verifica di modelli di composizione musicale di tipo algoritmica.

Miranda e Todd [72] propongono l'impiego dei metodi della Vita artificiale per lo studio delle circostanze e dei meccanismi che hanno portato alla nascita e all'evoluzione della musica. Questo nuovo approccio, chiamato Computational Evolutionary Musicology, si basa sull'uso di modelli e simulazioni, realizzati mediante calcolatore elettronico, finalizzati a studiare i fenomeni musicali all'interno di mondi artificiali abitati da comunità di agenti autonomi che interagiscono fra loro.

I processi creativi e compositivi che sottostanno alla produzione di nuove musiche rappresentano un'interessante manifestazione della mente umana che può essere studiata e compresa anche tramite nuovi strumenti d'indagine forniti dai diversi metodi della Vita artificiale. Da questo punto di vista suscitano molto interesse le possibilità di applicare in campo artistico e musicale tali modelli anche come supporto per la composizione musicale e come mezzo di amplificazione della creatività di compositori e musicisti per la generazione di suoni, melodie o intere strutture musicali. Infine, i modelli e gli strumenti della Vita artificiale possono essere utilizzati proficuamente anche per la realizzazione di sistemi di arte generativa.

4.2.3 Metodi computazionali per l'analisi musicale

Le tecniche impiegate in fisica e in ingegneria per l'analisi di segnali possono essere utilizzate anche per l'analisi del suono e della musica. Voss e Clarke [98], nel 1975, sono stati i primi a sperimentare questo tipo di analisi applicata alla musica e al parlato prendendo in esame il segnale prodotto da emittenti radio che trasmettevano programmi sia musicali sia con parlato. Il risultato di maggior interesse presentato dagli autori consiste nel mostrare come l'analisi del segnale sonoro di numerosi brani musicali appartenenti a stili e generi musicali differenti porta a ottenere un andamento della distribuzione delle fluttuazioni di ampiezza in funzione della frequenza che segue una legge di potenza del tipo $\frac{1}{f}$ del tutto simile all'andamento di molti altri fenomeni naturali. La figura 4.1 mostra il grafico dello spettro di ampiezza in funzione della frequenza ottenuto dall'analisi di sorgenti sonore di diversa natura. Questo lavoro ha contribuito fortemente ad avviare un ampio filone di ricerca nel campo dell'informatica musicale legato alla possibilità di creare delle sequenze musicali tramite l'utilizzo di generatori di numeri casuali caratterizzati da una legge di potenza simile a quella trovata da Voss e Clarke.

Negli ultimi anni sono stati presentati altri lavori finalizzati ad applicare le tecniche utilizzate per l'analisi di serie di dati di natura caotica in campo musicale per l'analisi di brani o di frammenti musicali. Questa tipologia di analisi può essere realizzata sia prendendo in esame il segnale sonoro relativo a un certo brano musicale [84] sia considerando la partitura del brano come una sequenza di numeri codificata tramite lo standard MIDI [33]. Un suono, così come le sequenze di note, possono essere considerate come segnali che variano nel tempo, rappresentabili tramite una relazione del tipo $x = x(t)$, prodotti da un sistema dinamico a cui possono essere applicati i metodi della Nonlinear Time Series Analysis (NTSA). Nel caso delle applicazioni musicali questa variabile può rappresentare in un caso l'ampiezza dell'onda sonora che viene registrata

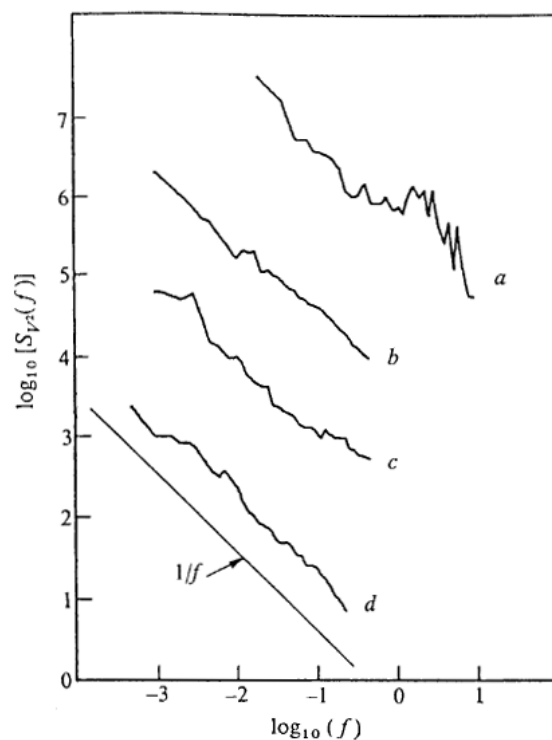


Figura 4.1: Spettro d'ampiezza al variare della frequenza. *a* Scott Joplin Piano Ragtime; *b* stazione radio che trasmette musica classica; *c* stazione radio che trasmette musica rock; *d* stazione radio che trasmette notizie e parlato.

istante per istante o nell'altro caso l'altezza delle varie note che caratterizzano la sequenza melodica in esame.

I metodi di analisi NTSA⁵ sono fondati su alcune assunzioni di base: un attrattore rappresenta lo stato stabile finale di un sistema dinamico; esistono diverse tipologie di attrattori fra cui anche gli attrattori strani che corrispondono a evoluzioni di tipo caotico; una serie temporale complicata può essere descritta anche mediante un sistema dinamico semplice la cui evoluzione è caratterizzata dalla presenza di un attrattore strano; nei dati raccolti relativi all'evoluzione temporale del sistema non esistono anomalie come per esempio spazi vuoti e discontinuità; l'impiego di tali metodi di analisi è finalizzato a individuare e ricostruire lo spazio multidimensionale in cui avviene l'evoluzione del sistema dinamico e a stimare tutti i vari parametri utili per caratterizzare le serie di dati.

I risultati delle ricerche finora condotti suggeriscono che questi metodi possono essere applicati in campo musicale anche se è necessario affinare le varie metodologie per renderle maggiormente adatte all'analisi di materiale musicale. I risultati ottenuti per riguarda le melodie inducono a pensare che l'evoluzione delle melodie sia molto simile a quella dei sistemi dinamici caotici. Infatti, si-

⁵Per compiere questo tipo di analisi è possibile utilizzare il pacchetto software TISEAN 2.1 (TIme SEries ANalysis 1999-2001, by R. Hegger, H. Kantz, and T. Schreiber).

milmente al caos deterministico, l'analisi delle melodie porta a identificare delle orbite che occupano una regione ben limitata dello spazio delle fasi, inoltre, le orbite spesso sono costituite da forme geometriche complicate che potrebbero far pensare all'esistenza di attrattori strani. Infine, lo spettro di potenza delle melodie spesso è caratterizzato sia dall'assenza di picchi (tipici di comportamenti periodici o quasi periodici) sia dalla mancanza di ampie bande di frequenza (tipiche di processi casuali come quelli che determinano il rumore bianco o altri tipi di rumore colorati).

4.3 Musica algoritmica

Il presente capitolo delinea lo stato dell'arte sulle ricerche interdisciplinari che studiano in maniera sinergica la Complessità e la Musica. In questa sezione conclusiva si illustreranno con maggiore dettaglio le ricerche e le applicazioni sviluppate nel campo della musica algoritmica all'interno della quale i paradigmi, i metodi e i modelli matematici dei vari settori della scienza della complessità trovano un fertile campo di applicazione. Gran parte dell'attività di ricerca svolta nel corso del Dottorato ricade in questo particolare settore dell'Informatica musicale per tale motivo appare importante delineare e chiarire il contesto di riferimento in cui è stata condotta la ricerca.

Con il termine "*Musica algoritmica*" si indica un'ampia gamma di tecniche finalizzate a creare musica mediante l'impiego di algoritmi. Da questa definizione di carattere generale emerge che queste pratiche non sono strettamente legate all'uso del calcolatore elettronico come potrebbe essere in prima analisi facile pensare. Così, il ben noto gioco dei dadi attribuito a Mozart, alcune ben codificate tecniche contrappuntistiche, altre, più o meno serie, pratiche risalenti alla fine del '700 [109] sia le tecniche di composizione basate su metodi stocastici sviluppate da Xenakis intorno la fine degli anni '50, pur non facendo alcun uso del calcolatore, possono rientrare tutte in questa vasta gamma di metodi algoritmici per la creazione di musica.

Lo sviluppo dei calcolatori elettronici, a partire dai primi esperimenti condotti da Hiller e Isaacson [50], ha dato forte impulso alla crescita dell'interesse da parte di musicisti e ricercatori verso tali problematiche. Attualmente in questo ambito esistono numerosi lavori sia musicali che scientifici finalizzati alla definizione e all'applicazione di metodi automatici per la produzione di musica. Spesso questo ambito di ricerca viene comunemente indicato tramite il termine "*Composizione algoritmica*", anche se, come affermano Wooller et al. [102], in questo ambito non esiste attualmente chiarezza nei termini e nei concetti e ciò spesso induce confusione nelle discussioni su questi temi. In questa trattazione si è scelto di utilizzare il termine Musica algoritmica in quanto sembra essere più generale e di ampio respiro poichè la composizione risulta essere una delle diverse attività che compongono il più ampio concetto di Musica. Nonostante il grande numero di lavori pubblicati su questo argomento, spesso la confusione nelle discussioni riguardo la Musica algoritmica può essere indotta dalla completa assenza di una struttura concettuale di riferimento cui si possa fare riferimento in maniera univoca. Per sopperire a tale mancanza Wooller et al. presentano un'architettura concettuale per la classificazione dei processi impiegati nei sistemi di Musica algoritmica. Il principale obiettivo perseguito dagli autori consiste nel cercare di sistematizzare e chiarire i vari concetti all'inter-

no di una struttura per rendere possibile il confronto tra differenti processi e applicazioni di Musica algoritmica. Ciò con l'obiettivo di riuscire a realizzare il confronto tra differenti sistemi tramite il loro posizionamento all'interno di un piano bidimensionale in cui le due coordinate rappresentano la *funzione* e il *contesto* che li caratterizza.

La dimensione relativa alla funzione può essere definita come un continuo che descrive le funzionalità che caratterizzano un dato sistema di Musica algoritmica. Il continuo si estende dal campo *analitico*, attraverso quello *trasformativo*, fino al campo *generativo*. Questi termini descrivono in maniera oggettiva l'effetto del processo che viene applicato sui dati. Esistono due differenti modi per distinguere come i processi possono modificare i dati:

- il cambiamento della dimensione potenziale dei dati;
- il cambiamento dello schema di rappresentazione.

Le tre categorie che caratterizzano la funzione di un sistema di musica algoritmica possono essere definite così come di seguito:

- **Analitica:** gli algoritmi di questa categoria tendono a ridurre sia la dimensione potenziale dei dati sia la predisposizione musicale generale della rappresentazione tramite l'estrazione di elementi specifici;
- **Trasformativa:** gli algoritmi di questa categoria tendono a non modificare in maniera significativa né la predisposizione musicale della rappresentazione né la reale dimensione dei dati, l'unico effetto di tali algoritmi consiste in cambiamento del contenuto d'informazione;
- **Generativa:** gli algoritmi generativi tendono ad aumentare sia la generale predisposizione musicale della rappresentazione dei dati sia la reale dimensione dei dati.

Il contesto definisce invece tutte le informazioni e le condizioni di tipo ambientale che hanno influenza sull'esecuzione e sul risultato di un determinato algoritmo e, quindi, sull'intero sistema di Musica algoritmica. Il contesto può essere rappresentato anche come un continuo ai cui estremi è possibile porre da un lato i sistemi caratterizzati da un ambito di validità molto limitato e dall'altro quelli a cui è possibile attribuirne uno molto ampio. Questo indice spesso è molto legato alla natura della rappresentazione musicale utilizzata in un dato sistema algoritmico, infatti, nella gran parte dei casi una maggiore generalità del sistema di rappresentazione consente di ottenere delle applicazioni musicali capaci di restare valide in ambiti più ampi. Da ciò deriva l'esigenza di valutare la predisposizione musicale di un dato sistema di rappresentazione che fornisce una misura di quale sia il grado con cui si riesca a definire e descrivere le idee musicali e dunque facilitare i processi compositivi richiesti. La figura 4.2 mostra diversi sistemi di Musica algoritmica posti a confronto mediante la loro collocazione all'interno del piano a due dimensioni *funzione-contesto*.

Una rappresentazione musicale può diventare più predisposta verso certi processi musicali tramite l'aggiunta di alcuni parametri, oppure tramite una strutturazione che risulti essere più appropriata al processo algoritmico da realizzare. Nel caso in cui si realizzi una misura assoluta della predisposizione

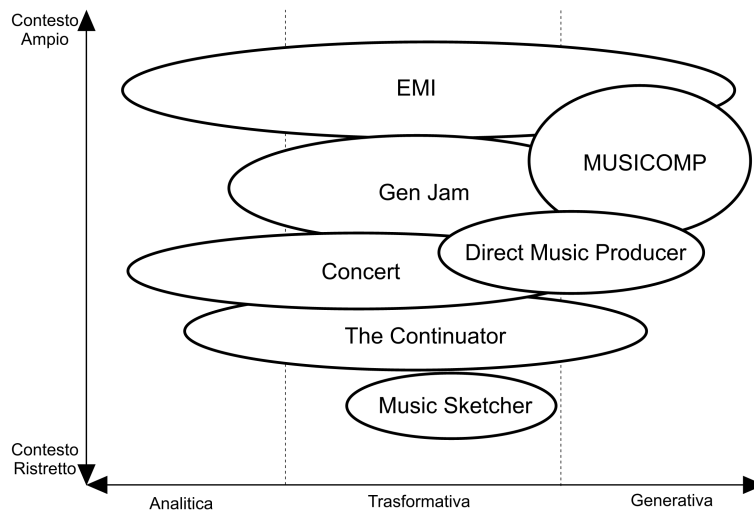


Figura 4.2: Alcuni sistemi di Musica Algoritmica collocati nel piano a due dimensioni.

musicale di un determinato sistema di rappresentazione musicale si corre il rischio di perdere di vista i diversi aspetti stilistici che possono caratterizzare differenti implementazioni musicali. Per tale motivo è preferibile e più appropriato valutare la predisposizione musicale in maniera relativa, dunque come uno strumento che consenta di stabilire se una determinata rappresentazione sia caratterizzata da una predisposizione musicale “maggiore o minore” rispetto ad un’altra o rispetto ad un gruppo di altre rappresentazioni.

Inoltre, bisogna considerare che il metodo di incapsulazione impiegato nell’analisi delle funzioni di un determinato sistema influisce sia sulla dimensione che sulla posizione che lo caratterizzano all’interno del continuo bidimensionale. Infatti, l’incapsulazione di sotto-componenti all’interno di un tutto unico che rappresenti collettivamente le loro varie funzioni può portare il sistema a occupare un’ampia regione del continuo. Mentre d’altra parte incapsulando soltanto un intero sistema può portare a collocarlo in un unico punto. Un’importante considerazione da sottolineare in tal senso, per realizzare una corretta analisi delle funzioni svolte e quindi la giusta localizzazione all’interno del continuo, consiste nell’attenta analisi e individuazione di quali siano gli ingressi e le uscite di maggiore interesse.

Nella sezione precedente si è messo in luce come i vari modelli sviluppati in ambito scientifico possano trovare applicazioni in campo musicale contribuendo nella realizzazione di risultati importanti sia per quanto riguarda la ricerca scientifica sia per lo sviluppo di nuovi strumenti di espressione artistica. Da questo punto di vista i differenti metodi finora sperimentati nel campo della musica algoritmica possono anche essere organizzati in base ai loro elementi caratteristici e in base all’ambito di ricerca in cui hanno avuto origine. Papadopoulos e Wiggins [79] presentano una rassegna di metodi ampiamente utilizzati nel campo della Musica algoritmica che sono stati classificati nelle seguenti categorie:

- Modelli Matematici;
- Sistemi basati sulla conoscenza;
- Grammatiche;
- Metodi evolutivi;
- Sistemi che imparano;
- Sistemi ibridi.

Nella prima categoria rientrano i metodi stocastici sviluppati da Xenakis [108], i metodi basati su modelli computazionali legati alle ricerche sui sistemi dinamici non lineari caratterizzati da un comportamento caotico [12, 19, 83, 101], l'uso di frattali [22, 37, 57], di Automi Cellulari e di altri metodi sviluppati nell'ambito della Vita Artificiale [14, 15, 66], e infine, di modelli biologici artificiali. In questa categoria rientrano anche molte delle applicazioni che saranno presentate nel seguito basate sull'impiego di sistemi dinamici caotici. Nel capitolo 7, inoltre, si presenteranno alcune ricerche sull'impiego di algoritmi genetici che ricadono all'interno della categoria relativa ai metodi evolutivi per la generazione di musica.

Le varie tecniche di Musica algoritmica possono essere suddivise anche in due grandi categorie, così come proposta da Miranda e Todd [72]: **Algoritmi astratti** e **Sistemi basati su conoscenze musicali**. Nella prima categoria rientrano tecniche basate sull'impiego di modelli e sistemi non necessariamente finalizzati a scopi musicali, come per esempio, i vari modelli matematici finora illustrati. La seconda categoria comprende invece tecniche in cui la conoscenza musicale ha un ruolo importante poichè sono ispirate o derivate da teorie musicali. Entrambe le categorie hanno pregi e difetti. Infatti le tecniche appartenenti alla prima categoria tendono a produrre materiali musicali complessi che però spesso all'ascolto danno la sensazione di mancare di coerenza o di senso musicale per l'assoluta mancanza di tutti quei riferimenti culturali cui gli ascoltatori fanno comunemente ricorso nell'ascolto della musica. D'altra parte le tecniche che rientrano nella seconda categoria soffrono spesso del problema opposto, poichè riescono a produrre materiale musicale rigorosamente aderente a uno o più determinati stili musicali, mentre risultano poco adatti all'esplorazione di nuovi linguaggi musicali.

Infine, la classificazione dei metodi di Musica algoritmica può essere realizzata anche prendendo in considerazione la natura degli oggetti su cui opera un dato algoritmo. Da questo punto di vista è possibile realizzare una suddivisione in tre differenti categorie:

- algoritmi che operano sul segnale sonoro;
- algoritmi che operano su strutture musicali;
- algoritmi ibridi che operano su più livelli simultaneamente: dal segnale sonoro fino alle strutture musicali.

Nella prima categoria rientrano molti metodi di analisi, elaborazione e sintesi dei segnali sonori. Nella seconda categoria possono essere raccolti i vari metodi, sviluppati fin dalla nascita della Musica algoritmica realizzata mediante l'uso

del calcolatore elettronico, finalizzati alla produzione automatica di melodie e di strutture musicali complesse. Nella terza categoria rientrano metodi che, superando la distinzione fra suono e musica, sono finalizzati a operare su più livelli gerarchici simultaneamente.

4.3.1 Musica generativa

La classificazione delle funzioni proposta da Wooller et al. nella loro struttura concettuale mostra chiaramente che la Musica generativa risulta essere un sotto insieme del più vasto settore della Musica algoritmica. Così come è stato fatto per il termine Arte Generativa nella sezione 3.2.3, è possibile definire il termine “*Musica generativa*” come quella musica in cui alcuni o tutti i suoi aspetti costitutivi vengono creati azionando un opportuno sistema dotato di un certo grado di autonomia. Diversi processi generativi sono stati introdotti e utilizzati nel corso degli ultimi anni nell’ambito della Musica elettronica per la creazione di materiali musicali. L’impiego di tali tecniche può essere realizzato operando su diversi livelli gerarchici così come avviene nel caso della Musica algoritmica. A livello macroscopico processi generativi possono essere utilizzati per la creazione di materiale musicale articolato e per la generazione di melodie e strutture tematiche. A livelli gerarchici inferiori, su scale temporali via via più piccole, i processi generativi possono essere utilizzati per la generazione di suoni mediante l’uso di opportune tecniche di sintesi.

Nel corso degli anni il termine Musica generativa è stato impiegato con diverse accezioni e significati da compositori, musicisti ed esperti di Informatica Musicale. I campi di riferimento e i paradigmi a cui si fa riferimento possono essere delineati secondo la seguente classificazione [102]:

linguistico/strutturale: musica creata usando costrutti teorici e analitici che siano sufficientemente espliciti per poter generare della musica. Questo approccio si ispira principalmente allo studio delle grammatiche generative per il linguaggio e la musica. Una grammatica generativa è un insieme di regole che “specificano” o “generano” in modo ricorsivo (cioè per mezzo di un sistema di riscrittura) le espressioni ben formate di un linguaggio [96, 29]. Nel caso in esame, quindi, il termine “generativo” si riferisce principalmente al concetto matematico di ricorsione che consente la produzione di nuove espressioni;

interattivo/comportamentale: musica prodotta da un processo in cui non è individuabile nessun tipo di informazione musicale in ingresso al sistema, in altri termini processi non basati sulla trasformazione o l’elaborazione di informazioni musicali [100];

creativo/procedurale: musica creata da processi che vengono messi in moto dal compositore come per esempio i casi di “*In C*” di Terry Riley e “*Its Gonna rain*” di Steve Raich;⁶

biologico/emergente: musica non ripetibile perchè basata su processi casuali, probabilistici o non deterministici. In questa categoria rientrano anche

⁶Per approfondimenti si veda l’articolo di Brian Eno dal titolo *Generative music* disponibile all’indirizzo: <http://www.inmotionmagazine.com/eno1.html>.

tutte le applicazioni musicali che impiegano processi deterministi caratterizzati da fenomeni di natura caotica o complessa come per esempio l'emergenza di strutture o l'insorgere di fenomeni di autorganizzazione [49], così come anche le musiche prodotte mediante la simulazione o la codifica di fenomeni biologici e naturali.

Anche se molto diversi fra loro, tutti i vari approcci rappresentati mediante queste categorie sono accomunati dalla presenza di un sistema dotato di un certo grado di autonomia capace di generare materiale musicale molto eterogeneo. Ritornando dunque alla definizione data da Wooller et al. sulla funzione generativa tutti questi sistemi sono accomunati dalla tendenza ad aumentare sia la generale predisposizione musicale della rappresentazione dei dati, sia la reale dimensione dei dati. In altri termini, i sistemi generativi solitamente hanno bisogno di una piccola quantità di dati in ingresso, spesso dotati di una limitata predisposizione musicale, per generare in uscita una quantità di dati significativamente maggiore che a seconda dei vari casi può presentare anche una predisposizione musicale di gran lunga superiore a quella dei dati in ingresso.

L'attività svolta durante il Dottorato di Ricerca ricade principalmente nel campo della Musica generativa. Infatti, la ricerca è stata principalmente orientata a sperimentare l'impiego di sistemi dinamici non lineari per la generazione di suoni e musiche. Le applicazioni sviluppate nel corso del Dottorato di Ricerca rientrano, dunque, in maniera prevalente nella categoria relativa ai processi di tipo **biologico/emergente**. Queste applicazioni sono state finalizzate da un lato all'esplorazione delle possibilità d'impiego di metodi di rappresentazione uditiva per l'analisi e il riconoscimento di strutture all'interno di serie di dati complesse, dall'altro lato sono state volte a sperimentare l'impiego artistico dei sistemi dinamici provenienti dalle ricerche sulla complessità e il caos tramite la definizione di metodologie per la generazione di suoni, di strutture melodiche e di interi brani musicali.

Durante l'attività di ricerca, inoltre, è apparso necessario riuscire a definire dei sistemi di interazione capaci di fornire un controllo adeguato sulla natura e sull'espressività del materiale musicale prodotto dai vari sistemi di musica generativa. In questa direzione si è cercato di dotare i sistemi generativi di opportuni strumenti di analisi e di sintesi al fine di renderli realmente interattivi, ossia capaci di rispondere alle informazioni provenienti dai musicisti o da altre fonti esterne di informazione. Le applicazioni interattive sviluppate possono ricadere anche nella categoria dei processi **interattivo/comportamentale**, anche se in molti casi risulta piuttosto difficile riuscire a stabilire in maniera esatta la frontiera fra le diverse categorie al fine di classificare con precisione una determinata applicazione.

Capitolo 5

Metodi di rappresentazione uditiva

Il suono è un fenomeno essenzialmente temporale. Questa sua natura prevalentemente dinamica implica la necessità di confrontarsi con concetti che contengono al proprio interno il fluire del tempo, quali per esempio: mutamento, evoluzione, ripetizione. Immaginando, infatti, un mondo soggetto a un immutabile stato di quiete, in cui il tempo si trasforma in eternità, nessuna musica potrebbe essere ascoltata, così come non potrebbe essere prodotto alcun tipo di suono. Questa natura, assolutamente non statica, del suono può essere utilizzata come strumento di rappresentazione di fenomeni e di dati che, in maniera simile, sono caratterizzati da una temporalità che determina l'insorgere e la modifica di forme e strutture che evolvono dinamicamente nel tempo. Concetti come: evoluzione, sviluppo, trasformazione, ripetizione con o senza variazione, sono largamente presenti nella storia del pensiero musicale. È possibile ipotizzare, dunque, che questa natura intrinsecamente dinamica consenta di rappresentare, mediante suoni, il manifestarsi di questi stessi fenomeni all'interno di dati che non sono strettamente di natura musicale o sonora. Da tali considerazioni emerge l'idea che il suono possa essere un fenomeno particolarmente adatto alla trasmissione e alla rappresentazione di informazioni relative alla presenza di strutture ricorrenti e di relazioni temporali all'interno di dati. Mentre, appare chiaro che tali informazioni sono difficilmente trasferibili e apprezzabili tramite l'impiego di altri canali sensoriali. Ciò sia per la natura prettamente temporale del fenomeno sonoro, sia per la spiccata capacità dell'apparato uditivo umano nell'eseguire precise e accurate analisi volte a valutare la correlazione fra eventi sonori, a riconoscere e isolare ripetizioni e motivi ricorrenti, a identificare sequenze non-lineari all'interno di valori in continua variazione. Queste sono alcune delle considerazioni che spingono la ricerca nel campo dei metodi di rappresentazione uditiva (*Auditory Display*) per la realizzazione di rappresentazioni acustiche di dati mediante l'uso di suoni non-verbali.

D'altra parte, lo studio dei sistemi dinamici, che svolge un importante ruolo nelle ricerche sulla Complessità, spesso si trova a dover impiegare rappresentazioni di evoluzioni temporali in spazi delle fasi a più dimensioni che possono comportare notevoli difficoltà per la visualizzazione e l'analisi delle traiettorie. Per fare fronte a tali limitazioni sono stati sviluppati diversi metodi di analisi

che considerano l'andamento temporale mediante una mappa spaziale statica piuttosto che tramite lo studio dell'evoluzione dinamica del sistema. In tal modo spesso il flusso informativo non è colto dinamicamente, ma è visto come se l'evoluzione temporale venisse fissata o meglio "congelata" in una certa struttura spaziale. Inoltre, nel caso di rappresentazioni relative a sistemi dinamici caratterizzati da uno spazio delle fasi multidimensionale il ricorso a proiezioni spaziali, basate sull'impiego simultaneo di più mappe bidimensionali e/o tridimensionali, spesso soffre del grosso limite di non poter rappresentare l'evoluzione del sistema in maniera globale facendo perdere il valore sinottico che potrebbe avere un'unica rappresentazione. L'impiego di rappresentazioni sonore potrebbe costituire un valido strumento per lo studio dei sistemi dinamici al fine di rendere manifeste le strutture temporali e le ricorrenze che spesso difficilmente riescono a essere messe in luce dai sistemi d'analisi correntemente in uso [101].

Nel seguito di questo capitolo si fornirà una breve introduzione all'acustica e alla psicoacustica. Si cercherà di presentare e definire i concetti legati alla fisica e alla percezione dei fenomeni sonori che possono essere impiegati e sfruttati nella realizzazione di sistemi di rappresentazione uditiva. Si introdurranno, inoltre, alcune nozioni legate alla teoria musicale, all'Informatica musicale e alla sintesi del suono con il preciso intento di delineare il contesto di riferimento nel quale si è svolta l'attività di ricerca. Successivamente si presenterà una rassegna dello stato dell'arte nel campo dei metodi di rappresentazione uditiva al fine di presentare gli aspetti più strettamente legati ai problemi affrontati lungo l'intero corso del Dottorato di Ricerca. Si presenteranno, infine, i diversi sistemi di codifica finora sviluppati che possono essere utilizzati per la rappresentazione di serie di dati mediante l'impiego di eventi sonori.

5.1 Il suono, la musica e il calcolatore

I legami tra Scienza, Matematica e Musica sono antichi e profondi così come è già stato illustrato nella sezione 3.1.1. Con l'avvento e il progressivo sviluppo dei calcolatori elettronici è diventato possibile produrre ed modificare il suono tramite processi di elaborazione numerica. Nel 1957 Max Mathews sperimentò le prime applicazioni dei calcolatori per la registrazione e la sintesi del suono [63, 65]. Queste tecniche rendono possibile comporre il suono a partire dai suoi costituenti elementari suscitando un enorme interesse in musicisti attratti dalla possibilità di impiegare nuovi strumenti per l'esplorazione di territori sonori inesplorati. A partire dalle prime applicazioni pionieristiche, l'impiego del calcolatore nella pratica musicale si è esteso e si è differenziato rendendo possibile per esempio la sintesi di nuove sonorità, l'imitazione di strumenti acustici, la creazione di suoni sintetici "*illusori*" o "*paradossali*", la composizione di tessiture sonore inedite, l'interpretazione in "*tempo reale*" e l'interazione dal vivo fra esecutori e calcolatore. Lo sviluppo dell'Informatica musicale ha dato anche un forte impulso alla ricerca nel campo dell'Acustica e in particolare in quello della Psicoacustica, disciplina che s'interessa dell'investigazione dei fenomeni percettivi legati alla sensazione sonora. Le possibilità offerte dall'impiego dei calcolatori elettronici, infatti, da una parte hanno reso possibile lo sviluppo di nuovi e sofisticati strumenti di analisi e d'investigazione per lo studio dei fenomeni acustici e psicoacustici, dall'altra parte hanno spinto musicisti e compositori ad approfondire le proprie conoscenze circa la comprensione dei fenomeni legati

al suono per meglio padroneggiare i nuovi strumenti tecnologici e ampliare così le conoscenze e le risorse al servizio del pensiero musicale.

5.1.1 Il suono – l'acustica

L'*Acustica* è quella parte della fisica che studia i fenomeni legati alla produzione, alla trasmissione e alla ricezione del suono [41, 81]. Il suono viene prodotto dalla vibrazione dei corpi. Queste disturbano il moto delle molecole d'aria poste attorno inducendo un moto alternato che tende ad allontanare e ad avvicinare le molecole in sincrono con la vibrazione del corpo. Le vibrazioni di un qualsiasi corpo, dunque, inducono nell'aria attorno ad esso delle onde che si propagano, sotto forma di fluttuazioni di pressione, secondo dei fronti d'onda sferici. L'immagine (a) in figura 5.1 mostra una rappresentazione schematica dello spostamento di una particella d'aria e l'onda sonora relativa al suo moto. Mentre l'immagine (b) mostra una rappresentazione della propagazione del suono secondo fronti d'onda sferici.

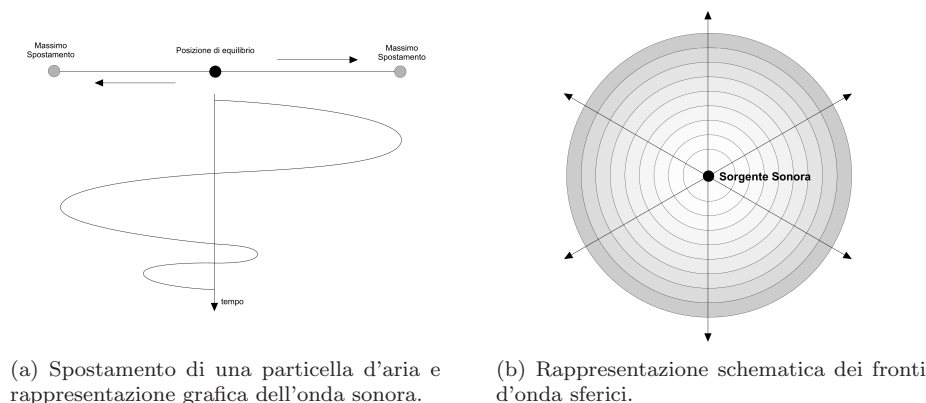
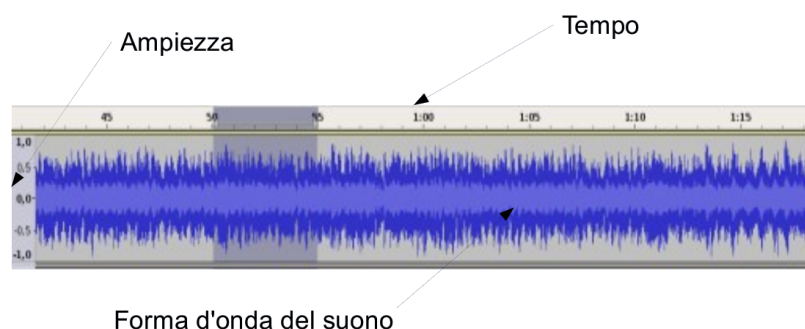


Figura 5.1: Propagazione del suono.

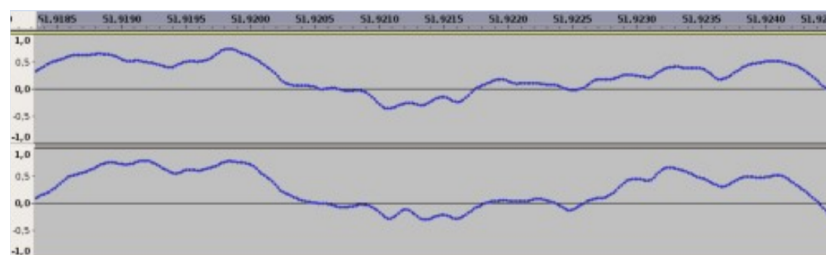
La perturbazione, che si propaga nell'aria, indotta dalla vibrazione di un qualsiasi corpo viene chiamata onda sonora. Le onde sonore sono definite come onde longitudinali poiché la direzione della pulsazione coincide con la direzione di propagazione dell'onda. Le onde sonore sono differenti dalle onde del mare e da quelle prodotte dal lancio di una pietra in uno stagno poiché queste ultime sono onde trasversali in cui la direzione della pulsazione dell'onda risulta essere perpendicolare alla sua direzione di propagazione.

Un qualsiasi suono può essere rappresentato, nel dominio del tempo, mediante un segnale $s(t)$ che definisce come varia l'ampiezza dell'onda sonora in funzione del tempo. L'*ampiezza* dell'onda sonora rappresenta la variazione di pressione sonora indotta nell'aria dalla propagazione del suono. La rappresentazione grafica del profilo del segnale sonoro su un piano cartesiano costituito dall'asse orizzontale relativo al tempo e dall'asse verticale relativo all'ampiezza del segnale viene in genere chiamata *forma d'onda* del suono. La misura dell'ampiezza del suono si realizza a partire da un valore zero che corrisponde a una variazione di pressione nulla relativa all'aria in uno stato di quiete in cui è assente qualsiasi perturbazione. L'ampiezza può assumere valori positivi o ne-

gativi corrispondenti a variazioni di pressioni di segno concorde che determinano nell'aria l'alternarsi di aree di compressione, in cui la pressione è leggermente maggiore della pressione atmosferica, a zone di rarefazione, in cui la pressione è leggermente inferiore a quella atmosferica. L'immagine *a* in figura 5.2 mostra parte della finestra di un programma per l'elaborazione e la modifica del suono in cui è rappresentata la forma d'onda di un segnale sonoro. Nell'immagine sono visibili le etichette degli assi utilizzati per la rappresentazione il tempo per l'asse delle ascisse e l'ampiezza per l'asse delle ordinate. L'immagine *b* mostra un dettaglio della forma onda ottenuto prendendo in considerazione un intervallo di tempo molto breve.



(a) Un segnale sonoro rappresentato all'interno di un programma di elaborazione del suono.



(b) Dettaglio della forma d'onda del segnale sonoro.

Figura 5.2: Il segnale sonoro.

L'andamento nel tempo di un generico segnale sonoro $s(t)$ può essere a seconda dei casi più o meno ripetitivo oppure può risultare estremamente complicato fino a presentare delle evoluzioni in cui appare praticamente impossibile riuscire a riconoscere delle strutture ricorrenti. Nel caso in cui un suono sia caratterizzato da un andamento temporale che presenta una struttura ricorrente nel tempo si dice che quel suono è caratterizzato da una forma d'onda *periodica* e si definisce come un *suono periodico*. Anche se i suoni periodici rappresentano un sottoinsieme ristretto dell'intera famiglia dei segnali sonori, essi sono estremamente interessanti perchè la loro trattazione matematica presenta meno difficoltà e dunque possono essere un ottimo esempio per spiegare molte delle proprietà che caratterizzano i suoni in generale.

Una singola ripetizione di un suono periodico viene chiamata *ciclo* e il numero di cicli per secondo con cui si ripete il segnale corrisponde alla sua *frequenza*

fondamentale. L'unità di misura relativa alla frequenza, corrispondente al numero di cicli per secondo, in fisica viene comunemente chiamata *Hertz* o in forma abbreviata *Hz*. La durata di tempo di un ciclo, per esempio misurata in secondi, viene chiamata *periodo* o *lunghezza d'onda*, il periodo è legato alla frequenza da una relazione di proporzionalità inversa poichè al crescere del periodo la frequenza diminuisce e viceversa. Una sinusoidale rappresenta uno dei più semplici esempi di segnale periodico, rappresentabile matematicamente mediante la seguente relazione:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (5.1)$$

dove A rappresenta l'ampiezza della sinusoidale, f la frequenza e ϕ la fase, ossia il valore iniziale di ampiezza che assume l'onda. La figura 5.3 mostra la forma d'onda relativa a una sinusoidale caratterizzata da un valore di frequenza pari a 440Hz .

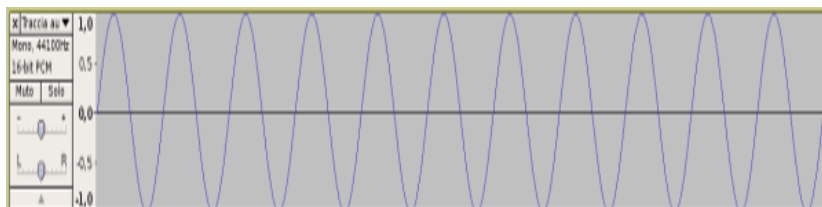
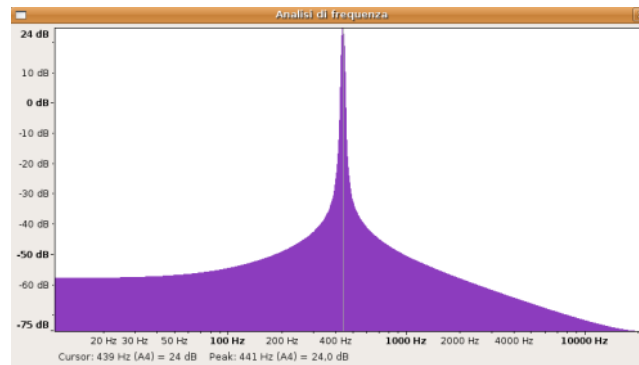


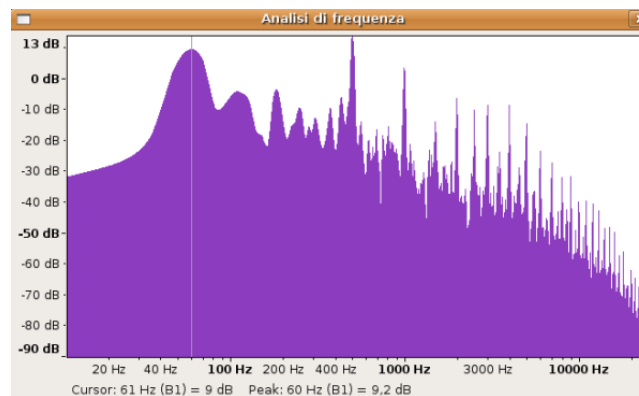
Figura 5.3: Grafico di una forma d'onda sinusoidale.

Una forma d'onda qualsiasi può contenere un ampio numero di frequenze diverse oltre la frequenza fondamentale. Per tale motivo spesso risulta utile impiegare anche una rappresentazione del suono nel *dominio della frequenza* che rende possibile mettere in luce lo *spettro* del segnale sonoro, ossia il suo contenuto frequenziale. Le diverse frequenze che compongono lo spettro vengono chiamate *parziali*¹. Il contenuto di frequenza di un suono può essere rappresentato in diversi modi, in genere però si preferisce utilizzare una rappresentazione su di un piano cartesiano caratterizzato dall'asse orizzontale relativo alle frequenze e l'asse verticale relativo all'ampiezza dei diversi componenti di frequenza. L'immagine (a) in figura 5.4 mostra lo spettro di frequenza di un segnale sinusoidale caratterizzato da un unico picco centrato attorno al valore di frequenza della sinusoidale. L'immagine (b) mostra lo spettro di frequenza di un breve frammento sonoro estratto da un brano musicale. In questo caso lo spettro di frequenza è molto più ricco e articolato rispetto al caso della sinusoidale. Il contenuto di frequenza di un suono si modifica nel tempo, dunque una rappresentazione bidimensionale come quella appena presentata risulta essere insufficiente. Infatti, la forma d'onda di un suono dipende sia dalla variazione nel tempo dell'ampiezza del suono, ossia l'*inviluppo di ampiezza*, sia da come variano nel tempo le ampiezze delle diverse componenti di frequenza, ossia gli *inviluppi temporali* delle diverse componenti spettrali.

¹Per indicare le varie frequenze che compongono lo spettro di un suono si utilizzano molto spesso anche i termini *armoniche* o *armonici*. Qui e nel seguito si è scelto di non utilizzare questi termini perchè non hanno un significato valido in generale e dunque spesso inducono in confusione e in ambiguità. Ha senso, infatti, parlare di armoniche, o meglio di parziali armoniche, soltanto nel caso particolare in cui tali componenti di frequenza sono multipli interi della frequenza fondamentale.



(a) Spettro di frequenza di un segnale sinusoidale.



(b) Spettro di frequenza di un frammento relativo a un brano musicale.

Figura 5.4: Spettri di frequenza.

5.1.2 La percezione del suono – la psicoacustica

Mentre l'acustica studia l'insieme dei fenomeni fisici legati alla produzione, trasmissione e ricezione del suono. La *psicoacustica* studia l'insieme dei fenomeni percettivi legati al modo in cui gli esseri umani percepiscono il suono. Dunque dal punto di vista psicoacustico, il suono viene considerato come la sensazione “*uditiva*” che si genera in un individuo a partire dalla propagazione di onde di pressione nell'aria che investono l'orecchio. Il meccanismo che produce tale sensazione può essere spiegato, in maniera estremamente semplificata, considerando che le onde sonore che si propagano nell'aria inducono la vibrazione della membrana del timpano che innesca un complesso meccanismo di trasduzione della variazione della pressione in sensazione sonora.

Le grandezze fisiche caratteristiche dell'acustica, presentate nella sezione precedente, hanno un corrispettivo in grandezze percettive equivalenti che consentono di studiare e quantificare le diverse sensazioni sonore. Tra grandezze acustiche e psicoacustiche è possibile stabilire la seguente corrispondenza: l'*intensità* fornisce la risposta soggettiva all'ampiezza di un segnale sonoro, l'*altezza* corrisponde alla risposta soggettiva alla frequenza e infine il *timbro* risposta sogget-

tiva alla forma d'onda e dunque al contenuto spettrale. La figura 5.1.2 mostra a confronto le grandezze acustiche del suono e quelle psicoacustiche legate alla percezione umana del suono.

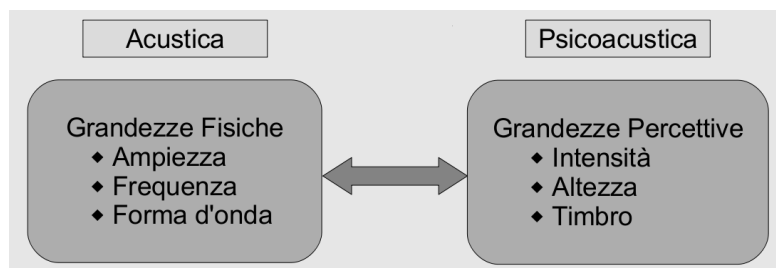


Figura 5.5: Grandezze acustiche e psicoacustiche.

La corrispondenza fra grandezze fisiche e grandezze percettive non è univoca e, dunque, deve essere considerata con una certa cautela, poiché numerosi studi dimostrano che ciascuna delle tre grandezze percettive è mutuamente influenzata dalle altre [28, 81]. Infatti in determinate condizioni la percezione dell'altezza, per esempio, può essere fortemente influenzata dal livello d'intensità sonora e in parte anche dal timbro del suono. Mentre, d'altra parte, la percezione del timbro, i cui meccanismi rimangono ancora non completamente spiegati e compresi in maniera chiara ed esauriente, è fortemente influenzata sia dall'intensità sonora sia dall'altezza del suono.

5.1.3 La Musica

Le grandezze psicoacustiche relative ai diversi attributi della sensazione sonora trovano largo impiego in Musica nella composizione e nell'esecuzione tramite opportuni sistemi di notazione. La scrittura musicale, con particolare riferimento alla prassi e ai sistemi legati alla musica occidentale, consente di definire, tramite segni grafici, diversi parametri musicali che forniscono ai musicisti le informazioni necessarie per l'esecuzione. La notazione tradizionale della musica occidentale che si è sviluppata a partire dal Medioevo fino ai giorni nostri consente di rappresentare, mediante il ben noto *pentagramma* musicale, l'altezza delle note musicali (es. Do, Re, Mi...) e le loro durate relative. Numerosi autori, tra cui anche Xenakis [107], sostengono che il sistema di notazione musicale sviluppato nel Medioevo, in cui si rappresenta l'evoluzione temporale dell'altezza delle note musicali, costituisce il primo esempio, non matematicamente formalizzato, di sistema di coordinate. Tali autori affermano anche che il sistema di notazione musicale ha fortemente influenzato lo sviluppo e la formalizzazione dei sistemi di coordinate a due dimensioni successivamente introdotti da Cartesio.

