

INDICE

INTRODUZIONE	3
1- MUSICA GENERATIVA ED EVOLUTIVA	5
1.1- MUSICA ED ELETTRONICA: PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA	5
1.2- AGLI ALBORI DELLA MUSICA GENERATIVA: LE AVANGUARDIE	7
1.3- MUSICA GENERATIVA ED EVOLUTIVA	9
1.3.1- DALLE AVANGUARDIE ALLA COMPUTER SCIENCE	9
1.3.2- ALCUNI ESEMPI DI <i>GENERATIVE AND EVOLUTIONARY MUSIC</i>	13
2- LA SCIENZA DELLE RETI	22
2.1- PICCOLI MONDI	22
2.2- GRAFI REGOLARI E RANDOM	24
2.3- IL MODELLO SMALL-WORLD	26
2.4- IL MODELLO SCALE-FREE	28
2.5- TOLLERANZA AD ATTACCHI ED ERRORI	30
2.6- ESEMPI DI RETI PICCOLO MONDO	32
3- RAPPRESENTAZIONE E ANALISI DI COMPOSIZIONI MUSICALI ATTRAVERSO LA SCIENZA DELLE RETI	36
3.1- INTRODUZIONE	36
3.1.1- RAPPRESENTAZIONE ED ANALISI MUSICALE	37
3.1.2 -RAPPRESENTAZIONE MUSICALE E SCIENZA DELLE RETI	41
3.2- SWAP (SMALL-WORLD ANALYSER AND PLAYER)	44
3.2.1 – L’INTERFACCIA E LE FUNZIONI DI SWAP	45
3.2.2 – RAPPRESENTAZIONE E ANALISI	47
3.2.3- BATCH ANALYSIS	51
3.3- ANALISI DI RETI DERIVATE DA COMPOSIZIONI MUSICALI	51
3.3.1- RISULTATI	52
3.4- ANALISI STATISTICHE	55
3.4.1- RISULTATI	55

4- SINTESI MUSICALE	61
4.1- ALGORITMI PER LA PRODUZIONE MUSICALE	61
4.2- RICERCA DEI CAMMINI MINIMI	61
4.3- WALKING	63
5- ALGORITMI GENETICI	67
5.1- INTRODUZIONE AGLI ALGORITMI GENETICI	67
5.2- ALGORITMI GENETICI PER LA CREAZIONE DI RETI PICCOLO-MONDO	69
5.2.1- FUNZIONE DI FITNESS	71
5.3- GA FINDER	73
5.4- RISULTATI	74
CONCLUSIONI	85
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	87

INTRODUZIONE

La scienza delle reti è una disciplina relativamente giovane che in poco tempo è divenuta un'importante strumento per la ricerca scientifica. In questo lavoro di tesi si tenta di impiegare gli strumenti offerti da questa disciplina per ipotizzare nuovi approcci alla musica generativa ed evolutiva e alla rappresentazione musicale. L'idea di base è quella che la musica sia pensabile come un sistema complesso composto da singoli elementi che interagendo tra loro danno vita a proprietà emergenti. Dunque il modello di rete piccolo mondo forgiato da Watts e Strogatz può rappresentare un utile elemento per approfondire analiticamente alcune caratteristiche della musica.

A questo proposito è stato implementato un simulatore capace di rappresentare sotto forma di rete composizioni musicali in formato MIDI e di analizzarle. Questa tecnica di rappresentazione ha il vantaggio di rendere visibile in un unico colpo d'occhio, l'interazione tra le varie parti della composizione (le note, che vengono rappresentate come fossero i nodi della struttura). In questo modo la rete diventa una specie di metafora universale per i sistemi caratterizzati da forte interazione tra le parti.

Le composizioni analizzate sono state studiate con i metodi della scienza delle reti con la finalità di ottenere informazioni numeriche non immediatamente riscontrabili con analisi classiche. Ad esempio, per verificare se è possibile trovare dei criteri che permettano di identificare le caratteristiche salienti delle composizioni di un determinato musicista sulla base dei dati numerici estratti dai file MIDI.

Inoltre, si è tentato di usare le informazioni ottenute con queste tecniche d'analisi per produrre scale e brevi cicli melodici che sfruttano la conformazione a rete.

La tesi è organizzata nel modo seguente.

I primi due capitoli offrono una panoramica del settore entro cui il presente lavoro è stato concepito. Nel primo capitolo viene presentato nel dettaglio il contesto della musica generativa dalle sue origini ai giorni nostri. Si inizia con una discussione sulle avanguardie artistiche di inizio '900 e sulle modalità con cui questo fenomeno arriverà ad influenzare l'arte contemporanea fino a costituire una sorta di incipit per la musica elettronica (nell'accezione più ampia che il termine possiede) e per la musica generativa ed evolutiva. Successivamente vengono discussi nel dettaglio alcuni esempi di generative and evolutionary music.

Nel secondo capitolo viene descritto il settore della scienza delle reti, partendo dalla teoria dei grafi classica fino ai modelli di rete ad invarianza di scala e alle numerose applicazioni che essi hanno offerto.

Il terzo capitolo offre una panoramica sulle tecniche di rappresentazione ed analisi create attraverso il modello di scienza delle reti. Vengono descritti nel dettaglio i metodi e gli strumenti utilizzati. Il simulatore implementato per l'analisi dei file MIDI e risultati ottenuti, mentre il capitolo successivo (cap. 4) è dedicato alla fase di sintesi, ovvero alle tecniche di creazione musicale offerte dall'impiego delle reti.