Nel corso dei secoli, l'evoluzione del pensiero e delle pratiche musicali ha condotto verso la creazione di musiche polifoniche in cui più strumenti musicali si trovano coinvolti simultaneamente nella realizzazione di linee melodiche differenti. Tutto ciò ha reso necessario estendere il sistema di notazione per poter soddisfare le nuove esigenze. La polifonia ha portato dunque alla sovrapposizione di più pentagrammi ciascuno relativo a una data voce assegnata a un certo strumento musicale. In tal modo si è cominciato anche a notare il timbro

sonoro assegnato a ogni voce tramite la definizione della tipologia di strumento impiegato (es. pianoforte, chitarra, violino, flauto). Questa pratica si è evoluta nel tempo fino a raggiungere elevatissimi livelli di raffinatezza nelle sofisticate tecniche di orchestrazione che caratterizzano la musica di molti dei compositori vissuti a cavallo fra la seconda metà dell'Ottocento e i primi decenni del Novecento. Nel Settecento e nell'Ottocento si è manifestata anche un'ulteriore evoluzione del sistema di notazione musicale legato alla progressiva aggiunta di indicazioni relative alla dinamica (es. pianissimo, piano, mezzo-forte, forte, fortissimo). Queste sono strettamente legate alla definizione del parametro che controlla l'intensità del suono e forniscono ai musicisti ulteriori informazioni sul modo in cui deve essere condotta l'esecuzione. La figura 5.6 mostra un breve frammento di una partitura musicale in cui è possibile osservare opportunamente notati e rappresentati tutti i diversi parametri musicali finora descritti.

The image shows a musical score for three instruments: Trumpet B♭, Tambourine, and Piano. The music is in 2/4 time and B-flat major. The Trumpet B♭ part begins with a rest, then plays a melodic line with dynamics 'Comodo' and 'p grazioso'. The Tambourine part plays a rhythmic pattern of eighth notes. The Piano part plays a harmonic accompaniment with dynamics 'p' and 'p grazioso'.

Figura 5.6: Un breve frammento di una partitura musicale.

Lo sviluppo della Musica elettronica e dell'Informatica musicale nella seconda metà del Novecento ha posto nuovi problemi sia per quanto riguarda le tecniche di notazione musicale sia, soprattutto, per quanto riguarda l'enorme ampliamento del numero di parametri musicali sui quali musicisti e compositori possono potenzialmente operare. Questi nuovi percorsi di ricerca del pensiero musicale hanno mostrato come sia possibile rivoluzionare le pratiche di composizione poichè oggi risulta possibile comporre i suoni stessi piuttosto che comporre mediante l'uso dei soli suoni forniti dagli strumenti musicali tradizionali [40]. Le ricerche condotte sul timbro hanno mostrato come questo attributo del suono nasconda in se un mondo estremamente complesso e multidimensionale costituito da strutture e relazioni poste su scale temporali molto più piccole di quelle che caratterizzano la musica in senso tradizionale. Nell'atto percettivo, il nostro sistema sensoriale si affida proprio a tali strutture e a tali relazioni che costituiscono, quindi, gli elementi di base di un suono. Le nuove opportunità offerte dall'impiego dei dispositivi elettronici hanno indotto numerosi musicisti a confrontarsi con la sfida legata all'ampliamento dei parametri necessari per la definizione e la rappresentazione del suono. Ciò ha determinato anche uno dei maggiori problemi con cui compositori e teorici musicali si confrontano oggi: la definizione di nuovi sistemi di notazione e di analisi della Musica elettronica [58]. Tali sistemi devono essere infatti, da un lato, capaci di fissare univocamente tutti gli aspetti necessari per la definizione del suono, e d'altra parte devono poter fornire mezzi e strumenti per l'analisi e la comprensione della Musica elettronica.

5.1.4 Informatica musicale

Le tecnologie elettroniche e quelle informatiche legate all'impiego dei calcolatori hanno fornito ai compositori e ai musicisti una vasta gamma di strumenti che rendono possibile concepire, realizzare e comunicare le proprie idee musicali in modi del tutto nuovi e prima assolutamente inimmaginabili. Il calcolatore, in particolare, si è rivelato essere uno strumento estremamente flessibile e potente sia per la sintesi e l'elaborazione del suono sia per la modifica e l'organizzazione di materiale e di strutture musicali. La natura stessa del calcolatore, quale strumento neutrale che consente la realizzazione di una enorme varietà di processi differenti limitati esclusivamente dalle capacità di calcolo della macchina, dalle potenzialità offerte dai linguaggi di programmazione, e infine dall'abilità del programmatore, ha reso possibile lo sviluppo di un'ampissima gamma di applicazioni musicali. Attualmente l'informatica musicale abbraccia un ambito molto vasto di ricerche e di differenti tematiche relative all'impiego in campo musicale del calcolatore [38, 89].²

L'audio digitale

Il concetto che sta alla base dell'audio digitale consiste nel *campionamento* cioè nella conversione di un segnale continuo in un suo corrispondente discreto ottenuto misurando in maniera periodica il segnale continuo in diversi intervalli di tempo successivi. Sotto la validità di alcune ipotesi circa la natura del segnale continuo e le condizioni secondo cui si realizza il processo è possibile ricostruire interamente il segnale analogico, continuo, a partire dalla sua versione digitale. La possibilità teorica di realizzare questa trasformazione da analogico in digitale e viceversa è garantita dal così detto *Teorema del Campionamento* che definisce anche in maniera rigorosa le condizioni necessarie perchè non si abbia perdita d'informazione durante il processo di conversione.

Il segnale digitale è costituito sostanzialmente da una sequenza di numeri che ne forniscono l'ampiezza nei vari istanti discreti di tempo. La *frequenza di campionamento* definisce la velocità con cui vengono misurati i campioni sonori, questa grandezza è chiaramente legata da una relazione di proporzionalità inversa con il *periodo di campionamento*, che fornisce, invece, una misura dell'intervallo di tempo che intercorre fra due campioni successivi. Il campionamento realizza una discretizzazione del segnale nel tempo trasformandolo da continuo a discreto nel tempo. Per poter rappresentare un segnale sonoro mediante il calcolatore risulta necessario rendere discreti anche i valori di ampiezza tramite un processo che è chiamato *quantizzazione*. Per tale motivo l'intervallo di variazione d'ampiezza può essere suddiviso in diversi modi utilizzando anche differenti livelli di risoluzione. In genere la risoluzione utilizzata nella quantizzazione dell'ampiezza si indica mediante il numero di bit, ossia di cifre binarie, che si utilizzano per rappresentare i valori di ampiezza. In tal modo, maggiore è il numero di bit, più fine sarà la quantizzazione dell'intervallo d'ampiezza e quindi migliore la risoluzione del segnale digitale. Lo standard relativo all'audio

²Per maggiori approfondimenti si veda il sito della **International Computer Music Association – ICMA** (<http://www.computermusic.org>) che annualmente organizza la International Computer Music Conference – ICMC e il sito della **Associazione di Informatica Musicale Italiana – AIMI** che ogni due anni organizza il Colloquio di Informatica Musicale – CIM (<http://www.aimi-musica.org/>).

digitale adottato per i CD audio impone per esempio un valore di frequenza di campionamento pari a 44100 Hz e una quantizzazione dell'ampiezza pari 16 bit.

Sintesi ed elaborazione del suono

Le invenzioni di fine Ottocento, quali il fonografo e il telefono, hanno sostanzialmente cambiato il rapporto tra uomo e suono. Prima di allora, infatti, i suoni, e la musica che essi animano, non potevano essere registrati, dunque la loro esistenza si limitava esclusivamente all'attimo stesso in cui venivano prodotti, mentre in seguito le possibilità tecnologiche legate alle tecniche di registrazione e riproduzione hanno reso possibile slegare l'ascolto dall'effettiva esecuzione del suono modificando profondamente le relazioni e i rapporti fra uomo, suono e musica. Successivamente l'impiego dei calcolatori ha reso possibile modificare radicalmente anche il rapporto fra compositori e suono grazie alle possibilità offerte per quanto riguarda sia la creazione di nuovi suoni – sintesi del suono, sia la modifica e la trasformazione di suoni esistenti – elaborazione del suono (Digital Signal Processing – DSP). Esiste una vasta letteratura a riguardo sia degli algoritmi di sintesi sia circa gli algoritmi e i metodi per l'elaborazione del suono.³

L'uso del calcolatore per la sintesi del suono ha reso possibile produrre suoni senza fare ricorso ad un sistema fisico vibrante. Un algoritmo di sintesi del suono rappresenta in sostanza una procedura capace di definire un meccanismo che produce una sequenza numerica di campioni audio che, se riprodotta attraverso un convertitore digitale–analogico, consente di ascoltare il suono sintetizzato. Le possibilità offerte dalla sintesi del suono sono estremamente ampie e varie, inoltre spesso sono esclusivamente limitate dalle capacità di calcolo e di programmabilità del calcolatore e dalla fantasia del compositore. Esiste un'ampia gamma di algoritmi diversi che possono essere utilizzati per la generazione di suoni. Ognuno di essi offre vantaggi e svantaggi, mostrandosi più o meno adatto alla produzione di specifiche tipologie di suoni. I principali fattori da valutare nella scelta di un algoritmo di sintesi consistono nel numero di parametri necessari per definire le proprietà che caratterizzano un suono, l'efficienza computazionale e la qualità del materiale sonoro che è possibile ottenere a fronte dei primi due elementi.

L'elaborazione digitale del suono rappresenta l'altra grande opportunità offerta dall'impiego dei calcolatori per modificare e trasformare a seconda delle esigenze materiale sonoro preesistente. Esiste un'ampia varietà di metodi e di algoritmi di elaborazione digitale del suono che consentono di modificare il contenuto in frequenza del suono (filtri digitali, distorsori, saturatori), manipolare l'evoluzione della gamma d'ampiezza del suono (processori di dinamica), aggiungere effetti (riverberi, delay, flanger), modificare la durata temporale o l'altezza del suono, e molto altro.

³Per maggiori approfondimenti si veda il sito della conferenza annuale **Digital Audio Effects – DAFX** (<http://www.dafx.de/>).

Il MIDI – la musica e il calcolatore

Il *Musical Instrument Digital Interface* – *MIDI* è il protocollo standard definito nei primi anni '80 per la comunicazione tra strumenti musicali digitali.⁴ Il MIDI è anche largamente utilizzato nell'Informatica musicale come mezzo di rappresentazione e di comunicazione di informazioni relative alle esecuzioni musicali. Il protocollo MIDI rende possibile rappresentare i diversi parametri di una esecuzione mediante delle sequenze di numeri che consentono di fissare le varie informazioni musicali. In tal modo l'altezza delle note, la durata, l'intensità, lo strumento utilizzato, e molto altro, possono essere codificati tramite sequenze di numeri e memorizzati su un calcolatore per essere riprodotte e/o modificate in seguito.

Il protocollo MIDI prevede lo scambio d'informazioni relative a eventi temporali e a dati relativi a tali eventi. Una nota musicale che comincia a suonare in un istante di tempo determinato viene rappresentata, dunque, come un evento relativo all'inizio di una nota (questo evento è indicato nel protocollo come *note on*) caratterizzata da dati relativi all'altezza, l'intensità. Le altezze delle note musicali sono rappresentate tramite i valori dei numeri interi definiti nell'intervallo da 0 a 127, il Do centrale del pianoforte, spesso indicato come C3, corrisponde al numero 60. L'intensità, comunemente chiamata *Velocity* all'interno del protocollo, viene rappresentata tramite i valori dei numeri interi definiti nell'intervallo da 0 a 127. Il numero 127 rappresenta la massima gamma dinamica (*fff* – più che fortissimo), mentre il numero 0 viene utilizzato per rappresentare l'evento che segna la fine di una nota (comunemente chiamato *note off*). La figura 5.7 mostra la rappresentazione grafica, generalmente chiamata "*piano roll*" di una sequenza di note MIDI. Nella parte sinistra è possibile osservare rappresentata una tastiera di pianoforte, nella parte centrale i vari rettangoli indicano le diverse note musicali da suonare. La posizione verticale del rettangolo definisce l'altezza della nota, mentre la sua lunghezza definisce la durata. Nella parte bassa della figura è possibile osservare un grafico simile a un istogramma che rappresenta la variazione della *velocity* fra le diverse note.

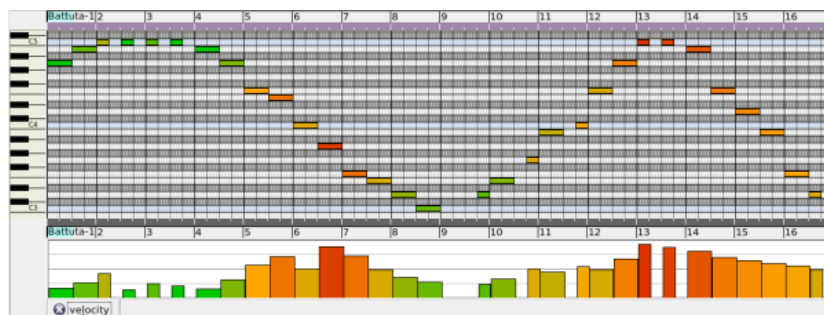


Figura 5.7: Rappresentazione grafica di una sequenza di note MIDI.

La durata delle note può essere rappresentata tramite l'intervallo di tempo, misurato in millisecondi che intercorre tra l'inizio e la fine della nota. La durata della nota non viene, dunque, codificata dal protocollo MIDI poiché può essere

⁴Per approfondimenti si veda il sito della **MIDI Manufacturers Association** – **MMA** (<http://www.midi.org/>).

ottenuta a partire dal manifestarsi di un evento relativo all'inizio di una nota con una certa altezza e dall'evento relativo alla sua fine. La figura 5.8 mostra una lista di eventi MIDI relativa a una sequenza musicale in cui è possibile osservare la variazione dei diversi parametri.

Velocità	Durata	Tipo di evento	Altezza	Velocità
001-01-00-00	000-02-00-00	note	81 A4	15
001-03-00-00	000-02-00-00	note	83 B4	29
002-01-00-00	000-01-00-00	note	84 C5	53
002-03-00-00	000-01-00-00	note	84 C5	11
003-01-00-00	000-01-00-00	note	84 C5	27
003-03-00-00	000-01-00-00	note	84 C5	21
004-01-00-00	000-02-00-00	note	83 B4	13
004-03-00-00	000-01-15-54	note	81 A4	37
005-01-00-00	000-02-00-00	note	77 F4	75
005-03-00-00	000-02-00-00	note	76 E4	97
006-01-00-00	000-02-00-00	note	72 C4	65
006-03-00-00	000-02-00-00	note	69 A3	122
007-01-00-00	000-02-00-00	note	65 F3	99
007-03-00-00	000-02-00-00	note	64 E3	63
008-01-00-00	000-02-00-00	note	62 D3	43

Figura 5.8: Lista di una sequenza di eventi MIDI.

Il protocollo consente di scambiare informazioni circa la tipologia di strumento musicale da utilizzare e dunque di scegliere fra differenti timbri strumentali. Il tipo di strumento viene rappresentato tramite i valori dei numeri interi definiti nell'intervallo da 0 a 127 che corrispondono alle diverse tipologie di strumenti musicali organizzate in famiglie secondo lo standard GeneralMIDI. Molti altri parametri utili nella definizione di una performance musicale e per il controllo di sintetizzatori e dispositivi di sintesi ed elaborazione del suono possono essere specificati e trasmessi mediante questo protocollo che rappresenta tuttora lo standard di riferimento per la comunicazione tra dispositivi musicali digitali. La figura 5.9 mostra la finestra di controllo di un sintetizzatore MIDI in cui è possibile visualizzare e modificare i diversi timbri offerti dallo strumento. Nell'immagine è possibile osservare che a ogni strumento è assegnato un indice (Prog.-Programma) che consente di identificare univocamente ciascun timbro strumentale.

Il protocollo MIDI è un mezzo estremamente adatto a rappresentare e trasmettere informazioni musicali all'interno dei programmi per calcolatore. Le sue applicazioni infatti non si limitano soltanto alla registrazione e alla modifica di esecuzioni musicali, ma spaziano anche fino alla generazione di materiale musicale tramite sistemi generativi o di composizione algoritmica. Nel capitolo successivo si presenteranno alcune applicazioni che impiegano sistemi caotici per la generazione di linee melodiche mediante l'impiego della codifica numerica definita dal protocollo MIDI.

Nonostante la sua diffusione e le potenzialità offerte questo protocollo, in talune circostanze, mostra delle forti limitazioni, specialmente imputabili alla sua rigidità e al limitato sviluppo che ha subito negli anni. Per superare tali limitazioni negli ultimi anni è stato proposto un nuovo protocollo di comunicazione

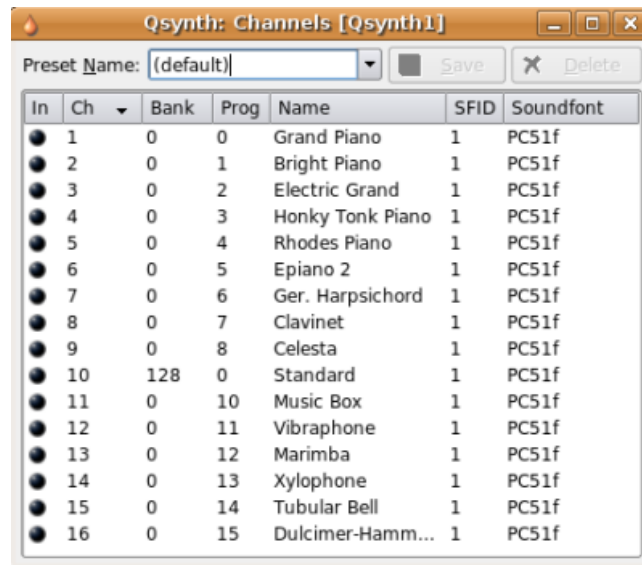


Figura 5.9: Finestra di controllo dei diversi timbri utilizzabili su di un sintetizzatore MIDI.

chiamato *Open Sound Control – OSC*⁵ che nasce, nelle intenzioni degli autori, aperto, flessibile ed estendibile. OSC è un protocollo di comunicazione fra calcolatori, sintetizzatori, e altri dispositivi multimediali, ottimizzato espressamente per le moderne tecnologie di rete.

5.2 Spazi matematici, spazi sonori e musicali

Diversi autori suggeriscono e stabiliscono paralleli, similitudine e relazioni fra i concetti caratteristici degli spazi matematici e spazi sonori e musicali, che possono essere utilizzati per la rappresentazione delle idee musicali. Arnold Schönberg, per esempio, nel già citato saggio dal titolo “*Composizione con dodici note*” [93] impiega il concetto di spazio musicale per affermare l’assoluta importanza del principio di unitarietà cui deve sottostare qualsiasi composizione musicale:

partendo dall’idea che la musica non é affatto una delle tante forme di divertimento, ma la presentazione, da parte di un poeta musicale o di un filosofo musicale, di idee musicali che devono corrispondere alle leggi della logica umana, ed essere quindi parte di ciò che l’uomo può percepire, ragionare ed esprimere, partendo dunque, da simili premesse, giunsi alla seguente conclusione:

LO SPAZIO MUSICALE A DUE O PIÚ DIMENSIONI NEL QUALE SONO PRESENTATE LE IDEE MUSICALI É UN’UNITÀ.⁶

⁵Per approfondimenti si veda il sito ufficiale del progetto: <http://opensoundcontrol.org>.

⁶A. Schönberg, op.cit., pp. 111–112.

Questa considerazione di Schönberg mette in luce come un grande musicista e teorico della musica impiegasse con estrema precisione e puntualità il concetto di spazio in maniera del tutto simile a quello che potrebbe fare un matematico o un fisico. Appare interessante sottolineare la precisa indicazione della natura dello spazio musicale “*a due o più dimensioni*” che, in maniera simile agli spazi matematici, è caratterizzato da un certo numero di dimensioni che definiscono il numero di parametri o di grandezze che costituiscono l'essenza stessa dello spazio. Appare anche evidente che la netta frase conclusiva nasca dal bisogno di affermare l'unità dello spazio musicale come mezzo per confermare l'assoluta necessità dell'uso dei metodi di composizione con dodici note da lui ideati e sviluppati.

Un altro importante compositore che ha contribuito a innovare fortemente il pensiero musicale lungo tutto il corso del Novecento è Edgard Varèse. La sua concezione musicale appare fortemente basata su profondi paralleli tra scienza e musica. Questa visione, inoltre, porta Varèse a preconizzare lo sviluppo e l'avvento di nuovi strumenti e nuovi mezzi che forniranno ai compositori enormi possibilità di manipolazione del suono, finalmente plasmabile in maniera diretta senza il bisogno della mediazione degli strumenti musicali tradizionali. Grazie a tali strumenti il timbro, ossia il colore sonoro, finalmente potrà diventare un elemento centrale e caratterizzante delle nuove pratiche compositive. Forse proprio per tali motivi Varèse è stato uno dei primissimi compositori a sperimentare l'impiego del mezzo elettronico nella composizione musicale. Anche nel pensiero di Varèse appare esistere, forse non in maniera evidentemente esplicita, il concetto di spazio musicale così come in Schönberg, infatti in virtù dei forti paralleli fra Scienza, Matematica e Musica che ispirano la sua concezione musicale egli fa spesso ricorso a concetti fisici e matematici quali quelli di massa, moto, velocità oppure a entità geometriche quali piani, superfici, volumi. In un suo scritto dal titolo “*Nuovi strumenti e nuova musica*” Varèse infatti afferma:

quando i nuovi strumenti che sostituiranno il contrappunto mi permetteranno di scrivere musica così come la concepisco, si potranno percepire chiaramente i movimenti delle masse e dei piani sonori. Quando queste masse sonore entreranno in collisione si avrà la sensazione che avvengano fenomeni di penetrazione o di repulsione, e che certe trasmutazioni che avvengono su determinati piani siano proiettate su altri, che si muovono a velocità diverse e in diverse direzioni. Non vi sarà più posto per la vecchia concezione di melodia o di combinazione di melodie: l'intera opera diverrà una totalità melodica, l'intera opera scorrerà come un fiume.⁷

Il concetto di spazio musicale e il suo impiego nella composizione è stato fortemente sviluppato anche da Iannis Xenakis che, sulla traccia già delineata da Varèse, ha trasformato i paralleli e le associazioni fra Scienza e Musica, semplicemente immaginati da quest'ultimo, in metodi e tecniche di composizione basati su modelli e strumenti tratti dalla Scienza e dalla Matematica. Xenakis fornisce una formulazione rigorosa del concetto di spazio musicale facendo ricorso alla struttura di spazio vettoriale che è comunemente impiegata in Matematica e in Fisica. Lo spazio musicale può essere costruito utilizzando grandezze

⁷E. Varèse, **Nuovi strumenti e nuova musica**, in *La musica elettronica* a cura di Henri Pousseur, Feltrinelli, 1976, pp. 16-17.

musicali quali altezza, durata, intensità e altre caratteristiche e parametri della composizione musicale (grado di ordine–disordine, densità di eventi, ecc...). Nel suo libro *Formalized Music* [108], così come in diversi altri suoi scritti, Xenakis descrive in maniera molto dettagliata la rappresentazione del materiale sonoro mediante l'uso di uno spazio vettoriale a tre dimensioni. Presenta, inoltre, in maniera formalizzata, il processo di costruzione di tale spazio assieme alle ipotesi su cui si basa tale costruzione, e infine enumera le proprietà di cui godono gli elementi sonori descritti tramite tale spazio. L'intento di Xenakis consiste nel definire in maniera rigorosa un sistema di rappresentazione del materiale musicale che, da un lato, possa essere utilizzato per l'analisi della musica del passato, e dall'altra parte possa essere impiegato per l'esplorazione di nuovi approcci alla composizione musicale, dunque per la musica del futuro. Infine Xenakis afferma che l'impiego di questo nuovo sistema di rappresentazione musicale accoppiato con lo sviluppo dell'Informatica musicale può portare a definire nuovi strumenti per manipolare anche i timbri e le microstrutture del suono. Questa prospettiva sembra essere molto promettente e incoraggiante, poichè, in tal modo potrebbe essere possibile ottenere uno strumento di rappresentazione capace di fornire un fattore di forte unificazione fra la musica strumentale tradizionale e i nuovi territori percorsi dalla musica elettronica.

Xenakis distingue fra strutture musicali *in tempo* e strutture *fuori tempo*. La differenza fondamentale tra queste due tipologie di strutture consiste nella temporalità delle prime, ossia nella loro natura intimamente legata al fluire del tempo, e nella totale atemporalità delle seconde che possono essere concepite e impiegate indipendentemente dal regolare corso del tempo. Le strutture fuori tempo della musica sono per Xenakis scale, modi, gamme, in altri termini strutture che possono essere utilizzate per organizzare i parametri musicali in maniera indipendente dall'evoluzione temporale che un dato parametro poi subirà al variare del tempo in una data composizione musicale. Xenakis propone diversi metodi per la creazione e la manipolazione delle strutture musicali fuori tempo, per esempio, l'impiego di reticoli, basati sull'assiomatica dei numeri interi di Peano, per la creazione di strutture fuori tempo per quanto riguarda le altezze musicali, inoltre, propone la formalizzazione di uno spazio vettoriale tridimensionale per la rappresentazione fuori tempo di un'ampissima classe di suoni.

Xenakis, infine, nel suo percorso di ricerca ha come obiettivo risalire alle fonti delle operazioni mentali che presiedono la composizione in maniera da individuare i principi generali alla base di ogni forma di musica. In questo sforzo egli fa ricorso alla logica, all'algebra e alla geometria per cercare d'identificare i rapporti astratti tra eventi sonori e le operazioni formali a cui essi possono essere sottoposti [77]. Questa ricerca porta a definire una logica della musica che in maniera generale consideri le relazioni fra oggetti sonori. Ciò può essere compiuto facendo ricorso al concetto di spazio sonoro e di spazio musicale.

5.2.1 Spazi sonori

Un qualsiasi evento sonoro può essere rappresentato mediante uno *spazio sonoro* tridimensionale, che nel seguito indicheremo con S . Lo spazio sonoro può essere utilizzato per definire e rappresentare sia strutture fuori tempo sia strutture in tempo in maniera estremamente generale e flessibile. Un evento

sonoro, qualsiasi, può essere definito facendo ricorso a tre parametri fisici che lo caratterizzano:

t – tempo: il tempo rappresenta la variabile indipendente nel cui fluire si manifesta l'evoluzione del suono;

f – frequenza: frequenza di vibrazione dell'onda sonora;

a – ampiezza: ampiezza delle vibrazioni dell'onda sonora.

Poichè questi parametri sono tutti indipendenti fra loro è possibile introdurre il concetto di spazio sonoro come strumento formale per la rappresentazione degli eventi sonori. Se si prendono in considerazione, come proposto da Xenakis in *Formalized Music*, non le grandezze “*absolute*” frequenza, ampiezza e tempo, ma gli intervalli di frequenza (o usando un termine più vicino alla teoria musicale, intervalli di altezza), gli intervalli di ampiezza e quelli di tempo (durate), lo spazio sonoro, definito mediante le tre variabili: intervallo di frequenza, durata (intervallo di tempo) e intervallo di ampiezza, può essere strutturato sotto forma di uno spazio vettoriale. Se si associa all'origine di questo spazio vettoriale dei dati valori (scelti arbitrariamente) di frequenza, tempo e ampiezza è possibile far corrispondere ad ogni punto di questo spazio vettoriale una terna di valori di frequenza ampiezza e tempo. In tal modo questo spazio può essere utilizzato sia per rappresentare strutture fuori tempo in cui non è coinvolta in alcun modo l'evoluzione temporale, sia strutture in tempo caratterizzati dal cambiamento dei due parametri frequenza e ampiezza in funzione della variabile indipendente relativa al tempo.

Un suono sinusoidale puro s , dunque, caratterizzato da un certo valore di frequenza, durata e ampiezza, può essere rappresentato mediante un punto immerso in questo spazio sonoro, così come mostrato dalla relazione 5.2. In tal modo si può stabilire un'analogia diretta fra i punti definiti all'interno di tale spazio tridimensionale e i suoni sinusoidali. La figura 5.10 mostra una rappresentazione grafica dello spazio sonoro.

$$s = \{t, f, a\} \quad (5.2)$$

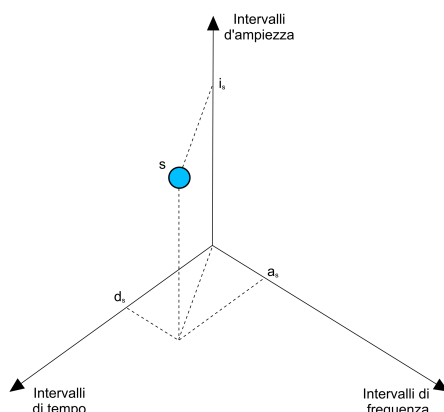


Figura 5.10: Spazio sonoro.

Un insieme di punti dello spazio sonoro rappresenta una struttura musicale fuori tempo poichè pur definendo un'organizzazione di parametri sonori non esistono relazioni di ordine temporale, ossia relative alla definizione di eventi che accadono prima, dopo, o in contemporanea. In tal modo è possibile rappresentare delle strutture musicali come se fossero “congelate” nel tempo. D'altra parte se si associa all'origine del sistema di riferimento uno specifico istante di tempo iniziale e si lasciano evolvere le variabili frequenza e ampiezza è possibile ottenere delle strutture nel tempo che potranno modificarsi in maniera dinamica. Un suono puro sinusoidale la cui frequenza e ampiezza può variare nel tempo traccerà una curva nello spazio sonoro che rappresenterà questa evoluzione temporale.

Mediante l'impiego di questo spazio sonoro l'evoluzione che subisce un suono sinusoidale nel momento in cui vengono modificati i suoi parametri caratteristici può essere analizzata e rappresentata mediante lo studio del moto di un punto all'interno di tale spazio. In questo caso lo spazio tridimensionale costituisce, dunque, una struttura fuori tempo, mentre il moto di un punto all'interno di questo spazio costituisce una struttura nel tempo. Tramite tale approccio è possibile, inoltre, dare una rappresentazione dell'evoluzioni simultanee nel tempo di due o più oscillatori sinusoidali che possono essere considerate come il moto di due o più punti all'interno dello spazio.

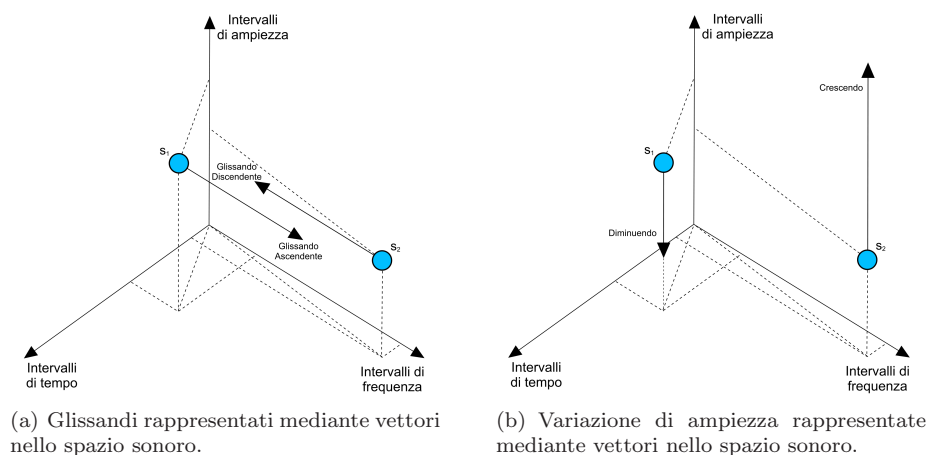


Figura 5.11: Vettori nello spazio sonoro.

Inoltre introducendo il concetto di vettore, è possibile rappresentare lo spostamento dei punti all'interno dello spazio sonoro. Alcuni vettori specifici risultano avere un significato musicale particolarmente interessante. Infatti, se si prende in esame la famiglia di vettori paralleli all'asse delle frequenze (immagine (a) in figura 5.11) essi rappresentano dei **glissandi, ascendenti** nel caso in cui il verso del vettore sia orientato in maniera concorde al verso dei valori crescenti diretti lungo l'asse delle frequenze, **discendenti** nel caso opposto. Se si prende in considerazione la famiglia dei vettori paralleli all'asse delle ampiezze essi rappresentano delle variazioni di ampiezza (immagine (b) in figura 5.11) che musicalmente possono essere interpretate come dei **crescendo**, nel caso in cui il verso del vettore sia concorde al verso crescente dei valori di ampiezza, dei **diminuendo** nel caso opposto. L'interpretazione musicale della famiglia dei

vettori paralleli alla direzione individuata dall'asse delle durate è meno immediata, anche se può comunque essere interpretata come uno spostamento che determina una crescita o una riduzione delle durate degli eventi sonori.

Lo spazio sonoro finora descritto può essere immaginato come uno spazio continuo in cui i parametri possono assumere qualsiasi valore all'interno di un determinato intervallo. La continuità rende valido l'impiego di qualsiasi valore per la frequenza, l'ampiezza e la durata, fornendo, quindi, la possibilità di rappresentare qualunque fenomeno acustico. Lo spazio sonoro, da un punto di vista matematico deve essere illimitato per garantire la struttura di spazio vettoriale. D'altra parte, per i limiti imposti dall'apparato percettivo umano sull'insieme dei valori che i tre parametri possono assumere, può essere utile inserire delle opportune ipotesi di periodicità che consentono di conservare la struttura di spazio vettoriale rendendo lo spazio sonoro limitato in degli opportuni intervalli. L'impiego di questa rappresentazione matematica del materiale acustico apre la possibilità di considerare qualunque suono come il prodotto dell'evoluzione di un sistema dinamico il cui comportamento evolve nel tempo all'interno dello spazio sonoro così definito. Nel capitolo 6 si presenteranno più nel dettaglio le possibilità offerte da questo nuovo punto di vista. Questa analogia che lega il materiale sonoro con una struttura di natura strettamente matematica sembra essere particolarmente utile come mezzo per la realizzazione di un sistema di rappresentazione musicale che sia capace di unificare la tradizione musicale strumentale dalla musica antica e moderna, così come si è sviluppata fino ai giorni nostri, con i recenti sviluppi dell'Informatica musicale e della musica contemporanea ed elettronica.

La rappresentazione dei suoni mediante lo spazio sonoro può essere facilmente utilizzata come strumento per l'analisi e la sintesi della musica mediante calcolatore e mezzi elettronici. In tal caso nella maggior parte dei casi risulta necessario considerare lo spazio sonoro, così come è stato finora descritto, come uno spazio continuo in cui i parametri frequenza, ampiezza e durata costituiscono gli elementi di base per la sintesi e l'elaborazione del suono mediante mezzi elettronici. A tal fine, lo spazio sonoro può essere utilizzato per manipolare anche altre tipologie di entità geometriche oltre i soli punti che rappresentano gli oscillatori sinusoidali. In questo spazio continuo è possibile considerare linee, curve, superfici, volumi, entità che possono prestarsi molto bene alla rappresentazione delle attuali idee e dei mezzi che alimentano le diverse correnti di sviluppo della attuale ricerca musicale. Da questo punto di vista tali entità geometriche costituiscono delle strutture fuori tempo la cui evoluzione temporale, ossia il modo secondo cui linee, curve, superfici e volumi si modificano nel tempo, rappresenta la realizzazione di strutture nel tempo. Suoni di sintesi, timbri complessi, fasce sonore possono essere rappresentate mediante entità geometriche e operazioni che le modificano opportunamente in funzione del tempo.

D'altra parte lo spazio sonoro finora analizzato può essere opportunamente discretizzato al fine di ottenere uno *spazio musicale* che può essere rappresentato mediante un reticolo tridimensionale immerso nello spazio sonoro. Questo spazio discreto, caratterizzato da un reticolo di note musicali, può essere impiegato come mezzo per la rappresentazione della musica strumentale tradizionale.

5.2.2 Spazi musicali

Lo spazio sonoro tridimensionale continuo può essere discretizzato in una infinità di modi diversi, ciascuno dei quali determina l'insorgere di un diverso reticolo tridimensionale che definisce tutti e soli i possibili punti ammissibili da una data struttura musicale fuori dal tempo che nel seguito chiameremo **spazio musicale** e che indicheremo con M [16]. L'arbitrarietà che è alla base del processo di discretizzazione consente di poter impiegare questo sistema di rappresentazione per qualsiasi sistema musicale sia esso già esistente o di là da venire. La ricerca etnomusicologica contribuisce ad avvalorare questa tesi mostrando che per quanto riguarda, per esempio, le scale musicali esistono nelle varie culture scale molto diversificate, artificiali, spesso soggette a variazioni ed eccezioni piuttosto singolari [1]. La constatazione di tale ricchezza di varietà induce, dunque, gli studiosi a non pensare più alla scala musicale come qualcosa di unico, fissato e "naturale" fondato sulle leggi stesse dalla costituzione del suono musicale. Gli studi etnomusicologici hanno messo in luce la coesistenza e la pari dignità di valore dei vari sistemi musicali che si sono evoluti nelle diverse regioni del mondo. Ogni sistema musicale è caratterizzato da una diversa discretizzazione dello spazio sonoro continuo che si è evoluta storicamente in base a scelte estetiche e funzionali all'interno di una determinata cultura e in una ben definita regione geografica. Da questo punto di vista appaiono, dunque, vani gli sforzi di coloro che intendono dimostrare, al contrario, la superiorità e l'ineluttabilità del sistema tonale sviluppato in occidente. Tali sforzi si scontrano profondamente con il carattere assolutamente arbitrario delle diverse discretizzazioni possibili dello spazio sonoro. L'evoluzione del pensiero musicale, in aree geografiche differenti e durante epoche storiche diverse, ha seguito vari percorsi che sulla base di criteri e di scelte puramente culturali hanno condotto al consolidarsi di determinati sistemi e pratiche musicali. Lo sviluppo della musica del secondo Novecento, assieme alla nascita della musica elettronica sembrano dimostrare in maniera chiara la fragilità della tesi della superiorità e dell'ineluttabilità del sistema tonale occidentale. Inoltre, la nascita dell'Informatica musicale da un lato ha fornito la possibilità di operare direttamente all'interno dello spazio sonoro continuo, e d'altra parte ha dato l'opportunità di creare in maniera semplice un gran numero di discretizzazioni di tale spazio continuo moltiplicando il numero di sistemi musicali possibili. Queste le ipotesi su cui fondare la sperimentazione dell'uso dello spazio sonoro e delle varie discretizzazioni che portano a ottenere diversi spazi musicali come strumento di rappresentazione di sistemi musicali già esistenti o di là da venire. La nuova musica potrebbe nascere proprio dall'esplorazione di nuovi spazi musicali, soltanto l'evoluzione che nel tempo subiranno il pensiero, la società e i gusti degli individui potrà fornire una misura del loro reale valore musicale.

Una data discretizzazione dello spazio sonoro porta a ottenere un certo spazio musicale M che può essere rappresentato mediante un reticolo tridimensionale immerso nello spazio sonoro. Questo reticolo è costituito da un certo numero di punti dello spazio sonoro che da un punto di vista musicale determinano i valori di altezze, durate e intensità ammissibili dalla discretizzazione che si è scelto d'impiegare. L'insieme di note ammissibili in un dato sistema musicale, considerate come eventi caratterizzati da altezza, durata e intensità, corrispondono a tutti i vari punti appartenenti al reticolo. Ciò comporta, in maniera inversa, che la scelta di un dato reticolo determina univocamente la scelta dei valori am-

missibili di altezza, durata e intensità. Limitandosi solo al caso del parametro altezza, l'impiego di un determinato sistema di quantizzazione dell'asse delle altezze determina di conseguenza la scelta di una data gamma o la scelta di una data scala o tonalità. Così allo stesso modo la discretizzazione che si realizza per gli altri parametri determina l'insieme dei valori ammissibili all'interno dello spazio musicale. Per esempio le durate possono essere discretizzate secondo la consueta notazione musicale fissando un tempo di riferimento (generalmente indicato in battiti per minuto – BPM) e quantizzando i valori di durata ammissibili secondo i valori $4/4$, $2/4$, $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$. In maniera simile è possibile realizzare la discretizzazione dell'asse relativo all'intensità utilizzando ad esempio una suddivisione basata sull'uso delle indicazioni dinamiche utilizzate nella notazione tradizionale (**ppp** – più che pianissimo, **pp** – pianissimo, **p** – piano, **mp** – mezzopiano, **mf** – mezzoforte, **f** – forte, **ff** – fortissimo, **fff** – più che fortissimo). La figura 5.12 mostra un reticolo discreto immerso nello spazio sonoro.

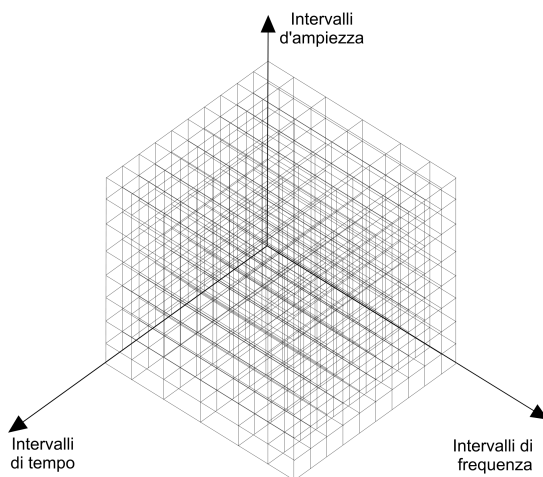


Figura 5.12: Reticolo discreto immerso nello spazio sonoro.

Così come proposto da Xenakis [108], lo spazio musicale viene appositamente definito per la rappresentazione di musica strumentale è, quindi, preferibile prendere in considerazione i parametri percettivi del suono, più legati alla pratica musicale rispetto ai parametri fisici, finora utilizzati nella definizione degli spazi sonori. I parametri percettivi che definiscono i suoni orchestrali sono:

- p** – **altezza**: attributo del suono che dipende principalmente dalla frequenza di vibrazione dell'onda sonora;
- d** – **durata**: intervallo di tempo nel quale viene emesso il suono;
- i** – **intensità**: attributo del suono che dipende soprattutto dall'ampiezza delle vibrazioni di un onda sonora;
- c** – **timbro**: attributo del suono legato alla sua forma d'onda che dipende dal contenuto spettrale e dalle variazioni che subiscono nel tempo le sue diverse componenti di frequenza.

Poichè questi parametri, entro certi limiti,⁸ possono essere considerati come indipendenti fra loro l'introduzione del concetto di spazio musicale può risultare estremamente utile come strumento di rappresentazione formale degli eventi musicali. Diverse tipologie di spazi musicali possono essere costituite tramite la scelta e la combinazione di questi quattro parametri. È necessario sottolineare che il timbro, per sua definizione, è caratterizzato di per se da una natura multidimensionale, da ciò deriva che risulta impossibile rappresentare questo attributo mediante un unico parametro. Considerare il timbro in tutta la sua complessità porterebbe al bisogno di utilizzare spazi multidimensionali caratterizzati da un infinito numero di dimensioni. Per semplicità è possibile considerare esclusivamente un insieme di timbri predefiniti ordinati ed etichettati mediante un apposito numero. In tal modo si può rappresentare una famiglia di timbri mediante un unico parametro che può essere facilmente utilizzato come una delle dimensioni dello spazio musicale. Da quanto detto deriva che è possibile rappresentare una qualsiasi nota prodotta da uno strumento orchestrale mediante un punto m immerso in uno spazio a quattro dimensioni, così come illustrato nella relazione 5.3.

$$m = \{p, d, i, c\} \quad (5.3)$$

Per realizzare questa rappresentazione può essere utilizzato lo standard definito dal protocollo MIDI che consente di associare ai valori assunti dai diversi parametri musicali appositi valori numerici. Per semplicità di trattazione a partire dallo spazio musicale M a quattro dimensioni è possibile ricavare diversi spazi a dimensione inferiore che è possibile utilizzare per la creazione di strutture musicali. Per esempio è possibile prendere in considerazione uno spazio tridimensionale M_1 costituito dalle tre variabili altezza (p), durata (d), intensità (i), all'interno di questo spazio una melodia Me può essere rappresentata mediante una sequenza di punti (note):

$$Me = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n | m_i \in M\}, \quad (5.4)$$

in cui la generica nota è definita come: $m_i = \{p, d, i\}$. L'immagine (*a*) in figura 5.13 mostra una sequenza di note, una melodia, rappresentata nello spazio musicale. Lo spazio tridimensionale costituisce la struttura fuori tempo, mentre il moto di un punto all'interno dello spazio costituisce una struttura nel tempo. Se si realizza una opportuna codifica mediante numeri interi dei valori ammissibili per i tre parametri che costituiscono il reticolo caratteristico dello spazio musicale M_1 , è possibile individuare ciascuna nota mediante una terna di numeri interi. In tal modo una melodia può essere rappresentata mediante una funzione f del tipo:

$$f : N \rightarrow N^3 \quad (5.5)$$

che rappresenta una applicazione che associa a una sequenza di numeri naturali una terna di numeri naturali, che individuano, secondo la codifica appena definita, la nota musicale. Tramite quest'approccio è possibile, inoltre, dare una rappresentazione di una polifonia, ossia dell'evoluzione di due o più linee melodiche come il moto simultaneo di due o più punti all'interno allo spazio.

⁸Gli studi di psicoacustica dimostrano che questi quattro parametri percettivi sono collegati fra loro in maniera complessa. Nonostante queste relazioni, entro certi limiti, l'ipotesi di indipendenza può ritenersi comunque valida.

Allo stesso tempo è possibile considerare l'analisi o la creazione di strutture armoniche mediante lo studio di un sistema di punti che si muovono nello spazio musicale in funzione del tempo.

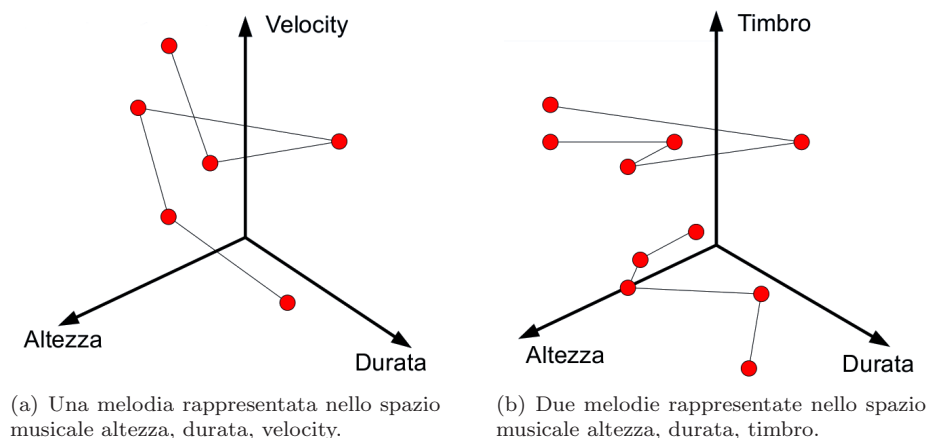


Figura 5.13: Diverse melodie rappresentata in opportuni spazi musicali.

È possibile, inoltre, prendere in considerazione altri spazi tridimensionali costituiti a partire dallo spazio M a quattro dimensioni. Per esempio un altro spazio M_2 può essere costituito dalle tre variabili altezza (p), durata (d), timbro (c). L'impiego di questo spazio potrebbe essere molto utile per la rappresentazione di polifonie suonate da diversi strumenti che possono essere rappresentate mediante curve definite su piani altezza–durata caratterizzati da valori diversi della variabile timbro. L'immagine (b) in figura 5.13 mostra due diverse melodie eseguite mediante timbri differenti.

5.3 Auditory Display – metodi di rappresentazione uditiva

L'impiego del suono per comunicare informazioni viene chiamato *Auditory Display*. Questa disciplina si sviluppa all'interno dell'ambito più ampio delle ricerche relative ai sistemi d'interazione fra uomo e calcolatore elettronico (Human–Computer Interaction – HCI). Nell'interazione uomo–calcolatore il canale visivo svolge un ruolo predominante e per tale motivo la ricerca si è concentrata fortemente sullo sviluppo di strumenti di rappresentazione visiva sempre più sofisticati e potenti. D'altra parte l'indagine sull'impiego di metodi di rappresentazione uditiva prende le mosse dalla considerazione che lo sfruttamento anche del canale sensoriale relativo all'udito possa contribuire, in maniera profonda, allo sviluppo di sistemi d'interazione sempre più capaci di veicolare l'informazione in maniera efficace e multimodale. Diverse motivazioni incoraggiano l'impiego di metodi di rappresentazione sonora. La combinazione di elementi visivi e sonori consente di trasmettere una quantità d'informazione sicuramente maggiore rispetto al caso dell'impiego esclusivo della visione. L'impiego del suono può migliorare il senso di coinvolgimento dell'utente poichè fa parte dell'esperienza quotidiana interagire con oggetti del mondo reale dotati di proprietà visive e

sonore. Infine, la percezione uditiva è connotata da aspetti e proprietà caratteristiche molto differenti da quelle relative alla visione, per tale motivo l'udito, e dunque il suono, può essere utilizzato come canale preferenziale per informazioni la cui natura poco si adatta alla rappresentazione visiva. L'udito a differenza della vista è un canale percettivo sempre attivo che spesso opera in secondo piano senza impiegare tutta l'attenzione, questa natura peculiare consente di utilizzare dei suoni, in letteratura chiamati icone acustiche (*auditory icons*, o anche *earcons*) per veicolare informazioni finalizzate a richiamare l'attenzione dell'utente, a porlo in uno stato di pre-allerta, oppure per fornirgli informazione su dove e su cosa concentrare l'attenzione. Un altro importante aspetto caratteristico dell'udito, che può essere sfruttato, consiste nella percezione di tipo logaritmico che può prestarsi meglio della visualizzazione all'analisi di serie temporali la cui evoluzione è caratterizzata dalla coesistenza di fenomeni su scale molto differenti fra loro. Infine l'udito, con la sua capacità di analizzare e percepire le sottili differenze dei timbri sonori, può rivelarsi molto più adatto della vista nella percezione di dati multidimensionali [83, 92].

In questo ambito di ricerca è possibile delineare due distinti filoni: il primo relativo all'impiego del suono per migliorare le interfacce uomo-macchina, il secondo relativo all'uso del suono come mezzo di rappresentazione per l'analisi e l'interpretazione di dati. Questo ultimo ambito, spesso indicato con il termine "sonificazione" (*sonification*), consiste nell'impiego di audio non-verbale per la rappresentazione e l'analisi di serie di dati. Una delle prime applicazioni, di maggior successo, relative alla sonificazione è costituita dal ben noto contatore Geiger, un dispositivo per la misura delle radiazioni ionizzanti. Il numero e la frequenza di click prodotti dal dispositivo sono, infatti, in dipendenza diretta con il livello di radiazione nelle immediate vicinanze del dispositivo, in tal modo il suono prodotto riesce a dare un'informazione precisa, anche se qualitativa, del dato misurato.

In letteratura esistono diversi lavori che presentano l'impiego, complementare alla visualizzazione 3D, di tecniche di sonificazione per la rappresentazione e l'analisi di serie di dati di vaste dimensioni e caratterizzate da un alto grado di complessità. Le rappresentazioni uditive sembrano particolarmente adatte a favorire il riconoscimento e l'analisi di strutture e di andamenti ricorrenti. L'apparato uditivo umano, accoppiato alle abilità cognitive legate alla percezione sonora, rende possibile l'analisi mediante l'ascolto di serie di dati molto estese che consentono di estrarre informazioni salienti a partire dai fenomeni percepiti. È noto, infatti, che le fluttuazioni e i transienti che si manifestano negli stimoli sonori, quali l'intonazione e le velocità di cambiamento e di oscillazione osservati sia nel parlato che nell'esecuzioni musicali veicolano informazioni sulle intenzioni, sulle emozioni, sugli stati d'animo dei soggetti, permettendo in tal modo la comunicazione. Lo sviluppo di tecniche di rappresentazione uditiva può sfruttare le potenzialità offerte dalle capacità percettive e cognitive legate all'udito dell'uomo per definire strumenti di supporto allo studio e all'interpretazione di serie di dati complesse e multidimensionali. Infatti, tramite l'ascolto, probabilmente, si possono cogliere informazioni qualitative sull'evoluzione temporale più di quanto sia possibile fare tramite la sola visualizzazione. I metodi di rappresentazione uditiva, dunque, possono contribuire a sviluppare strumenti capaci di superare i limiti delle tecniche di visualizzazione nel caso di serie di dati vaste, complesse e multidimensionali.

5.3.1 Il suono: un fenomeno multidimensionale

Come mostrato nelle sezioni precedenti, una onda sonora può essere caratterizzata mediante parametri unidimensionali quali l'ampiezza, la frequenza e la fase. Questi parametri fisici e i loro corrispettivi percettivi, però non sono sufficienti a definire in maniera univoca e completa la natura dell'onda sonora e la sensazione che il suo ascolto induce negli individui. La forma d'onda che caratterizza un dato segnale sonoro infatti veicola una grande quantità d'informazione circa il contenuto spettrale del segnale e le sue variazioni in funzione del tempo che risultano di fondamentale importanza nel processo di percezione del suono. In termini percettivi spesso queste caratteristiche, legate alla forma d'onda e alla distribuzione relativa delle diverse frequenze che compongono un dato suono, vengono attribuite al parametro percettivo chiamato *timbro* o *colore*.

Il timbro è quella particolare qualità che permette di giudicare diversi due suoni con uguale intensità e altezza. Il timbro rappresenta, in altri termini, quell'attributo della sensazione uditiva che consente all'ascoltatore d'identificare la fonte sonora, rendendola distinguibile da ogni altra. Il timbro, che spesso è indicato fra i parametri percettivi del suono musicale, insieme all'altezza, all'intensità e alla durata, suggerisce numerose analogie con il colore per quanto riguarda la percezione visiva. Infatti, il timbro viene designato come colore del suono tanto in inglese (*tone-colour*) quanto in tedesco (*klangfarbe*). Mentre le altezze sonore, le durate e le intensità possono essere discretizzate e ordinate lungo una scala così da essere definite in base a un'unica dimensione, non si può realizzare altrettanto per il timbro che è una grandezza tipicamente multidimensionale. Ciò significa che non può esistere una scala lungo la quale si possono ordinare e mettere a confronto timbri di suoni diversi, infatti due timbri possono differire sotto più punti di vista simultaneamente (*scuro/chiaro*, *percussivo/continuo*). Il timbro del suono è, dunque, un attributo intrinsecamente multidimensionale poichè non è possibile utilizzare un unico parametro per caratterizzare i vari timbri sonori, ma, come propongono diversi autori, richiede la definizione di "*spazi*" a più dimensioni all'interno dei quali creare delle rappresentazioni dei diversi timbri sonori [48].

Nella concezione classica, fondata sulla teoria del suono di Helmholtz, il timbro viene determinato in relazione alla sola composizione spettrale del suono, ossia in base alla distribuzione dell'energia delle diverse componenti di frequenza che compongono il suono. In questa concezione vi è una netta associazione fra spettro del suono e timbro, ma studi più recenti hanno dimostrato che i suoni prodotti da strumenti musicali tradizionali sono caratterizzati da andamenti spettrali che variano nel tempo, così che per dare una rappresentazione fedele del suono risulta necessario determinare le variazioni del contenuto spettrale al variare del tempo. Ciò ha spinto a considerare il timbro come dipendente sia dalla distribuzione dell'energia nello spettro di frequenza, sia da fattori temporali, da ciò deriva che per tracciare una rappresentazione intuitiva del suono fisico può risultare utile impiegare un grafico tridimensionale (*ampiezza, frequenza, tempo*) in cui il timbro risulta individuato mediante una complessa superficie definita in questo spazio. Questo tipo di rappresentazione può essere avvicinata, in prima approssimazione, al tipo di analisi condotta dal nostro sistema percettivo.

Numerosi ricercatori hanno proposto diversi tipi di rappresentazioni spaziali del timbro per l'analisi, la classificazione o per la sintesi dei suoni. L'idea di

base consiste nella possibilità di definire un insieme di coordinate all'interno di uno spazio timbrico al fine di definire un timbro tramite le coordinate date. Wessel [99] propone l'impiego di spazi timbrici a più dimensioni sia per l'analisi dei suoni degli strumenti tradizionali sia per la composizione dei suoni mediante l'uso del calcolatore. In particolare, egli impiega un piano a due dimensioni per classificare i timbri degli strumenti che compongono un'orchestra, le grandezze di riferimento per gli assi coordinati di questo spazio timbrico corrispondono alla distribuzione dell'energia all'interno dello spettro di frequenza e alla natura del transitorio di attacco del suono. Una dimensione può essere utilizzata per classificare la distribuzione del contenuto spettrale, mentre la seconda dimensione può essere impiegata per rappresentare la variazione del tempo di attacco dell'involuppo d'ampiezza del suono e il grado di sincronia fra l'attacco delle varie componenti spettrali. Dunque, lungo la prima direzione del piano si possono ordinare i suoni in base al loro contenuto spettrale su un continuo che spazia dai timbri con uno scarso contenuto di alte frequenze fino ai timbri “*brillanti*” caratterizzati da una spiccata presenza di energia nella parte alta dello spettro. Lungo la seconda direzione i timbri possono essere ordinati in base alla natura del transitorio d'attacco a partire dai timbri contraddistinti da un lungo attacco, fino ai timbri di natura percussiva che sono caratterizzati da transitori estremamente di breve durata.

La natura multidimensionale del suono e la spiccata capacità d'analisi che caratterizza l'apparato percettivo umano lasciano pensare che è possibile utilizzare il suono come strumento per realizzare rappresentazioni uditive di natura qualitativa di dati multidimensionali, che risultano essere difficili da rappresentare in maniera visiva.

5.3.2 Rappresentazioni uditive di sistemi dinamici

Le ricerche nel campo del Auditory Display coinvolgono un gran numero di settori differenti e sono finalizzate allo sviluppo di una vasta gamma di applicazioni. L'attività svolta nel corso del Dottorato di Ricerca è stata concentrata nella definizione di metodi di rappresentazione uditiva di sistemi dinamici provenienti dalle ricerche sul caos e sulla complessità. In particolare si è concentrata l'attenzione sulla codifica di serie di dati, prodotte da sistemi dinamici caotici, in sequenze di eventi musicali oppure, tramite l'impiego di opportuni algoritmi di sintesi del suono, in eventi sonori.

La definizione di tali metodi di rappresentazione uditiva dell'evoluzione di sistemi dinamici può essere compiuta seguendo approcci diversi. La scelta del metodo da impiegare dipende, sia dal tipo di sistema dinamico preso in analisi, sia dal tipo di rappresentazione uditiva che s'intende realizzare. La tipologia del sistema dinamico, per esempio continuo o discreto, oppure caratterizzato da una, due o tre o più dimensioni, influisce fortemente sulla natura stessa del sistema di rappresentazione uditiva da utilizzare. D'altra parte l'impiego di un dato tipo di rappresentazione uditiva influisce sulla tipologia e sulla natura stessa degli eventi sonori che è possibile utilizzare per codificare l'evoluzione del sistema dinamico. Dal punto di vista dell'organizzazione gerarchica del materiale musicale, l'operazione di codifica può essere realizzata operando su tre diversi livelli:

livello alto: generazione di eventi musicali (note);

livello intermedio: generazione di eventi sonori mediante algoritmi di sintesi;

livello basso: produzione diretta di campioni sonori.

Per esempio, un sistema di codifica ad alto livello trasforma le serie temporali in note musicali i cui parametri (altezza, durata, intensità) variano in funzione dell'evoluzione del sistema dinamico. Diversi metodi sono stati proposti per trasformare serie temporali in sequenze di note musicali [12, 19, 83, 101]. In letteratura, la generazione di melodie a partire dall'evoluzione di sistemi dinamici sembra essere l'approccio maggiormente utilizzato. Generalmente questi sistemi di codifica producono dei file MIDI che possono essere trasformati in suoni tramite un qualsiasi dispositivo General MIDI.

Per quanto riguarda la codifica a livello intermedio, è possibile utilizzare i parametri di controllo di un algoritmo di sintesi del suono per produrre degli eventi sonori caratterizzati dalla presenza di alcuni elementi che subiscono un'evoluzione capace di rappresentare quella del sistema dinamico in analisi. Un altro approccio consiste nel realizzare la codifica delle serie temporali a un livello inferiore rispetto al precedente [18]. In questo caso infatti le serie temporali vengono trasformate nell'evoluzione dei parametri di controllo di un sistema di sintesi sonora. In tal modo è possibile trasformare l'evoluzione di un sistema dinamico nella variazione di alcune caratteristiche di un suono di sintesi. Il vantaggio offerto da questo approccio consiste nel lasciare al musicista la libertà di definire i parametri musicali di alto livello (altezza, intensità e durata della nota da sintetizzare).

Infine è possibile trasformare l'evoluzione di un sistema dinamico in una sequenza di campioni per ascoltarne il suono che produce o utilizzare degli opportuni metodi per generare dei campioni sonori a partire dalla sua evoluzione temporale. In letteratura sono riportati anche casi in cui la trasformazione delle serie temporali viene realizzata ad un livello inferiore rispetto al precedente producendo gli elementi fondamentali del suono: i campioni audio [35, 36].

Per produrre musica a partire da un sistema dinamico è necessario creare una corrispondenza fra le variabili del sistema e i parametri fisici o percettivi del suono. La trasformazione dell'evoluzione di un sistema dinamico in una sequenza di eventi musicali viene denominata "*musificazione*" [14], così come con il termine sonificazione, già precedentemente introdotto, si può indicare la trasformazione della serie temporale prodotta dall'evoluzione di un sistema dinamico in un segnale sonoro.

Indipendentemente dai vari livelli gerarchici in cui può ricadere un dato sistema di rappresentazione uditiva, è possibile affermare che in ogni caso per poter realizzare una rappresentazione uditiva di dati mediante suoni e musica dovranno essere almeno presenti tre componenti fondamentali:

- un generatore che produce delle sequenze numeriche;
- un codice capace di trasformare opportunamente tali sequenze;
- un sistema di sintesi che produca rappresentazioni sonore a partire dai dati prodotti dal sistema di codifica.

La tabella 5.1 descrive sinteticamente le caratteristiche dei tre componenti.

Generatore	sistema dinamico che genera delle serie temporali
Codice	sistema di codifica che trasforma le serie temporali in parametri sonori e/o musicali
Motore audio	strumento che genera suoni o musiche in funzione dei dati forniti dal processo di codifica

Tabella 5.1: Elementi di un sistema di rappresentazione uditiva.

La figura 5.14 mostra una rappresentazione schematica di un sistema per la generazione di suoni e musica tramite sistemi dinamici in cui sono rappresentate le connessioni fra i diversi componenti in maniera da illustrare il flusso dei dati all'interno del processo di rappresentazione uditiva.

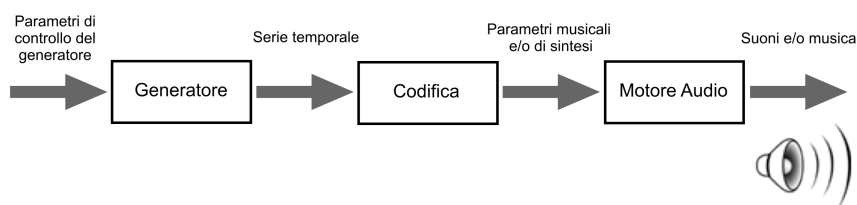


Figura 5.14: Schema di un sistema per la generazione di suoni e musica tramite sistemi dinamici.

La tabella 5.2 riporta una schematizzazione degli ingressi e delle uscite dei tre blocchi costituenti un sistema di musicificazione/sonificazione:

	Ingresso	Uscita
Generatori	Parametri del sistema	Serie temporale
Codici	Serie temporale	Parametri di sintesi
Motore audio	Parametri di sintesi	Suoni – Musica

Tabella 5.2: Descrizione degli ingressi e delle uscite dei tre blocchi costituenti un sistema di musicificazione/sonificazione.

Lo schema di riferimento che s’impiega nella generazione di suoni e musica a partire da sistemi dinamici è il così detto “triangolo di musicificazione” [21]. La figura 5.15 mostra schematicamente la relazione che è possibile instaurare tramite il sistema di codifica fra una serie di dati e la sua rappresentazione uditiva. Questa figura è stata derivata e adattata al caso delle rappresentazioni uditive a partire dal “*triangolo semantico*” che è spesso impiegato negli studi sul linguaggio e la comunicazione come paradigma per lo studio dei processi semiotici. Adottando come metafora un triangolo di musicificazione che connette le strutture matematiche prodotte all’interno di qualche modello formale o teoria empirica e differenti meccanismi di musicificazione o sonificazione, possiamo creare innumerevoli rappresentazioni o artefatti musicali.

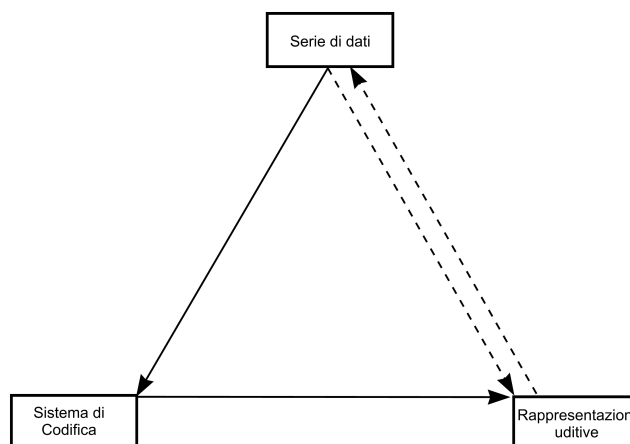


Figura 5.15: Triangolo semantico relativo alla rappresentazione uditiva di serie di dati.

5.4 Sistemi di codifica

L'aspetto piú importante nella creazione di un sistema che realizzi la rappresentazione uditiva di sequenze di dati consiste nella definizione del sistema di codifica. In letteratura spesso il sistema di codifica viene anche chiamato “*mapping*” sottolineando che nella maggior parte dei casi questa operazione consiste nella definizione di una opportuna funzione che instauri una relazione univoca tra gli elementi dello spazio delle fasi del sistema dinamico e gli elementi nello spazio dei parametri musicali. Da questo punto di vista appare evidente che il processo di codifica può essere definito in maniera completamente arbitraria e, quindi, risulta piuttosto ovvio che la qualità della rappresentazione uditiva dipende fortemente dalle scelte compiute nella sua definizione. Per tali ragioni nella definizione di un sistema di codifica è di fondamentale importanza non solo realizzare un meccanismo che sia capace di effettuare la trasposizione tra le serie di dati, le sequenze numeriche che caratterizzano l'evoluzione di un sistema dinamico, e i parametri musicali, ma risulta anche necessario cercare di ottenere un mezzo capace di effettuare una trasformazione significativa dei dati che preservi e rappresenti, con un sufficiente grado di fedeltà, gli aspetti salienti della serie di dati. La creazione di un buon sistema di codifica infatti deve poter consentire l'esplorazione, da un punto di vista uditivo, dell'evoluzione dinamica dei dati in analisi mettendo in risalto le sue strutture temporali, le ripetizioni, le variazioni e tutti i suoi vari comportamenti. I metodi di rappresentazione uditiva sono particolarmente adatti a rappresentare, tramite suoni, le strutture temporali che caratterizzano i dati da rappresentare. Per questo motivo potrebbe essere importante definire quali siano le condizioni che il sistema di codifica deve soddisfare per rappresentare fedelmente le strutture dati. Probabilmente la definizione di un criterio di fedeltà potrebbe essere un aspetto importante al fine di indirizzare le scelte e soprattutto per evitare che il sistema di codifica alteri o addirittura distrugga il contenuto d'informazione delle serie di dati rappresentate mediante eventi sonori. Nella definizione e nella scelta di un sistema di codifica, infatti, esiste la massima libertà poiché non esistono vincoli forti e

limiti che fissano in maniera univoca il campo di scelta dello sperimentatore alla ricerca di un mezzo che trasformi l'evoluzione di un sistema dinamico in suoni e/o musica. Tale problema, infatti, può essere affrontato in maniera diversa, secondo differenti approcci e perseguendo vari obiettivi. Spesso lo sperimentatore deve definire a priori e autoimporsi dei limiti e dei vincoli che confinino e indirizzino le sue scelte al fine di soddisfare un dato criterio di fedeltà nella codifica dei dati. Infatti il processo semiotico, rappresentato mediante il triangolo di musicificazione, non sempre è fedele e lo sforzo maggiore consiste nel creare un codice che, interpretando i dati in ingresso, ossia le variabili del sistema dinamico, generi un processo di traduzione significativa che produca in uscita una rappresentazione che in qualche modo conservi le caratteristiche salienti del sistema dinamico in analisi.

A causa dell'enorme libertà di scelta che si ha a disposizione risulta necessario compiere una attenta analisi dei risultati forniti dal processo di codifica con l'obiettivo di verificare la qualità delle scelte compiute nella definizione del sistema stesso. I risultati prodotti dalla codifica devono essere valutati in base alla qualità del materiale sonoro o musicale ottenuto. La definizione di un sistema di codifica può essere concepito, dunque, come un processo iterativo in cui la valutazione della resa del materiale porta a modificare il sistema di codifica secondo le esigenze emerse dalla fase di analisi. La figura 5.16 mostra uno schema del processo di sviluppo di un sistema di rappresentazione uditiva.

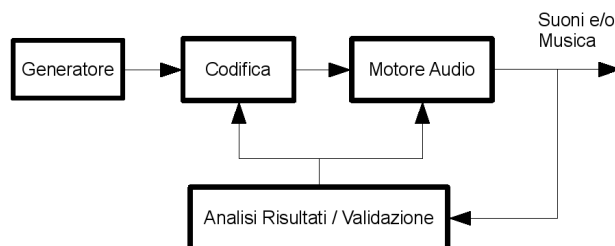


Figura 5.16: Sviluppo di un sistema di rappresentazione uditiva.

La ricerca sulla definizione dei sistemi di codifica è stata svolta in maniera parallela allo studio e alla sperimentazione delle diverse tecniche di sintesi del suono al fine d'individuare e selezionare le tecniche che meglio si prestano alla sonorizzazione dei parametri ottenuti mediante i processi di codifica. La correlazione tra l'evoluzione di un sistema dinamico e gli eventi sonori o musicali generati, infatti, dipende fortemente dalla natura del sistema dinamico, dal sistema di codifica e dal metodo di sintesi impiegato; per tale motivo è parso necessario realizzare un'indagine sistematica delle possibilità d'impiego di diversi sistemi di codifica e di sintesi con la consapevolezza che l'uso di un dato sistema di codifica avrebbe potuto fornire risultati migliori o peggiori a seconda del sistema di sintesi utilizzato e viceversa. Tale indagine è stata finalizzata a esplorare le possibilità d'impiego di diverse tipologie di generatori, caratterizzati da un comportamento in cui emergono gli elementi tipici della complessità e del caos, e nel selezionare quelli che si sono mostrati più adatti all'impiego in processi di generazione di sequenze sonore.

La definizione dei sistemi di codifica da utilizzare per la realizzazione di

metodi di rappresentazione uditiva deve tener conto delle caratteristiche e dei limiti percettivi propri della percezione umana dei suoni. Nella definizione di un sistema di codifica bisogna cercare di considerare soprattutto i limiti dei fenomeni percettivi e cognitivi che riguardano il suono e la musica. Per esempio, l'eccessiva ridondanza può essere un fattore estremamente negativo che può finanche impedire la percezione degli elementi interessanti di una struttura. In letteratura si trovano proposti diversi sistemi di codifica [16], specifici per la musicificazione di Automi Cellulari, che sono classificati secondo le seguenti categorie:

- codici locali;
- codici globali;
- codici misti.

La prima categoria si riferisce a codici che trasformano in suoni e musica le informazioni relative a ogni cella dell'automa cellulare [14]. Un forte limite dei processi di musicificazione locale consiste proprio nell'eccessiva ridondanza poichè la quantità di note prodotte dal processo di codifica è molto elevata. Le strutture emergenti tipiche degli automi cellulari spesso possono avere anche dimensioni molto grandi coinvolgendo un ampio numero di celle. Da ciò deriva che i codici locali producono rappresentazione uditive caratterizzate da un elevato numero di note. Ciò può limitare le possibilità di riconoscimento e di comprensione delle strutture emergenti mediante l'ascolto poichè l'eccessiva ridondanza nelle sequenze di note coerenti con il comportamento locale dell'automa cellulare può impedire la percezione di strutture organizzate. Per questo motivo la codifica spesso deve essere realizzata in maniera da diminuire la ridondanza del messaggio per rappresentare in maniera efficace le strutture e le proprietà che maggiormente interessano. La seconda categoria di codici cerca di superare il problema della ridondanza prendendo in considerazione delle grandezze globali che colgano aspetti salienti del fenomeno in analisi. Tali grandezze possono essere associate per esempio a note musicali in maniera da cogliere tramite l'ascolto l'evoluzione globale del sistema. Poichè questo secondo approccio può soffrire del problema inverso del primo, ossia può non riuscire a rappresentare strutture locali importanti che sfuggono a un'analisi globale, in alcuni casi può essere utile impiegare dei metodi misti che cercano di conciliare entrambe le tendenze estreme.

5.4.1 Mapping

Il "*Mapping*" è una tecnica comunemente impiegata nell'Informatica musicale in vari contesti applicativi. Nel campo della composizione algoritmica il mapping viene largamente utilizzato nello sviluppo di sistemi di musica generativa per mettere in relazione due o più parametri caratterizzati da campi di variazione differenti. Per quanto riguarda invece la sintesi del suono e lo sviluppo di strumenti musicali digitali, le tecniche di mapping vengono impiegate per collegare i parametri di controllo di un sintetizzatore con i parametri di sintesi dello strumento. Nella realizzazione di un sistema di controllo per uno strumento musicale digitale è di fondamentale importanza riuscire a definire un'opportuna strategia che riesca a trasformare un certo numero di variabili di controllo, siano esse di

natura discreta oppure continua, in un altro numero, generalmente diverso dal primo, di variabili che modificano i processi di sintesi del suono [10, 47, 75].

In una ampia accezione il mapping è tipicamente legato alla possibilità di associare alcune variabili con alcune altre. Le tecniche di mapping impiegano delle trasformazioni di natura prettamente matematica che consentono di mettere in relazione un elemento appartenente ad un dato insieme con un altro elemento definito nello stesso oppure in un altro insieme. Infatti al termine mappa nel linguaggio matematico viene associato il significato di: corrispondenza univoca, morfismo, mentre in inglese l'espressione "Map onto Something" significa far corrispondere qualcosa con qualcos'altro tramite un'opportuna relazione diretta. Questa corrispondenza può essere stabilita fra varie grandezze tramite una mappa, ossia una funzione che associa a ogni elemento di un dato insieme X , detto *dominio* della funzione, un elemento di un altro insieme Y , detto *codominio* della funzione. Nel caso dei sistemi di controllo e delle interfacce per gli strumenti musicali digitali le mappe, spesso, vengono costruite per punti in maniera da definire una corrispondenza puntuale tra i valori assunti dai diversi parametri di controllo e il suono prodotto dallo strumento. In questo caso risulta necessario utilizzare delle opportune funzioni d'interpolazione che producano in maniera soddisfacente i valori intermedi fra i vari punti presi in considerazione. In questo caso il modo in cui s'interpolano i punti influisce in maniera determinante sulla resa sonora dello strumento musicale. Inoltre spesso i sintetizzatori e gli strumenti musicali basati su tecniche di sintesi digitale sono caratterizzati da un numero di parametri molto elevato che rende praticamente impossibile il controllo in tempo reale di tutti i parametri da parte di un utente. Per ridurre la complessità legata a un ampio numero di parametri è possibile impiegare un interpolatore multidimensionale (High-Dimensional Interpolator -HDI) che consente di controllare un vasto numero di parametri di sintesi tramite un ristretto numero di parametri di controllo manipolabili dall'utente. In generale le strategie di mapping possono essere classificate in tre diverse categorie:

uno a uno (one-to-one): un parametro d'ingresso viene trasformato in un parametro d'uscita, generalmente definito all'interno di un campo di valori differente dal primo o caratterizzato da un andamento diverso (lineare, esponenziale, logaritmico,...);

uno a molti (one-to-many): uno parametro d'ingresso viene trasformato in un certo numero di parametri d'uscita;

molti a uno (many-to-one): più parametri d'ingresso vengono trasformati in un unico parametro d'uscita.

Dalla combinazione di mappe e trasformazioni appartenenti a queste tre diverse categorie è possibile creare sistemi che possono anche mettere in relazione un certo numero di grandezze in ingresso con un certo altro numero di grandezze in uscita, ossia creare delle trasformazioni "molti a molti" (many-to-many).

La definizione dei mapping, formulata tramite l'impiego del concetto matematico di funzione, consente di stabilire sia "che cosa" viene associato, ossia le coppie di elementi messi in relazione e dunque i punti o le regioni dello spazio dei parametri d'ingresso e i loro corrispettivi nello spazio dei parametri d'uscita, sia "come" avviene tale associazione, in altri termini il modo secondo cui si realizza la corrispondenza e dunque la natura stessa della trasformazione dei punti

da un insieme all'altro. Nel caso in cui si abbia una collezione di N parametri d'ingresso continui queste variabili possono essere pensate come le coordinate di uno spazio Euclideo continuo a N -dimensioni. In tal caso la trasformazione realizzata mediante il mapping definisce:

- l'associazione tra i vari elementi dello spazio d'ingresso a N -dimensioni e lo spazio d'uscita a M -dimensioni (il "che cosa" della trasformazione);
- le regole che governano il processo di associazione fra i punti dei due spazi (il "come" della trasformazione).

Da un punto di vista matematico il mapping consiste in una funzione continua da \mathbb{R}^n in \mathbb{R}^m in cui n e m sono due numeri interi arbitrari che corrispondono al numero di variabili in ingresso e in uscita al processo di mapping. Una semplice mappa che associa gli elementi dei due spazi può essere creata impiegando delle operazioni tra matrici. Infatti, si può definire con $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un vettore di dimensione n relativo allo spazio dei parametri d'ingresso, ossia al dominio X della funzione, e con $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ un secondo vettore di dimensione m appartenente allo spazio dei parametri d'uscita, ossia al codominio Y della funzione. Una semplice trasformazione che associa a ogni vettore di X un vettore appartenente a Y può essere rappresentato tramite la relazione matriciale:

$$\mathbf{y} = A\mathbf{x} + B \quad (5.6)$$

in cui A rappresenta una matrice $m \times n$ e B è un vettore di dimensione m . Gli $m \times n$ coefficienti che compongono la matrice A e gli m elementi del vettore B possono essere esattamente determinati a partire dalla definizione di una serie di $n + 1$ esempi, del tipo $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i\}$ con $1 \leq i \leq n + 1$, che associano i punti nello spazio degli ingressi ai punti nello spazio delle uscite. Quest'approccio è largamente utilizzato in letteratura per lo sviluppo di sistemi di controllo e di interfacce per strumenti musicali digitali, allo stesso tempo può essere utilizzato anche nel campo della composizione algoritmica e della musica generativa per la trasformazione delle serie di dati prodotte dall'evoluzione di sistemi dinamici in parametri musicali e/o sonori che possono essere utilizzati come mezzo di rappresentazione uditiva.

5.4.2 Processi di codifica e codici

La "codifica", in generale, può essere definita come un procedimento di traduzione di un messaggio nella forma più adatta per essere trasmesso lungo un canale o manipolato tramite un elaboratore. Questo processo si basa sull'impiego di un "codice" che è composto dall'elenco dei simboli e dei segnali che permettono di effettuare l'operazione di traduzione e di trasformazione del messaggio; se, per esempio, si tratta di sequenze di impulsi si parla di codice a impulsi. I ricercatori che hanno studiato tali problematiche hanno contribuito alla nascita e all'affermazione del vasto ambito che riguarda la Teoria dell'informazione [80] che mira principalmente a individuare le condizioni teoriche e a definire i sistemi di codifica ottimali per il trasferimento di qualunque tipo di messaggi.

Nel caso dei metodi di rappresentazione uditiva applicati all'evoluzione di sistemi dinamici bisogna distinguere tra processi basati sull'impiego di codici musicali o di codici sonori. Nel primo caso, infatti, il processo di codifica, basato sull'uso di un codice costituito da un insieme di note o di altri parametri

musicali, è volto a trasformare il messaggio, ossia l'evoluzione temporale del sistema dinamico, in una partitura musicale. Il problema principale della codifica musicale consiste, dunque, nella definizione di un meccanismo di trasformazione che sia capace di associare ai diversi valori assunti dalla variabile $x(t)$ che rappresenta una variabile di stato caratteristica dell'evoluzione di un sistema dinamico in una successione di note musicali S_k :

$$S_k = \{note_1, note_2, note_3, \dots, note_k\}. \quad (5.7)$$

Nel secondo caso, invece, il codice sonoro può essere rappresentato da un insieme di suoni differenti che possono essere generati da un sistema di sintesi controllato da un certo numero di parametri. Poiché esiste una relazione diretta fra i parametri di sintesi e risultato sonoro ottenuto, il codice può essere pensato come l'insieme dei valori ammissibili per i vari parametri di sintesi. Dunque, il processo di codifica sonora può essere considerato come la definizione di un meccanismo che trasforma l'evoluzione delle variabili di stato di un sistema dinamico nella variazione corrispondente di tutti i parametri che controllano un dato algoritmo di sintesi. A tal fine può risultare estremamente utile il sistema di mapping, presentato nella sezione precedente, che consente di individuare in maniera assolutamente generale delle funzioni matematiche che rendono possibile stabilire l'associazione tra punti appartenenti a spazi matematici caratterizzati da dimensioni molto diverse fra loro.

Mapping Lineare

Il più semplice sistema di codifica può essere definito tramite una relazione tra il campo di valori in cui è definita una variabile di stato $x(t)$ di un sistema dinamico e un altro corrispondente intervallo di valori, relativo a note MIDI, o ad altri parametri musicali oppure a un qualsiasi algoritmo di sintesi del suono. Questa trasformazione può essere realizzata tramite un mapping lineare che trasforma la variabile x , definita all'interno dell'intervallo $[a, b]$, nella variabile y , definita nell'intervallo $[c, d]$ [38]:

$$y = \frac{(d - c)}{(b - a)}(x - a) + c \quad (5.8)$$

Nel caso in cui la variabile x è continua, allora lo sarà anche la y ; altrimenti se x è discreta anche la y sarà discreta. Questo esempio di trasformazione rappresenta un caso particolare del modello presentato nella sezione precedente in cui la dimensione dei due spazi n e m è pari a uno. Nel caso in cui si abbia un numero di parametri in ingresso e in uscita maggiore di uno la relazione 5.8 deve essere sostituita dalla relazione matriciale 5.6.

L'estrema semplicità di questo sistema di codifica rappresenta il suo miglior pregio. Questo metodo si rivela estremamente utile in molte circostanze applicative e specialmente nei casi in cui le variabili coinvolte, x, y sono di natura continua. D'altra parte, però, questo approccio presenta alcuni problemi e alcune limitazioni particolarmente evidenti nel caso in cui lo si voglia utilizzare per la codifica tramite altezze musicali. In queste circostanze il maggior problema consiste nell'impossibilità di scegliere l'insieme di note da utilizzare per la conversione dell'evoluzione del sistema dinamico in una sequenza di note. Questo perché la natura stessa della trasformazione matematica mette in relazione diretta il campo di variazione della coordinata del sistema dinamico con il campo

di valori delle altezze musicali che possono essere per esempio definite secondo il protocollo MIDI. Questo schema di codifica, quindi, rende impossibile definire un preciso vocabolario di altezze da utilizzare nella codifica delle serie temporali in sequenze di note. Le strutture musicali ottenute attraverso questo approccio spesso sono musicalmente poco interessanti poiché la definizione di un intervallo di note MIDI comporta l'impiego di una collezione di note di tipo cromatico⁹. Inoltre poiché la maggior parte dei sistemi dinamici sono caratterizzati da un andamento pressoché continuo questo tipo di codifica porta alla generazione di scale cromatiche ascendenti e discendenti che, per l'elevato grado di ridondanza, risultano estremamente noiose all'ascolto e scarsamente interessanti dal punto di vista musicale. Questo problema può essere superato definendo dei sistemi di codifica basati sull'impiego di tabelle che diano la possibilità di scegliere liberamente il vocabolario di altezze ammissibili all'interno del sistema di codifica. In tal modo è possibile determinare il tipo di materiale musicale prodotto dal sistema di musica generativa a seconda della collezione di altezze adottata.

Seguendo la classificazione dei sistemi di codifica presentata in precedenza, questo approccio ricade nella classe dei codici locali poiché la trasformazione avviene punto per punto e ogni valore della serie temporale ha un proprio corrispondente univoco nel codominio della funzione. Questa natura fortemente locale determina una grande ridondanza che spesso in termini uditivi corrisponde nella ripetizione immutata di eventi sonori o in una lentissima variazione di parametri che modificano la natura della rappresentazione sonora.

Codifica massimi e minimi

I problemi legati alla ridondanza e alla generazione di valori sequenziali che caratterizzano il mapping lineare possono essere superati apportando alcune modifiche al sistema di codifica. Un approccio che si è mostrato utile per la codifica di altezze musicali consiste nell'impiego del mapping lineare per trasformare l'evoluzione che caratterizza una variabile di stato di un sistema dinamico in una sequenza di note, rappresentate mediante il protocollo MIDI, a cui è stato combinato un sistema di filtraggio degli eventi sonori prodotti finalizzato a individuare le note musicali corrispondenti esclusivamente ai punti di massimo e di minimo della forma d'onda relativa all'evoluzione della serie temporale. La figura 5.17 mostra un'immagine schematica del sistema di mapping basato sull'individuazione dei punti di massimo e di minimo della forma d'onda.

Il filtraggio rende possibile ridurre la ridondanza degli eventi sonori generati e limitare fortemente la sequenzialità dei valori prodotti. Questo sistema di codifica può ricadere nella categoria dei *codici misti* poiché pur realizzando una codifica punto a punto gli eventi effettivamente generati sono scelti in base a delle proprietà globali. Questo sistema di codifica è stato utilizzato positivamente anche per generare delle sequenze di note MIDI che controllano suoni di percussioni.

⁹Una collezione di note basata sull'impiego di una *scala cromatica*, ossia una successione ordinata per altezze ascendente o discendente dei dodici semitoni della scala temperata costituenti l'ottava.

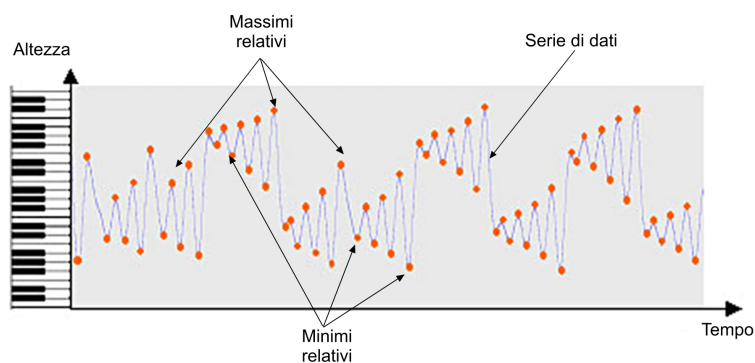


Figura 5.17: Schema del sistema di codifica massimi e minimi.

Codifica mediante tabella

Un segnale continuo può assumere un numero infinito di valori diversi in corrispondenza di un punto campione, così allo stesso modo nel caso in cui si compie l'integrazione numerica di un sistema di equazioni differenziali relativo a un sistema dinamico si ottiene una serie temporale di dati che può assumere un numero infinito di valori diversi. Tuttavia la Teoria dell'informazione afferma che, nel caso della trasmissione di suoni o immagini, perché i segnali possano essere uditi o visti, è sufficiente garantire un certo grado di fedeltà nella loro riproduzione. Così, trattando dei segnali discreti al posto dei segnali continui, è possibile impiegare nella trasmissione un numero finito di livelli d'ampiezza che soddisfi il criterio di fedeltà scelto per misurare il grado di approssimazione fra il segnale trasmesso e il segnale continuo originale [80]. Allo stesso modo nel caso della generazione di musica tramite l'uso di sistemi dinamici è necessario garantire un certo grado di fedeltà che renda possibile una corrispondenza sufficientemente buona fra l'evoluzione del sistema dinamico e gli andamenti musicali generati. Per soddisfare il criterio di fedeltà prefissato è sufficiente definire un opportuno intervallo di quantizzazione in maniera da non operare più con un segnale continuo, ma con un numero limitato di valori di ampiezza.

La *codifica mediante tabella* si basa proprio su questo principio poiché prevede l'impiego di un sistema di quantizzazione delle serie temporali generate dal sistema dinamico. Il principale vantaggio offerto da questo approccio consiste nella possibilità di definire la collezione di valori, siano essi relativi alle altezze musicali o a parametri sonori di altra natura, da utilizzare nella codifica delle serie temporali. In tal modo l'utente può definire in maniera molto dettagliata il codice da utilizzare, nel caso della codifica mediante altezze musicali questa scelta consiste nella definizione del tipo di scala musicale e di tonalità da utilizzare. Nel seguito si illustrerà nel caso specifico il processo della codifica di altezze, anche se l'impiego di questo metodo può essere esteso a qualsiasi altro parametro musicale o relativo alla sintesi del suono. Inizialmente, è necessario scegliere l'ampiezza dell'intervallo di altezze che s'intende utilizzare nel processo di codifica tramite la definizione dell'estremo superiore e dell'estremo inferiore (ad esempio si può considerare un intervallo di due ottave centrato attorno al Do centrale del pianoforte). La scelta delle due note che limitano l'intervallo di altezze può essere determinante per la definizione della tonalità o del modo

che caratterizza la collezione di altezze.¹⁰ Successivamente é necessario scegliere il tipo di scala musicale da utilizzare. L'elenco di seguito riporta alcune delle principali scale musicali, tra le tante possibili, da utilizzare per la definizione della collezione di altezze:

- diatonica - sette note per ottava;
- pentatonica - cinque note per ottava;
- scala basata su triadi - primo, terzo e quinto grado di una scala diatonica.

La scelta di una scala musicale consente di definire univocamente la collezione di altezze musicali da utilizzare, che può essere rappresentata tramite l'insieme ordinato S_h che comprende tutte le h note generabili dal processo di codifica:

$$S_h = \{nota_1, nota_2, \dots, nota_h\} \quad (5.9)$$

Nella realizzazione di un simile sistema di codifica l'insieme ordinato delle note ammissibili può essere memorizzato in una tabella, da cui deriva il nome dato a questo metodo. Il processo di codifica si realizza discretizzando opportunamente la serie di dati e generando una sequenza di indici che forniscono nel tempo le varie posizioni delle celle della tabella da leggere per ottenere i valori di altezza musicale. Prendendo in considerazione un sistema dinamico caratterizzato da uno spazio delle fasi n -dimensionale, per realizzare questo tipo di codifica é necessario calcolare il valore minimo m e il valore massimo M per ognuna delle n serie temporali che caratterizzano il sistema. In tal modo si otterranno n coppie di valori del tipo $[m_i, M_i]$ che definiscono l'intervallo di variazione relativo alla i -esima serie temporale del sistema dinamico. L'insieme di tutte le coppie di valori può essere pensato come l'insieme dei vertici che definiscono un parallelepipedo in uno spazio a n dimensioni all'interno del quale é vincolata l'evoluzione del sistema dinamico. Se si prende in considerazione solo l' i -esima coordinata dello spazio delle fasi la lunghezza dello spigolo può essere calcolata come: $(M_i - m_i)$. Ogni spigolo può essere suddiviso in h segmenti di egual lunghezza; la lunghezza di ogni segmento l_i può essere calcolata tramite la relazione:

$$l_i = \frac{M_i - m_i}{h} \quad (5.10)$$

Il processo di codifica può essere realizzato associando ad ognuna delle n serie temporali $x_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$), che caratterizzano l'evoluzione del sistema dinamico, una sequenza di numeri interi $p_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) definiti nell'intervallo $[1, h]$. Questo processo di codifica determina una quantizzazione delle serie temporali secondo il numero di note dell'insieme S_h . Considerando il caso dell' i -esima serie temporale l'indice del segmento in cui cade il valore corrente $x_i(t)$ della serie temporale può essere calcolato tramite la relazione:

$$p_i(t) = 1 + \frac{x_i(t) - m_i}{l_i} \quad (5.11)$$

¹⁰La *tonalita* é, in senso lato, il rapporto di gerarchia che si stabilisce, all'interno di una successione determinata di suoni, nei confronti di una tonica, ossia di un suono prescelto attorno al quale, e verso il quale, gravitano tutti gli altri.

Il *modo* é la scala che inizia a partire da un determinato grado di una scala diatonica (ad esempio il modo Ionico é costruito a partire dalla tonica, ossia dal primo grado della scala di riferimento, mentre il modo Eolio é costruito sul sesto grado).

Il valore ottenuto per l'indice $p_i(t)$ definirà quale elemento dell'insieme S_h si sceglierà come altezza della prossima nota da suonare. Le note possono essere generate secondo due differenti approcci:

- asincrono - si genera una nota ogni qualvolta si determina una variazione rispetto al valore precedente di uno degli indici $p_i(t)$;
- sincrono - prima di effettuare la codifica si campionano le serie temporali secondo un determinato periodo di campionamento.

Codifica degli intervalli

In questo schema si mette in relazione la variazione di una delle coordinate del sistema dinamico con un intervallo musicale. Se si prende in considerazione una variabile di stato x di un sistema dinamico la variazione del valore della coordinata in due campioni successivi è definita come:

$$\Delta_x = x_n - x_{n-1} \quad (5.12)$$

Lo schema di mappaggio viene definito ponendo come proporzionale la grandezza dell'intervallo musicale e la variazione della coordinata x , come mostrato nella seguente relazione¹¹:

$$I = \lfloor C\Delta_x \rfloor \quad (5.13)$$

dove C è un opportuno fattore di proporzionalità che consente di ottenere la dimensione degli intervalli musicali desiderati. Il fattore di proporzionalità C svolge un ruolo fondamentale in questo schema di codifica. Il suo valore può essere definito secondo diversi modi, un metodo che sembra fornire risultati particolarmente interessanti consiste nel calcolare il coefficiente C come il rapporto dell'intervallo desiderato in corrispondenza del valore medio della variazione della variabile x .

$$C = \frac{I_D}{\Delta_x} \quad (5.14)$$

Il valore dell'intervallo I deve essere opportunamente quantizzato in maniera da soddisfare la sequenza di intervalli definita da una data scala musicale.

Codifica mediante una finestra scorrevole

La codifica basata sull'impiego di una “*finestra scorrevole*”, in inglese indicata con l'espressione “*sliding window*”, prende origine da un sistema di analisi di dati che prevede il calcolo di grandezze significative sulla base di una finestra temporale che prende in considerazione soltanto una certa quantità di dati la volta. In tal modo le serie di dati possono essere analizzate facendo scorrere nel tempo una finestra che consente di ottenere al variare del tempo, corrispondente dunque alla posizione della finestra, l'andamento temporale di grandezze significative per lo studio dei dati in esame. In questo tipo di analisi è possibile utilizzare finestra di diversa dimensione. Nel caso di finestre di grandi dimensioni è possibile ottenere informazioni principalmente di natura globale, mentre nel caso opposto, l'impiego di finestre piccole rende possibile ottenere informazioni più di natura locale.

¹¹Si utilizza l'operatore “*Parte intera inferiore*” per eseguire la conversione del prodotto in un numero intero.

Questo stesso approccio può essere utilizzato per effettuare la codifica musicale o sonora dell'evoluzione caratteristica delle serie di dati prodotti da un sistema dinamico. Una serie temporale prodotta dall'evoluzione di un sistema dinamico può essere, infatti, analizzata mediante una finestra scorrevole e per ogni finestra è possibile calcolare delle grandezze statistiche (media, deviazione standard, ...) i cui valori possono essere trasformati in parametri utilizzabili per fornire delle rappresentazioni uditive dell'evoluzione temporale. La dimensione della finestra assume un ruolo fondamentale sulla qualità dei risultati ottenibili tramite questo metodo. L'impiego di grandezze statistiche rende questo approccio un sistema di codifica *globale*, anche se, la dimensione della finestra d'analisi determina in maniera significativa il prevalere del carattere globale, misto o strettamente locale.

Capitolo 6

Musiche e suoni dal caos

Lo sviluppo della Teoria del Caos e della Complessità negli ultimi quaranta anni ha portato a un nuovo felice incontro fra Arte e Scienza. A partire dagli anni '80, lo sviluppo di queste nuove discipline scientifiche ha avuto una forte influenza anche in campo musicale. Numerosi artisti e scienziati, infatti, hanno cercato di applicare a fini artistici le scoperte e i risultati emersi in questi settori della ricerca scientifica. Tra le varie applicazioni sviluppate nel corso degli anni, diversi compositori e ricercatori hanno sperimentato la possibilità di impiegare sistemi dinamici non-lineari per la generazione di suoni e musiche [12, 35, 36, 83]. Le motivazioni che hanno favorito questo felice incontro sono molteplici e probabilmente anche difficili da individuare in maniera completa. Sicuramente un fattore determinante è rappresentato dal fascino che esercitano le varie forme e gli oggetti generati artificialmente mediante il calcolatore la cui bellezza spesso si fonda sull'evocazione di strutture e di proprietà tipiche dei fenomeni e degli oggetti della Natura. Tutto ciò ha stimolato sia la fantasia degli artisti, interessati a esplorare mondi immaginari prodotti dall'estro e dalla creatività, sia quella degli scienziati spinti dal desiderio di investigare i fenomeni naturali tramite la creazione di modelli semplificati capaci comunque di ricreare la complessità e il fascino di tutto ciò che ci circonda in Natura.

L'architettura si occupa dell'organizzazione delle forme nello spazio; in maniera simile è possibile pensare la Musica come quella disciplina finalizzata all'organizzazione delle forme nel tempo. Il suono è un fenomeno di natura strettamente temporale che implica il bisogno di rapportarsi a esso mediante concetti che riflettano questa sua essenza profondamente dinamica. Non è, infatti, un caso che concetti quali: evoluzione, sviluppo, trasformazione, ripetizione, variazione, siano largamente presenti nel pensiero musicale riflettendo la natura intrinsecamente dinamica del suono e della musica. Questa natura dinamica spinge a esplorare le possibili relazioni fra l'universo musicale e il sapere matematico legato ai sistemi dinamici nel quale i sistemi caotici rappresentano una delle più interessanti e affascinanti sottocategorie.

La generazione di suoni e musiche mediante sistemi caotici può essere compiuta ponendosi obiettivi di natura diversa. Da un punto di vista strettamente scientifico è possibile perseguire diversi obiettivi mediante l'impiego di rappresentazioni sonore nello studio dell'evoluzione di sistemi dinamici [9]:

- individuare ricorrenze e riconoscere musicalmente i punti di equilibrio di un sistema dinamico;
- osservare come, in presenza di attrattori stabili, più soluzioni, pur partendo da condizioni iniziali differenti, tendono ad assestarsi, con il passare del tempo, a un punto fisso. Ciò equivale alla rappresentazione uditiva dei bacini di attrazione e delle caratteristiche del transiente, ossia del modo secondo cui il sistema perviene allo stato stabile;
- indagare sulla natura del caos, osservando il comportamento del sistema di fronte a piccole variazioni sulle condizioni iniziali;
- indagare sulla stabilità strutturale di un sistema dinamico tramite l'analisi del materiale musicale generato al fine di osservare il suo comportamento di fronte a piccole variazioni dei suoi parametri di controllo;
- analizzare come i materiali musicali prodotti dall'attività relativa ai punti precedenti siano percepiti dai soggetti umani.

D'altra parte, sposando un punto di vista più rivolto alla composizione musicale, queste stesse attività possono contribuire a esplorare e scoprire nuovi materiali, sia musicali, sia sonori, che possono facilmente trovare un diretto utilizzo per la composizione di brani musicali e per la realizzazione di performance e installazioni artistiche.

I sistemi dinamici che mostrano un comportamento caotico possono essere impiegati in diversi modi in campo musicale per la generazione di suoni e musiche. Da un punto di vista storico, a causa delle limitate capacità computazionali dei primi calcolatori, tali sistemi sono stati inizialmente utilizzati per la generazione di melodie. In seguito, con la crescita della potenza di calcolo dei processori, la possibilità di realizzare la sintesi dei suoni in tempo reale ha spinto a utilizzare i sistemi dinamici anche all'interno di processi di generazione del suono. Per quanto riguarda la sintesi del suono mediante calcolatore, la letteratura specializzata nel campo dell'Informatica musicale riporta un ampio numero di approcci differenti alla generazione e all'elaborazione del suono. In questo ambito i sistemi caotici possono essere impiegati in maniera molto diversa a seconda dell'approccio che si vuole adottare.

È possibile definire delle **Architetture** di riferimento [17] per classificare i diversi approcci possibili per la generazione di suoni e musiche mediante sistemi caotici. Tali architetture forniscono uno strumento per l'organizzazione sistematica dei diversi approcci possibili. Una architettura rappresenta, dunque, una struttura paradigmatica che può essere utilizzata come riferimento concettuale per la realizzazione di un sistema di generazione di musica a partire da sistemi dinamici. Ogni architettura definisce un modello che delinea e definisce un ben determinato approccio per la generazione di eventi sonori o musicali a partire dalle serie temporali prodotte da un sistema dinamico. Le varie architetture possono essere, dunque, trasformate in una vasta collezione di sistemi generativi differenti che impiegano sia diversi sistemi dinamici come generatori, sia differenti sistemi di codifica. Le architetture, in sé, sono quindi indipendenti dallo specifico sistema dinamico preso in considerazione. Allo stesso modo, nell'ambito di una stessa architettura è possibile impiegare sistemi di codifica differenti o motori audio di diversa natura per realizzare varie rappresentazioni uditive della

stessa serie temporale prodotta da un dato sistema dinamico. Nel seguito le architetture verranno presentate applicate principalmente all'oscillatore di Chua anche se la loro valenza rimane pur sempre molto più generale e applicabile a qualsiasi altro tipo di sistema dinamico. Le architetture che saranno presentate consentono di generare sia suoni che musica, la tabella 6.1 mostra in breve una descrizione delle architetture generative.

Nome	Descrizione	Tipo
Architettura 1.1	trasformazione delle serie temporali in suoni	sintesi del suono
Architettura 1.2	le serie temporali si usano in un sistema di sintesi del suono per modulazione di frequenza	sintesi del suono
Architettura 1.3	trasformazione delle serie temporali in sequenze di note MIDI	generazione di musica
Architettura 1.4	trasformazione delle serie temporali in note MIDI che controllano suoni di percussioni	generazione di musica
Architettura 2	trasformazione delle serie temporali in sequenze di note musicali suonate da un sintetizzatore che impiega lo stesso sistema dinamico per la sintesi del suono	generazione di musica sintesi del suono
Architettura 3	sistema di musica generativa interattivo	generazione di musica interazione
Architettura 4	sintesi ed elaborazione del suono interattiva	sintesi del suono interazione

Tabella 6.1: Classificazione delle Architetture.

Le architetture sono state classificate e numerate a partire dagli schemi più semplici fino a quelli più articolati. Le architetture indicate con il numero 1 rappresentano le operazioni di base relative alla trasformazione di serie temporali in suoni e musica. L'architettura indicata con il numero 2 combina la generazione di materiale musicale mediante l'uso di un sistema dinamico, con l'impiego di uno strumento musicale che sfrutta lo stesso sistema dinamico all'interno di un processo di sintesi del suono. L'architettura indicata con il numero 3 rappresenta dei sistemi generativi in cui è possibile realizzare anche l'interazione dell'utente. L'architettura indicata con il numero 4 rappresenta una combinazione delle precedenti in cui è possibile anche realizzare l'elaborazione del suono in ingresso al calcolatore. Queste architetture, in quanto modelli astratti dei processi generativi, possono essere realizzati in molti modi mediante strumenti tecnici di differente natura. L'attività svolta durante il Dottorato di Ricerca è stata condotta utilizzando inizialmente Max/MSP, un ambiente di programma-

zione visuale per lo sviluppo di applicazioni sonore e musicali. Successivamente si è passati a impiegare anche Pure Data (PD),¹ un ambiente di sviluppo simile al precedente, ma più flessibile e versatile. PD, al contrario di Max/MSP, è un software open source che garantisce maggiori possibilità per quanto riguarda l'estensione e la personalizzazione dell'ambiente di sviluppo assieme all'assoluta libertà circa la distribuzione e il riutilizzo di tutte le applicazioni sviluppate. Per tutti questi motivi si è scelto di impiegare PD come ambiente di sviluppo principale delle varie applicazioni sviluppate. Per realizzare la simulazione dei sistemi dinamici sono stati sviluppati degli "external", ossia delle librerie che estendono le funzionalità di base di PD, che implementano i simulatori dell'oscillatore di Chua e degli altri sistemi dinamici caotici.

La simulazione dell'oscillatore di Chua, del sistema di equazioni di Lorenz e di tutti gli altri sistemi dinamici continui e discreti impiegati nel corso delle ricerche è stata realizzata creando degli appositi plug-in per Pure Data che estendendone le funzionalità eseguono l'integrazione numerica dei sistemi d'equazioni differenziali che caratterizzano i vari sistemi dinamici. L'integrazione numerica dei sistemi d'equazioni differenziali è stata realizzata impiegando il metodo di Runge-Kutta del quarto ordine. Per ogni sistema dinamico sono stati realizzati due external di tipo differente uno relativo alla produzione dati di controllo generalmente elaborati da PD con una frequenza dell'ordine del millesimo di secondo, l'altro relativo alla produzione di segnali di tipo audio, elaborati in funzione della frequenza di campionamento con cui opera la scheda audio che si interfaccia con PD.

Nel seguito di questo capitolo si presenteranno una serie di strumenti e tecniche per la generazione di suoni e musiche mediante sistemi dinamici caotici. La ricerca è stata volta a sperimentare l'impiego artistico dei sistemi dinamici provenienti dalle ricerche sulla complessità e il caos al fine di definire un'insieme di approcci che possano contribuire nell'opera di musicisti e compositori volti a esplorare nuovi territori sonori e musicali. A tal fine il lavoro è stato orientato a definire delle metodologie basate sull'uso di sistemi caotici per la generazione di suoni, di strutture melodiche o d'interi brani musicali. Inoltre, si è cercato di creare degli "strumenti musicali" innovativi che possano essere utilizzati per la produzione di brani musicali, per la realizzazione di performance live o di installazioni multimediali. Tra le principali problematiche affrontate in questa direzione spicca la necessità di definire dei sistemi di interazione a più livelli fra musicista e strumento musicale. I sistemi d'interazione devono essere da una parte sufficientemente semplici da poter essere gestiti in tempo reale, mentre dall'altra devono essere capaci di fornire un controllo adeguato dell'espressività del materiale musicale prodotto. Da quanto illustrato nel capitolo precedente, la definizione di codici capaci di trasformare le serie temporali prodotte da un sistema dinamico nella variazione di opportuni parametri sonori/musicali è un problema che influisce in maniera determinante sul conseguimento di risultati musicali interessanti. Nel seguito si illustreranno alcune applicazioni dei sistemi di codifica finora sviluppati per la generazione di melodie e per la produzione di suoni di sintesi.

¹Si veda il sito ufficiale del progetto: <http://puredata.info/>.

6.1 Suoni

I sistemi dinamici caotici possono essere utilizzati sia all'interno di algoritmi di sintesi del suono, sia per realizzare processi di elaborazione del suono. Il loro impiego per la sintesi del suono può essere realizzato secondo diverse modalità. Le serie temporali, prodotte dall'evoluzione di un sistema dinamico, possono essere utilizzate in vario modo: per generare i valori assunti dai campioni [34], all'interno di algoritmi di sintesi del suono [87], oppure per controllare la variazione nel tempo dei parametri di un processo di sintesi [86].

Durante il Dottorato si è approfondito lo studio di numerose tecniche di sintesi ed elaborazione numerica del suono. Quest'attività è stata condotta sia, da un punto di vista teorico, per studiare le potenzialità offerte dai vari algoritmi per la realizzazione di rappresentazioni uditive dell'evoluzione di sistemi dinamici, sia, nell'ambito dello sviluppo di un nuovo software, chiamato *Imagination Tools*, per l'elaborazione e la sintesi del suono [7, 8], per implementare le funzionalità previste in fase di progetto. L'attività svolta in questo secondo ambito è stata finalizzata allo studio, alla progettazione e alla realizzazione di una vasta gamma di processi di elaborazione e di sintesi del suono. Sono stati realizzati circa sessanta oggetti, caricabili nel programma principale come delle librerie esterne, che realizzano diverse tipologie di processi di generazione e di elaborazione di segnali sonori. Quest'attività ha avuto un elevato valore formativo poichè ha reso necessario lo studio teorico approfondito delle problematiche legate all'elaborazione numerica del segnale. Inoltre, ha determinato il bisogno di investigare in dettaglio le differenti possibilità di implementazione degli algoritmi e dei processi presi in esame. Infine, per quanto riguarda la fase finale di realizzazione, ha indotto a confrontarsi in maniera pratica con la programmazione e con lo sviluppo del software.

6.1.1 Sistemi di sintesi del suono

Il più semplice sistema di generazione del suono a partire da un sistema dinamico può essere rappresentato dall'**Architettura 1.1**. In questa architettura le serie temporali prodotte da un sistema dinamico, per esempio l'oscillatore di Chua, vengono inviate direttamente alle uscite della scheda sonora del calcolatore. In questo modo è possibile ascoltare il suono prodotto dal sistema dinamico, trasformando direttamente l'evoluzione delle variabili di stato del sistema in una successione di campioni sonori. Questa architettura, nel caso dell'oscillatore di Chua, è pressochè equivalente al caso in cui si colleghino degli altoparlanti ai terminali del circuito elettronico realizzato fisicamente. I suoni prodotti dall'oscillatore di Chua sono generalmente a bassa frequenza, con un ampio spettro che contiene parziali armoniche e inarmoniche la cui frequenza e ampiezza varia rapidamente. All'ascolto, questi segnali generalmente sono percepiti e assimilati a dei rumori. La codifica consiste esclusivamente in un processo di normalizzazione delle serie temporali che rende compatibile il campo di variazione delle serie numeriche con l'intervallo d'ampiezza dei campioni sonori accettati dalla scheda audio. In tal modo si cerca di evitare la saturazione della gamma dinamica dei convertitori e quindi la distorsione del segnale dovuto alla saturazione. La figura 6.1 mostra due rappresentazioni schematiche dell'**Architettura 1.1**.

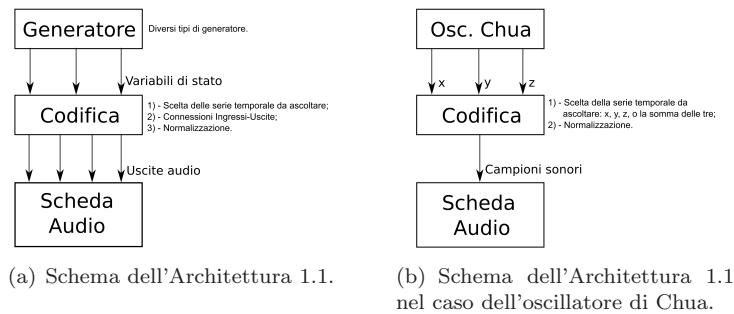


Figura 6.1: Architettura 1.1.

Le immagini in figura 6.2 mostrano le forme d'onda dei suoni generati da tre diversi attrattori dell'oscillatore di Chua mediante l'uso dell'Architettura 1.1.

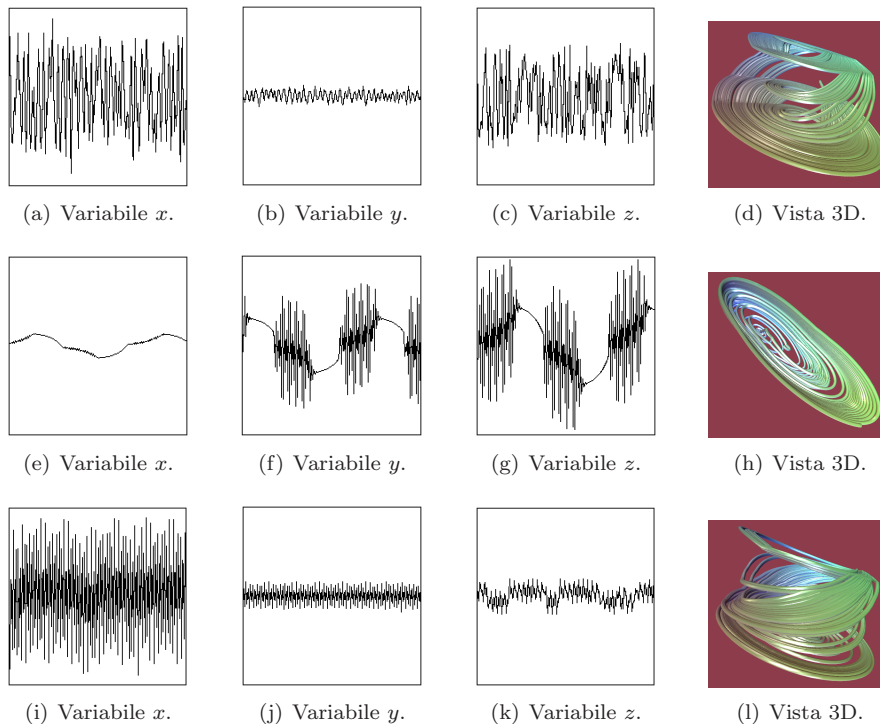


Figura 6.2: Forme d'onda dei suoni generati mediante l'Architettura 1.1.

L'**Architettura 1.2** impiega un sistema dinamico all'interno di un algoritmo di sintesi del suono. In letteratura è riportato un'ampio numero di approcci e algoritmi differenti per la sintesi del suono che possono essere utilizzati per la produzione di suoni mediante l'uso di sistemi dinamici. Tra i vari metodi possibili si è scelto, per la sua semplicità, di sperimentare l'impiego della sintesi per modulazione di frequenza [38, 89] come tecnica di base per la realizzazione di quest'architettura. Per questa via le serie temporali prodotte dall'oscillatore

di Chua sono utilizzate come segnali che modulano la frequenza di un oscillatore sinusoidale. Tale oscillatore, in assenza di modulazione, è caratterizzato da una certa frequenza, generalmente compresa nella banda udibile, chiamata frequenza portante. La figura 6.3 mostra una rappresentazione schematica dell'**Architettura 1.2**.

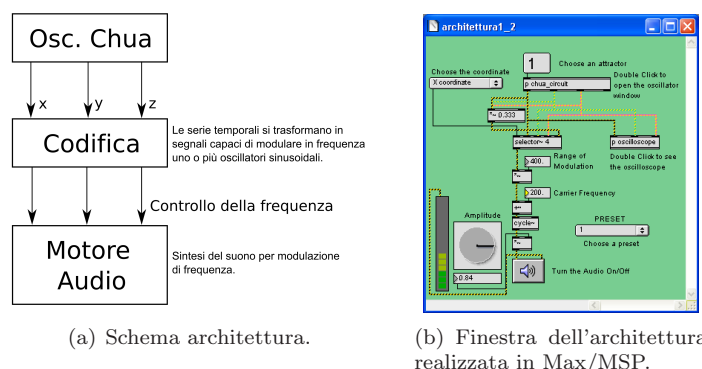


Figura 6.3: Architettura1.2.

Il processo di codifica consiste nella trasformazione delle serie temporali prodotte dal sistema dinamico in segnali che possono essere utilizzati per controllare la frequenza di uno o più oscillatori sinusoidali. In analogia alla sintesi per modulazione di frequenza questa trasformazione viene realizzata mediante la seguente relazione:

$$F_s = F_p + I_m x, \quad (6.1)$$

dove con F_s si indica il segnale che controlla la frequenza dell'oscillatore sinusoidale, F_p è il valore della frequenza portante dell'oscillatore, I_m rappresenta l'*indice di modulazione* e infine x è la variabile relativa alla serie di dati da codificare. Il valore assunto dall'indice di modulazione e il suo rapporto con il valore della frequenza portante rappresentano i due elementi determinanti del tipo di sonorità ottenibili per questa via. Per valori prossimi allo zero dell'indice di modulazione, infatti, si ottengono suoni sinusoidali con frequenza costante o con delle piccole variazioni percepite come un vibrato. Mentre, per valori crescenti di quest'indice i suoni prodotti diventano via via timbricamente ricchi e articolati manifestando molte delle caratteristiche tipiche dei suoni prodotti da sistemi caotici. La modifica dell'indice di modulazione assieme alla possibilità d'impiegare attrattori caotici con evoluzioni temporali molto varie costituisce un potente mezzo per l'esplorazione di nuovi territori sonori. Questa architettura è stata anche utilizzata per realizzare un sintetizzatore che impiega l'oscillatore di Chua in un algoritmo di modulazione di frequenza. Questo nuovo strumento musicale sarà presentato nel seguito nella sezione 6.3.3.

L'**Architettura 4**, infine, rappresenta uno strumento più articolato in cui, oltre alla sintesi del suono, è possibile utilizzare i sistemi dinamici caotici anche in processi di elaborazione del suono, quali per esempio la convoluzione, la modulazione ad anello (ring modulation), o il ritardo (delay). Le serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua sono state impiegate per creare effetti capaci di modificare il suono sintetizzato mediante il calcolatore e quello prodotto dagli strumenti musicali tradizionali. In questa direzione sono stati sviluppati degli

effetti comunemente utilizzati nell'attuale pratica musicale da strumentisti di vario genere, quali per esempio: delay, flanger, chorus. L'impiego di tali funzionalità di elaborazione del suono possono essere opportunamente combinate con tutte le altre architetture, relative sia alla generazione di musiche sia alla produzione di suoni, per la creazione di sistemi generativi molto articolati.

6.1.2 Rappresentazioni sonore

Le architetture finora presentate consentono di realizzare delle rappresentazioni sonore dell'evoluzione temporale dei sistemi dinamici. Nel seguito si presenteranno alcuni esempi in cui s'impiega l'**Architettura 1.1** per rendere udibile i vari comportamenti tipici delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua. Nello specifico si può usare una rappresentazione uditiva delle serie di dati per percorrere la strada verso il caos che, al variare del parametro α nell'intervallo di valori compresi fra 5 e 10, porta alla formazione del ben noto attrattore "double scroll" indicato nella tabella 2.1 mediante la sigla DE1. La figura 6.4 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 5$.

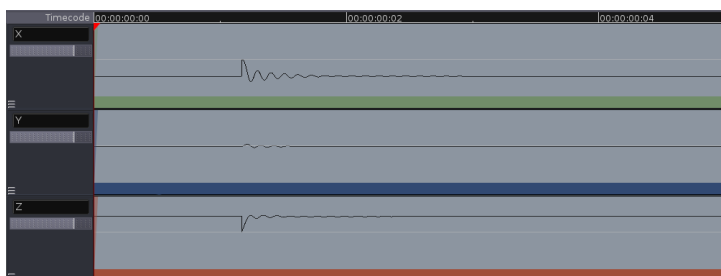


Figura 6.4: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 5$.

In questo caso l'oscillatore mostra un comportamento convergente a un punto fisso. I suoni prodotti dalla simulazione dell'oscillatore, assumendo come condizione iniziale il punto di coordinate $x = 0,001$; $y = 0,001$; $z = 0,001$ sono costituiti da oscillazioni smorzate che si estinguono dopo un certo periodo di tempo. Nella parte alta della figura è riportata la griglia del "timecode" che consente di misurare la durata del suono. Nel caso in considerazione l'oscillazione smorzata è estremamente breve poichè dura soltanto due frame del timecode che adotta lo standard di 24 frame per secondo. La figura 6.5 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 6$.

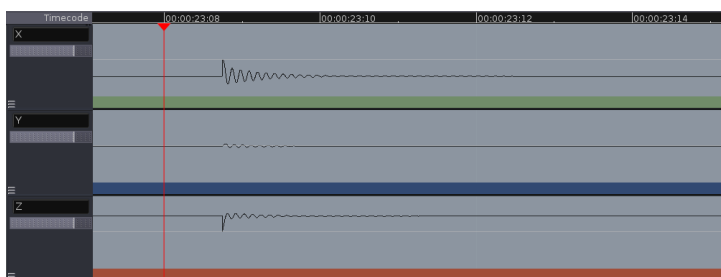


Figura 6.5: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 6$.

L'oscillatore mostra ancora un comportamento convergente a un punto fisso, ma in questo caso aumenta l'intervallo di tempo per raggiungere la condizione di stabilità. I suoni prodotti dalla simulazione dell'oscillatore sono, quindi ancora delle oscillazioni smorzate di durata maggiore del caso precedente. La maggiore durata del suono consente di percepire un suono ad altezza determinata molto simile a un suono puro sinusoidale. La griglia del timecode mostra una durata approssimativa di 4 frame, circa il doppio del caso precedente. La figura 6.6 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7$.

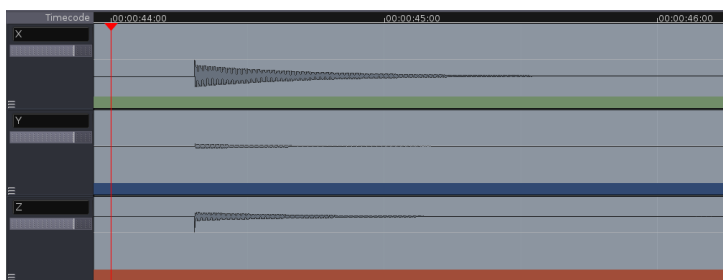


Figura 6.6: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7$.

Al crescere del valore del parametro α la durata del suono aumenta, anche se il comportamento dell'oscillatore rimane ancora quello di convergere verso un punto fisso. Dalla griglia del timecode mostrata in figura è possibile osservare che la durata del suono è maggiore di un secondo. L'ascolto rende possibile discriminare i tre diversi casi finora presentati. Infatti, anche se dal punto di vista dell'altezza e del contenuto frequenziale i tre casi sono pressochè indistinguibili, la variazione delle durate connessa alla presenza di diversi involucri d'ampiezza rende molto diversi fra loro i tre suoni. Il primo suono è percepito come un suono impulsivo o percussivo, il secondo è un suono di breve durata con un decadimento piuttosto rapido che comunque non impedisce la possibilità di percepirne l'altezza e la natura quasi-sinusoidale. Il terzo, infine, è un suono prolungato caratterizzato da un lento decadimento. Al crescere del valore del parametro α la durata del suono continua ad aumentare e il decadimento diventa sempre più lento. Infatti nella figura 6.7 sono riportate le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7,05$ in cui è possibile osservare che il suono ha una durata di circa 25 secondi.

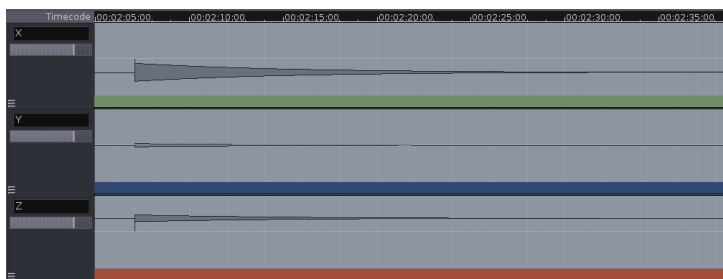


Figura 6.7: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7,05$.

Al crescere del valore del parametro α il comportamento dell'evoluzione temporale dell'oscillatore di Chua cambia radicalmente trasformandosi in un'oscillazione di tipo periodico. La natura dell'attrattore che caratterizza il sistema si trasforma da un punto fisso a un ciclo limite. Il suono prodotto consiste in un suono prolungato ad altezza determinata in cui è possibile riconoscere una o più componenti armoniche. Inoltre, l'ascolto consente di riconoscere una variazione periodica d'ampiezza percepibile sotto forma di modulazione dell'intensità del suono. La figura 6.8 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7,055$ in cui è visibile la variazione periodica dell'ampiezza delle forme d'onda.

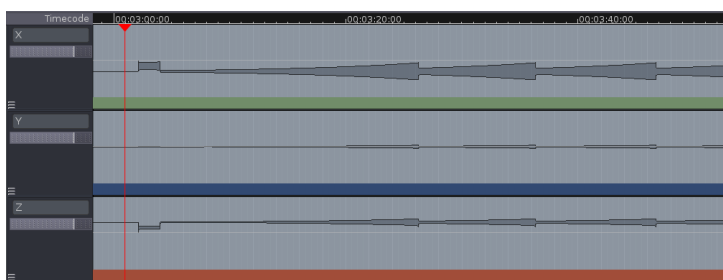


Figura 6.8: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 7,055$.

Il successivo aumento del valore del parametro α non introduce modifiche sul tipo di comportamento manifestato dal sistema caotico. L'altezza del suono rimane piuttosto stabile, mentre varia la frequenza della variazione dell'ampiezza che cresce all'aumentare del valore del parametro. La figura 6.9 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 8$ in cui è visibile l'aumento della frequenza della variazione periodica dell'ampiezza.

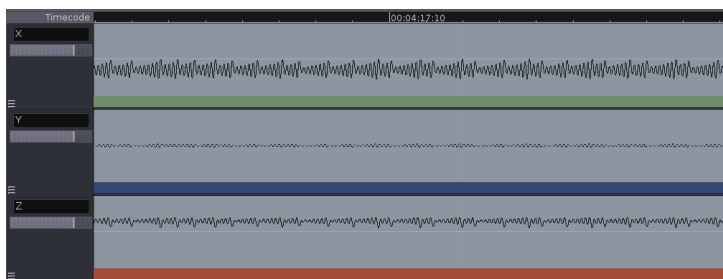


Figura 6.9: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 8$.

La modifica del valore del parametro α nell'intervallo fra 8 e 9 causa il fenomeno dei raddoppiamenti di periodo in cascata che porta alla transizione tra periodicità e caos. L'ascolto dei suoni prodotti dall'oscillatore rende percepibile la rilevante variazione del timbro determinata dalla ridotta predominanza della componente periodica quasi-sinusoidale e dall'emergere di numerose altre componenti spettrali. Per valori del parametro prossimi a 9 il comportamento dell'oscillatore cambia nuovamente verso l'insorgere dell'attrattore strano chiamato "double scroll". La figura 6.10 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 9$ in cui è visibile l'andamento delle forme d'onda tipiche dell'attrattore caotico.

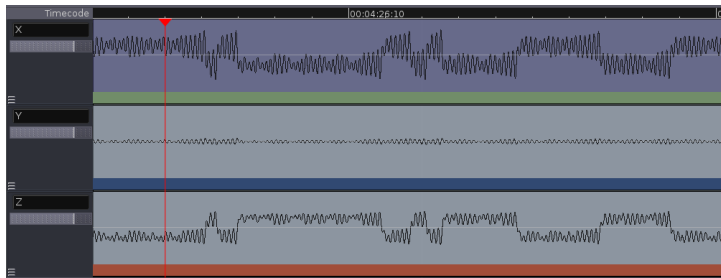


Figura 6.10: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 9$.

Al crescere del valore del parametro fra 9 e 10 l'evoluzione secondo l'attrattore "double scroll" rimane stabile anche se il contenuto spettrale del segnale si modifica profondamente determinando la percezione di suoni dal timbro molto differente l'uno dall'altro. L'attrattore caotico è caratterizzato da un suono simile a un rumore in cui sono però facilmente riconoscibili delle strutture ritmiche e delle ricorrenze piuttosto tipiche. La figura 6.11 mostra le forme d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 10$. Per valori del parametro maggiori di dieci la simulazione numerica dell'oscillatore diventa molto instabile portando a evoluzioni che divergono in maniera esponenziale anziché convergere verso degli attrattori stabili.

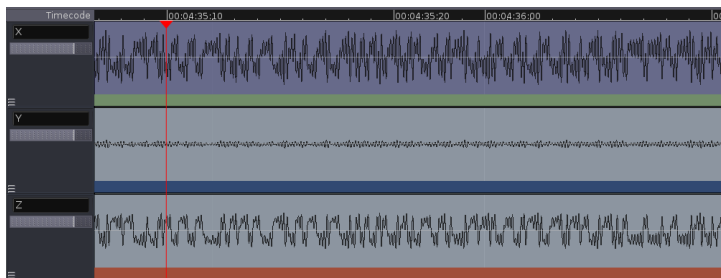
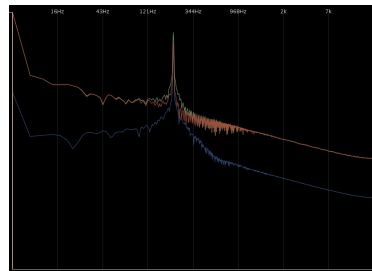
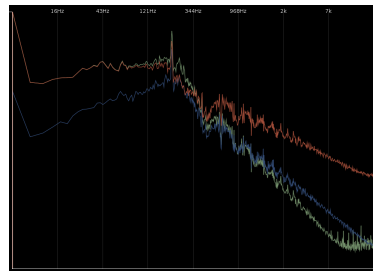


Figura 6.11: Forma d'onda dei suoni prodotti per $\alpha = 10$.

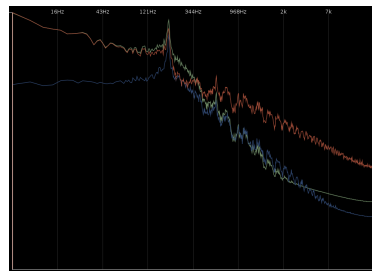
La variazione del contenuto spettrale del suono ottenuto dalla codifica delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua può essere rappresentata visivamente mediante il grafico ottenuto dall'analisi della distribuzione di frequenze presente nel segnale. La figura 6.12 mostra l'analisi spettrale per quattro diversi valori del parametro α in cui è possibile osservare la transizione fra la prevalenza di una sola componente di frequenza relativa al comportamento periodico fino all'emergere, nel caso del comportamento caotico, di uno spettro a banda larga, simile a quello che caratterizza i rumori che presentano una distribuzione di frequenza di tipo $\frac{1}{f}$.



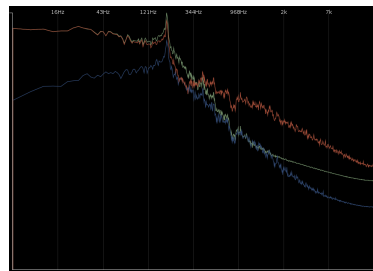
(a) Spettri sonori per $\alpha = 7,055$.



(b) Spettri sonori per $\alpha = 8$.



(c) Spettri sonori per $\alpha = 9$.



(d) Spettri sonori per $\alpha = 10$.

Figura 6.12: Analisi spettrale dei suoni prodotti dall'oscillatore di Chua.

6.2 Musiche

La generazione di musiche mediante un sistema dinamico caotico può essere realizzata tramite tre diversi approcci:

sincrono: Il *Delta Time*, ossia l'intervallo di tempo che intercorre fra due note consecutive², rimane costante. Le note sono prodotte a intervalli regolari di tempo mediante l'uso di un metronomo che scandisce il processo d'integrazione numerica del sistema dinamico e, dunque, la produzione delle note musicali;

asincrono: Il *Delta Time* tra le note varia nel tempo. In tal modo è possibile creare degli andamenti ritmici caratterizzati dal succedersi di durate differenti. L'evoluzione di un sistema dinamico può essere codificata anche tramite il parametro relativo alla durata delle note;

asincrono con filtraggio: Questo approccio è molto simile al precedente, ma si introduce un filtraggio sulla durata e sul delta time fra le note in maniera che sia, con un certo grado d'approssimazione, congruente con un dato valore di tempo espresso in BPM (Battiti Per Minuto).

La scelta di uno dei tre approcci in molti casi può essere determinata dalla scelta del sistema di codifica che spesso influisce sul tipo di generazione, sincrona o

²Il Delta Time si trova indicato in letteratura anche con l'acronimo "*IOI - Inter Onset Interval*". Si è scelto di utilizzare il termine Delta Time poichè è maggiormente utilizzato nella letteratura relativa all'Informatica musicale e alla creazione di sistemi d'interazione musicali basati sull'uso del calcolatore.

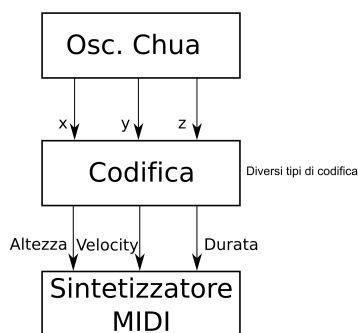
asincrona, del materiale musicale. Infatti, alcuni sistemi di codifica consentono di produrre materiale solo in maniera asincrona oppure, viceversa, soltanto in maniera sincrona. Alcuni altri sistemi di codifica consentono di realizzare entrambi i tipi di approcci, in tal caso, dunque, la scelta ricade quindi sulla volontà dello sperimentatore.

I sistemi dinamici possono essere utilizzati per controllare simultaneamente uno o più parametri musicali. Nel caso del controllo di un solo parametro musicale è possibile, per esempio, prendere in considerazione l'altezza delle note. Se si considera un sistema dinamico tridimensionale, come l'oscillatore di Chua, esso produce tre serie temporali, una per ciascuna delle tre variabili di stato, che possono produrre tre diverse linee melodiche. Ognuna di queste può essere assegnata a tre strumenti musicali diversi in maniera da realizzare tramite il timbro del suono la differenziazione delle tre melodie. In questo caso è possibile utilizzare sia un approccio sincrono, sia asincrono.

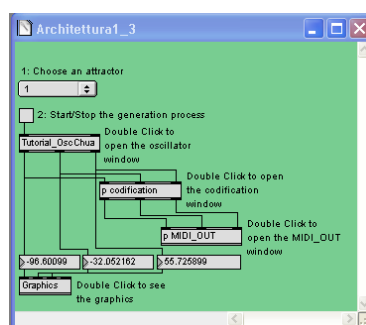
Nel caso in cui si voglia controllare più parametri musicali simultaneamente è possibile fare ricorso ai concetti introdotti nel capitolo precedente per quanto riguarda gli spazi musicali. Tramite uno spazio musicale appositamente definito è possibile definire un sistema di codifica che instauri una corrispondenza tra lo spazio musicale e lo spazio delle fasi del sistema dinamico. Ciò al fine di trasformare la traiettoria del sistema dinamico, all'interno del suo spazio delle fasi, in una evoluzione corrispondente dei parametri all'interno dello spazio musicale. Tramite questo approccio, se si prende in considerazione uno spazio musicale costituito da intervalli d'altezza, intervalli d'intensità e durate, così come quello presentato nella sezione 5.2.2, l'evoluzione dell'oscillatore produce un'unica linea melodica caratterizzata dall'evoluzione simultanea dei parametri altezza, intensità e durata.

6.2.1 Sistemi per la generazione di musiche

L'**Architettura 1.3** rappresenta il più semplice sistema generativo per la produzione di musiche dai sistemi dinamici. Quest'architettura è composta dai tre elementi, già descritti nella sezione 5.3.2, necessari per la realizzazione di un sistema di musica generativa. La figura 6.13 mostra uno schema dell'**Architettura 1.3** per generare musica tramite l'oscillatore di Chua.



(a) Schema dell'architettura.



(b) Finestra dell'architettura realizzata in Max/MSP.

Figura 6.13: Architettura1.3.

Nel'esempio riportato in figura il generatore, ossia il sistema dinamico che produce le serie temporali, consiste nell'oscillatore di Chua, mentre il motore audio per realizzare la rappresentazione musicale delle sequenze numeriche consiste in un sintetizzatore MIDI che produce le note musicali in base alle informazioni prodotte dal sistema di codifica. Le serie temporali prodotte dal sistema dinamico possono essere codificate secondo approcci diversi: è possibile produrre tre differenti linee melodiche, una per ogni variabile del sistema, oppure si può codificare ogni serie temporale tramite uno dei vari parametri musicali di una stessa linea melodica. Inoltre è possibile utilizzare diversi tipi di codici che determinano rappresentazioni musicali molto differenti le une dalle altre. Il *mapping lineare* è il sistema di codifica più semplice da utilizzare in questo tipo di applicazione poichè consente di trasformare in maniera semplice e fedele l'evoluzione delle serie temporali, definite in un dato intervallo, nell'evoluzione di una seconda variabile definita in un intervallo completamente differente. Nel caso di sistemi dinamici caratterizzati da più di una variabile, il sistema di codifica consente di scegliere quale delle serie temporali usare per controllare ciascuno dei tre parametri musicali altezza, velocity, durata. Per quanto riguarda il parametro durate è possibile utilizzare due diversi approcci, entrambi di tipo asincrono:

- codifica delle durate – si mappa l'intervallo di valori in cui avviene l'evoluzione della serie temporale in un corrispondente intervallo di durate musicali;
- derivata nulla – si suona una nota ogni volta che si trova un punto di massimo e di minimo in una data serie temporale;

Anche la scelta del motore audio e la sua particolare configurazione costituiscono elementi importanti che permettono di ottenere un'ampia varietà di rappresentazioni uditive differenti. Per esempio l'**Architettura 1.4** è stata ottenuta a partire dalla precedente modificando il sistema di codifica e modificando la configurazione del motore audio. Quest'architettura consente di generare delle sequenze di note MIDI utilizzabili per il controllo di suoni di percussioni. Il sistema di codifica utilizzato è basato sull'individuazione dei punti di massimo e minimo relativi nelle tre serie temporali ogni volta che si rileva, nell'evoluzione di una data serie temporale, un punto di massimo o minimo relativo viene generato un evento che causa l'esecuzione del suono percussivo associato a quella data serie temporale.

Un'altro interessante esempio di ciò si trova nel caso dell'**Architettura 2**, costituita dall'impiego combinato dell'**Architettura 1.3** con uno degli strumenti musicali, presentati nel seguito nella sezione 6.3, basato sull'impiego di sistemi dinamici per la sintesi del suono. Come nell'**Architettura 1.3**, le serie temporali vengono trasformate in sequenze di note musicali, le note così prodotte controllano un sintetizzatore basato sull'impiego dello stesso sistema dinamico per la sintesi del suono. Gli esperimenti finora compiuti sono stati realizzati utilizzando come motore audio il Chaotic Synth, strumento presentato in seguito nella sezione 6.3.1, ma, in maniera analoga, si può utilizzare qualsiasi altro strumento musicale.

6.2.2 Rappresentazioni musicali

Le architetture finora presentate consentono di realizzare anche delle rappresentazioni musicali dell'evoluzione temporale dei sistemi dinamici. Nel seguito si presenteranno alcuni esempi in cui s'impiega l'**Architettura 1.3** per trasformare in sequenze di note musicali i vari comportamenti tipici delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua. In maniera analoga a quanto presentato per le rappresentazioni sonore, si presenteranno i risultati musicali ottenibili percorrendo la strada verso il caos che, al variare del parametro α , porta alla formazione dell'attrattore "double scroll". La figura 6.14 mostra la rappresentazione "piano roll" della sequenza di note prodotte per $\alpha = 5$.

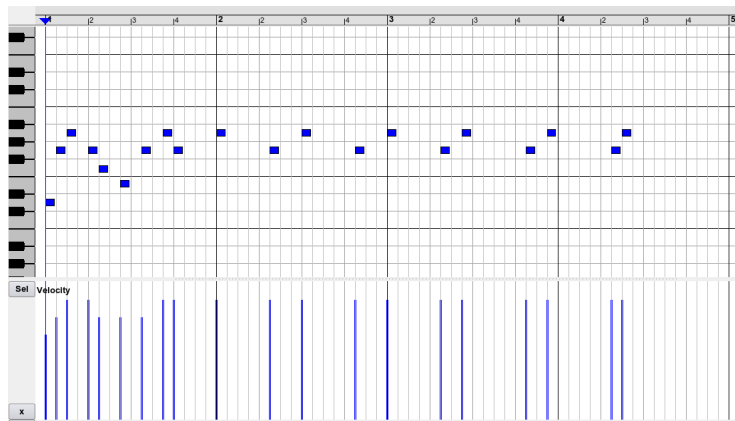


Figura 6.14: Sequenza di note prodotta per $\alpha = 5$.

La simulazione è stata condotta assumendo come condizione iniziale il punto di coordinate: $x = 0,5$; $y = 0,5$; $z = 0,5$. Nella figura è possibile osservare una successione di note, relativa all'evoluzione della variabile di stato x , in cui è possibile riconoscere delle oscillazioni smorzate che, estinguendosi in un certo periodo di tempo, portano il sistema a convergere verso un punto fisso. Il sistema di codifica impiegato consiste nella codifica mediante tabella. La stessa serie temporale è stata impiegata per codificare sia il parametro altezza delle note, sia la loro intensità. Nella parte bassa dell'immagine è riportato anche il grafico del parametro velocity delle varie note che mostra un andamento analogo a quello delle altezze. La figura 6.15 mostra la rappresentazione "piano roll" della sequenza di note prodotte per $\alpha = 6$.

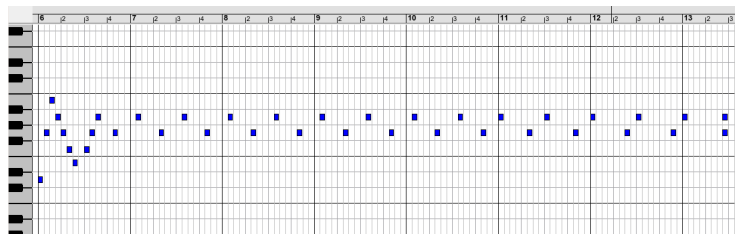


Figura 6.15: Sequenza di note prodotta per $\alpha = 6$.

In questo caso è possibile osservare, ma soprattutto ascoltare, una maggiore durata del processo di estinzione delle oscillazioni smorzate. La figura 6.16, invece, mostra la rappresentazione “*piano roll*” della sequenza di note prodotte per $\alpha = 7$. Lo smorzamento delle oscillazioni è in questo caso ancora più lento del precedente determinando una lunga successione alternata delle due note Sol e La. L’immagine riporta soltanto la parte iniziale di tale sequenza.

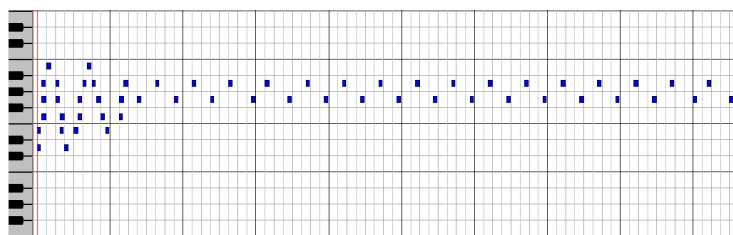
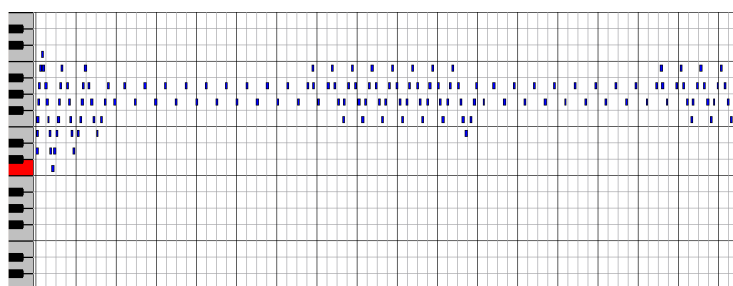
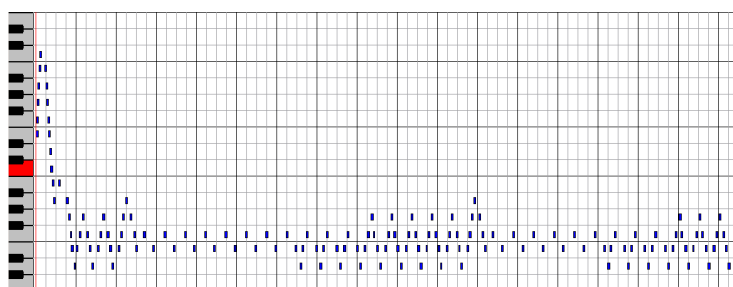


Figura 6.16: Sequenza di note prodotta per $\alpha = 7$.

Come già illustrato per valori del parametro maggiori di 7 il comportamento dell’oscillatore subisce una trasformazione diventando di natura periodica. Le immagini in figura 6.17 mostrano due sequenze di note relative a condizioni iniziali differenti ottenute per un valore di $\alpha = 7,4$.



(a) Sequenza di note relativa alla condizione iniziale: $x = 0,5$; $y = 0,5$; $z = 0,5$.



(b) Sequenza di note relativa alla condizione iniziale: $x = 0,8$; $y = 0,5$; $z = 0,5$.

Figura 6.17: Sequenze di note prodotta per $\alpha = 7,4$.

Con il variare della condizione iniziale il sistema può evolvere secondo due diversi cicli limite. L’immagine (a) mostra una simulazione realizzata assumendo

come condizione iniziale il punto di coordinate $x = 0,5$; $y = 0,5$; $z = 0,5$, mentre l'immagine (b) riporta l'evoluzione relativa alla condizione iniziale fissata nel punto di coordinate $x = 0,8$; $y = 0,5$; $z = 0,5$. L'ascolto, così come anche la rappresentazione grafica della sequenza di note, rende possibile distinguere le due diverse evoluzioni che generano sequenze di note differenti che evolvono all'interno di due ottave diverse. Il tasto evidenziato in entrambe le immagini corrisponde alla nota C-3, usualmente il Do posto al centro della tastiera del pianoforte. In entrambe le figure è possibile riconoscere sia un andamento periodico fra due o più note, sia una ricorrenza di strutture su una scala più ampia. Infine la figura 6.18 mostra la rappresentazione della sequenza di note prodotte per $\alpha = 9$. In questo caso la sequenza riporta l'evoluzione della serie temporale prodotta dall'attrattore caotico.

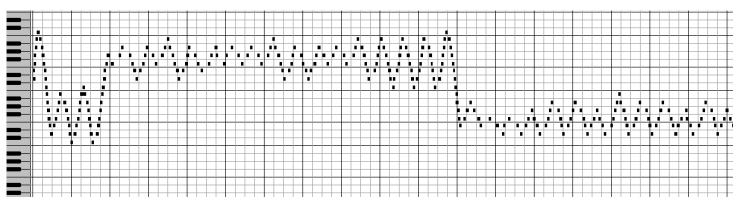


Figura 6.18: Sequenza di note prodotta per $\alpha = 9$.

6.2.3 Tecniche di composizione

Le sequenze melodiche prodotte mediante i sistemi generativi possono essere utilizzate come materiali “grezzi” da cui avviare un processo di organizzazione e di composizione finalizzato alla realizzazione di brani musicali con una struttura organica. L'atto compositivo risulta di fondamentale importanza poichè consente di imprimere una struttura e una organizzazione musicale su del materiale spesso molto suggestivo tanto quanto carente di coerenza e di senso musicale. Questi limiti riguardano soprattutto i livelli gerarchici superiori relativi alle strutture tematiche e all'organizzazione della forma.

Il materiale musicale ottenuto impiegando una delle architetture appena descritte può essere trasformato in dei file MIDI importabili nei vari programmi specializzati per l'editing musicale. In questi ambienti software l'utente può manipolare il materiale MIDI al fine di creare strutture musicali di alto livello che contribuiscono a definire la forma del brano musicale. Per realizzare quest'operazione si può anche far ricorso a trasformazioni del materiale musicale che consentono di lasciare invariate alcune sue proprietà, mentre inseriscono elementi di differenza che introducono nel fluire musicale elementi di novità e di sorpresa. Queste trasformazioni hanno sempre fatto parte del bagaglio di strumenti a disposizione dei compositori per realizzare specifiche forme musicali, per eseguire sviluppi melodici e arrangiamenti di idee musicali. Queste trasformazioni possono essere viste come trasformazioni geometriche di una linea melodica rappresentata mediante una sequenza di punti in un piano. Nella sezione 5.1.3 si è mostrato come l'uso del pentagramma musicale ha storicamente influenzato lo sviluppo della geometria analitica, è dunque possibile, compiendo approssimativamente il percorso inverso, rappresentare le note mediante entità geometriche e applicare sugli insiemi di punti trasformazioni geometriche che

ne modificano le proprietà musicali. Operazioni musicali, quali per esempio: la trasposizione, il retrogrado, l'inversione, l'aumentazione o la diminuzione, e i loro corrispettivi geometrici traslazioni, dilatazioni e simmetrie, possono essere applicate nella fase di composizione per la creazione di strutture musicali articolate che contribuiscano alla creazione di una forma musicale.

L'attività compositiva, oltre che concentrarsi sulla creazione di forme e di strutture di alto livello, capaci di dare senso e coerenza al fluire dei materiali generati mediante l'uso di sistemi dinamici, si concentra anche sull'orchestrazione, sull'assegnazione delle varie parti ai diversi strumenti e sulla scelta delle sonorità e delle ambientazioni sonore delle diverse sezioni dei brani. Le varie tecniche di codifica musicale, di composizioni, arrangiamento e orchestrazione sono state impiegate per la realizzazione di alcuni brani musicali che saranno presentati in dettaglio nella sezione 9.1.

6.3 Nuovi strumenti musicali

La sperimentazione dell'uso dei sistemi dinamici all'interno degli algoritmi di sintesi del suono ha portato allo sviluppo e alla realizzazione di nuovi “*strumenti musicali*”. Tali strumenti sfruttano le potenzialità offerte dall'impiego di sistemi caotici per produrre timbri e nuove sonorità da utilizzare per la produzione di brani musicali, per la realizzazione di performance live o di installazioni multimediali. L'attività di ricerca svolta in questa direzione ha portato alla creazione di tre diversi prototipi di sintetizzatori attualmente ancora in fase sperimentale. Il primo strumento, chiamato “**Chaotic Synth**”, è basato sull'impiego dell'oscillatore di Chua per la generazione diretta del suono. Il secondo prototipo, chiamato “**Timbralizer**”, è basato sulla codifica dell'evoluzione di serie temporali sotto forma di cambiamenti del timbro del suono. Infine, il terzo strumento, chiamato “**Chaotic Modulator**”, è basato su un sistema di sintesi del suono per modulazione di frequenza in cui s'impiega l'oscillatore di Chua.

6.3.1 Chaotic Synth

Il “**Chaotic Synth**” è uno strumento in cui il processo di generazione del suono è basato esclusivamente sull'oscillatore di Chua. Mediante la variazione dei parametri di controllo di questo sistema dinamico è possibile modificare separatamente sia la frequenza fondamentale del suono, dunque, l'altezza percepita, sia il suo contenuto spettrale, quindi, il timbro del suono prodotto. Il Chaotic Synth è stato realizzato impiegando l'ambiente di programmazione visuale Max/MSP.

In letteratura diversi autori hanno impiegato l'oscillatore di Chua per generare suoni. Inoltre alcuni lavori si concentrano anche sullo sviluppo di sistemi di controllo capaci di variare i parametri del sistema al fine di modificarne il comportamento e, quindi, influire sulla natura dei suoni prodotti. Infatti, come già detto in precedenza, i valori assunti dai sei parametri del modello adimensionale dell'oscillatore di Chua determinano l'evoluzione temporale e il tipo di comportamento globale del sistema. Da un punto di vista qualitativo, due diversi comportamenti suscitano particolare interesse per la generazione del suono: l'evoluzione secondo un ciclo limite, caratterizzato da un certo periodo, e l'evoluzione secondo un attrattore strano. L'esplorazione uditiva dello spazio dei

parametri ha condotto a distinguere questi due diversi comportamenti qualitativi mediante la percezione di suoni con un timbro prevalentemente armonico nel primo caso e un timbro prevalentemente inarmonico, con un'elevata componente di rumore, nel secondo caso. Inoltre, l'esplorazione uditiva dello spazio dei parametri ha portato a individuare una certa variazione della frequenza fondamentale del suono in funzione della modifica dei parametri. La constatazione di questi due fenomeni ha spinto a sfruttare tale dipendenza per realizzare un sistema di controllo capace di “*accordare*” l'oscillatore di Chua al fine di poter generare suoni con altezza e timbro determinati. L'immagine in figura 6.19 mostra tre differenti viste dello spazio delle fasi dell'oscillatore di Chua, relative ai piani $x - z$, $y - z$, $y - x$, in cui è rappresentata l'evoluzione dell'oscillatore secondo un ciclo limite.

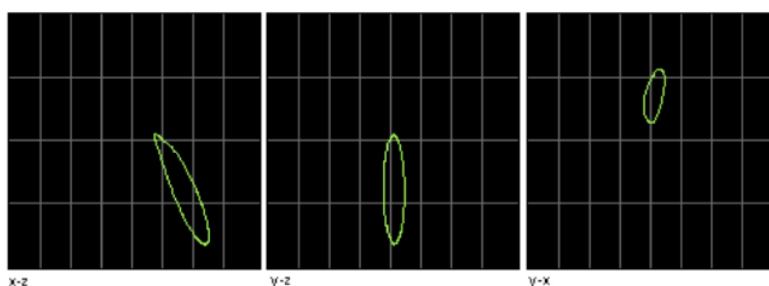


Figura 6.19: Evoluzione secondo un ciclo limite.

Il suono prodotto dal Chaotic Synth viene ottenuto sommando i valori assunti nei vari istanti di tempo dalle tre variabili di stato x , y , z dell'oscillatore di Chua. L'immagine in figura 6.20 mostra un breve tratto della forma d'onda generata dallo strumento in corrispondenza dell'evoluzione secondo il ciclo limite mostrato in precedenza.

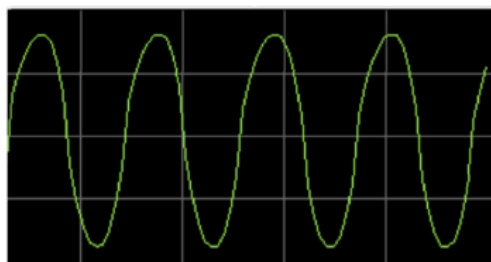


Figura 6.20: Forma d'onda del suono.

Il processo di “*accordatura*” è stato realizzato per via empirica attraverso la definizione di un meccanismo che consente di calcolare i valori dei parametri di controllo dell'oscillatore di Chua che rendono possibile generare un segnale con un dato valore di frequenza fondamentale. Tramite l'uso di strumenti di analisi finalizzati a misurare l'altezza e il contenuto spettrale del suono prodotto dall'oscillatore di Chua si è cercato d'individuare tre insiemi di punti campione che definiscono le relazioni che intercorrono fra la variazione di frequenza e la variazione dei parametri α , β , γ dell'oscillatore di Chua. Il processo d'individuazione

di tali punti è stato compiuto con l'intento di mantenere invariato il contenuto spettrale del suono prodotto. Ciò al fine di generare suoni con altezze differenti, ma tutti approssimativamente caratterizzati dallo stesso timbro sonoro. Tramite un processo di regressione lineare sugli insiemi di punti così ottenuti è stato possibile determinare tre funzioni che al variare della frequenza del suono forniscono il valore corrispondente dei parametri di controllo. Il processo d'individuazioni di tali funzioni caratteristiche è stato condotto fino a ottenere tre curve capaci di coprire un intervallo di frequenza compreso fra $60Hz$ e $2000Hz$. In tal modo è possibile comprendere un'ampia gamma di altezze che risulta adeguata per la maggior parte delle applicazioni musicali. La determinazione delle tre funzioni caratteristiche rende possibile "accordare" l'oscillatore di Chua poiché impostando il valore della frequenza fondamentale del suono, mediante una tastiera o un qualsiasi altro dispositivo MIDI, possono essere ricavati i valori dei tre parametri dell'oscillatore capaci di produrre un suono caratterizzato dalla frequenza voluta.

Oltre al controllo dell'altezza del suono è possibile modificare il suo contenuto spettrale e, dunque, il timbro percepito. Questa modifica può essere realizzata operando principalmente sul controllo della transizione fra comportamento periodico e caotico dell'oscillatore. L'analisi sperimentale condotta inizialmente ha spinto a concentrare l'attenzione sui parametri a e b dell'oscillatore di Chua che sono strettamente legati alla forma della caratteristica non-lineare del diodo di Chua. A livello qualitativo si è osservato che, a partire dalla configurazione di parametri che in letteratura si trova associata all'attrattore chiamato "double scroll", aumentando il valore del parametro a l'evoluzione del sistema cambia passando da un attrattore strano, tipico del comportamento caotico, a un ciclo limite. Questa transizione, in genere, avviene con una lievissima modifica della frequenza fondamentale del suono, per tale motivo si è scelto di utilizzare il parametro a per controllare il contenuto spettrale del suono in maniera indipendente dalla sua altezza.

L'approccio utilizzato per controllare i parametri dell'oscillatore di Chua mostra buoni risultati poiché è possibile generare suoni ad altezza determinata in un campo di frequenza nell'intervallo $60 - 2000Hz$, i suoni generati possono avere sia un contenuto spettrale di tipo armonico, sia un contenuto fortemente inarmonico. La transizione fra i due estremi del contenuto spettrale può essere opportunamente controllata consentendo di ottenere un'ampia gamma di timbri diversi. Tutto ciò ha consentito di realizzare il primo prototipo del Chaotic Synth il cui funzionamento è basato sull'esplorazione dello spazio dei parametri prossimo alla configurazione corrispondente al ben noto attrattore chiamato "double scroll". In letteratura è stato mostrato che l'oscillatore di Chua dà luogo a una vastissima collezione di attrattori strani dalle forme e dall'evoluzioni dinamiche molto diverse [17], per cui i risultati ottenuti potranno essere estesi e confermati anche tramite l'esplorazione di altre zone dello spazio dei parametri di questo sistema dinamico.

6.3.2 Timbralizer

Il "Timbralizer" [86] è uno strumento in cui si controllano i parametri di un sistema di sintesi sonora mediante l'impiego di sistemi dinamici. In particolare, la loro evoluzione viene utilizzata per modificare il timbro del suono generato dallo strumento. Questo tipo di approccio sembra essere molto promettente,

specialmente dal punto di vista delle applicazioni musicali, poiché lascia la possibilità all'utente di controllare, tramite un qualsiasi dispositivo MIDI, i parametri musicali delle note (altezza, intensità, durata). Il **Timbralizer** è stato creato impiegando l'ambiente di programmazione visuale Max/MSP. L'immagine in figura 6.21 mostra la finestra del prototipo del "**Timbralizer-1D**". Sono state sviluppate tre differenti versioni da impiegare con sistemi a una dimensione, a due dimensioni e a tre dimensioni. Il prototipo della versione monodimensionale è completamente funzionante, mentre le altre due versioni sono ancora in fase di sperimentazione e sviluppo. Nell'immagine dell'interfaccia utente è visibile in alto a sinistra la finestra che mostra l'evoluzione del sistema dinamico e in basso la finestra che rappresenta la forma d'onda generata dal sintetizzatore.

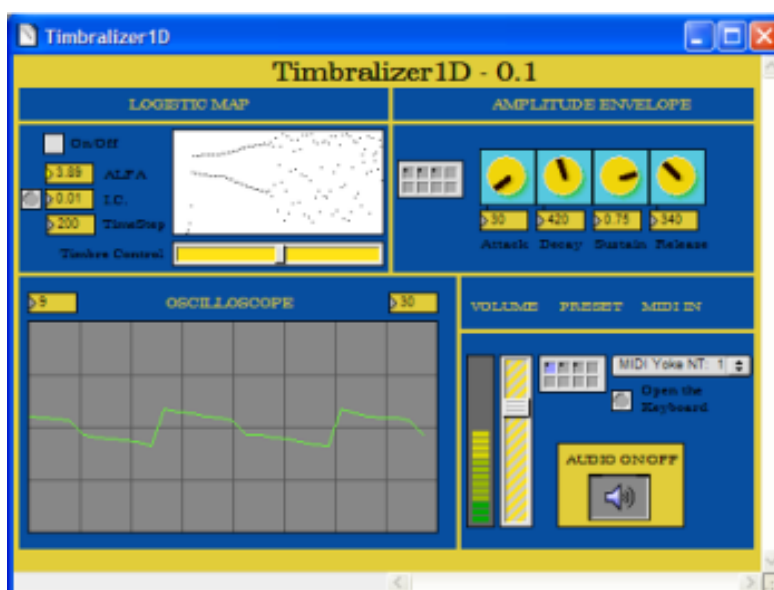


Figura 6.21: Interfaccia grafica del Timbralizer-1D.

Nel **Timbralizer-1D** la serie temporale prodotta da un sistema dinamico monodimensionale, nell'esempio è stata impiegata la mappa logistica, viene trasformata nell'evoluzione del timbro del suono generato dallo strumento. Diversi ricercatori hanno proposto in letteratura rappresentazioni spaziali del timbro differenti utili per l'analisi, la classificazione e la sintesi dei suoni. L'idea che accomuna i vari approcci consiste nel definire un insieme di parametri sonori come coordinate di uno spazio timbrico. In tal modo un dato timbro può essere rappresentato univocamente nello spazio mediante le sue coordinate. Gli spazi timbrici possono essere utilizzati anche per la creazione di "*sound morphing*", ossia trasformazioni continue del suono definite tramite delle opportune funzioni, dette di "*morphing*", che controllano la natura stessa del materiale sonoro. Tali trasformazioni consentono di realizzare, in funzione di un parametro di controllo, l'interpolazione fra due timbri differenti in maniera da ottenere, da un lato un suono che coincide a uno dei due suoni originari nel caso ci si collochi agli estremi del campo di variazione del parametro di controllo, e d'altra parte, dei suoni ibridi per tutti i valori intermedi del parametro di controllo. I suoni

ibridi posseggono, con gradi diversi, le varie caratteristiche di entrambi i suoni.

Il Timbralizer impiega una codifica basata su un sound morphing tra due ben definite forme d'onda per trasformare una serie temporale nell'evoluzione del timbro. Il sistema di sintesi impiegato é di tipo additivo ed é caratterizzato dalla somma di dieci parziali sinusoidali. Un'opportuna funzione di mapping consente di controllare tramite un unico parametro l'ampiezza di tutte le parziali. Questa funzione é stata definita in maniera da ottenere al variare del valore del parametro una trasformazione tra una forma d'onda a dente di sega e un'onda quadra. L'onda a dente di sega può essere ottenuta utilizzando la seguente distribuzione delle ampiezze delle parziali armoniche utilizzate nel processo di sintesi additiva:

$$a_k = \begin{cases} -\frac{1}{k} & \text{per } k \text{ pari} \\ \frac{1}{k} & \text{per } k \text{ dispari} \end{cases} \quad (6.2)$$

mentre l'onda quadra può essere sintetizzata impiegando la seguente distribuzione di ampiezze:

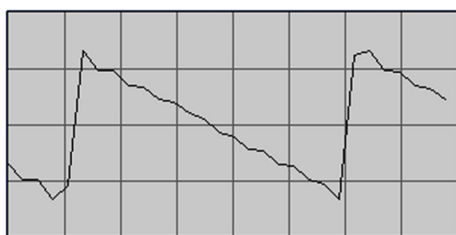
$$a_k = \begin{cases} 0 & \text{per } k \text{ pari} \\ \frac{1}{k} & \text{per } k \text{ dispari} \end{cases} \quad (6.3)$$

L'equazione del mapping che consente di realizzare l'interpolazione fra le due forme d'onda può essere scritto nella forma:

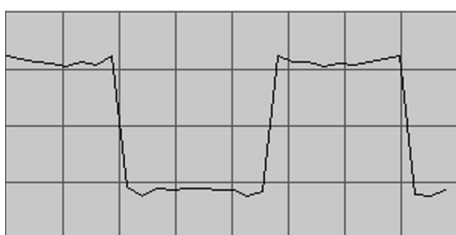
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{10} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{10} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

in cui x rappresenta il parametro di controllo che può variare nell'intervallo $[1, 100]$, e il vettore $Y = [y_1, \dots, y_{10}]$ contiene le variabili associate all'ampiezza delle parziali usate per la sintesi additiva del suono. Imponendo le condizioni relative alle distribuzioni delle ampiezze per le due forme d'onda è possibile ottenere un sistema di equazioni che rendono possibile calcolare i coefficienti che compongono i due vettori $A = [a_1, \dots, a_{10}]$ e $B = [b_1, \dots, b_{10}]$. Le immagini in figura 6.22 mostrano tre diverse forme d'onda ottenibili tramite il processo di morphing. L'immagine (a) mostra la forma d'onda a dente di sega ottenibile quando il parametro x è pari a 1, l'immagine (b) mostra l'onda quadra generata quando il parametro di controllo vale 100, infine la terza immagine mostra la forma d'onda prodotta per un valore intermedio del parametro ($x = 50$).

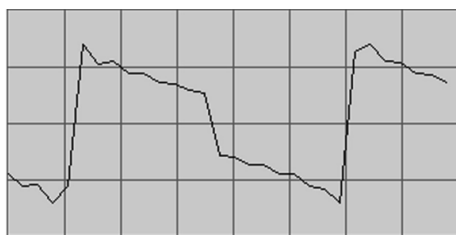
Il sintetizzatore é stato dotato di una interfaccia MIDI che consente all'utente il controllo dei parametri necessari alla generazione delle note, mentre il contenuto spettrale del suono prodotto dallo strumento evolve seguendo le serie temporali generate dal sistema dinamico preso in considerazione. Le prove effettuate hanno mostrato che questo strumento consente di realizzare una buona rappresentazione uditiva dell'evoluzione del sistema dinamico. É possibile infatti riuscire a seguire in maniera qualitativa e riconoscere tramite l'ascolto i comportamenti topologicamente diversi caratteristici dei sistemi dinamici caotici. Nel caso della mappa logistica, per esempio, é possibile riuscire a distinguere le tre diverse zone che caratterizzano il comportamento del sistema:



(a) Forma d'onda a dente di sega.



(b) Forma d'onda onda quadra.



(c) Forma d'onda intermedia.

Figura 6.22: Forme d'onda ottenute dal processo di morphing.

- convergenza ad un punto fisso ($\alpha < 2$)
- comportamento periodico ($2 \leq \alpha < 3.5$)
- comportamento caotico ($3.5 \leq \alpha < 4$).

Da un punto di vista artistico–musicale questo strumento può essere utilizzato per generare dei suoni caratterizzati da un'evoluzione del timbro estremamente ricca e interessante che si avvicina molto alla complessità dei suoni prodotti dagli strumenti naturali. È possibile controllare l'evoluzione del timbro operando su due distinti fattori:

- modifica dei parametri del sistema dinamico – le zone caotiche e le zone di transizione tra comportamento periodico e caotico generalmente consentono di ottenere sonorità più ricche e interessanti;
- modifica del periodo d'iterazione del sistema dinamico – in tal modo è possibile ottenere degli effetti di modulazione (tipo phaser, flanger) per valori inferiori a 100ms, oppure, per valori superiori, evoluzioni articolate del timbro.

Le versioni dello strumento relative a sistemi dinamici a due o tre dimensioni impiegano un'estensione del metodo finora presentato. Sono stati sperimentati diversi sistemi di mapping che consentono di realizzare morphing fra più di due forme d'onda in modo da ottenere due o tre parametri di controllo indipendenti che modificano il timbro del suono generato dal sintetizzatore. A tal fine ulteriori ricerche sono necessarie per la verifica e l'estensione dei risultati finora conseguiti.

6.3.3 Chaotic Modulator

Il “**Chaotic Modulator**” é uno strumento musicale in cui si impiega l'oscillatore di Chua all'interno di un processo di sintesi del suono per modulazione di frequenza. Il prototipo del Chaotic Modulator é stato creato impiegando l'ambiente di programmazione visuale Pure Data.

L'oscillatore di Chua genera tre distinte serie temporali ciascuna relativa a una delle tre variabili (x, y, z) che caratterizzano lo stato del sistema. Le tre serie di dati vengono utilizzate per modulare in frequenza tre oscillatori sinusoidali. Le frequenze portanti dei tre oscillatori sono scelte tramite rapporti armonici in modo che in assenza di modulazione forniscano un suono contenente la prima, la seconda e la quarta armonica. La frequenza fondamentale del sintetizzatore può essere controllata attraverso una tastiera o qualsiasi altro dispositivo MIDI. La figura 6.23 mostra una rappresentazione schematica del sistema di sintesi utilizzato per la realizzazione del Chaotic Modulator.

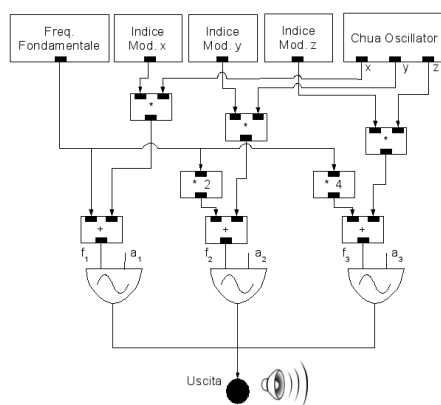


Figura 6.23: Schema del sistema di sintesi impiegato nel Chaotic Modulator.

Attraverso il controllo dei tre indici di modulazione (in alto nella figura 6.23) é possibile modificare il contenuto spettrale del suono passando da un suono con quasi esclusivamente parziali armoniche, nel caso di valori bassi dei tre indici, a un suono dal timbro articolato e con una forte presenza di componenti inarmoniche e di rumore, ottenuto per valori alti dei tre indici. La figura 6.24 mostra l'interfaccia grafica del sintetizzatore in cui é possibile osservare i diversi parametri che l'utente può modificare per cambiare la natura del suono prodotto dallo strumento.

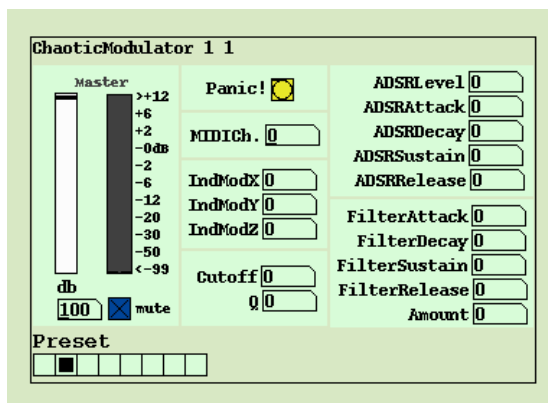


Figura 6.24: Interfaccia grafica del Chaotic Modulator.

6.4 Sistemi d'interazione per la musica generativa

L'**Architettura 3** rappresenta un sistema di musica generativa che fornisce all'utente un certo grado d'interazione nel controllo del processo di generazione del materiale musicale. Il sistema d'interazione può essere realizzato in molti modi; un esempio può essere il caso in cui l'utente fornisce la nota fondamentale sulla cui scala viene costruito un arpeggio basato sull'evoluzione dell'oscillatore di Chua [17]. L'interazione può essere stabilita sia usando una tastiera MIDI sia utilizzando un qualsiasi altro strumento musicale tramite l'invio in ingresso alla scheda audio di un segnale sonoro. Un processo di "*Pitch detection*" consente di valutare l'altezza del suono fornito in ingresso e definisce, dunque, la nota fondamentale dell'arpeggio. Il sistema generativo consente di definire il tipo di scala da utilizzare per la costruzione dell'arpeggio, maggiore, minore o di altro tipo, inoltre, è possibile definire l'ampiezza dell'intervallo, o meglio l'estensione, all'interno della quale realizzare l'arpeggio, e la trasposizione dell'arpeggio. La figura 6.25 mostra l'**Architettura 3** realizzata in Max/MSP.

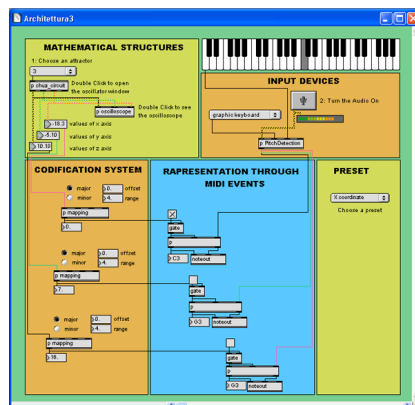


Figura 6.25: Architettura 3.

L'interazione è uno dei componenti essenziali della musica sia essa fra musicisti intenti nell'eseguire un brano musicale, sia fra singolo esecutore e il suo strumento musicale. Quest'ultima, forse, risulta essere la forma d'interazione più importante se si considera che lo studio e il perfezionamento di uno strumentista avviene lungo un periodo di tempo che abbraccia numerosi anni durante i quali ci si concentra nello sviluppo e nell'affinazione di tutti quei sottili meccanismi atti a padroneggiare il controllo e l'interazione con lo strumento musicale. Se tutto questo è valido per gli strumenti musicali tradizionali, come afferma precisamente Joel Chadabe nel suo libro *“Electric Sound”* [25], ciò è anche vero per gli strumenti elettronici. Per avvalorare questa ipotesi egli dedica un intero capitolo a questo argomento riportando una serie di esperimenti compiuti nel corso degli anni in questa direzione. Chadabe afferma che gli strumenti musicali elettronici, al pari degli strumenti musicali tradizionali, sono costituiti da:

- un *“performance device”* – un *“dispositivo di controllo”* che il musicista controlla durante la produzione del suono;
- un *“motore audio”* – un generatore capace di produrre il suono;
- un sistema che collega e mette in relazione queste due componenti.

La figura 6.26 mostra una rappresentazione schematica dei componenti di uno strumento musicale.

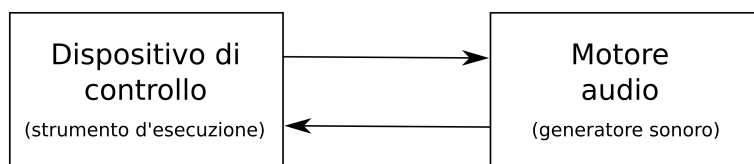


Figura 6.26: Schema dei componenti di uno strumento musicale.

Nel caso degli strumenti tradizionali il performance device è responsabile dell'inizio del suono dell'intero strumento, per questo motivo esso rappresenta una parte intrinseca allo strumento stesso. Al contrario in uno strumento musicale elettronico il dispositivo di controllo generalmente non è responsabile dell'inizio e della produzione del suono, dunque, non rappresenta una componente propriamente appartenente allo strumento stesso. Il mezzo impiegato per l'esecuzione serve esclusivamente per il controllo del suono prodotto dallo strumento. Da ciò deriva che qualsiasi tipo di dispositivo di controllo può essere collegato a qualsiasi tipo di generatore di suono. Inoltre, vale anche, al contrario, che un generatore sonoro può produrre qualsiasi tipo di suono in risposta a un qualunque tipo di strumento d'esecuzione. Infine, poiché il collegamento fra performance device e generatore sonoro viene realizzato via software, è possibile usare il dispositivo di controllo per manipolare qualsiasi aspetto della musica così come del suono.

L'interazione si manifesta nei diversi strumenti musicali tramite un processo di accoppiamento che rende mutuamente dipendenti l'azione dello strumento e quella dell'esecutore. Dunque uno strumento musicale, sia esso tradizionale o

elettronico si può definire interattivo soltanto nel caso in cui l'esecutore e lo strumento sono entrambi mutuamente coinvolti nel processo di generazione del materiale musicale. Il musicista è influenzato dal suono prodotto dallo strumento e quest'ultimo, allo stesso tempo, subisce l'azione di controllo svolta dal musicista. Uno strumento può definirsi interattivo, quindi, se è caratterizzato da un controllo sul processo di produzione del materiale musicale di tipo simultaneo e condiviso da parte dello strumento e dell'esecutore. In un tale strumento il sistema di generazione del suono e il giudizio musicale del musicista collaborano al fine di definire una forma globale al flusso sonoro.

Il sistema di interazione realizza l'accoppiamento fra il dispositivo di controllo e il generatore sonoro. Per tale motivo deve essere realizzato in maniera da consentire l'instaurarsi di un flusso d'informazione bidirezionale fra musicista e sistema generativo. L'obiettivo di tale sistema consiste nel realizzare una mutua interdipendenza fra i gesti musicali dell'utente e il materiale sonoro prodotto dal sistema generativo. Per questo motivo è importante definire sia delle interfacce che facilitino l'interazione fra musicista e macchina, sia dei sistemi di elaborazione dell'informazione proveniente dall'interfaccia, che rendano il sistema generativo realmente interattivo. La figura 6.27 mostra una rappresentazione schematica del sistema d'interazione che, posto tra musicista e strumento musicale, consente di stabilire un flusso d'informazione bidirezionale capace di produrre un controllo comune e condiviso sul materiale musicale prodotto.

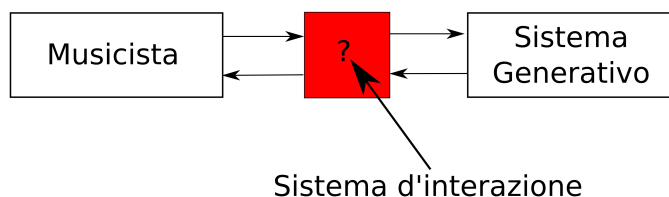


Figura 6.27: Schema della collocazione del sistema d'interazione.

Winkler [100] presenta una classificazione delle diverse tipologie di strumenti musicali che possono essere creati mediante l'impiego del calcolatore:

Strumento Virtuale: uno strumento virtuale è caratterizzato da un comportamento molto simile a quello di uno strumento musicale tradizionale, può essere infatti suonato tramite i consueti sistemi d'interazione dei calcolatori elettronici, tramite tastiere e dispositivi MIDI, oppure tramite altri strumenti d'interazione basati su sensori di vario genere;

Esecutore Virtuale: un esecutore virtuale può suonare insieme a un musicista reale interagendo in maniera da mostrare una "*intelligenza musicale*" che rende possibile il suo inserimento in contesti musicali quali un duo o una formazione più ampia e la realizzazione di ruoli diversi come l'accompagnamento o l'assolo;

Compositore Virtuale: un compositore virtuale crea musica originale sulla base di un apposito processo definito da un compositore reale; tale processo può essere utilizzato per produrre materiale musicale con cui comporre anche brani per strumenti tradizionali;

Ascoltatore e Critico Virtuale: questi due strumenti possono estrarre informazioni e formulare “*giudizi*” sul materiale musicale prodotto al fine di reagire e alterare il risultato finale di un’esecuzione musicale.

Il comportamento di tutte queste diverse entità può essere definito e descritto in maniera dettagliata dal compositore e implementato mediante un’opportuno programma. Winkler afferma che nella fase di progettazione e di realizzazione di tali strumenti lo sviluppatore deve porsi alcune importanti domande, quali per esempio:

- Chi dovrà suonare gli strumenti virtuali?
- In che modo un esecutore virtuale risponde ai vari stimoli musicali provenienti dall’ambiente esterno?
- In che modo un compositore virtuale genera, elabora e struttura il materiale musicale?
- Secondo quali criteri un critico virtuale giudica il successo oppure il fallimento di una esecuzione o un intero brano musicale?
- Quali sono gli aspetti critici di una esecuzione su cui si concentra l’attenzione di un ascoltatore virtuale?

Molte altre domande, caratterizzate da un livello crescente di dettaglio possono essere formulate e analizzate durante il processo di sviluppo di tali strumenti. La formulazione di risposte a simili domande può contribuire a guidare e correggere l’intero processo creativo che porta alla realizzazione di strumenti musicali interattivi.

I calcolatori non sono di per se dispositivi intelligenti. Dunque l’apparente intelligenza che riescono a mostrare deriva esclusivamente dall’esperienza e dalla conoscenza della persona che crea il programma che essi eseguono. Dunque l’intelligenza mostrata da un calcolatore rispecchia in qualche modo l’intelligenza e la conoscenza che il programmatore ha sul problema specifico. Nella applicazioni musicali è necessario dotare i programmi di strumenti e metodi per rappresentare ed elaborare il sapere musicale in maniera da riuscire a ottenere dal calcolatore risposte musicali adeguate al contesto. La musica interattiva, in senso generale, si basa sull’impiego di un calcolatore che interpreta e risponde, in maniera musicalmente significativa, alle azioni di altri musicisti modificando i diversi parametri musicali. I programmi musicali interattivi simulano un comportamento intelligente tramite la modellizzazione dei processi che presiedono l’ascolto, la comprensione e la risposta degli umani agli stimoli musicali. A tal fine è possibile delineare diverse attività che un sistema interattivo deve essere capace di svolgere per poter svolgere tali compiti:

Udito: le informazioni relative all’esecuzione dei musicisti reali devono essere opportunamente codificate e inviate al calcolatore in maniera che gli strumenti virtuali possano conoscere che cosa avviene nell’ambiente esterno;

Ascolto e analisi dell’esecuzione: tutte le informazioni ricevute dall’esterno possono essere analizzate ed elaborate al fine di estrarre dati musicali significativi (tempo, ritmo, altezza, dinamica, o altre caratteristiche musicali) che contribuiscono a caratterizzare il materiale musicale;

Interpretazione: i dati prodotti dall'ascolto possono essere interpretati e utilizzati per generare delle opportune risposte che tendono a modificare l'evoluzione del materiale generato;

Composizione: l'interpretazione dei dati raccolti ed elaborati modifica i processi automatici di composizione in maniera da realizzare un'opportuna risposta ai cambiamenti che avvengono nell'ambiente esterno;

Esecuzione: il calcolatore esegue della musica, o produce dei suoni di sintesi, oppure invia informazioni di controllo ad altri dispositivi preposti alla generazione del suono.

Per quanto riguarda le applicazioni relative alla musica generativa gli strumenti di composizione e di esecuzione sono già esistenti. Infatti l'approccio generativo, come mostrato nelle sezioni precedenti, consente di produrre suoni e musiche tramite l'impiego di modelli matematici e di opportuni processi di codifica. D'altra parte il livello d'interazione è estremamente basso poichè risulta molto difficile instaurare quel flusso d'informazioni musicali di tipo bidirezionale che è la condizione necessaria per l'instaurarsi di processi d'interazione. In questa direzione appare, quindi, di estrema importanza il bisogno di dotare gli strumenti musicali generativi di opportuni sistemi di analisi e d'elaborazione delle informazioni musicali. In tal modo può essere possibile rendere i sistemi generativi capaci di rispondere alle informazioni provenienti dai musicisti o da altre fonti esterne di informazione e dunque realmente interattivi.

6.4.1 ChaoticPerformer

Il *Chaotic Performer* è una applicazione sviluppata mediante l'ambiente di programmazione visuale Pure Data finalizzata a sperimentare l'interazione fra un musicista e un sistema di musica generativa. L'obiettivo principale che si è cercato di perseguire consiste nel realizzare un sistema di musica generativa capace di avere insieme a uno o più musicisti un controllo simultaneo e condiviso sul processo di produzione del materiale musicale. Come afferma Winkler [100]: "*Interaction is a two way street*", per tale motivo si è provveduto a dotare il Chaotic Performer di un "*ascoltatore*", ossia di un sistema capace di estrarre e organizzare le informazioni relative al materiale musicale prodotto da un musicista. In seguito i dati raccolti dall'ascoltatore vengono utilizzati da una seconda parte del sistema, chiamato "*compositore*", per la generazione di melodie tramite l'impiego di sistemi dinamici. L'ascoltatore riceve un flusso di dati MIDI ed estrae le seguenti informazioni:

- stima del tempo;
- classificazione delle note in classi di altezza (es. DO, DO#, RE, MIb, ..., SI);
- durata delle note;
- intervallo di tempo fra l'attacco di due note successive (Delta-Time o IOI-Inter Onset Interval);
- intensità delle note.

La figura 6.28 mostra l'interfaccia grafica del Chaotic Performer; in alto é posizionata la zona relativa all'ascoltatore in cui vengono visualizzate, tramite tabelle, le informazioni raccolte sulla performance del musicista.

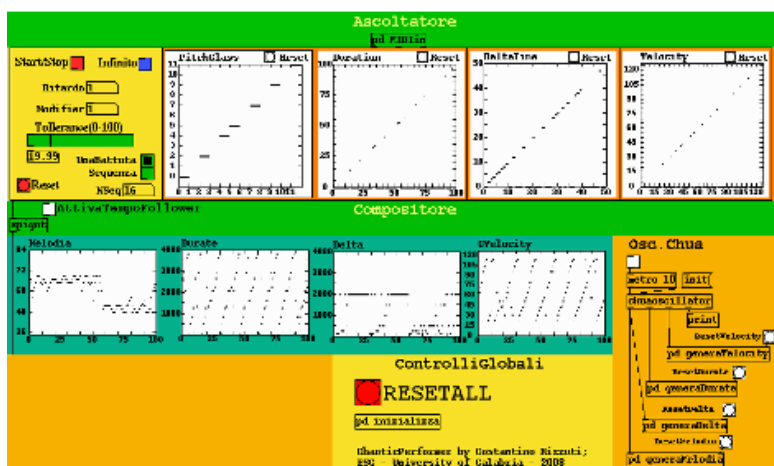


Figura 6.28: Interfaccia grafica del Chaotic Performer.

La parte sottostante l'ascoltatore é dedicata al compositore. Sulla destra é collocato il sistema di musica generativa in cui si utilizza l'oscillatore di Chua come sistema dinamico per la generazione delle sequenze di note. Le tabelle che si trovano in questa parte dell'interfaccia grafica mostrano l'andamento dei seguenti parametri musicali: altezza, durata, delta-time, intensitá. Il sistema di musica generativa impiega la codifica mediante tabella per trasformare le serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua nelle sequenze dei quattro parametri musicali. Nel processo di codifica si impiegano le informazioni raccolte dall'ascoltatore come collezioni di dati ammissibili per i diversi parametri musicali.

L'impiego del Chaotic Performer é ancora in fase di sperimentazione e di sviluppo, ma i risultati forniti dai primi esperimenti sono estremamente incoraggianti. Giá allo stato attuale il sistema fornisce un buon livello d'interazione e produce del materiale musicale interessante. Il Chaotic Performer puó essere impiegato per lo sviluppo di sistemi di accompagnamento automatici e per la generazione di linee melodiche secondo un preciso stile musicale. Quest'ultima possibilitá potrebbe risultare interessante per la composizione poiché pur non utilizzando il sistema di analisi in tempo reale é possibile inserire nelle tabelle i dati desiderati per la generazione delle sequenze melodiche. Infine, uno sviluppo per migliorare l'impiego di questa applicazione nelle performance dal vivo consiste nel dotare il sistema di composizione di un "ascoltatore interno" che consenta di compiere un confronto in tempo reale fra il materiale prodotto dal sistema di musica generativa e i dati esterni provenienti dai musicisti.

Capitolo 7

Musica evolutiva

I metodi evolutivi possono essere utilizzati per la generazione di suoni e musiche. In letteratura si trovano diversi lavori che propongono l'impiego di algoritmi genetici e di altri metodi evolutivi per la generazione di musica, per la produzione di suoni e per il controllo di sistemi di sintesi. La **Musica evolutiva** rappresenta una nuova disciplina in crescita caratterizzata da un rapido sviluppo [71]. Questo nuovo settore d'indagine, nato come incrocio fra sperimentazione artistica e ricerca scientifica sui metodi evolutivi, è indotto dalla volontà di esplorare l'impiego di idee, metodi e strumenti tipici della Vita artificiale e dell'Intelligenza artificiale per la generazione di musica e suoni [9, 13].

Per quanto riguarda le applicazioni finalizzate alla produzione di musica, in letteratura esiste un crescente numero di lavori basati sull'impiego degli algoritmi genetici e di altri metodi evolutivi per la composizione di musica, per la creazione di sistemi musicali interattivi per la realizzazione di performance interattive in tempo reale. Bilotta et al. [20] presentano un metodo evolutivo per produrre automaticamente musica utilizzando dei principi di consonanza come funzione di fitness per selezionare le musiche migliori in ogni generazione. La funzione di fitness è basata sul principio della consonanza musicale che consente di valutare la “*piacevolezza*” delle sequenze di note generate in maniera algoritmica. Gartland–Jones [43] presenta un sistema di composizione algoritmica in tempo reale basati sull'impiego di un algoritmo genetico. Khalifa et al. [52] hanno realizzato uno strumento per la composizione musicale basato sull'impiego di un algoritmo genetico che genera e combina sequenze musicali valutate sulla base di due diverse funzioni di adattamento una basata sulla valutazione di intervalli melodici e una relativa a rapporti tonali. Carpentier et al. [24] presentano un approccio evolutivo per realizzare l'orchestrazione assistita dal calcolatore. Questo lavoro presenta un'applicazione finalizzata a individuare, mediante un approccio evolutivo, un'organizzazione di timbri orchestrali che renda possibile riuscire a produrre un suono caratterizzato da un determinato timbro prefissato come obiettivo.

Nel seguito si presenteranno le ricerche condotte sull'impiego di metodi evolutivi per il controllo dei sistemi di musica generativa.

7.1 Evoluzione di melodie generative tramite algoritmi genetici

L'oscillatore di Chua, presentato nella sezione 2.2.2, è caratterizzato da sei diversi parametri che determinano univocamente la sua evoluzione temporale. Le serie di dati che rappresentano lo stato di questo sistema dinamico possono essere trasformate in sequenze di note che, a seconda del tipo di comportamento mostrato dall'oscillatore, producono andamenti melodici tra loro molto diversi. Il cambiamento dei valori dei diversi parametri consente di modificare l'evoluzione temporale dell'oscillatore e, dunque, anche la natura del materiale musicale generato dal processo di codifica delle serie temporali.

Poichè lo spazio dei parametri dell'oscillatore di Chua è estremamente ampio e ricco di comportamenti differenti si è cercato di esplorare lo spazio mediante un approccio evolutivo. Tale ricerca è finalizzata a individuare configurazioni dei parametri che consentono di ottenere del materiale musicale con delle ben definite caratteristiche [18]. A tal fine si è definito un algoritmo genetico che evolve delle sequenze melodiche ottenute dalla codifica musicale delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua. Gli algoritmi genetici vengono presentati in letteratura come dei mezzi estremamente adatti per l'esplorazione e l'individuazione di soluzioni ottime o pseudo-ottime all'interno di spazi di parametri caratterizzati da un grande numero di dimensioni. L'idea principale che ha guidato questo lavoro consiste nell'esplorazione delle possibilità musicali offerte dal sistema generativo al variare dei parametri del generatore caotico. L'algoritmo genetico è stato realizzato al fine di selezionare configurazioni dei parametri capaci di generare melodie con determinate caratteristiche, quali per esempio alcune tipiche proprietà che caratterizzano il linguaggio della musica tradizionale occidentale.

L'algoritmo genetico che è stato realizzato è basato sul seguente schema di rappresentazione. Il **genotipo** è costituito da una lista contenente cinque dei sei parametri che determinano il comportamento dell'oscillatore di Chua:

$$\eta = \{\alpha, \beta, \gamma, a, b\} \quad (7.1)$$

Il parametro κ dell'oscillatore di Chua è stato fissato pari a 1 poichè si è scelto di prendere in considerazione esclusivamente una sola famiglia di attrattori caotici all'interno della quale tale parametro rimane invariato. La rappresentazione del genoma è caratterizzata direttamente dai valori numerici dei cinque parametri poichè si è scelto di non utilizzare nessun tipo di codifica binaria dei numeri, così come spesso avviene nel caso degli algoritmi genetici. Questa scelta è stata motivata dalla considerazione che usando la codifica binaria l'operatore genetico che realizza la mutazione dei geni ha un effetto meno controllabile rispetto alla versione non codificata e questo potrebbe portare l'algoritmo a esplorare zone dello spazio dei parametri in cui il sistema ha un comportamento principalmente di natura instabile. Il **fenotipo**, invece consiste in una sequenza melodica composta da eventi MIDI e generata tramite la codifica dell'evoluzione temporale della coordinata x dell'oscillatore di Chua. Per la codifica delle serie temporali in sequenze di note si è scelto d'impiegare la codifica massimi e minimi presentata nella sezione 5.4.2.

Per spiegare in dettaglio come funziona l'algoritmo genetico è possibile impiegare alcune definizioni formali. Sia η il genotipo, definito secondo la relazione 7.1, che individua una data configurazione dei parametri dell'oscillatore di Chua. A questo insieme di parametri corrisponderà una certa evoluzione temporale che, a seconda dei casi, potrà coincidere con un punto fisso, con un ciclo limite, o infine con un attrattore strano. Possiamo definire una popolazione iniziale di genotipi $P_\eta^{(0)}$, ciascuno determinato in maniera casuale all'interno dello spazio di ricerca. Lo schema che rappresenta l'algoritmo genetico può essere definito in tal modo:

1. $\forall \eta \in P_\eta^{(i)}$ generare la sequenza melodica associata;
2. $\forall \eta \in P_\eta^{(i)}$ calcolare il valore della funzione di fitness;
3. creare dei nuovi genotipi mediante l'applicazione, sugli individui più adatti della popolazione corrente, degli operatori genetici, incrocio, mutazione e generazione casuale;
4. costituire la generazione successiva $P_\eta^{(i+1)}$ e sostituirla a quella attuale;
5. ripetere dal passo 1.

Questo ciclo deve essere ripetuto per un certo numero di generazioni successive oppure fino a quando non viene raggiunto un prefissato valore di soglia della funzione di fitness che indica che è stata trovata una configurazione di parametri accettabile.

Gli esperimenti evolutivi sono stati condotti su una popolazione costituita da 40 individui. Ogni popolazione è stata evoluta per 100 generazioni successive. Per la creazione delle generazioni successive tramite l'impiego degli operatori genetici, si è scelto di selezionare all'interno della popolazione i 10 individui con fitness maggiore e con questi costituire "élite" su cui applicare le operazioni di incrocio e di mutazione. Ogni nuova popolazione è stata creata secondo le seguenti regole:

- si conserva l'élite – i migliori dieci individui della generazione precedente;
- si generano venti nuovi individui mediante operazioni genetiche – incrocio e mutazione di uno dei geni;
- si generano dieci nuovi individui in maniera casuale.

7.1.1 Funzione di Fitness

La funzione di fitness serve per compiere la valutazione automatica delle sequenze melodiche prodotte dalla codifica musicale dell'oscillatore di Chua. La misura dell'adattamento dei vari genomi è stata definita con l'intento di riuscire a discriminare tra linee melodiche caratterizzate da proprietà tipiche della musica occidentale e linee melodiche in cui tali proprietà non emergono. La funzione di fitness che si è scelto d'impiegare può essere definita in maniera rigorosa nel seguente modo: sia X l'insieme ordinato composto da n note musicali prodotte da un processo generativo:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (7.2)$$

se si assegna al *Do* più basso dell'ottava in cui ricadono le note dell'insieme X l'indice 1, successivamente alla nota Do^\sharp l'indice 2, e così via fino alla nota *Si*, allora è possibile definire un insieme J costituito da n indici definiti nell'intervallo (1 – 12) che rappresentano le classi di altezza delle note definite X . La funzione di fitness della sequenza di note relativa all'insieme X può essere dunque definita come la somma di tutti i punteggi relativi a ogni intervallo melodico all'interno della sequenza:

$$f(J) = \sum_{i=1}^n C_{J_i J_{i+1}} \quad (7.3)$$

il generico coefficiente $C_{J_i J_k}$ rappresenta un valore costante che attribuisce all'intervallo melodico $x_i - x_k$ un dato punteggio relativo al grado di consonanza fra le due note che costituiscono l'intervallo. L'insieme dei diversi punteggi assegnati ai vari intervalli melodici può essere rappresentato mediante una matrice C simile a quella riportata in Tabella 7.1.

	<i>Do</i>	<i>Do</i> [♯]	<i>Re</i>	<i>Re</i> [♯]	<i>Mi</i>	<i>Fa</i>	<i>Fa</i> [♯]	<i>Sol</i>	<i>Sol</i> [♯]	<i>La</i>	<i>La</i> [♯]	<i>Si</i>
<i>Do</i>	-100	-100	-100	-100	2000	2000	-100	2000	-100	2000	-100	-100
<i>Do</i> [♯]	-100	-1000	-100	-1000	-100	-100	-1000	-100	-1000	-100	-1000	-100
<i>Re</i>	-100	-100	-100	-100	-100	2000	-100	2000	-100	2000	-100	2000
<i>Re</i> [♯]	-100	-1000	-100	-1000	-100	-100	-1000	-100	-1000	-100	-1000	-100
<i>Mi</i>	2000	-100	-100	-100	-100	-100	-100	2000	-100	2000	-100	2000
<i>Fa</i>	2000	-100	2000	-100	-100	-100	-100	-100	-100	2000	-100	2000
<i>Fa</i> [♯]	-100	-1000	-100	-1000	-100	-100	-1000	-100	-1000	-100	-1000	-100
<i>Sol</i>	2000	-100	2000	-100	2000	-100	-100	-100	-100	-100	-100	2000
<i>Sol</i> [♯]	-100	-1000	-100	-1000	-100	-100	-1000	-100	-1000	-100	-1000	-100
<i>La</i>	2000	-100	2000	-100	2000	2000	-100	-100	-100	-100	-100	-100
<i>La</i> [♯]	-100	-1000	-100	-1000	-100	-100	-1000	-100	-1000	-100	-1000	-100
<i>Si</i>	-100	-100	2000	-100	2000	2000	-100	2000	-100	-100	-100	-100

Tabella 7.1: Matrice di consonanza.

I coefficienti che compongono la matrice dei punteggi sono stati scelti con l'intento di selezionare, mediante il processo evolutivo, delle sequenze di note che fossero principalmente caratterizzate dalla presenza degli intervalli melodici tipici della tradizione tonale della musica occidentale. A tal fine i coefficienti della matrice C devono essere scelti con estrema cura, inoltre risulta necessario introdurre tra i coefficienti sia valori positivi, sia valori negativi in maniera che la presenza di intervalli valutati positivamente accresca il grado di adattamento, mentre la presenza di intervalli caratterizzati da un punteggio negativo contribuisca a diminuire il valore della funzione che stima l'adattamento. Da queste considerazioni appare chiaro che, a seconda di come si scelgono i valori dei coefficienti della matrice, risulta possibile incoraggiare o scoraggiare la presenza di intervalli melodici consonanti o dissonanti, di unisoni o ottave, oppure la presenza di intervalli cromatici o diatonici. Con l'intento di valutare la capacità della funzione di fitness di selezionare sequenze melodiche con date caratteristiche sono stati condotti degli esperimenti basati sull'impiego di tre diverse matrici di punteggio, utilizzate per realizzare tre processi evolutivi distinti.

La Tabella 7.1 riporta i valori dei punteggi della prima matrice basata sulla consonanza di toni successivi che è stata costruita con l'intento di selezionare

delle melodie in cui prevalgano gli intervalli che caratterizzano la scala di *Do* maggiore:

- gli intervalli di *III*, *IV*, *V*, *VI*, nella tonalità di *Do* maggiore, hanno un punteggio pari a 2000;
- gli intervalli di *II*, *VII*, ottava e unisono, nella tonalità di *Do* maggiore, hanno un punteggio pari a -100;
- gli intervalli che contengono una nota esterna dalla tonalità di *Do* maggiore (*Do*[#], *Re*[#], ...) hanno un punteggio pari a -100;
- gli intervalli che contengono due note esterne dalla tonalità hanno un punteggio pari a -1000.

La seconda matrice dei punteggi è stata anche basata sulla preferenza di intervalli consonanti in una data tonalità, ma è stata realizzata seguendo un approccio più restrittivo rispetto alla prima. I punteggi assegnati in questo caso, infatti, tendono a scoraggiare fortemente la presenza di note esterne alla tonalità scelta come riferimento. La seconda matrice, riportata in Tabella 7.2, è stata realizzata secondo il seguente schema:

- gli intervalli di *III*, *IV*, *V*, *VI*, nella tonalità di *Do* maggiore, hanno un punteggio positivo pari a 20;
- gli intervalli di *II*, *VII*, ottava e unisono, nella tonalità di *Do* maggiore, hanno un punteggio negativo pari a -1;
- qualsiasi intervallo che contiene almeno una nota esterna alla tonalità di *Do* maggiore riceve un punteggio negativo pari a -20;

	<i>Do</i>	<i>Do</i> [#]	<i>Re</i>	<i>Re</i> [#]	<i>Mi</i>	<i>Fa</i>	<i>Fa</i> [#]	<i>Sol</i>	<i>Sol</i> [#]	<i>La</i>	<i>La</i> [#]	<i>Si</i>
<i>Do</i>	-1	-20	-1	-20	20	20	-20	20	-20	20	-20	-1
<i>Do</i> [#]	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<i>Re</i>	-1	-20	-1	-20	-1	20	-20	20	-20	20	-20	20
<i>Re</i> [#]	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<i>Mi</i>	20	-20	-1	-20	-1	-1	-20	20	-20	20	-20	20
<i>Fa</i>	20	-20	20	-20	-1	-1	-20	-1	-20	20	-20	20
<i>Fa</i> [#]	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<i>Sol</i>	20	-20	20	-20	20	-1	-20	-1	-20	-1	-20	20
<i>Sol</i> [#]	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<i>La</i>	20	-20	20	-20	20	20	-20	-1	-20	-1	-20	-1
<i>La</i> [#]	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
<i>Si</i>	-1	-20	20	-20	20	20	-20	20	-20	-1	-20	-1

Tabella 7.2: Seconda matrice di consonanza.

La terza matrice è stata realizzata attribuendo un punteggio positivo se entrambe le note che costituiscono l'intervallo appartengono alla tonalità di *Do* maggiore, altrimenti si assegna un punteggio negativo. In base a questo schema la terza matrice, riportata in Tabella 7.3, è stata realizzata attribuendo un punteggio pari a +2 per gli intervalli le cui note appartengono alla tonalità e un punteggio pari a -2 per tutti gli altri intervalli.

	<i>Do</i>	<i>Do</i> [#]	<i>Re</i>	<i>Re</i> [#]	<i>Mi</i>	<i>Fa</i>	<i>Fa</i> [#]	<i>Sol</i>	<i>Sol</i> [#]	<i>La</i>	<i>La</i> [#]	<i>Si</i>
<i>Do</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>Do</i> [#]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
<i>Re</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>Re</i> [#]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
<i>Mi</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>Fa</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>Fa</i> [#]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
<i>Sol</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>Sol</i> [#]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
<i>La</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2
<i>La</i> [#]	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
<i>Si</i>	2	-2	2	-2	2	2	-2	2	-2	2	-2	2

Tabella 7.3: Terza matrice di consonanza.

7.1.2 Risultati

Sono stati condotti numerosi esperimenti evolutivi usando tutte e tre le matrici finora presentate. I risultati ottenuti mostrano che il processo evolutivo consente di selezionare delle popolazioni d'individui che nelle successive generazioni mostrano un valore crescente di adattamento. In tutti e tre i casi l'andamento della funzione di fitness risulta essere crescente, mostrando dunque l'efficacia dei metodi evolutivi nell'individuare delle soluzioni via via migliori nel tempo. I grafici in Figura 7.1 mostrano l'andamento del valore massimo e medio della funzione di fitness per i tre diversi processi evolutivi condotti utilizzando le tre matrici di punteggio.

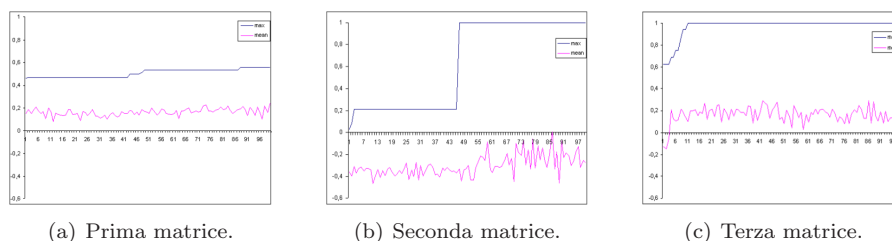


Figura 7.1: Grafici dell'andamento del valore medio e massimo della funzione di fitness.

Analisi musicale dei risultati

I genomi selezionati mediante il processo evolutivo sono stati utilizzati per generare delle sequenze melodiche in seguito analizzate per valutare la qualità musicale dei risultati ottenuti. L'analisi musicale delle sequenze melodiche ottenute dalla codifica dei genomi selezionati tramite la prima matrice mostra la ripetizione di brevi sequenze melodiche in cui sono riscontrabili continue variazioni, la Figura 7.2 mostra la rappresentazione piano roll di una di queste sequenze in cui è possibile notare la ripetizione variata di una stessa struttura

musicale. Le sequenze musicali sembrano presentare una struttura caratterizzata dalla ripetizione di forme che subiscono un continuo processo di variazione, questo è probabilmente dovuto alla natura fortemente frattale del processo di generazione delle sequenze melodiche a partire da un sistema caotico. Queste sequenze di note sono caratterizzate dalla presenza di intervalli dissonanti che spesso portano la melodia al di fuori della tonalità di riferimento.

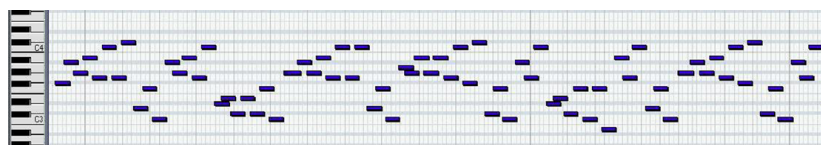


Figura 7.2: Un frammento musicale selezionato mediante la prima matrice dei punteggi.

Le sequenze melodiche prodotte dalla codifica dei genotipi selezionati tramite l'uso della seconda matrice sono caratterizzate dalle strutture melodiche molto più ampie di quelle ottenute con la prima matrice, la Figura 7.3 mostra la rappresentazione piano roll di una di queste sequenze in cui è possibile osservare queste strutture molto ampie.

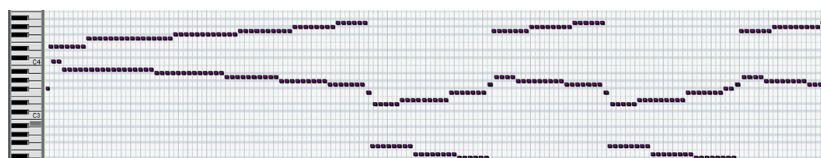


Figura 7.3: Un frammento musicale selezionato mediante la seconda matrice dei punteggi.

L'analisi delle sequenze musicali prodotte dalla codifica dei genotipi selezionati mediante l'uso della terza matrice dei punteggi mostra che la condizione imposta sull'appartenenza delle note alla tonalità di *Do* maggiore risulta essere troppo restrittiva e porta a ottenere dei risultati di scarso interesse musicale. La Figura 7.4 mostra la rappresentazione piano roll di una di sequenza di note prodotta a partire da un genotipo evoluto mediante l'uso della terza matrice dei punteggi.

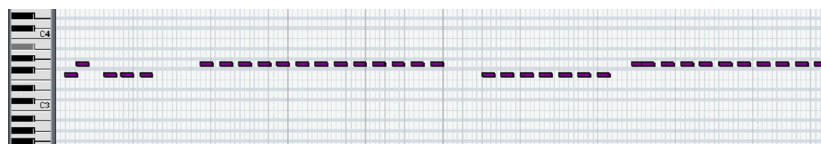


Figura 7.4: Un frammento musicale selezionato mediante la terza matrice dei punteggi.

Il processo evolutivo ha selezionato degli attrattori che nella maggior parte dei casi sono costituiti da cicli limite di piccole dimensioni che determinano la generazione di sequenze musicali caratterizzate dalla ripetizione continua di due o tre note. Gli intervalli maggiormente presenti sono di piccola estensione, con una maggiore presenza d'intervalli di seconda e di terza. L'analisi musicale di queste sequenze dimostra che, anche se le note che le compongono sono tutte appartenenti alla tonalità prefissata, le sequenze ottenute sono nel complesso scarsamente interessanti. Probabilmente l'impiego di un diverso sistema di codifica potrebbe contribuire a ottenere delle sequenze melodiche caratterizzate da intervalli melodici più ampi che potrebbero portare alla generazione di strutture simili ad arpeggi.

I risultati ottenuti dagli esperimenti finora presentati mostrano che è possibile utilizzare gli algoritmi genetici per l'esplorazione dello spazio dei parametri dell'oscillatore di Chua al fine di selezionare degli insiemi di parametri che portino alla generazione di melodie con delle date proprietà. L'analisi dei risultati finora ottenuti mostra che la scelta della codifica musicale e la definizione della funzione di fitness rappresentano i due elementi fondamentali per il conseguimento di risultati interessanti dal punto di vista musicale. Gli esperimenti finora presentati si sono concentrati sulla generazione di melodie tonali, i risultati ottenuti mostrano che le prime due matrici dei punteggi, anche se non generano materiale strettamente tonale, comunque rendono possibile generare sequenze melodiche con delle strutture musicali alternate a variazioni. La terza matrice dei punteggi porta a ottenere sequenze tonali, ma che mancano di strutture capaci di renderle musicalmente interessanti.

7.2 Algoritmi genetici per l'imitazione di una melodia data

I sistemi caotici possono essere utilizzati per la generazione di suoni e musica così come è stato finora mostrato nel capitolo 6. Definito un opportuno sistema di codifica musicale, gli algoritmi genetici possono essere utilizzati per esplorare lo spazio dei parametri di un sistema dinamico caotico per selezionare delle configurazioni di parametri capaci di generare delle sequenze melodiche con delle date caratteristiche musicali. Questa possibilità ha stimolato l'idea di utilizzare gli algoritmi genetici come mezzo per consentire l'interazione fra un sistema di musica generativa e un musicista. Riuscire a stabilire un'interazione musicale con un sistema di musica generativa è un compito estremamente difficile, nella sezione 6.4 è stato presentato un sistema di musica generativa interattivo che impiega le informazioni estratte dall'analisi dell'esecuzione di un musicista per generare il materiale musicale. In questa sezione si presenterà un metodo evolutivo sviluppato per cercare di estendere il grado d'interazione di questo sistema il cui limite principale consiste nella scarsa capacità di controllo del materiale melodico prodotto dal sistema generativo [88]. Il musicista ha la possibilità di ascoltare e, quindi, imitare ciò che il sistema generativo produce; per aumentare il grado d'interazione si è cercato di definire una strategia di controllo che renda possibile al sistema di musica generativa di imitare ciò che viene eseguito dal musicista.

Il sistema di musica generativa è basato sull'impiego della codifica mediante tabella presentato nella sezione 5.4.2. Il vantaggio offerto da questo tipo di codifica consiste nella possibilità di definire il vocabolario (ossia l'insieme ordinato di elementi ammissibili) di altezze o di qualsiasi altro parametro musicale da utilizzare nel processo di codifica. Questo insieme di elementi ammissibili può essere modificato dinamicamente, aggiungendo o sottraendo elementi, in base per esempio all'analisi dei dati provenienti dall'esecuzione di un musicista. Il sistema di codifica realizza la quantizzazione della serie temporale prodotta da un sistema dinamico in funzione del numero di elementi presenti all'interno del vocabolario. Nel caso della codifica di altezze musicali ogni nuova nota viene generata in maniera sincrona campionando con un certo periodo la serie temporale prodotta dal sistema dinamico.

Un algoritmo genetico è stato utilizzato per esplorare lo spazio dei parametri dell'oscillatore di Chua al fine di selezionare l'insieme di parametri che consentono di generare una sequenza melodica che sia quanto più possibile simile a una melodia di riferimento. La Figura 7.5 rappresenta lo schema della struttura dell'algoritmo genetico, nella figura è possibile osservare come il processo evolutivo, realizzato mediante l'algoritmo genetico, svolga una funzione di controllo sul sistema di musica generativa.

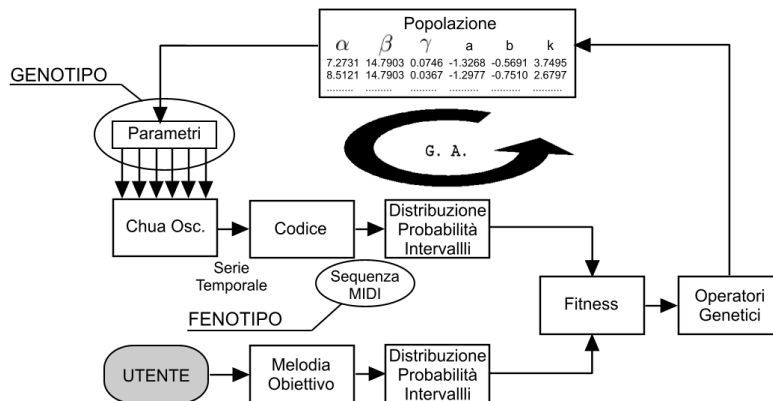


Figura 7.5: Schema dell'algoritmo genetico.

Lo schema di rappresentazione utilizzato è simile a quello mostrato nella sezione precedente, l'algoritmo genetico evolve dei genotipi artificiali costituiti dall'insieme dei sei parametri dell'oscillatore di Chua:

$$\eta = \{\alpha, \beta, \gamma, a, b, k\}. \quad (7.4)$$

Il fenotipo è costituito da una sequenza di note prodotte mediante la codifica musicale delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua. Il processo evolutivo realizzato mediante l'algoritmo genetico è finalizzato a selezionare i genotipi che portano a generare delle sequenze melodiche che meglio approssimano una data melodia obiettivo secondo una opportuna metrica. L'algoritmo genetico è stato realizzato secondo lo stesso schema presentato nella sezione precedente.

La funzione di fitness è stata definita con l'intento di ottenere una misura della similarità tra due differenti sequenze di note. Poichè non si è interessati a trovare un'imitazione perfetta della melodia obiettivo, ma piuttosto una sua variazione che presenti un alto grado di similarità, si è scelto di usare un indice di alto livello, basato su una misura statistica, che dia un'indice della similarità fra due sequenze di note senza prendere in considerazione l'ordine in cui sono poste in successione le diverse note nelle due melodie. Da tali considerazioni la funzione di valutazione dell'adattamento di ogni individuo è stata basata sul confronto tra le distribuzioni di probabilità degli intervalli musicali presenti nella melodia obiettivo e quelli presenti nella sequenza generata mediante il sistema generativo. Il processo di calcolo della funzione di fitness di ogni individuo si realizza generando una sequenza melodica composta da 200 note mediante la codifica musicale delle serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua. Successivamente, si calcola la distribuzione di probabilità dei diversi intervalli melodici presenti in tale sequenza di note e la si compara con quella relativa alla melodia obiettivo. Il confronto tra le due distribuzioni di probabilità può essere realizzato tramite la divergenza di Kullback–Leibler (KL) [54] che rappresenta una misura non-commutativa della differenza tra due distribuzioni di probabilità. Date due distribuzioni di probabilità P e Q di una variabile discreta casuale la divergenza KL di Q da P è definita dalla relazione:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_i P_{(i)} \log \frac{P_{(i)}}{Q_{(i)}} \quad (7.5)$$

La divergenza di Kullback–Leibler ha la proprietà di essere sempre non-negativa, inoltre il suo valore è uguale a zero se e solo se $P = Q$. Per questi motivi si è scelto di utilizzare la divergenza KL come misura dell'adattamento di ciascun individuo che aumenta se il valore misurato per la divergenza KL approssima lo zero.

7.2.1 Esperimenti evolutivi e risultati

Sono stati condotti diversi esperimenti evolutivi per validare il funzionamento dell'algoritmo genetico e per valutare la qualità dei risultati forniti. Questi esperimenti sono stati condotti utilizzando quattro diverse distribuzioni di probabilità relative a quattro differenti strutture melodiche. La prima sequenza di note usata come melodia obiettivo è costituita da una sequenza di note disposte l'una dall'altra a un intervallo di tono ascendente e discendente (per esempio: Do–Re–Do–Re–....). La seconda melodia obiettivo è simile alla prima, ma è stata aggiunta la possibilità di ripetere la nota precedente con la probabilità uguale ai due intervalli di tono ascendente e discendente. La terza sequenza è costituita da una successione d'intervalli di terza maggiore alternati ascendenti e discendenti (per esempio: Do–Mi–Do–Mi–...). La quarta melodia obiettivo è simile alla seconda con l'aggiunta dell'intervallo di terza maggiore con la stessa probabilità di presentarsi che caratterizza gli altri intervalli. Se si utilizza lo standard MIDI per rappresentare le note, e dunque anche gli intervalli musicali, è possibile costruire la Tabella 7.4 e la Tabella 7.5 che rappresentano le quattro distribuzioni di probabilità utilizzate per realizzare gli esperimenti evolutivi. Tramite la rappresentazione basata sull'impiego dello standard MIDI tutti gli intervalli che si ottengono all'interno di una estensione di due ottave possono essere rappresentati dai numeri interi definiti nell'intervallo $[-12, 12]$.

Sequenza 1		Sequenza 2	
Intervallo	Probabilità	Intervallo	Probabilità
-2	50%	-2	33%
2	50%	0	33%
		2	33%

Tabella 7.4: Prima e seconda melodia obiettivo.

Sequenza 3		Sequenza 4	
Intervallo	Probabilità	Intervallo	Probabilità
-4	50%	-4	20%
4	50%	-2	20%
		0	20%
		2	20%
		4	20%

Tabella 7.5: Terza e quarta melodia obiettivo.

Le immagini in Figura 7.6 mostrano le distribuzioni di probabilità ottenute da cinque diverse evoluzioni dell’algoritmo genetico ciascuna condotta per 200 generazioni successive. In particolare il grafico (a) mostra i risultati ottenuti per la prima sequenza obiettivo, mentre il grafico (b) mostra quelli relativi alla seconda.

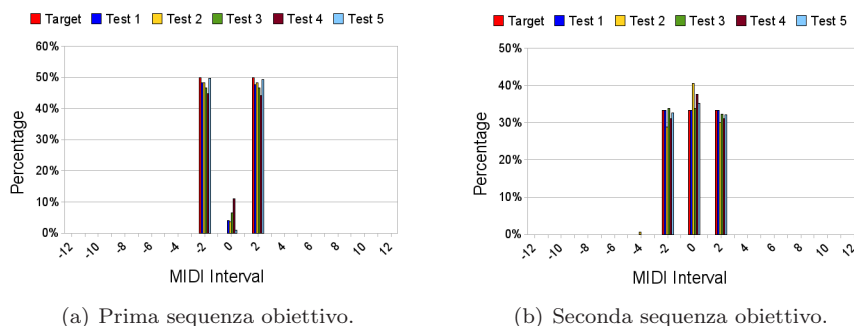


Figura 7.6: Distribuzione di probabilità degli intervalli per la prima e per la seconda sequenza obiettivo.

Le immagini riportate in Figura 7.7 mostrano i risultati ottenuti per gli esperimenti compiuti utilizzando la terza e la quarta sequenza obiettivo, il grafico di sinistra mostra i risultati ottenuti per quanto riguarda la terza sequenza, mentre il grafico sulla destra mostra quelli relativi alla quarta. Queste distribuzioni di probabilità sono state ottenute da cinque diverse evoluzioni dell’algoritmo genetico ciascuna condotta per 1000 generazioni successive. I risultati riportati nelle figure mostrano un adattamento molto buono tra le melodie obiettivo e le melodie prodotte mediante il sistema generativo successi-

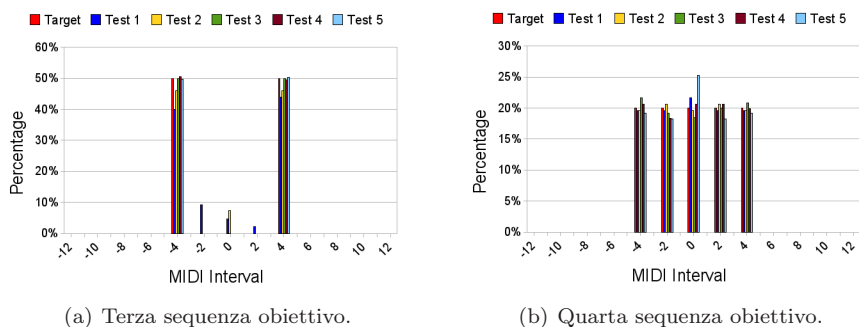


Figura 7.7: Distribuzione di probabilità degli intervalli per la terza e per la quarta sequenza obiettivo.

vamente alla selezione compiuta dall’algoritmo genetico. I grafici mettono anche in luce che le melodie generative sono caratterizzate dalla presenza di intervalli non presenti nella melodia obiettivo. Questi intervalli estranei appaiono, nella maggior parte dei casi, con valori di probabilità estremamente bassi. Da un punto di vista strettamente musicale questo aspetto potrebbe rivelarsi molto interessante perchè le melodie generative selezionate mediante l’algoritmo genetico rappresentano un’imitazione della melodia obiettivo che presenta anche un certo grado di variazione. Questo aspetto risulta di particolare interesse per la realizzazione di un sistema generativo interattivo in cui musicista e sistema generativo condividono il controllo sul materiale musicale prodotto e interagiscono ciascuno in maniera attiva.

I risultati ottenuti dagli esperimenti evolutivi presentati in questa sezione sono interessanti poichè mostrano che è possibile controllare i parametri dell’oscillatore di Chua per poter produrre una sequenza musicale con delle date proprietà. Finora, si è sperimentato soltanto l’utilizzo di semplici sequenze di note come melodie obiettivo, inoltre lo spazio di ricerca è stato limitato a una piccola porzione dell’intero spazio dei parametri che caratterizza l’oscillatore di Chua. Infine, è necessario compiere un’approfondita analisi dei risultati dal punto di vista musicale, soprattutto per valutare quali possano essere le opportunità e i vantaggi che questo approccio fornisce per lo sviluppo di sistemi interattivi di musica generativa.

Capitolo 8

Ambienti Virtuali

Negli ultimi anni è emerso un crescente interesse nell'impiego di ambienti virtuali da parte di ricercatori attivi in settori piuttosto diversi: dalla visualizzazione scientifica, agli studi percettivi e cognitivi, fino alle applicazioni mediche finalizzate alla diagnosi e alla terapia. L'impiego di ambienti virtuali con, a seconda dei casi, un maggiore o minore grado di immersività offre la possibilità di usufruire di modalità d'interazione con una scena virtuale che risultano essere naturali e familiari per gli utenti. Le azioni mediante cui stabilire l'interazione con tali ambienti sono, infatti, in genere basate sullo svolgimento di attività comuni molto simili a quelle svolte nella vita quotidiana.

Anche se lo sviluppo tecnologico legato agli ambienti virtuali offre ampie e interessanti possibilità, l'uso di questi ambienti in ambito musicale per la rappresentazione e il controllo di sistemi musicali interattivi rimane ancora un settore scarsamente esplorato. Questo ambito di ricerca si interseca fortemente con le attività volte alla creazione di nuove interfacce e di nuovi modelli d'interazione per l'espressività musicale.¹ D'altra parte gli ambienti virtuali sono anche largamente utilizzati nel campo della ricerca scientifica per la visualizzazione e la rappresentazione di dati e per lo studio dei sistemi complessi.

Nel seguito si presenterà l'architettura utilizzata per realizzare gli ambienti virtuali multimediali, prestando particolare attenzione alle tecniche impiegate per la creazione di scene audio 3D. Infine, s'illustreranno le applicazioni sviluppate per l'esplorazione dei sistemi complessi mediante l'impiego di ambienti virtuali.

8.1 Ambienti virtuali 3D

Lo sviluppo delle tecnologie legate agli ambienti virtuali sta interessando crescenti settori della ricerca scientifica. Inoltre la crescita tecnologica ha anche influito sul miglioramento delle prestazioni fornite dalle componenti specializzate per la gestione dell'audio. Nonostante il rapido sviluppo e il perfezionamento delle apparecchiature tecnologiche e delle applicazioni software dedicate al suono, comunque appare ancora fortemente limitato l'uso degli ambienti virtuali nel

¹Per approfondimenti a riguardo si consultino gli atti, disponibili in rete all'indirizzo: <http://nime.org>, della conferenza internazionale New Interfaces for Musical Expression – NIME, svolta annualmente presso i più prestigiosi istituti di ricerca del settore.

campo delle applicazioni musicali per la realizzazione di performance e installazioni artistiche. Ciò probabilmente può essere dovuto all'impiego di modelli di rappresentazione della componente audio estremamente semplicistici e limitanti attualmente largamente diffusi tra le applicazioni che dominano il settore. L'industria dell'intrattenimento (video giochi, film di animazione, etc...) rappresenta il principale campo in cui sono nate e si sono sviluppate tali applicazioni. Esistono, infatti, numerosi sistemi interattivi in tempo reale finalizzati a modellare sorgenti sonore virtuali che trovano un'ampio utilizzo nello sviluppo di video giochi e di ambienti di realtà virtuale. Sono state create diverse librerie software per tali applicazioni, come per esempio le DirectX[®] di Microsoft[®], OpenAL, e X3D. A queste si può aggiungere anche il sistema Creative EAX[®] che consente di simulare l'effetto di riverberazione degli ambienti. Questi strumenti software consentono di posizionare e muovere le sorgenti sonore in maniera interattiva all'interno della scena virtuale con una fedele resa acustica. I sistemi, che attualmente dominano il settore, però presentano diversi limiti poiché sono basati sull'impiego di modelli dei fenomeni acustici eccessivamente semplificati. Inoltre, le sorgenti sonore virtuali sono associate a modelli della propagazione del suono uguali per tutte le sorgenti che spesso offrono scarse possibilità per la gestione d'interazioni complesse fra i diversi elementi che compongono la scena sonora. Spesso, inoltre, tali architetture consentono di creare soltanto un unico punto di ascolto della scena sonora limitando fortemente il loro impiego per scopi musicali. Un ulteriore fattore che influisce in maniera forte sull'impiego di queste librerie per scopi musicali consiste nell'impossibilità di definire la direzionalità delle sorgenti sonore (tutte le sorgenti si assumono come omni-direzionali). L'unica libreria che supporta la definizione della direzione di propagazione del suono è X3D, nella quale la direttività della sorgente sonora è modellata mediante due ellissoidi che definiscono il campo in cui si manifesta l'attenuazione del suono dovuta alla variazione della distanza. Questo modello presenta diverse limitazioni: risulta impossibile definire degli andamenti della direttività più complessi, come per esempio quelli che caratterizzano gli strumenti musicali tradizionali, inoltre, la direttività può essere applicata solo alle sorgenti sonore (l'ascoltatore, i microfoni virtuali sono omni-direzionali), l'andamento lineare dell'attenuazione in funzione della distanza non si accorda con quello relativo al mondo reale che è, invece, di tipo esponenziale. Infine, le librerie software attualmente esistenti supportano soltanto formati di tipo standard per la riproduzione del suono. Risulta, quindi, estremamente difficile utilizzare configurazioni di altoparlanti o sistemi di riproduzione arbitrari così come molto spesso accade nelle applicazioni musicali. Tali rigidità, e alcune altre limitazioni di natura molto più tecnica, fanno sì che i sistemi attualmente presenti sul mercato si prestino poco ad applicazioni strettamente legate alla composizione e all'esecuzione musicale. In tal caso, infatti, è necessario un sufficiente livello di flessibilità per la modifica dei parametri che influenzano la propagazione del suono nell'ambiente virtuale, per la definizione dei sistemi d'interazione e per la progettazione delle varie strategie di controllo della scena audio.

Per superare le limitazioni finora illustrate dei vari sistemi già esistenti, l'architettura Audioscape² [103, 104, 105, 106] nasce, nelle intenzioni dei suoi autori, appositamente per esplorare le possibilità d'impiego degli ambienti virtuali

²Si veda per maggiori informazioni il sito ufficiale del progetto: <http://www.audioscape.org>.

nell'ambito di applicazioni legate alla composizione e all'esecuzione musicale. Quest'architettura, basata sulla modellizzazione dei fenomeni fisici tipici dell'acustica, consente di creare degli ambienti virtuali 3D caratterizzati da una componente sonora e da una visiva. Audioscape rappresenta, infatti, uno dei pochi esempi di architettura per la creazione di ambienti virtuali multimediali che consente di simulare la propagazione del suono in un ambiente tridimensionale. tra i principali vantaggi offerti spicca la possibilità di controllare individualmente sorgenti e ricevitori in maniera accurata rendendo possibile la creazione di scene 3D utilizzabili come degli strumenti musicali virtuali.

Audioscape è basato sull'impiego dell'ambiente di programmazione visuale Pure Data che fornisce delle possibilità di estensione pressochè illimitate. Attualmente l'architettura supporta già una vasta gamma di sistemi d'interazione e di input device. Inoltre, un importante punto di forza di tale sistema consiste nel fornire un'ampia gamma di strumenti per la trasmissione e la gestione di messaggi tramite rete che rende possibile creare ambienti multimediali condivisi tra più utenti, o sistemi per la generazione di suoni e musica distribuite su più calcolatori, oppure performance condivise. Le potenzialità offerte dalle tecnologie di rete consentono di mettere in comunicazione sistemi differenti per realizzare un sistema complesso che racchiuda, integrandole opportunamente, le potenzialità dei vari costituenti. Tutto ciò rende Audioscape uno strumento particolarmente adatto alla realizzazione di performance e installazioni multimediali.

Quest'architettura rende possibile creare una scena 3D navigabile composta da sorgenti e di ricevitori sonori di cui è possibile definire e controllare la posizione e l'orientamento. Gli oggetti che compongono la scena trasformano il segnale audio secondo degli algoritmi di elaborazione del suono (Digital Signal Processing – DSP). L'utente può navigare all'interno dell'ambiente virtuale controllando la posizione e l'orientamento, modificando il proprio punto di vista e di ascolto. L'utente in tal modo, navigando nell'ambiente, può controllare la natura del suono che ascolta; per esempio avvicinandosi o allontanandosi dagli oggetti della scena può scegliere di passare da determinate tecniche di elaborazione del suono ad altre completamente differenti.

Gli oggetti che compongono la scena oltre che essere utilizzati per l'elaborazione del suono possono anche operare come generatori di suono. Tramite l'impiego di opportuni algoritmi di sintesi digitale del suono è possibile immettere segnali sonori nell'ambiente virtuale. Inoltre, gli oggetti possono essere usati anche come interfacce per immettere o prelevare il suono nell'ambiente virtuale. Questa possibilità è utile per esempio per introdurre nell'ambiente virtuale il suono di uno strumento tradizionale che può essere elaborato in maniere differenti a seconda degli oggetti posti nelle sue vicinanze e della sua posizione nell'ambiente virtuale.

Diverse tipologie di dispositivi di controllo possono essere utilizzate per modificare i parametri che caratterizzano i vari DSP, i parametri relativi alla visualizzazione della scena e, infine, i parametri che controllano la propagazione del suono nell'ambiente virtuale. La possibilità di modificare in maniera precisa la propagazione del suono suggerisce lo sviluppo di un nuovo paradigma di controllo per l'espressività musicale. Tale paradigma basa il suo sviluppo sullo sfruttamento delle capacità di percezione dello spazio che rappresenta uno dei principali punti di forza degli esseri umani.

Oltre la possibilità di definire una ricca scena sonora, Audioscape consente di creare anche delle scene visive 3D molto realistiche. L'architettura impiega

un motore 3D dedicato che è stato sviluppato a partire della libreria grafica OpenSceneGraph (OSG).³ Il motore grafico consente il controllo interattivo dei modelli 3D necessari per la creazione della scena virtuale. Inoltre, il motore grafico rende possibile distribuire il rendering della scena su più schermi in maniera da poter realizzare anche un ambiente virtuale realmente immersivo che circonda l'utente più o meno completamente.

Il motore grafico è basato sulla creazione e sulla gestione dello “*scene-graph*”, ossia il grafo che rappresenta l'organizzazione gerarchica della scena 3D. Questo grafo è una struttura dati che definisce e organizza in maniera logica le relazioni spaziali e gerarchiche dei vari elementi che compongono la scena. Ogni elemento è rappresentato tramite un nodo all'interno di una struttura ad albero in maniera che qualsiasi trasformazione spaziale realizzata su un nodo genitore possa propagarsi, in maniera automatica, anche su tutti i nodi figli a esso collegati. Questa struttura dati risulta molto utile per rappresentare oggetti rigidi composti da più parti e per la gestione di scene gerarchizzate. In entrambi i casi, infatti, i gruppi di oggetti devono essere animati e trattati come un tutto unico. Mediante questa rappresentazione tutte le operazioni applicate al nodo origine di un gruppo si propagano anche su tutti i nodi a esso associati semplificando la gestione delle proprietà e delle operazioni sugli elementi della scena.

8.1.1 Definizione di una scena audio 3D

L'architettura consente all'utente di costruire una scena virtuale realistica per applicazioni musicali volte all'esecuzione e all'ascolto. L'ambiente virtuale simula il mondo reale sia per quanto riguarda la componente visiva sia per la componente sonora. In quest'ultimo caso la modellizzazione della propagazione del suono nell'ambiente e numerosi altri effetti fisici che caratterizzano l'acustica consente di realizzarne una fedele simulazione. A tal fine è necessario definire una scena audio che raccolga e organizzi tutti gli elementi necessari per lo sviluppo dell'ambiente virtuale. Le informazioni relative ai diversi elementi che compongono la scena audio vengono utilizzate dal così detto “*motore audio*” per gestire i vari processi necessari per il calcolo e l'elaborazione del suono virtuale. La scena audio 3D è composta da elementi preposti all'elaborazione del suono (DSP), chiamati “*Nodi Sonori*”. Perché sia possibile la propagazione del suono all'interno dell'ambiente, inoltre, è necessario definire tra le diverse coppie di nodi sonori delle “*Connessioni Sonore*” che determinano le modalità secondo cui si realizza il flusso dell'audio all'interno dell'ambiente virtuale. I nodi e le connessioni sonore possono essere rispettivamente pensati come i nodi e gli archi di un grafo che rappresenta la struttura della catena di elaborazione del suono realizzata all'interno dell'ambiente virtuale. L'organizzazione dei nodi e delle connessioni sonore costituisce una struttura a grafo che rappresenta i vari processi di elaborazione del suono. Questa struttura, chiamata anche grafo del DSP, è diretta a partire da una o più sorgenti sonore verso uno o più nodi terminali costituiti da ricevitori sonori. Il grafo del DSP, generalmente, è di tipo aciclico, ossia è rappresentabile mediante una catena aperta in cui non sono presenti anelli e percorsi chiusi di segnale. Comunque, è anche possibile creare delle strutture rappresentabili tramite grafi ciclici, utilizzabili per esempio per il filtraggio ricorsivo del segnale.

³Per maggiori informazioni e approfondimenti si veda il sito ufficiale del progetto: <http://www.openscenegraph.org>.

La configurazione delle connessioni fra i nodi sonori consente di creare catene di nodi finalizzate a realizzare un specifico tipo di elaborazione del suono. Il controllo e la modifica delle proprietà del grafo del DSP può essere realizzato tramite i vari parametri che caratterizzano le connessioni e i nodi coinvolti nella catena di elaborazione del segnale. Al crescere delle dimensioni del grafo questo compito può diventare in apparenza difficile e complicato, ma in realtà non è così poichè spesso le modifiche dei parametri si realizzano mediante attività di natura spaziale come per esempio traslazioni, rotazioni nello spazio 3D che risultano facili da realizzare. Inoltre tali modifiche sono anche facilitate dall'impiego del grafo della scena che, definendo l'ordine gerarchico dei nodi coinvolti, consente di modificare simultaneamente gruppi organizzati di nodi. In tal modo le modifiche spaziali effettuate su un nodo padre si propagano in maniera automatica a tutti i nodi a lui collegati. I valori assunti dai parametri relativi alle connessioni sonore, inoltre, consentono di influenzare in modo determinante le condizioni di propagazione del suono nell'ambiente virtuale, così oltre alla simulazione del mondo reale, risulta possibile sperimentare condizioni e fenomeni acustici lontani dalla realtà quotidiana che possono comunque consentire di ottenere risultati interessanti da un punto di vista musicale e artistico. Per esempio, l'effetto del decadimento in funzione della distanza può essere diminuito o esagerato rendendo possibile l'ascolto di sorgenti molto lontane o determinando l'ascolto soltanto di ciò che è strettamente vicino al ricevitore. Allo stesso modo l'effetto Doppler può essere esagerato o diminuito sperimentando condizioni di ascolto diverse da quelle a cui siamo abituati nel mondo reale. Infine, risulta possibile realizzare il “*teletrasporto*” del suono annullando completamente gli effetti dovuti alla distanza o modificare le caratteristiche di emissione e di ricezione al fine di scegliere se realizzare un ascolto più o meno selettivo rispetto alla direzione.

La struttura a grafo finora presentata consente di modificare il concetto di “*ascoltatore*” della scena audio. Mentre in molti altri sistemi citati in precedenza è possibile avere un solo ascoltatore, tramite questa architettura è possibile avere tanti ascoltatori simultaneamente. Infatti, un ascoltatore non è altro che uno o più nodi riceventi in cui il segnale assorbito dall'ambiente viene scritto sui buffer hardware di un dispositivo audio connesso a degli altoparlanti o a delle cuffie. Questo particolare tipo di ricevente è chiamato anche “*ricevente esterno*” poichè rappresenta un mezzo per interfacciare l'ambiente virtuale con l'esterno. Allo stesso modo possono esistere delle “*sorgenti esterne*”, come per esempio microfoni, file audio o altri tipi di segnali sonori, che consentono di immettere del segnale proveniente dall'esterno all'interno dell'ambiente virtuale.

Nodi sonori

Il “*Nodo Sonoro*” è l'elemento fondamentale per la creazione di una scena audio virtuale, ogni nodo è caratterizzato da una serie di parametri la cui definizione è di fondamentale importanza per il controllo della propagazione e dell'elaborazione del suono nella scena audio. Un nodo sonoro può essere sia una sorgente, ossia un nodo che emette del suono, sia un ricevente, un nodo che assorbe del suono, sia entrambe le cose simultaneamente. In quest'ultimo caso il nodo sonoro costituisce l'elemento tramite cui è possibile realizzare l'elaborazione del suono attraverso un opportuno algoritmo di DSP che modifica il segnale assorbito dall'ambiente e successivamente lo reimmette nell'ambiente. Bisogna sottolineare che un singolo nodo sonoro è caratterizzato dalla possibilità di rea-

lizzare esclusivamente l'elaborazione del suono di tipo monofonica. Per ottenere un'elaborazione di tipo polifonica è necessario utilizzare più nodi sonori opportunamente disposti e connessi fra loro in maniera che si ottenga tra essi la corretta distribuzione del segnale audio. La realizzazione, dunque, di effetti audio multi-canale può essere realizzata tramite un meccanismo di raggruppamento in cui i diversi nodi sonori coinvolti vengono organizzati in una struttura coerente rappresentata mediante delle adeguate relazioni logiche e gerarchiche nel grafo della scena. In tal modo una qualsiasi modifica applicata al nodo padre sia essa di natura spaziale o di natura acustica sarà automaticamente applicata a tutti gli altri nodi figli preservando l'unità e la coerenza che caratterizza il gruppo.

I nodi sonori sono delle entità caratterizzate da posizione e orientamento all'interno dell'ambiente 3D, da parametri che ne controllano la visualizzazione all'interno della scena visiva e da diversi altri parametri che controllano gli aspetti legati al suono, quali per esempio: l'elaborazione del suono, la sua ricezione, la sua propagazione verso l'ambiente virtuale. Per ogni nodo infatti è possibile definire un andamento caratteristico della direttività che definisce come varia l'attenuazione del segnale in funzione dell'angolo di incidenza fra il suono e la direzione che definisce l'orientamento del nodo. L'andamento della direttività può essere definito in maniera completamente arbitraria oppure è possibile utilizzare gli andamenti tipici dell'acustica e dell'ingegneria del suono che rappresentano andamenti tipici degli strumenti musicali e dei microfoni. La figura 8.1 mostra i grafici delle tre principali caratteristiche direzionali: omnidirezionale, cardioide, bidirezionale.

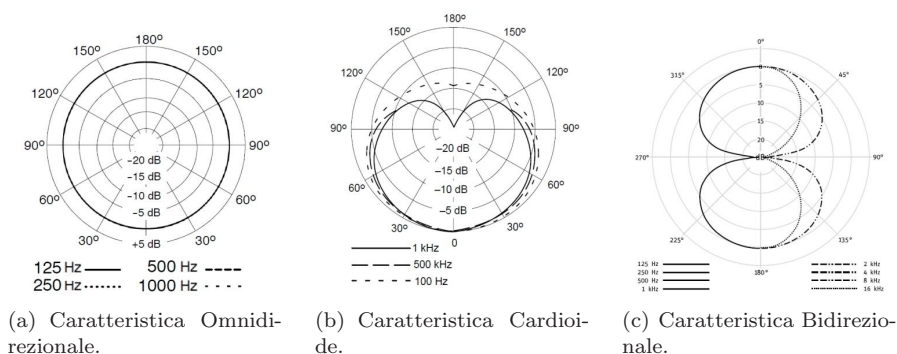


Figura 8.1: Caratteristiche direzionali dei microfoni.

Il tipo di direttività può essere impostato separatamente per quanto riguarda l'assorbimento e l'emissione del suono, così come in maniera simile l'orientamento può essere impostato in maniera separata per definire la direzione di emissione e quella di assorbimento. Tramite la modifica di questi parametri l'utente può controllare con grande precisione la propagazione del suono nell'ambiente. L'utente può scegliere infatti se un nodo deve emettere o assorbire il suono in tutte le direzioni o, al contrario, lungo una data direzione in maniera più o meno selettiva, in tal modo è possibile creare delle catene di elaborazione del suono controllate mediante la posizione e l'orientamento dei diversi nodi sonori. Questa possibilità è estremamente importante per lo sviluppo di sistemi di elaborazione del suono basati sull'interazione spaziale in cui ogni nodo posto

in una data posizione rappresenta un processo che in qualche modo modifica il suono. L'utente, modificando la propria posizione e l'orientamento all'interno dell'ambiente virtuale, può scegliere quale effetto utilizzare o combinare i vari processi disponibili nella scena.

Qualsiasi tipo di DSP può essere realizzato all'interno di un nodo sonoro. Ogni nodo, infatti, è caratterizzato da una patch di PD finalizzata a realizzare l'elaborazione del suono. Questa patch presenta un ingresso e un'uscita per ricevere e inviare il suono assorbito ed emesso dal nodo. L'utente può personalizzare a piacimento il suo contenuto realizzando la catena di DSP che meglio soddisfa le proprie esigenze.

Connessioni sonore

Perché sia possibile la propagazione del suono fra una coppia di nodi sonori è necessario che sia stata stabilita una “*Connessione Sonora*” fra essi. L'impiego delle connessioni sonore differenzia Audioscape da tutti gli altri sistemi attualmente esistenti in cui gli elementi sonori sono caratterizzati dallo stesso modello di propagazione del suono. L'impiego delle connessioni sonore è principalmente ispirato al paradigma tipico dell'ingegneria del suono in cui diversi dispositivi vengono collegati fra loro tramite cablaggi che stabiliscono una catena capace di realizzare un determinato processo di generazione o elaborazione del suono. Le connessioni sonore, oltre che connettere i vari nodi al fine di definire i percorsi di propagazione del suono all'interno della scena audio, determinano anche il modo in cui il suono deve propagarsi nello spazio che intercorre fra i due nodi coinvolti nella connessione.

L'impiego di questo paradigma, basato sulle connessioni sonore, comporta che il messaggio e il mescolamento fra diverse sorgenti sonore non venga realizzato tramite cursori o manopole, ma, in maniera del tutto diversa, sia realizzato tramite la modifica della posizione spaziale e dell'orientamento dei diversi nodi sonori coinvolti nella scena audio. Quando due nodi sono molto distanti fra loro il segnale trasmesso sarà molto attenuato a causa della distanza, inoltre il segnale sarà anche ritardato a causa del tempo necessario per la propagazione. Se due nodi vengono avvicinati fra loro l'effetto dell'attenuazione si ridurrà così il segnale ricevuto avrà un'intensità maggiore. In maniera simile modificando l'orientamento di un dato nodo si cambierà l'angolo d'incidenza del suono e si otterrà, quindi, un'attenuazione o un incremento delle alte frequenze dovuto alla simulazione dell'effetto di diffrazione delle onde sonore. Modificando, dunque, i parametri spaziali dei diversi nodi risulta possibile realizzare il mescolamento e l'elaborazione di più sorgenti sonore così come è possibile fare, in maniera tradizionale, tramite l'impiego di un'interfaccia costituita da cursori e manopole.

Le connessioni sonore sono caratterizzate da diversi parametri che influiscono sulla propagazione del suono nello spazio compreso fra i due nodi. Questi parametri influiscono sull'entità dell'assorbimento o della diffusione del suono dovuto all'aria, sul tempo di ritardo dovuto alla propagazione nello spazio che intercorre fra i due nodi, sul decadimento dovuto alla distanza, sul filtraggio da applicare in funzione dell'angolo d'incidenza e, infine, sull'entità dell'effetto Doppler. Dopo aver stabilito una connessione fra due nodi, l'utente può modificare tali parametri per ottenere diversi tipi di effetti sonori e musicali. Inoltre, l'utente può alterare e influenzare il modo in cui si propaga il suono fra due nodi secondo le esigenze che spingono la creazione di una data scena sonora.

Per esempio, se è necessario impiegare un brano musicale potrebbe essere utile preservarne quanto più possibile il contenuto frequenziale tramite la diminuzione dell'influenza dell'effetto Doppler che tende a inserire uno spostamento delle frequenze. Inoltre, potrebbe essere anche utile diminuire la rilevanza del decadimento del suono in funzione della distanza in maniera da rendere poco sensibile la variazione dell'ampiezza del brano musicale allo spostamento che possono subire i vari nodi. In tal modo la propagazione del suono nell'ambiente verrebbe trasformata in una specie di “teletrasporto” del suono da un punto all'altro della scena senza che gli effetti acustici alterino la qualità sonora del brano musicale.

8.1.2 Simulazione dei fenomeni acustici

La simulazione dei fenomeni acustici legati alla propagazione del suono viene realizzata applicando al suono emesso e ricevuto da ciascuno nodo sonoro delle opportune trasformazioni volte a modificare sia l'ampiezza che il contenuto di frequenza del segnale trasmesso. Nel corso di questa sezione si prenderanno in rassegna i vari fenomeni acustici e si presenteranno alcuni metodi utili per realizzare la loro simulazione.

Sia I un nodo sonoro assunto come sorgente sonora, I è caratterizzato da una certa posizione nella scena 3D, $P_I = (x_I, y_I, z_I)$, e da un certo orientamento, $E_I = (\theta_I, \phi_I, \psi_I)$, che definisce la direzione in cui il nodo emette il suono. Ogni nodo sonoro è caratterizzato anche da un dato andamento della direttività di emissione che definisce come varia l'intensità del suono emesso al variare della direzione di propagazione del suono; nel caso del nodo I questa proprietà può essere indicata con De_I . L'andamento della direttività di emissione può essere rappresentato tramite un'opportuna curva come quelle rappresentate in figura 8.1 o tramite una funzione matematica $Ge_I(\alpha)$ che fornisce il valore di attenuazione del segnale emesso al variare dell'angolo di emissione α . Sia J un secondo nodo sonoro assunto come ricevitore; J è caratterizzato dalle stesse proprietà del nodo sorgente. Inoltre questo nodo è caratterizzato da un certo orientamento, $A_J = (\theta_J, \phi_J, \psi_J)$, che definisce la direzione di assorbimento del suono e da un andamento della direttività di assorbimento che possiamo indicare con Da_J a cui è possibile associare una funzione di attenuazione $Ga_J(\alpha)$.

Definite tali proprietà dei due nodi sorgente e ricevitore è possibile simulare i vari effetti acustici legati alla propagazione del suono. Nel seguito presenteremo una breve rassegna dei metodi impiegati per simulare i vari effetti acustici.

Decadimento dell'intensità sonora in funzione della distanza

L'intensità sonora diminuisce in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza [41, 81]. Questo effetto acustico può essere simulato tramite l'impiego di un fattore di guadagno G_{dist} che, tramite un'operazione di moltiplicazione, modifichi l'intensità del suono trasmesso. Il fattore di guadagno può essere calcolato tramite la relazione 8.1 che esprime il decadimento dell'ampiezza in funzione della distanza fra i due nodi I e J :

$$G_{dist} = \frac{1}{(1 + |P_J - P_I|)^\beta}. \quad (8.1)$$

Il parametro di controllo, β , determina la pendenza del decadimento esponenziale a cui è soggetta l'intensità sonora al variare della distanza. Nel caso in cui

si fissi $\beta = 2$ il modello è identico al decadimento che si ha in natura che varia in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Decadimento dell'intensità sonora in funzione dell'orientamento

Per calcolare il decadimento dell'intensità sonora in funzione dell'orientamento reciproco fra sorgente e ricevitore è necessario calcolare gli angoli d'incidenza tra le direzioni di emissione e di assorbimento dei due nodi e la retta congiungente i due nodi. I valori dei due angoli d'incidenza possono essere calcolati tramite semplici relazioni trigonometriche. Sia α_I l'angolo di incidenza tra la direzione della sorgente E_I e la retta congiungente la sorgente e il ricevitore; sia α_J il corrispondente angolo di incidenza relativo al ricevitore, formato tra la direzione di assorbimento A_J e la congiungente i due nodi. La variazione dell'intensità sonora dovuta all'orientamento reciproco dei due nodi sonori può essere simulato tramite un fattore di guadagno G_{ang} . Questo fattore di guadagno può essere determinato, così come riportato nella seguente relazione, come il prodotto tra i valori di attenuazione relativi alla sorgente e al ricevente in funzione dei rispettivi angoli d'incidenza:

$$G_{ang} = Ge_I(\alpha_I) Ga_J(\alpha_J) \quad (8.2)$$

Le funzioni di attenuazione che descrivono la variazione del decadimento dell'intensità sonora in funzione della variazione dell'angolo d'incidenza possono essere espresse matematicamente tramite delle opportune equazioni. In Audioscape, piuttosto che le relazioni matematiche, si utilizzano delle tabelle che contengono i diversi andamenti di direttività che caratterizzano gli strumenti musicali e i microfoni poichè in tal modo è possibile ottenere una maggiore flessibilità soprattutto per quanto riguarda la sperimentazione di andamenti non standard.

Il valore finale dell'attenuazione dell'intensità sonora dovuta all'effetto combinato della distanza e dell'orientamento relativo di due nodi sonori può essere calcolato tramite il prodotto dei due fattori di guadagno definiti in 8.1 e in 8.2:

$$G_{totale} = G_{dist} G_{ang} \quad (8.3)$$

Effetto Doppler

L'effetto Doppler consiste nello spostamento di frequenza apparente che subisce un suono percepito da un ascoltatore a causa della variazione della distanza fra la lui e la sorgente sonora. Questo effetto può essere simulato utilizzando una linea di ritardo il cui tempo di ritardo può essere modificato dinamicamente. Ogni nuova connessione sonora stabilita fra due qualsiasi nodi contiene il sistema di elaborazione del suono finalizzato a simulare sia l'effetto Doppler sia il ritardo dovuto alla propagazione del suono nel mezzo che separa i due nodi. Il tempo di ritardo corrisponde al tempo necessario al suono per percorrere la distanza che separa i due nodi coinvolti nella connessione, in tal modo, se la distanza varia in funzione del tempo anche il tempo di ritardo si modificherà di conseguenza e sarà dunque percepibile lo spostamento di frequenza tipico dell'effetto Doppler.

Altri effetti legati alla propagazione del suono nello spazio

La propagazione del suono fra due punti dello spazio, assunti l'uno come sorgente e l'altro come ricevitore, è caratterizzata da alcuni altri fenomeni legati alla

distanza e all'orientamento reciproco. Tali fenomeni si manifestano tramite la tendenza a introdurre modifiche e alterazioni nel contenuto spettrale del suono.

Le componenti ad alta frequenza del suono sono caratterizzate da una elevata direzionalità che ne determina una forte attenuazione al variare dell'angolo d'incidenza, mentre, al contrario, le componenti a bassa frequenza sono caratterizzate da un comportamento molto più omni-direzionale con una limitata variazione in funzione dell'angolo d'incidenza. Questo effetto può essere simulato tramite l'impiego di un filtro passa basso (chiamato filtro di direttività), la cui frequenza di taglio varia proporzionalmente al valore assunto dall'angolo d'incidenza. Tale filtro introduce un'attenuazione delle alte frequenze al crescere dell'angolo d'incidenza che raggiunge un massimo in corrispondenza della direzione opposta alla direzione di emissione del suono.

Un secondo effetto della propagazione del suono che tende a modificarne il contenuto spettrale è imputabile alla riduzione delle alte frequenze a causa dell'assorbimento dell'aria. Tale fenomeno modifica il proprio effetto al variare della distanza che intercorre fra sorgente e ricevitore con una sensibile diminuzione delle alte frequenze al crescere della distanza. Anche questo effetto può essere simulato tramite un filtro passa basso (chiamato filtro di assorbimento) la cui frequenza di taglio è opportunamente cambiata in funzione della distanza fra i due nodi coinvolti in una connessione sonora.

Un altro comune effetto acustico che caratterizza in particolare i microfoni direttivi è chiamato "*effetto di prossimità*" ed è caratterizzato da un incremento delle componenti a bassa frequenza del suono quando la distanza fra sorgente e ricevitore diventa molto piccola. Il manifestarsi di questo effetto risulta essere molto familiare sia ai tecnici del suono sia ai musicisti e agli esecutori, spesso questo effetto viene utilizzato come riferimento per valutare la prossimità spaziale. Questo effetto può essere simulato tramite l'impiego di un filtro che amplifica le componenti a bassa frequenza del suono. Poiché l'effetto si manifesta soltanto quando la distanza è inferiore a un certo valore, il filtro viene attivato soltanto quando la distanza fra due nodi sonori scende al di sotto di un dato valore di soglia.

Un altro effetto acustico che viene simulato nell'ambiente consiste nella possibilità di utilizzare un sistema di riverberazione artificiale. L'utente può controllare diversi parametri che influiscono sull'effetto di riverbero come per esempio il volume delle prime riflessioni e quello della coda, la dimensione della stanza, il tempo di riverberazione e il volume relativo fra suono diretto e suono riverberato.

8.1.3 Spazializzazione 3D

Le ricerche svolte nel campo del suono per gli ambienti virtuali sono principalmente finalizzate a definire metodi e tecnologie per la localizzazione di suoni all'interno di uno spazio virtuale tridimensionale. Questa area di ricerca viene chiamata "*spazializzazione sonora*" o anche, usando dei termini di lingua inglese, "*audio rendering*" o "*sound imaging*". Nel campo della musica contemporanea, la spazializzazione sonora rappresenta una tecnica ampiamente studiata e utilizzata, a partire dagli anni '50, da parte di compositori e tecnici interessati prima allo sviluppo della Musica elettronica e successivamente anche alle ricerche riguardanti l'Informatica musicale [38, 89].

Le ricerche in questo settore s'intersecano anche con ambiti paralleli relativi

allo studio dei sistemi sonori per gli ambienti virtuali. Esistono diverse tecniche che possono essere utilizzate per ricreare la percezione della localizzazione di sorgenti sonore in uno spazio tridimensionale [4]; tutti i vari metodi esistenti comunque possono essere raggruppati in tre categorie principali:

- metodi binaurali;
- metodi basati sulle differenze di ampiezza;
- wave field synthesis (WFS).

Metodi binaurali

I metodi binaurali usano delle catene di filtri per simulare le modifiche, dovute alla posizione delle orecchie e della testa, che avvengono nel contenuto spettrale del segnale sonoro che raggiunge le due orecchie. I filtri vengono realizzati in maniera da simulare l'effetto della testa sulla ricezione di suoni collocati in diverse posizioni spaziali. Questo effetto di variazione del contenuto spettrale viene simulato tramite l'individuazione della funzione di trasferimento della testa (Head Response Transfer Function – HRTF). I coefficienti dei filtri vengono calcolati tramite misure empiriche realizzate mediante la registrazione del suono prodotto da sorgenti sonore collocate in posizioni diverse rispetto a un modello di testa umana dotato di opportuni microfoni che simulano l'apparato uditivo umano. In tal modo, la spazializzazione si può realizzare tramite il filtraggio separato del suono da inviare all'orecchio sinistro e quello relativo all'orecchio destro. L'impiego delle cuffie è particolarmente adatto per l'ascolto dei suoni prodotti tramite questo metodo poichè i due segnali vengono mantenuti separati e non risulta possibile nessun tipo d'interferenza tra essi. Esistono anche diversi mezzi, basati sulla cancellazione delle interferenze fra i due segnali, che rendono possibile usare gli altoparlanti per la riproduzione dei suoni prodotti tramite questo approccio.

Metodi basati sulle differenze di ampiezza

I sistemi di riproduzione del suono multicanale che si trovano attualmente in commercio sono basati sull'impiego di un certo numero di altoparlanti disposti in posizioni equidistanti gli uni dagli altri. In tal modo è possibile delimitare una zona d'ascolto all'interno della quale è possibile simulare la localizzazione di sorgenti sonore disposte in diverse posizioni spaziali. La zona in cui è possibile percepire l'effetto di spazializzazione del suono viene comunemente chiamato “*sweet spot*”. Questi sistemi sono tipicamente basati sulla distribuzione del suono con ampiezze diverse sui vari altoparlanti al fine di far percepire il suono come proveniente da una data direzione, per tale motivo il controllo delle differenze di ampiezza fra i diversi altoparlanti diventa l'elemento fondamentale per la realizzazione dell'effetto di spazializzazione sonora. I sistemi attualmente disponibili sul mercato, nella maggior parte dei casi, consentono esclusivamente la localizzazione delle sorgenti sonore su di un piano tramite un accurato posizionamento degli altoparlanti. Per tale motivo tali sistemi vengono definiti “*pantofonici*”. Esistono anche diversi metodi per realizzare sistemi di riproduzione “*perifonici*”, ossia capaci di localizzare le direzioni di emissione delle sorgenti sonore in uno spazio a tre dimensioni. Il metodo “*Ambisonics*”, per esempio, codifica i

segnali audio tramite quattro componenti di direzione (x, y, z, w) , la decodifica di questi segnali rende possibile ricreare l'insieme di segnali sonori che, se inviati a un sistema di riproduzione multicanale, consente di simulare la direzione di provenienza del suono. Un altro metodo, chiamato “*Vector base amplitude panning (VBAP)*”, raggruppa gli altoparlanti in gruppi di tre in maniera che qualsiasi vettore direzione possa essere calcolato per una sorgente sonora disposta all'interno del triangolo formato dagli altoparlanti. Entrambi i sistemi finora descritti possono essere composti da un numero variabile di altoparlanti. Per minimizzare gli errori di localizzazione e per aumentare la risoluzione del sistema di riproduzione è possibile, dunque, utilizzare un elevato numero di altoparlanti uniformemente distribuiti e posti in maniera equidistante attorno alla zona di ascolto.

Wave field synthesis (WFS)

In maniera opposta a quanto detto per i metodi basati sulle differenze d'ampiezza che mirano a ricostruire un campo sonoro accurato esclusivamente all'interno di una data zona d'ascolto, i metodi basati sull'approccio chiamato “*wave field synthesis (WFS)*” sono finalizzati a ricreare l'intero campo sonoro all'interno di un spazio tridimensionale. Questi metodi richiedono una grande quantità di altoparlanti opportunamente disposti e un'elevatissima potenza di calcolo per la determinazione del segnale da inviare a ogni altoparlante. Il campo sonoro così creato non può essere completamente accurato nello spazio di ascolto, ma l'errore all'interno del campo viene minimizzato e distribuito in maniera uniforme su tutto il volume di ascolto. In tal modo gli ascoltatori possono spostarsi all'interno dello spazio senza sostanziali perdite e distorsioni del senso d'immersione nel campo sonoro virtuale.

8.1.4 Ambienti di rete distribuiti

L'intera architettura di Audioscape si basa su tecnologie di rete che rendono possibile l'integrazione fra i suoi diversi componenti: il motore grafico – responsabile della visualizzazione della scena, il motore audio, l'interfaccia grafica e i vari dispositivi d'interazione. Grazie anche agli strumenti messi a disposizione da PD tale sistema fornisce un'ampia gamma di strumenti per la trasmissione e la gestione di messaggi di rete. Tutto ciò rende possibile creare con grande facilità ambienti multimediali condivisi tra più utenti, sistemi per la generazione di suoni e musica distribuiti su più calcolatori, oppure performance condivise. Le potenzialità offerte dalle tecnologie di rete consentono di mettere in comunicazione applicazioni differenti per realizzare un sistema complesso che racchiuda, integrandole opportunamente, le potenzialità dei vari costituenti.

Tali dispositivi sono stati utilizzati per esplorare le possibilità d'integrazione tra i vari strumenti attualmente disponibili nel campo degli ambienti virtuali e della generazione di suoni e musiche da sistemi caotici. Un filone della ricerca che è stata sviluppata consiste nel dotare *Imagination Tools*, applicazione per la generazione e l'elaborazione del suono presentata nella sezione 6.1, di un supporto per la trasmissione di informazioni via rete. Tutto ciò con l'obiettivo di rendere possibile la trasmissione d'informazioni sia tra applicazioni dello stesso tipo che operano su macchine diverse, sia lo scambio di dati con altre applicazioni quali per esempio Audioscape e PD. Queste alcune delle applicazioni che si

è cercato di sperimentare: la creazione di una rete di calcolatori che tramite Imagination Tools condivide la stessa configurazione di DSP e rende possibile l'interazione in tempo reale fra più utenti, l'impiego delle potenzialità offerte dai sistemi d'interazione supportati da Audioscape per il controllo dei processi di generazione e d'elaborazione del suono realizzati in Imagination Tools.

Un secondo filone di ricerca consiste nella realizzazione di alcune applicazioni, strutturate secondo un'architettura client/server, capaci di connettere applicazioni per l'elaborazione e la sintesi del suono (Pure Data, Imagination Tools) funzionanti su calcolatori differenti. Ciò con l'obiettivo di riuscire a creare delle reti di calcolatori che consentono agli utenti di condivide le informazioni relative alla configurazione di DSP e di generatori sonori al fine di realizzare performance musicali distribuite sia su scala locale che su scala globale.

Infine, le tecnologie di rete sono state impiegate nella realizzazione di un visualizzatore specifico per la rappresentazione delle traiettorie prodotte dagli attrattori caotici. Audioscape, infatti, rende possibile visualizzare le traiettorie degli attrattori nella scena 3D, ma la resa grafica delle curve è piuttosto scadente e le possibilità di modifica della qualità e del tipo di visualizzazione sono estremamente scarse. Per superare tali limitazioni si è scelto di sviluppare un visualizzatore dedicato che fosse sufficientemente versatile e flessibile per l'esigenze legate alla rappresentazione visiva delle traiettorie caotiche. Questa applicazione è stata sviluppata ispirandosi all'architettura adottata da Audioscape in cui il motore grafico, basato sull'impiego della libreria grafica Irrlicht,⁴ consiste in una applicazione autonoma che dialoga e interagisce con l'esterno mediante messaggi di rete. Si è scelto d'impiegare il protocollo di rete *Open Sound Control - OSC*, già presentato nella sezione 5.1.4, che, grazie alla sua flessibilità ed estendibilità, consente di realizzare in maniera semplice un sistema di comunicazione fra calcolatori e fra applicazioni. Il visualizzatore crea una scena 3D in cui viene tracciata la traiettoria dell'attrattore. Le immagini in figura 8.2 mostrano tre diversi attrattori rappresentati mediante il visualizzatore.

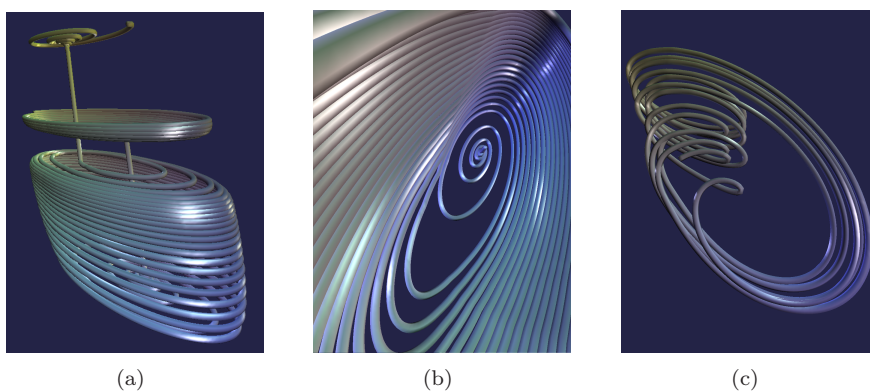


Figura 8.2: Attrattori caotici rappresentati mediante il visualizzatore.

⁴Per approfondimenti si veda il sito ufficiale del progetto: <http://irrlicht.sourceforge.net/>.

Le caratteristiche della scena, quali luci, punto di vista, texture e colori della traiettoria possono essere modificate dall'utente consentendo un'ampia flessibilità nella scelta del suo aspetto finale. Attualmente queste impostazioni possono essere modificate operando direttamente sul codice sorgente dell'applicazione, mentre in futuro questi controlli saranno accessibili tramite messaggi di rete basati sul protocollo OSC e tramite un'opportuna interfaccia grafica. La traiettoria dell'attrattore viene tracciata in seguito alla ricezione di messaggi OSC che specificano le coordinate tridimensionali di un nuovo punto. Tali messaggi possono essere inviati da una qualsiasi applicazione che supporti il protocollo OSC, come per esempio Pure Data. Il visualizzatore è stato impiegato nella realizzazione di un'installazione che sarà presentata in seguito nella sezione 9.3.2.

8.1.5 Sistemi d'interazione

Diverse tipologie di sistemi d'interazione sono stati sperimentati durante lo sviluppo delle applicazioni legate agli ambienti virtuali. Audioscape supporta già un'ampia gamma di sistemi d'interazione basati su diversi dispositivi di input. Inoltre, le sue potenzialità possono essere ampliate notevolmente dalla possibilità di sfruttare l'ambiente di programmazione visuale Pure Data per la creazione di meccanismi d'interazione specificamente realizzati per le diverse esigenze. I dispositivi d'interazione, utilizzati nel corso del Dottorato per la realizzazione di performance e installazioni multimediali, sono stati i seguenti:

- sistemi d'interazione tradizionali (tastiera, mouse);
- joystick – game pad;
- Nintendo Wii;
- sistemi basati su telecamere.

Tralasciando nella trattazione i sistemi d'interazione più tradizionali, il Nintendo Wii appare essere il sistema più promettente per quanto riguarda il suo impiego nello sviluppo di sistemi d'interazione per ambienti virtuali. La connessione wireless consente all'utente di muoversi liberamente nell'ambiente senza preoccuparsi dei cavi di collegamento, inoltre ciò consente a più utenti di scambiarsi il dispositivo di controllo in maniera estremamente semplice. Il Wii mette a disposizione un'ampia scelta di meccanismi di controllo, quali per esempio: diversi bottoni, quattro tasti di direzione, un dispositivo di puntamento infrarosso, degli accelerometri per il rilevamento dell'orientamento. Tutto ciò rende il dispositivo molto versatile e flessibile poichè consente di scegliere, a seconda dei diversi casi, la strategia di controllo più adatta e naturale per facilitare il più possibile l'interazione fra utente e ambiente virtuale. Dalle applicazioni finora sviluppate, l'impiego dei sensori di orientamento per controllare la navigazione all'interno dell'ambiente sembra essere il meccanismo d'interazione che fornisce i risultati più interessanti nella realizzazione di un sistema di controllo intuitivo e di semplice impiego.

L'impiego di telecamere è stato anche sperimentato per catturare i movimenti di un utente e trasformarli in mezzi utili per il controllo di elementi dell'ambiente virtuale. Inizialmente per sperimentare le possibilità offerte da

tale approccio è stato impiegato *EyesWeb*⁵ che è un ambiente di programmazione visuale specializzato per lo sviluppo di processi di elaborazione di video e immagini finalizzato alla creazione di interfacce espressive per la musica, la danza e le arti coreografiche. Successivamente si è passati a utilizzare *Graphics Environment for Multimedia – GEM*⁶ che è una libreria grafica per Pure Data che fornisce anche oggetti per l’acquisizione e l’elaborazione del video. Con questa libreria è stato realizzato il sistema d’interazione basato sull’uso di una telecamera impiegato nell’allestimento dell’installazione presentata nel seguito nella sezione 9.3.2.

8.2 Ambienti virtuali per l’esplorazione dei sistemi complessi

Gli ambienti virtuali 3D multimediali possono essere utilizzati fruttuosamente per lo studio, l’esplorazione e la presentazione dei vari fenomeni legati ai sistemi complessi e caotici. Il principale vantaggio offerto dall’impiego degli ambienti virtuali consiste nella possibilità di combinare simultaneamente la visualizzazione e l’ascolto dei suoni e delle musiche generate dai sistemi dinamici. Inoltre la possibilità di utilizzare nuovi paradigmi e modalità innovative d’interazione con la scena virtuale e con gli oggetti che essa contiene fornisce la possibilità di svolgere azioni che risultano naturali e familiari per gli utenti poiché sono basate sullo svolgimento di attività simili a quelle svolte nella vita quotidiana. Per la creazione di questi ambienti virtuali è stata impiegata l’architettura Audioscape principalmente per due motivi: perchè consente di creare delle scene sonore in cui è possibile simulare in maniera accurata la propagazione del suono in un ambiente tridimensionale; perchè è un’architettura software open source nata come estensione di altri sistemi liberi specializzati nella grafica 3D e nell’elaborazione del suono. Questo secondo aspetto garantisce un’elevata versatilità e flessibilità del sistema che può essere modificato ed esteso a piacimento a seconda delle particolari esigenze che sorgono nello sviluppo di un determinato ambiente virtuale.

Tramite Audioscape, sono state sviluppate diverse applicazioni per l’esplorazione dei sistemi caotici e per lo studio del loro impiego in campo musicale. Ambienti virtuali 3D sono stati utilizzati come strumento di rappresentazione e controllo dei processi di generazione di suoni, musiche e accompagnamenti musicali mediante sistemi caotici [23, 30]. L’architettura è stata anche utilizzata per sperimentare l’impiego di diversi metodi di rappresentazione sonora combinati alla visualizzazione 3D delle traiettorie caotiche tipiche degli attrattori prodotti dall’oscillatore di Chua. L’immagine in figura 8.3 mostra un attrattore generato dall’oscillatore di Chua all’interno di un ambiente virtuale creato mediante Audioscape.

La generazione di melodie, l’ascolto diretto delle serie temporali, la sintesi per modulazione di frequenza sono i metodi maggiormente utilizzati, fra tutti i vari possibili, per la rappresentazione uditiva dell’evoluzione degli attrattori caotici all’interno degli ambienti virtuali. L’impiego combinato di rappresentazioni

⁵Per approfondimenti si veda il sito ufficiale del progetto: <http://www.infomus.org/EywIndex.html>.

⁶Per approfondimenti si veda il sito ufficiale del progetto: <http://gem.iem.at/>.

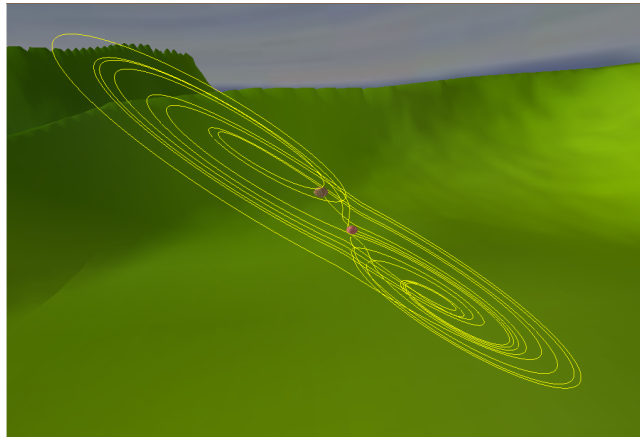


Figura 8.3: Un attrattore caotico nell'ambiente virtuale.

visive e sonore è estremamente interessante e utile per compiere l'esplorazione dello spazio dei parametri dell'oscillatore di Chua tramite l'uso simultaneo di diversi canali sensoriali. A tal fine è stata sviluppata un'apposita interfaccia che consente di visualizzare l'evoluzione dell'oscillatore di Chua assieme a sei cursori che rappresentano visivamente la variazione dei suoi parametri di controllo rispetto a un insieme di valori di partenza. L'immagine in figura 8.4 mostra l'interfaccia in cui è possibile vedere al centro la traiettoria descritta da un attrattore caotico e i sei cursori posti attorno. L'interfaccia può essere combinata con differenti metodi di rappresentazione uditiva così come è possibile utilizzare tutti i differenti dispositivi d'interazione illustrati nella sezione precedente per effettuare la modifica dei valori dei parametri di controllo dell'oscillatore di Chua.

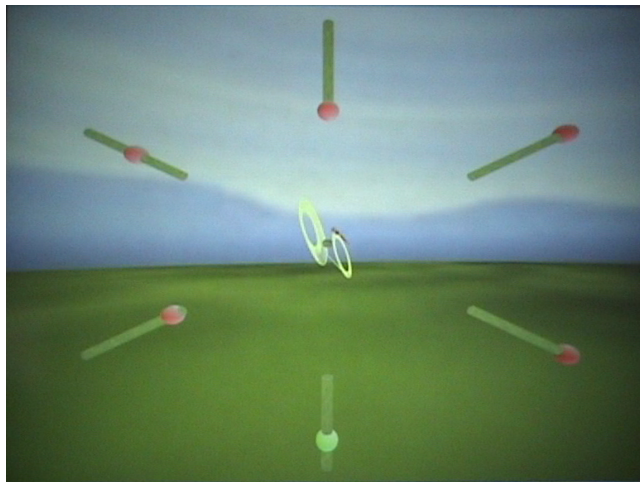


Figura 8.4: Interfaccia per l'esplorazione dello spazio dei parametri dell'oscillatore di Chua.

La spazializzazione 3D è stata anche utilizzata per rappresentare acusticamente l'evoluzione degli attrattori caotici tramite lo spostamento di una sorgente sonora che si sposta nello spazio in maniera solidale con la traiettoria che descrive l'attrattore caotico. La spazializzazione 3D è stata realizzata usando il metodo delle differenze d'ampiezza basato sull'impiego di un sistema di riproduzione audio composto da otto altoparlanti disposti ai vertici di un cubo. La figura 8.5 mostra una rappresentazione schematica del sistema di riproduzione del suono 3D.

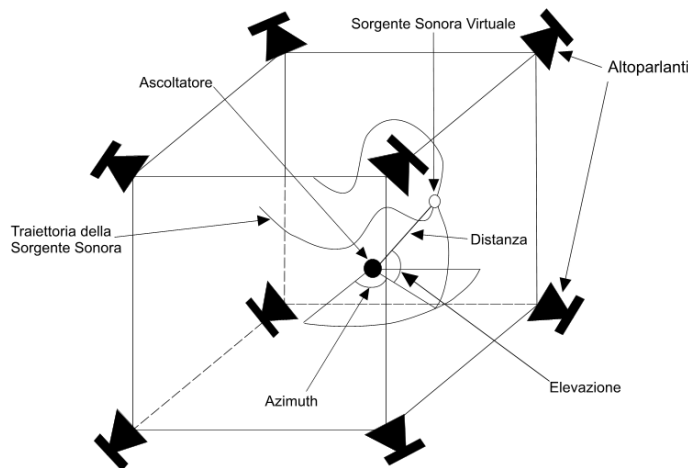


Figura 8.5: Schema del sistema di riproduzione del suono 3D.

Per realizzare la spazializzazione all'interno dell'ambiente virtuale è stato creato un punto di ascolto virtuale in cui sono stati collocati otto microfoni virtuali opportunamente orientati per coprire un angolo solido di 360° . Si è realizzata un'importante fase di calibrazione dei vari parametri che controllano l'assorbimento del suono da parte dei microfoni virtuali al fine di ottenere un effetto di spazializzazione quanto più fedele e preciso possibile. L'uso della spazializzazione 3D consente di simulare lo spostamento di una sorgente sonora secondo la traiettoria tridimensionale descritta da un attrattore caotico. Materiali sonori di diversa natura possono essere emessi dalla sorgente sonora in movimento: brani pre-registrati, i suoni o le musiche prodotte dalle serie temporali del sistema caotico, suoni generati mediante qualsiasi altro sistema di sintesi del suono. Dai vari esperimenti condotti si è notato che l'impiego di materiale musicale tradizionale caratterizzato principalmente da suoni armonici risulta essere poco adatto a tale scopo poiché le variazioni di altezza introdotte dalla simulazione dell'effetto Doppler distorcono fortemente il materiale musicale rendendolo poco coerente e a volte sgradevole all'ascolto. Inoltre si è notato che l'impiego di suoni lunghi e tenuti spesso limita fortemente la completa percezione dell'effetto di spazializzazione. Da tali considerazioni si è trovato preferibile utilizzare suoni di natura percussiva caratterizzati da una breve durata e da una struttura interna scarsamente armonica che li rende meno sensibili alle distorsioni indotte dalla simulazione dell'effetto Doppler. La spazializzazione può essere efficacemente combinata alla visualizzazione 3D per realizzare un sistema di rappresentazione

degli attrattori caotici in cui la componente visiva sia coerente con la localizzazione spaziale riprodotta dal sistema sonoro. In tal modo è possibile muovere l'attrattore dello spazio virtuale tridimensionale, applicare delle rotazioni o delle traslazioni, per poter osservare dettagli diversi che saranno rappresentati sia mediante la componente grafica che tramite la spazializzazione 3D. La figura 8.6 mostra un attrattore prodotto dall'oscillatore di Chua visualizzato in un ambiente virtuale in cui il punto di ascolto è fissato in corrispondenza dell'intersezione dei tre piani visibili al centro dell'immagine; la rotazione dell'attrattore ha effetti sia sulla componente visiva che sulla spazializzazione 3D del suono.

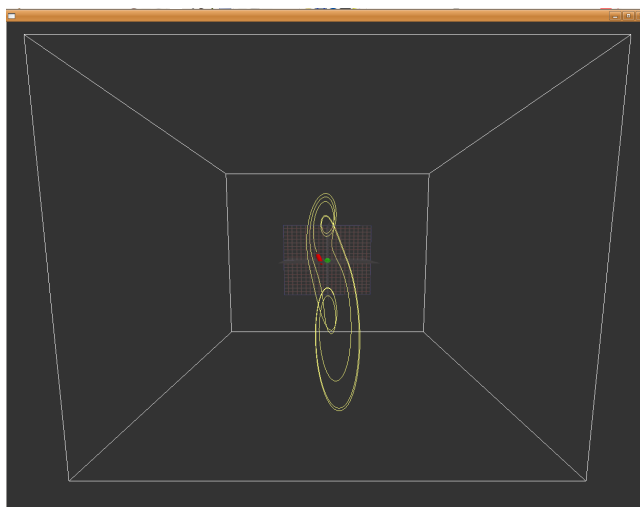


Figura 8.6: Visualizzazione di un attrattore dell'oscillatore di Chua.

Capitolo 9

Applicazioni artistiche

La ricerca sull'impiego di metodi di rappresentazione uditiva e di ambienti virtuali applicati allo studio dei sistemi dinamici ha portato alla creazione di strumenti capaci di generare suoni, linee melodiche e strutture musicali a partire dall'evoluzione temporale dei sistemi caotici. Inoltre, sono stati creati degli "strumenti musicali" innovativi e degli ambienti virtuali in cui rappresentare visivamente e uditivamente l'evoluzione temporale dei sistemi dinamici.

Tutti questi strumenti sono stati utilizzati anche per la realizzazione di prodotti artistici come per esempio brani musicali, performance live e installazioni multimediali. L'intento che ha mosso questa sperimentazione consiste nell'esplorare e nel verificare le possibilità artistiche offerte dai diversi strumenti e dalle tecniche sviluppate nel corso della ricerca. Inoltre, da un punto di vista esclusivamente artistico si è cercato di sfruttare le potenzialità di tali strumenti per esplorare nuovi territori sonori e musicali.

Per quanto riguarda la valutazione degli esiti di questo percorso artistico è necessario mettere in atto un profondo cambiamento di prospettiva poichè ciò che sarà presentato nel seguito dovrà essere valutato e giudicato esclusivamente in base a considerazioni estetiche e artistiche circa la capacità di suscitare emozioni, di evocare e trasmettere stati d'animo o visioni, di coinvolgere e attrarre l'attenzione del pubblico. Nel caso specifico di un prodotto musicale l'ascolto e la capacità di suscitare emozioni saranno, dunque, gli unici aspetti che contano nella valutazione dei risultati. Il retroterra di conoscenze scientifiche e tecniche, anche se svolgono sicuramente un importante ruolo, devono restare sempre sullo sfondo del processo di valutazione poichè la logica interna della musica e la sua validità da un punto di vista qualitativo si basano esclusivamente sulla comunicazione mediante fenomeni sonori e sulla loro conseguente trasformazione in rappresentazioni mentali.

Nel seguito si presenterà una rassegna delle applicazioni artistiche realizzate nel corso del Dottorato di Ricerca. Si presenteranno alcune composizioni musicali realizzate mediante l'impiego dell'oscillatore di Chua per generare materiale musicale e delle installazioni multimediali che sono state realizzate per presentare le attività di ricerca svolte e per sperimentare l'impiego dell'oscillatore di Chua in campo artistico.

9.1 Composizioni musicali

Al libro *A Gallery of Chua Attractors* pubblicato da E. Bilotta e P. Pantano [17] è stato allegato un CD musicale dal titolo: *Music from A Gallery of Chua Attractors*. Al contenuto di questo CD si è contribuito con la creazione di cinque composizioni musicali che sono state realizzate utilizzando le tecniche di codifica musicale dell'oscillatore di Chua e le tecniche di composizioni arrangiamento e orchestrazione presentate nella sezione 6.2.3. I titoli dei brani realizzati, ascoltabili anche in rete all'indirizzo: <http://musigen.unical.it/>, sono i seguenti:

- Flying wing;
- Iaco;
- Movimenti Obliqui;
- Pan II;
- Studio 3.5-Beta.

La figura 9.1 mostra l'immagine del CD "*Music from a Gallery of Chua Attractors*".

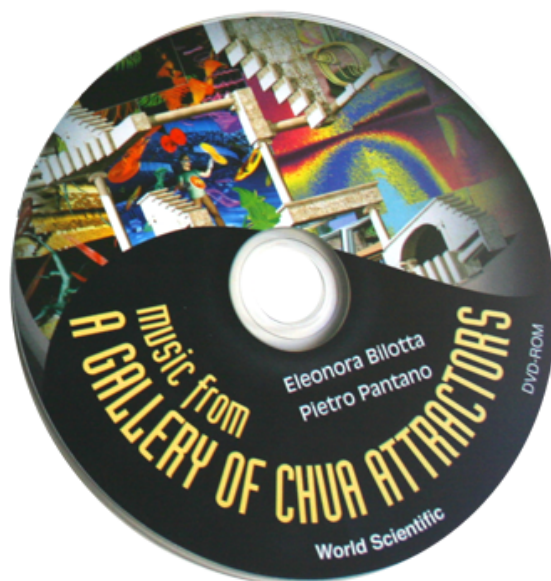


Figura 9.1: Music from a Gallery of Chua Attractors.

9.2 Performance Live

Gli strumenti musicali basati sull'impiego di sistemi dinamici caotici sviluppati nel corso del Dottorato di Ricerca, già presentati nella sezione 6.3, possono essere utilizzati per la realizzazione di performance musicali e di esecuzioni dal vivo.

Il Chaotic Modulator è al momento lo strumento più adatto per tale compito poichè consente di ottenere una vasta gamma di sonorità diverse che possono essere controllate e modificate mediante un sistema di controllo e di manipolazione sufficientemente semplice e intuitivo. Per tale motivo questo strumento è stato già utilizzato per la realizzazione di due differenti performance musicali: la prima ha avuto luogo in occasione del concerto dell'Orchestra svoltosi nell'ambito della serata conclusiva della prima edizione di Paola in Jazz, svoltasi a Paola alla fine Luglio 2008; la seconda si è svolta il 20 Maggio 2009 presso l'Evolutionary System Group dell'Università della Calabria in occasione del seminario dal titolo *La Fisica e la Musica* svolto dal Prof. Gianni Zanarini dell'Università di Bologna.

9.3 Installazioni

Due installazioni multimediali sono state allestite mediante l'impiego delle tecnologie dedicate agli ambienti virtuali. Tali installazioni sono state realizzate con l'intento di trasferire sul piano artistico e divulgativo i risultati della ricerca svolta durante l'intero corso del dottorato.

9.3.1 Forme Caotiche

L'installazione multimediale, presentata nel corso della mostra "*Forme caotiche: un viaggio tra arte e scienza*" svolta presso il Complesso Monumentale del Valentianum di Vibo Valentia dal 19 al 24 Gennaio 2008, aveva come obiettivo la presentazione e la divulgazione delle ricerche sulla generazione di suoni e musiche mediante sistemi caotici. L'installazione, realizzata mediante Audioscape, presenta un mondo virtuale tridimensionale in cui sono stati collocati vari attrattori del circuito di Chua. Al pubblico è stata data l'opportunità d'interagire con l'ambiente, navigare al suo interno per fruire dei contenuti presentati, visualizzare gli attrattori caotici e ascoltare i suoni e le musiche da essi generati. La figura 9.2 mostra una fotografia della presentazione dei contenuti dell'installazione agli studenti di una scuola.

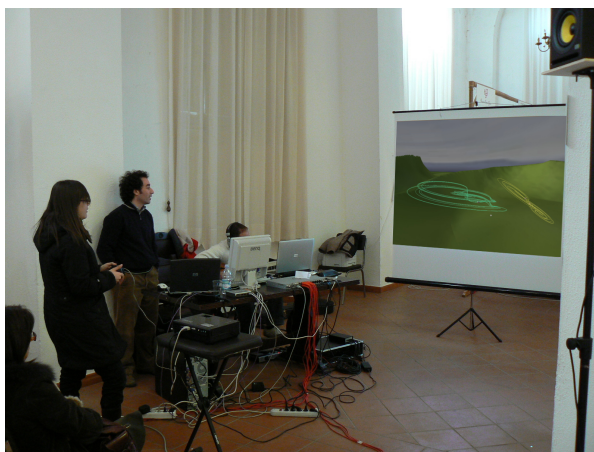


Figura 9.2: Un utente esplora l'ambiente virtuale.

L'apparecchiatura impiegata per l'allestimento dell'installazione consiste in: otto casse utilizzate per la riproduzione del suono spazializzato tridimensionalmente, una scheda audio multicanale, un calcolatore per la gestione dell'audio, un computer portatile collegato a un proiettore per il rendering video, uno switch per collegare in rete i due calcolatori e un gamepad per controllare la navigazione e l'interazione degli utenti con l'ambiente virtuale. La scena virtuale 3D è composta da quattro diverse aree:

1. Presentazione dei suoni e delle musiche prodotte dagli attrattori dell'oscillatore di Chua;
2. Spazializzazione tridimensionale del suono. Gli spettatori hanno assistito all'evoluzione di alcune traiettorie tridimensionali (si vedano le immagini in figura 9.3) nell'ambiente grafico e hanno avuto la possibilità di seguire il movimento della sorgente sonora tramite la spazializzazione tridimensionale;
3. Sperimentazione della sensibilità alle condizioni iniziali (si veda la figura 9.4). È stata mostrata l'evoluzione simultanea di due attrattori caratterizzati da condizioni iniziali fra loro molto simili. Per un certo periodo di tempo i due attrattori seguono la stessa traiettoria, in seguito le traiettorie evolvono in maniera autonoma. L'evoluzione di ogni attrattore è stata trasformata in una sequenza di note con un dato suono. Inizialmente è possibile ascoltare un'unica melodia poiché gli attrattori seguono la stessa evoluzione, in seguito, dopo la separazione, è possibile distinguere due differenti melodie;
4. Il giardino degli attrattori, presentazione di una galleria di sei diversi attrattori che evolvono in tempo reale (si veda la figura 9.5).

La figura 9.3 mostra le due curve usate per la spazializzazione tridimensionale del suono.

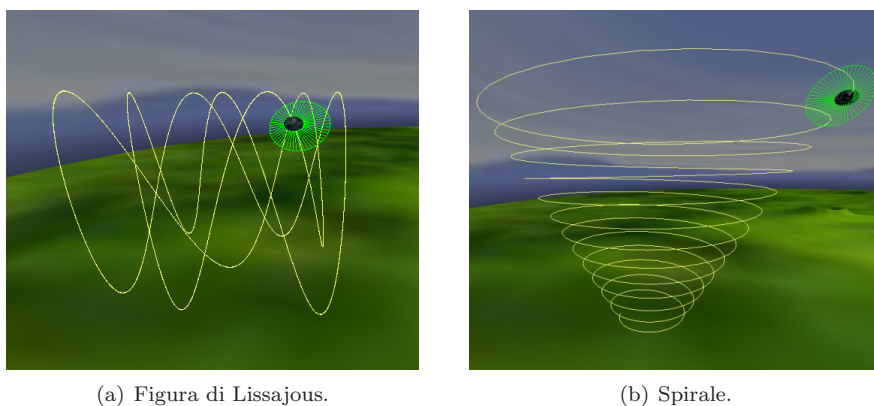


Figura 9.3: Curve usate per la spazializzazione tridimensionale del suono.

La figura 9.4 mostra la vista dell'ambiente virtuale relativa all'esperimento sulla variazione sensibile alle condizioni iniziali. La figura 9.5 mostra la vista dell'ambiente virtuale relativa alla collezione di attrattori caotici.

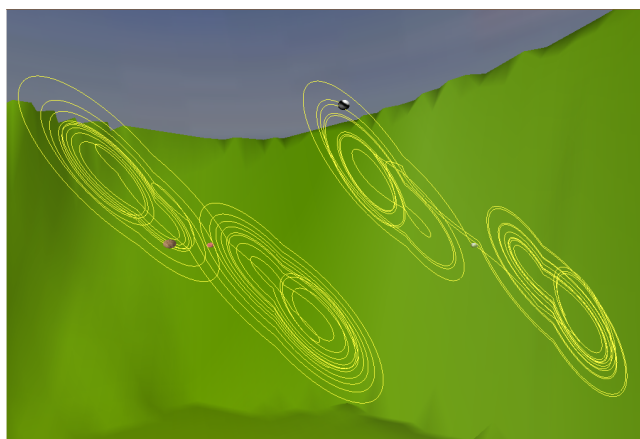


Figura 9.4: Esperimento sulla variazione sensibile alle condizioni iniziali.

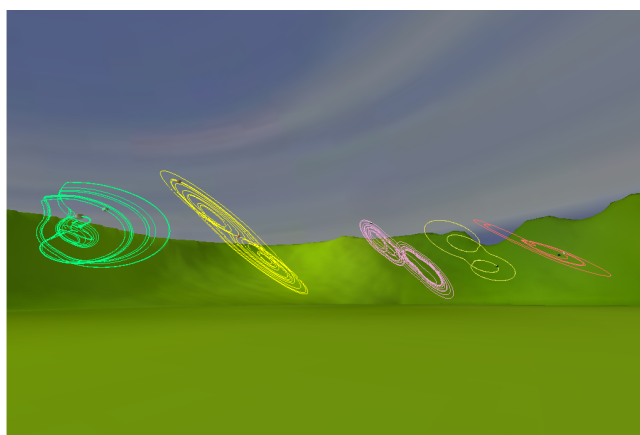


Figura 9.5: Collezione di attrattori caotici.

9.3.2 Memorie acustiche

Memorie Acustiche è un'installazione multimediale interattiva basata sull'impiego di un sistema di musica concreta generativa. La componente sonora dell'installazione consiste in un ambiente sonoro virtuale creato mediante l'uso di un insieme ordinato di campioni sonori che riproducono un'ampia collezione di suoni ambientali registrati in luoghi e tempi differenti. L'insieme dei diversi campioni sonori costituisce, dunque, una collezione di ricordi, di "Memorie Acustiche" che via via riaffiorano e vengono organizzate all'interno dell'ambiente sonoro tramite un sistema di musica generativa basato sull'impiego dell'oscillatore di Chua. L'evoluzione delle tre serie temporali che determinano il comportamento dell'oscillatore di Chua sono state utilizzate per controllare i tre diversi parametri che modificano l'ambiente sonoro. La figura 9.6 mostra l'allestimento dell'installazione.

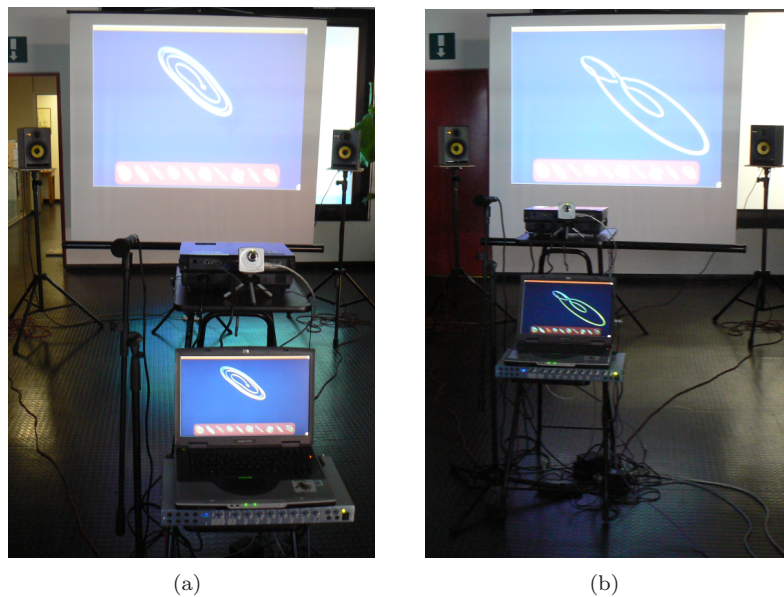


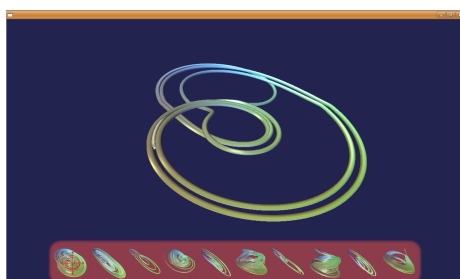
Figura 9.6: Memorie acustiche.

La componente visiva dell'installazione consiste nel visualizzatore presentato nella sezione 8.1.4 che rappresenta l'evoluzione dell'attrattore caotico usato per la generazione dell'ambiente sonoro. Il sistema d'interazione dell'installazione consiste in una telecamera collegata a un sistema di elaborazione di immagini che consente di acquisire e registrare i movimenti degli utenti che vengono utilizzati per controllare quale attrattore caotico utilizzare nel processo di generazione dell'ambiente sonoro. L'interazione avviene anche sul piano sonoro poiché tramite un microfono viene acquisito il suono dell'ambiente reale che viene opportunamente elaborato e inserito all'interno dell'ambiente sonoro virtuale.

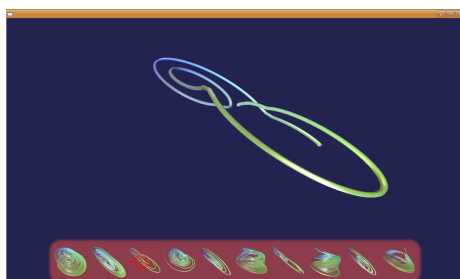
Il primo dei parametri che influiscono sull'ambiente virtuale consente di definire quali campioni sonori debbano essere riprodotti. I campioni pre-registrati sono stati ordinati in sequenza e fra suoni successivi è stato realizzato un processo di *“crossfading”* che consente di ottenere delle transizioni continue fra i vari suoni. La variazione continua del primo parametro in un dato intervallo numerico consente di riprodurre i vari campioni sonori relativi all'intervallo prescelto. Il secondo parametro definisce la posizione della sorgente nell'ambiente sonoro, in altri termini questo parametro controlla il *“panning”* del suono da indirizzare al canale sinistro e al canale destro di un impianto di riproduzione stereofonico. Il terzo parametro controlla la distanza della sorgente sonora virtuale dall'ascoltatore. Per cercare di fornire all'ascoltatore la percezione della variazione della distanza dalla sorgente che emette il suono sono stati simulati diversi effetti caratteristici dei fenomeni acustici legati alla propagazione del suono. Si è introdotta l'attenuazione del suono inversamente proporzionale al quadrato della distanza, il filtraggio delle alte frequenze al crescere della distanza al fine di simulare i fenomeni di assorbimento dell'aria, infine s'impiegato un riverbero digitale per simulare un ambiente virtuale e si è introdotto il cambiamento del bilanciamento fra suono diretto e suono riverberato in maniera da far prevalere

il suono diretto quando la distanza fra ascoltatore è sorgente è piccola, mentre al crescere della distanza il bilanciamento si sposta in maniera da dare maggiore rilevanza al suono riverberato.

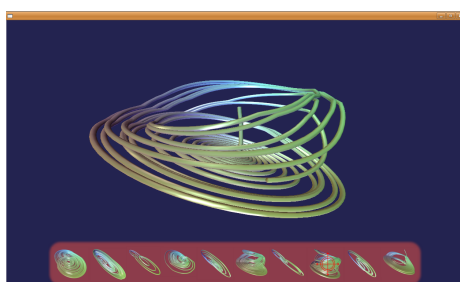
Sono stati scelti e utilizzati dieci diversi attrattori prodotti dall'oscillatore di Chua, nella parte bassa del visualizzatore è stata inserita una barra che rappresenta l'insieme ordinato dei dieci attrattori che consente di fornire all'utente un feedback visivo del processo d'interazione realizzato mediante la telecamera. Sulla barra, infatti, scorre un cursore controllato mediante il sistema di elaborazione del flusso video acquisito dalla telecamera che indica all'utente la sua attuale posizione nel campo visivo della telecamera. In tal modo l'utente tramite il movimento del proprio corpo ha la possibilità di cambiare l'attrattore intervenendo dunque nella modifica del processo di generazione dell'ambiente sonoro. Le immagini in figura 9.7 mostrano tre diversi attrattori rappresentati nella finestra del visualizzatore.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.7: Visualizzatore Memorie acustiche.

Capitolo 10

Conclusioni

Lo sviluppo della Musica elettronica e, successivamente, dell'Informatica musicale ha dato un forte impulso, negli ultimi sessanta anni, alle ricerche nel campo dell'acustica e della psicoacustica. La cooperazione e le sinergie sorte fra ricercatori e compositori interessati a sperimentare l'impiego dei nuovi mezzi elettronici per la generazione e l'elaborazione del suono hanno reso possibile numerose scoperte. Da ciò è emersa una nuova visione del suono che appare caratterizzato da una natura ricca e variegata. I vari processi percettivi e cognitivi, legati alla sensazione umana del suono, sono stati analizzati in dettaglio da psicologi e studiosi di psicoacustica anche grazie all'impiego delle nuove tecnologie legate alla sintesi e all'elaborazione numerica del suono. Tali ricerche hanno gettato nuova luce su un vasto terreno di ricerca caratterizzato da fenomeni di non facile comprensione. Da ciò il suono appare come un fenomeno complesso sia per la sua natura intrinseca, sia per quanto riguarda i meccanismi della percezione umana a lui riconducibili. La Musica, dunque, come organizzazione nel tempo di suoni, può considerarsi qualcosa di ancora più complesso e difficile da spiegare. Lo studio e la comprensione dei meccanismi fondanti della Musica possono essere realizzati anche mediante l'impiego di strumenti e metodi che trovano il proprio retroterra in campi avanzati della ricerca scientifica quali l'Intelligenza Artificiale, la Vita Artificiale, la Teoria del Caos.

L'ipotesi che è stata avanzata in questa tesi consiste nel pensare la musica come uno strumento di rappresentazione, come uno schermo per studiare e comprendere la Complessità. Se si pensa, infatti, che l'interesse della ricerca scientifica consiste nella comprensione di tutti quei fenomeni, spesso sfuggenti e impalpabili, legati all'emergenza e all'auto-organizzazione nei sistemi complessi è possibile pensare alle rappresentazioni musicali come uno strumento specializzato nel cogliere e manifestare, tramite l'espressione artistica, ciò che per sua natura risulta essere estremamente sottile e sfuggente.

Per investigare tale ipotesi sono state sviluppate alcune applicazioni che impiegano sistemi dinamici caotici per la generazione di suoni e musica. I sistemi dinamici sono modelli matematici capaci di rappresentare una vasta gamma di evoluzioni temporali, mentre d'altra parte la Musica non è altro che l'organizzazione nel tempo di eventi sonori. Dunque, il parallelo è immediato e bidirezionale: l'organizzazione musicale di eventi sonori può essere realizzata o modellata tramite sistemi dinamici; d'altra parte, la Musica può costituire un potente strumento di rappresentazione per l'analisi di comportamenti temporali

extra-musicali. A tal fine si è cercato di valutare la qualità e le potenzialità offerte dai metodi di rappresentazione uditiva, affrontando, anche da un punto di vista teorico, le principali problematiche legate allo sviluppo di tali applicazioni. In questo ambito, è stato necessario definire dei sistemi di codifica opportuni che rendano possibile trasformare le strutture matematiche in oggetti sonori e musicali lasciando inalterati i vari aspetti caratteristici del fenomeno in analisi. In tal modo, tramite lo studio del sistema di codifica e del materiale musicale capace di produrre dalle varie strutture matematiche, è possibile realizzare un percorso inverso dalla Musica alla Matematica, fino alla Scienza, che potrebbe contribuire a individuare e comprendere gli aspetti salienti delle strutture matematiche d'origine.

L'ipotesi che ha guidato lo sviluppo dei sistemi di codifica consiste nel pensare tali sistemi come dei processi che, nel caso ideale, consentano di trasferire completamente immutato in campo musicale il "grado di complessità" caratteristico del comportamento di un dato modello matematico. La definizione di un tale sistema di codifica può contribuire, dunque, a identificare le leggi che sottostanno ai comportamenti complessi tramite l'individuazione di tutte quelle proprietà invarianti che possono essere rese manifeste anche tramite l'ascolto delle strutture musicali generate dal modello matematico.

I risultati finora ottenuti mostrano che è possibile realizzare delle rappresentazioni uditive dell'evoluzione dei sistemi dinamici. Tali rappresentazioni sono state utilizzate per la creazione di artefatti sonori e musicali e per la realizzazione di performance live e installazioni multimediali. Per quanto riguarda le reali ricadute in campo scientifico, i risultati appaiono promettenti anche se occorre più tempo e altre sperimentazioni per valutare il reale valore e l'affidabilità.

Infine è stato illustrato l'impiego di ambienti virtuali 3D multimediali per lo studio e la rappresentazione di sistemi complessi. Gli ambienti virtuali possono essere utilizzati fruttuosamente per lo studio, l'esplorazione e la presentazione dei vari fenomeni legati ai sistemi complessi e caotici. Il principale vantaggio offerto consiste nella possibilità di combinare simultaneamente la visualizzazione e l'ascolto dei suoni e delle musiche generate dai sistemi dinamici. Inoltre, gli ambienti virtuali offrono anche la possibilità di utilizzare dei paradigmi d'interazione con la scena 3D e con gli oggetti in essa contenuti che risultano essere naturali e familiari per gli utenti poiché sono basati sullo svolgimento di attività simili a quelle svolte nella vita quotidiana.

L'attività di ricerca in futuro dovrà concentrarsi sulla realizzazione di esperimenti percettivi per valutare la qualità delle rappresentazioni uditive fornite dai diversi sistemi di codifica. Inoltre, sarà opportuno cercare, tramite la collaborazione con musicisti e compositori, di approfondire l'impiego in campo artistico degli strumenti sviluppati per la creazione di performance musicali e installazioni multimediali.

Bibliografia

- [1] M. Agamennone, S. Facci, F. Giannattasio, e G. Giurati. *Grammatica della musica etnica*. Bulzoni Editore, Roma, 1991.
- [2] M. F. Barnsley. *Fractals everywhere*. Academic Press, New York, 1988.
- [3] M. F. Barnsley, A. Jacquin, F. Malassenet, L. Reuter, e A. D. Sloan. Harnessing chaos for image synthesis. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 22(4):131–140, 1988.
- [4] D. Begault. 3-D sound for virtual reality and multimedia. Relazione tecnica, NASA, 1994. Disponibile all'indirizzo: http://human-factors.arc.nasa.gov/publibrary/Begault_2000_3d_Sound_Multimedia.pdf.
- [5] W. Benjamin. *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*. Piccola Biblioteca Einaudi, Torino, 2000.
- [6] P. J. Bentley e D. W. Corne. *Creative Evolutionary Systems*. Academic Press, Londra, 2002.
- [7] P. A. Bertacchini, E. Bilotta, L. Gabriele, G. Longo, V. Mazzeo, P. Pantano, C. Rizzuti, A. Talarico, G. Tocci, e S. Vena. Imagination Tools. A 3D environment for learning and playing music. In *Eurographics Italian Chapter Conference*. A cura di R. De Amicis e Conti G., Trento, 2007.
- [8] P. A. Bertacchini, E. Bilotta, L. Gabriele, V. Mazzeo, P. Pantano, C. Rizzuti, e S. Vena. Imagination Tools: Made to play music. In *Edutainment 2007, The 2nd International Conference of E-Learning and Games*, Hong Kong, 2007.
- [9] P. A. Bertacchini, E. Bilotta, e P. Pantano. Modelli matematici, linguaggi e musica. *Sistemi Intelligenti*, (3):489–530, 2005.
- [10] F. Bevilacqua, R. Muller, e N. Schnell. MnM: a Max/MSP mapping toolbox. In *Proc. of 2005 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME-05)*, Vancouver, 2005.
- [11] P. Beyls. Chaos and creativity: The dynamic systems approach to musical composition. *Leonardo Music Journal*, 1(1):31–36, 1991.
- [12] R. Bidlack. Chaotic systems as simple (but complex) compositional algorithms. *Computer Music Journal*, 16(3):33–47, 1992.

- [13] E. Bilotta, E. R. Miranda, P. Pantano, e P. M. Todd. Artificial life models for musical applications: Workshop report. *Artificial Life*, 8(1):83–86, 2002.
- [14] E. Bilotta e P. Pantano. Artificial life music tells complexity. In *ALMMA 2001 - Artificial Life Models for Musical Applications*. A cura di E. Bilotta, P. Pantano, e P. Todd, pp. 17–28, Cosenza, 2001.
- [15] E. Bilotta e P. Pantano. Synthetic harmonies: An approach to musical semiosis by means of cellular automata. *Leonardo*, 35(2):153–159, 2002.
- [16] E. Bilotta e P. Pantano. Matematica, musica e tecnologie: un trinomio possibile. In *Atti del Convegno Matematica senza Frontiere, Quaderno n.2 del Dipartimento di Matematica dell'Università di Lecce*, pp. 309–324, Lecce, 2003.
- [17] E. Bilotta e P. Pantano. *A Gallery of Chua Attractors*. World Scientific Publishing, Singapore, 2008.
- [18] E. Bilotta, P. Pantano, E. Cupellini, e C. Rizzuti. Evolutionary methods for melodic sequences generation from non-linear dynamics systems. In *EvoWorkshops 2007*, pp. 585–592, Berlino, 2007.
- [19] E. Bilotta, P. Pantano, e S. Gervasi. Readings complexity in Chua's oscillator through music. Part I: A new way of understanding chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 15(2):253–382, 2005.
- [20] E. Bilotta, P. Pantano, e V. Talarico. Evolutionary music and fitness function. In *Mathematics in Industry 1, Progress in Industrial Mathematics at ECMI*. A cura di A.M. Anile, V. Capasso, e A. Greco, pp. 127–139. Springer, 2000.
- [21] E. Bilotta, P. Pantano, e V. Talarico. Synthetic harmonies: An approach to musical semiosis by means of cellular automata. In *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference*. A cura di M. A. Bedau, J.S. Mc Caskill, Packard N. H., e Rasmussen S., pp. 537–546, Cambridge, MA, 2002. MIT Press.
- [22] T. Bolognesi. Automatic composition: Experiments with self-similar music. *Computer Music Journal*, 7(1):25–36, 1983.
- [23] E. Bossio e C. Rizzuti. An interactive virtual environment to learn chaos. In *Proc. of International Technology, Education and Development Conference*, Valencia, 2009.
- [24] A. Carpentier, D. Tardieu, G. Assayag, X. Rodet, e E. Saint-James. An evolutionary approach to computer-aided orchestration. In *EvoWorkshops 2007*, pp. 488–497, Berlino, 2007.
- [25] Chadabe. *Electric sound. The Past and Promise of Electronic Music*. Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [26] L. O. Chua. Global unfolding of Chua circuits. *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, E76-A(5):704–734, 1993.

- [27] L.O. Chua, C.W. Wu, A. Huang, e G.Q. Zhong. A universal circuit for studying and generating chaos. II. strange attractors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 40(10):745–761, 1993.
- [28] P. R. Cook (ed.). *Music, cognition, and Computerized sound. An introduction to Psychoacoustics*. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [29] D. Cope. On algorithmic representation of musical style. In *Understanding music with AI: Perspectives on music cognition*. A cura di M. Balaban, R. Ebiciglu, e O. E. Laske, pp. 355–363. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [30] E. Cupellini, C. Rizzuti, E. Bilotta, P. Pantano, M. Wozniowski, e J.R. Cooperstock. Exploring musical mappings and generating accompaniment with chaotic systems. In *Proc. of International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 467–474, Belfast, 2008.
- [31] L. Davis. *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [32] S. Demko, L. Hodges, e B. Naylor. Construction of fractal objects with iterated function systems. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 19(3):271–278, 1985.
- [33] P. Di Lorenzo. Mathematics and music: fatal (strange) attraction at first sight! In *Atti del convegno SIMAI 2004, Venezia, 23-24 Settembre 2004, A cura di Bilotta E., Francaviglia M., Pantano P. S.*, Cosenza, 2004. AVR.
- [34] A. Di Scipio. La sintesi del suono mediante iterazione di funzioni nonlineari. In *Il suono virtuale*. A cura di R. Bianchini e A. Cipriani. Edizioni Contempo, Roma, 1998.
- [35] A. Di Scipio. The synthesis of environmental sound texture by iterated nonlinear functions, and its ecological relevance to perceptual modeling. *Journal of New Music Research*, 31(2), 2002.
- [36] A. Di Scipio e I. Prignano. Synthesis by functional iterations. a revitalization of nonstandard synthesis. *Journal of New Music Research*, 25(1):31–46, 1996.
- [37] C. Dodge. Profile: a musical fractal. *Computer Music Journal*, 12(3):10–14, 1988.
- [38] C. Dodge e T. A. Jerse. *Computer Music*. Schirmer, New York, 1997.
- [39] C. Emmeche. *Il giardino nella macchina. La nuova scienza della vita artificiale*. Bollati Boringhieri, Torino, 1996.
- [40] S. Emmerson (ed.). *The language of electroacoustic music*. MacMillan Press, Londra, 1986.
- [41] A. F. Everest. *Manuale di acustica*. Hoepli, Milano, 1996.

- [42] P. Galanter. What is generative art? Complexity theory as a context for art theory. In *Proceedings of the 6th Generative Art Conference 2003*, Generative Design Lab., Politecnico di Milano, Milano, 2003.
- [43] A. Gartland-Jones. Musicbloc: A real-time algorithmic composition system incorporating a distributed interactive genetic algorithm. In *EvoWorkshops 2003*, pp. 490–501, Berlino, 2003.
- [44] J. Gleick. *Caos*. Superbur Scienza, Milano, 2000.
- [45] M. Gogins. Iterated functions systems music. *Computer Music Journal*, 15(1):40–48, 1991.
- [46] D. Goldberg. *The design of innovation*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- [47] C. Goudeseune. Interpolated mappings for musical instruments. *Organized Sound*, 7(2), 2002.
- [48] J. M. Grey. Exploration of musical timbre. Relazione Tecnica STAN-M-2, Stanford University, Dept. of Music, 1975. Disponibile all'indirizzo: <http://ccrma.stanford.edu/STANM/stanms/stanm2/stanm2.ps.gz>.
- [49] J. Harley. Generative processes in algorithmic composition: Chaos and music. *Leonardo*, 28(3):221–24, 1995.
- [50] L. Hiller. Music composed with computers – a historical survey. In *The computer and music*. A cura di Lincoln H. B., capitolo 4, pp. 42–96. Cornell University Press, Londra, 1970.
- [51] D. R. Hofstadter. *Gödel, Escher, Bach. Un'eterna ghirlanda brillante*. Adelphi, Milano, 1990.
- [52] Y. Khalifa e R. Foster. A two-state autonomous evolutionary music composer. In *EvoWorkshops 2006*, pp. 717–721, Berlino, 2006.
- [53] J. R. Koza. *Genetic Programming*. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [54] S. Kullback e R. A. Leibler. On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, 22:79–86, 1951.
- [55] C. Langton. *Artificial Life: An overview*. MIT Press, Cambridge, MA, 1995.
- [56] O. E. Laske. Artificial intelligence and music: a cornerstone of cognitive musicology. In *Understanding music with AI: Perspectives on music cognition*. A cura di M. Balaban, R. Ebicioglu, e O. E. Laske, pp. 3–28. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [57] J. Leach e J. Fitch. Nature, music and algorithmic composition. *Computer Music Journal*, 19(2):23–33, 1995.
- [58] T. Licata (ed.). *Electroacoustic music. Analytical perspectives*. Greenwood Press, Westport, Connecticut, 2002.

- [59] D. Little. Composing with chaos: Applications of a new science for music. *Interface*, 22:23–51, 1993.
- [60] Edward N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2):130–141, 1963.
- [61] B. Mandelbrot. *Gli oggetti frattali: forma, caso e dimensione*. Einaudi, Torino, 1987.
- [62] P. Manning. *Electronic and Computer Music*. Oxford University Press, New York, 2004.
- [63] M. Mathews. The digital computer as musical instrument. *Science*, 142(3592):553–557, 1963.
- [64] M. Mathews. Tecnologia della musica di elaboratore. In *La Musica elettronica*. A cura di H. Pousseur. Feltrinelli, Milano, 1976.
- [65] M. Mathews, F. R. Moore, e Risset J. C. Computers and future music. *Science*, 183(4122):263–268, 1974.
- [66] K. McAlpine, E. Miranda, e S. Hoggar. Making music with algorithms: A case-study system. *Computer Music Journal*, 23(2):19–30, 1999.
- [67] N. Meeùs. Scale, polifonia, armonia. In *L'Enciclopedia della Musica Vol.II - Il sapere musicale*. A cura di Jean-Jacques Nattiez, pp. 72–88. Einaudi, Torino, 2002.
- [68] G. S. P. Miller. The definition and rendering of terrain maps. In *SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 39–48, New York, NY, 1986. ACM.
- [69] E. R. Miranda. Reading music, machines, intelligence and the brain: an introduction to music and AI. In *Readings in Music and Artificial Intelligence*. A cura di E. R. Miranda, capitolo 1, pp. 1–13. Harwood Academic, Amsterdam, 2000.
- [70] E. R. Miranda. On the origins and evolution of music in virtual worlds. In *Creative Evolutionary Systems*. A cura di P. J. Bentley e D. W. Corne, capitolo 6, pp. 189–204. Academic Press, Londra, 2002.
- [71] E. R. Miranda e J. A. Biles (eds.). *Evolutionary Computer Music*. Springer-Verlag, Londra, 2007.
- [72] E. R. Miranda e P. M. Todd. Computational evolutionary musicology. In *Evolutionary Computer Music*. A cura di E. R. Miranda e J. A. Biles (eds.), capitolo 10, pp. 218–249. Springer-Verlag, Londra, 2007.
- [73] E. Morin. *L'industria culturale*. Il Mulino, Bologna, 1963.
- [74] G. Nicolis e I. Prigogine. *La Complessità. Esplorazione nei nuovi campi della scienza*. Einaudi, Torino, 1991.
- [75] D.V. Nort e M. Wanderley. Exploring the effect of mapping trajectories on musical performance. In *Proc. of Sound and Music Computing Conference (SMC-06)*, Marsiglia, 2006.

- [76] P. E. Oppenheimer. Real time design and animation of fractal plants and trees. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):55–64, 1986.
- [77] A. Orcalli. *Fenomelogia della musica sperimentale*. Sonus Edizioni Musicali, Potenza, 1993.
- [78] A. Orcalli. Complessità e non-linearità nel pensiero musicale contemporaneo. *Sonus - Materiali per la musica moderna e contemporanea*, (2-3):27–34, 1997. Disponibile in rete all'indirizzo: <http://www.sonusedizioni.it/maratea/files/edizioni/pdf/orcalli2.PDF>.
- [79] G. Papadopoulos e G. Wiggins. AI methods for algorithmic composition: a survey, a critical view and future prospects. In *In AISB Symposium on Musical Creativity*, pp. 110–117, 1999.
- [80] J. R. Pierce. *Simboli, codici, messaggi. La teoria dell'informazione*. Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, 1963.
- [81] J. R. Pierce. *La scienza del suono*. Zanichelli, 1988.
- [82] H. Pousseur. *La Musica elettronica*. Feltrinelli, Milano, 1976.
- [83] J. Pressing. Nonlinear maps as generators of musical design. *Computer Music Journal*, 12(2):35–45, 1988.
- [84] J. D. Reiss e M. B. Sandler. Nonlinear time series analysis of musical signals. In *Proc. of the 6th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)*, Londra, 2003.
- [85] J.C. Risset. Calcolare il suono musicale. In *Matematica e cultura 2001*, pp. 103–118, Milano, 2001.
- [86] C. Rizzuti. Mapping chaotic dynamical systems into timbre evolution. In *Proc. of Sound and Music Computing Conference (SMC07)*, pp. 22–29, Lefkada, 2007.
- [87] C. Rizzuti. Generazione di suoni e musica mediante sistemi caotici. In *Atti del XVII Colloquio di Informatica Musicale*, pp. 131–137, Venezia, 2009.
- [88] C. Rizzuti, E. Bilotta, e P. Pantano. A GA-based control strategy to create music with a chaotic system. In *EvoWorkshops 2009*, pp. 585–590, Berlino, 2009.
- [89] C. Roads. *The Computer Music Tutorial*. The MIT Press, 1996.
- [90] D. Ruelle. *Caso e caos*. Bollati Boringhieri, Torino, 1992.
- [91] N. Sala e G. Cappellato. *Viaggio matematico nell'arte e nell'architettura*. Franco Angeli, Milano, 2002.
- [92] C. Scaletti e A. Craig. Using sound to extract meaning from complex data. In *Proc. SPIE Conference Vol. 1495, Extracting Meaning from Complex Data: Processing, Display, Interaction II*, San Jose, CA, 1991.
- [93] A. Schönberg. *Stile e Idea*. Feltrinelli, Milano, 1975.

- [94] B. Scimemi. Contrappunto musicale. In *Matematica e cultura 2001*, pp. 119–134, Milano, 2001.
- [95] I. Stewart. *Does God Play Dice?* Penguin Books, Londra, 1990.
- [96] M. Supper. A few remarks on algorithmic composition. *Computer Music Journal*, 25(1):48–53, 2001.
- [97] M. Thompson e H. B. Stewart. *Dinamica Nonlineare e Caos*. Liguori Editore, Napoli, 1993.
- [98] R.F. Voss e J. Clarke. 1/f noise in music and speech. *Nature*, 258:317–318, 1975.
- [99] D. L. Wessel. Timbre space as a musical control structure. *Computer Music Journal*, 3(2):45–52, 1979.
- [100] T. Winkler. *Composing Interactive Music - Techniques and Ideas Using Max*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2001.
- [101] M. Witten. The sounds of science: II. listening to dynamical systems – towards a musical exploration of complexity. *Computers Mathematic with Applications*, 32(1):145–173, 1996.
- [102] R. Wooller, A. Brown, J. Diederich, E. R. Miranda, e R. Berry. A framework for comparison of process in algorithmic music systems. In *Proc. of the Generative Arts Practice - A Creativity and Cognitinion Symposium*, pp. 109–124, Sydney, 2005.
- [103] M. Wozniowski, Z. Settel, e J.R. Cooperstock. A framework for immersive spatial audio performance. In *Proc. of New Interfaces for Musical Expression (NIME)*, Parigi, 2006.
- [104] M. Wozniowski, Z. Settel, e J.R. Cooperstock. A paradigm for physical interaction with sound in 3-D audio space. In *Proc. of International Computer Music Conference (ICMC)*, New Orleans, 2006.
- [105] M. Wozniowski, Z. Settel, e J.R. Cooperstock. A spatial interface for audio and music production. In *Proc. of 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx '06)*, Montreal, 2006.
- [106] M. Wozniowski, Z. Settel, e J.R. Cooperstock. User-specific audio rendering and steerable sound for distributed virtual environments. In *Proc. of International conference on auditory displays (ICAD)*, Montreal, 2007.
- [107] I. Xenakis. *Musica Architettura*. Spirali, Milano, 1982.
- [108] I. Xenakis. *Formalized Music - Thought and mathematics in music*. Pendragon Press, Stuyvesant, NY, 1992.
- [109] R. Zaripov. *Musica con il calcolatore*. Muzio, Padova, 1979.

Indice analitico

- Algoritmi Genetici, 34, 144
- Aristosseno, 41, 46
- Arte generativa, 52
- Attrattore, 12
- Attrattore strano, 13, 18
- Audioscape, 157, 170, 176
 - Connessioni sonore, 162
 - Nodi sonori, 160
 - Sistemi d'interazione, 169
- Auditory Display, 97
- Auto-organizzazione, 31

- Bacino di attrazione, 13

- Cage, J., 53
- Cascata di raddoppiamenti di periodo, 20
- Ciclo limite, 12
- Circuito di Chua, 26
- Codifica, 107, 128, 145, 152

- Digital Signal Processing (DSP), 85, 158
- Dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, 16, 129, 177
- Direttività
 - bidirezionale, 161
 - cardioide, 161
 - omnidirezionale, 161

- Effetto Doppler, 164, 172

- Imagination Tools, 118, 167
- Intelligenza artificiale, 66
- Intermittenza, 20

- Linearità, 10
- Lorenz, E., 19

- Mandelbrot, B., 18, 49
- Mappa di biforcazione, 23
- Mappa di Hénon, 9, 24

- Mappa logistica, 22, 135
- Mapping, 105
 - lineare, 108, 127
- Modulazione di frequenza, 119, 137
- Musica generativa, 54, 74, 178

- Non-linearità, 11

- Open Sound Control (OSC), 88, 168
- Oscillatore di Chua, 26, 121, 128, 131, 137, 145, 152, 177

- Pitagora, 42
- Poincarè, H., 8
- Proprietà emergenti, 32
- Punto fisso, 12
- Pure Data (PD), 117, 158

- Schönberg, A., 44, 59, 88
- Sistema di Lorenz, 9, 25
- Sistemi dinamici, 9
- Spazializzazione del suono, 165, 172, 177
- Spazio delle fasi, 8
- Strade verso il caos, 20, 121, 128

- Teoria del caos, 14
- Teoria della complessità, 7
- Traiettoria, 9, 168

- Varèse, E., 44, 89
- Vita artificiale, 66

- Xenakis, I., 44, 57, 73, 82, 89