L'ultimo capitolo del presente lavoro è dedicato all'utilizzo di algoritmi genetici per la creazione di reti piccolo mondo. Si parte dall'analisi di gruppi di composizioni di un determinato autore, successivamente alla raccolta dei dati si tenta di individuare caratteristiche peculiari delle reti estratte da determinate composizioni. Queste informazioni vengono successivamente utilizzate per creare reti aventi caratteristiche analoghe a quelle studiate in precedenza.

CAPITOLO 1

La Musica Generativa ed Evolutiva

1.1- Musica ed Elettronica: Presentazione del Problema

La nascita dei calcolatori ha rappresentato una importante innovazione per la musica e per l'arte in generale. Si potrebbe addirittura asserire che la rivoluzione elettronica [Carnet, 2001; Christensen, 2003; Kippen, 1992; Mason, 1989; McNabb, 1990; Risset et Al., 1982, 1992; Sundberg, 1991; Truax, 1990; Vercoe, 1997; Witten, 1996] rappresenti il più radicale degli stravolgimenti cui la musica, e in particolare quella "colta" (ovvero quella studiata ed insegnata nelle accademie), dovette piegarsi. L'avvento delle tecniche di sintesi e trattamento del suono, nonché la nascita della computer music e della composizione detta *algoritmica*, più della rottura dell'impianto armonico operata da Schönberg e dalla scuola dodecafonica, o dell'improvvisazione radicale introdotta dal free-jazz a metà del secolo scorso, ha rappresentato un assoluto punto di non ritorno in musica [Campolongo, 2005a]. La nascita di nuovi strumenti, di nuove tecniche di composizione ha sovvertito gli ordini pre-esistenti e polverizzato le dicotomie che popolavano a più livelli i dibattiti musicali (non ultima quella tra improvvisazione e scrittura che sarà costretta a confrontarsi con l'alea di Cage e con le tecniche di rielaborazione *xenocronica*¹ indagate da Zappa [Salvatore, 2000] intorno alla metà degli anni '70).

¹ La Xenocronia è una tecnica indagata da Frank Zappa che consiste nel sovrapporre parti sonore provenienti da diversi contesti. Con questa tecnica Zappa poteva confrontare tra loro e integrare in uno stesso ambiente esecuzioni elaborate con tempi e modalità diverse. L'interazione che si

In ultima analisi anche i rapporti compositore-esecutore, musicista-fruitori hanno iniziato a venire meno man mano che venivano meno le distinzioni (inizialmente nette e inequivocabili) tra queste figure. L'elettronica, e in particolare il digitale, ha reso più democratico il rapporto con la musica, dunque al giorno d'oggi, per molta gente, anche se del tutto digiuna di nozioni musicali, comporre, registrare e distribuire musica è assai semplice e poco dispendioso (basta possedere un PC e qualche software per la composizione e il sound editing).

Eppure musica e innovazione tecnologica hanno sempre camminato di pari passo, a partire dalle ricerche inaugurate da Pitagora, che all'epoca rappresentavano il massimo dell'evoluzione tecnica possiamo immaginare. La nascita del monocordo, antesignano di molti strumenti musicali attuali, o quella del clavicembalo sono esempi lampanti di tecnologia al servizio dell'arte e del compositore. Cosa rende dunque, la nascita del computer un evento per molti versi controverso e difficile da analizzare? E soprattutto, per quale ragione molti musicisti (soprattutto quelli formati nelle accademie) insistono nell'asserire che l'elettronica sia una sorta di arresto evolutivo per le sorti della musica contemporanea?

Il motivo è che il processo di democratizzazione della musica cui si accennava poc'anzi ha finito per privare le accademie del loro ruolo egemone di depositarie della conoscenza e della pratica musicali e ciò a ben vedere ha decretato un progressivo sgretolamento del divario esistente tra musica colta e popolare.

Inoltre, le tecniche di elaborazione e trattamento elettronico del segnale audio sono un fatto meramente scientifico che poco ha a che vedere con lo studio del ritmo e dell'armonia che a tutt'oggi rappresenta gran parte dello studio e degli insegnamenti accademici. E anche se recentemente anche i conservatori hanno dovuto affrettarsi a inglobare nei loro programmi studi di elettronica e musiche digitali è solo per cercare di arginare il problema, evitando di perder completamente il controllo su quella che sembra destinata ad essere la più fruttuosa (anche sotto il profilo economico) e promettente delle attività musicali per il prossimo futuro: la musica elettronica.

ascoltava dunque, in realtà non era mai avvenuta e ciò permetteva a Zappa di sperimentare linguaggi musicali in cui parti improvvisate e parti scritte erano poste allo stesso livello.

1.2- Agli Albori della Musica Elettronica: Le Avanguardie

L'idea di una musica completamente elettronica nasce all'inizio dello scorso secolo, nel periodo in cui le cosiddette avanguardie artistiche sperimentano nuove forme creative (non solo in ambito musicale ma anche nel teatro, nella pittura, nella scultura ecc.). La spinta innovativa e iconoclasta delle avanguardie porta numerosi artisti sulla strada di una sperimentazione la cui finalità principale sembra essere quella di polverizzare gli ordini pre-esistenti facendo a meno di tutte le nozioni e le pratiche di cui l'accademia si era sempre nutrita, e rinnegare il passato, bollandolo come vecchio e privo di valore.

Questo clima favorisce la nascita di nuove espressioni sonore oltre che artistiche in senso esteso, il cui comune denominatore è per l'appunto il distacco dalla tradizione. Oltre a ciò le avanguardie segnano una importante cesura con la storia occidentale fino ad allora caratterizzata dalla centralità del *logos* e di una razionalità meccanica e tecnocentrica. Questa spinta razionalista viene posta in questione da un impulso radicalmente irrazionale e visionario che sfocerà in forme artistiche schizofreniche e paradossali (si pensi ad esempio ai lavori di Marcel Duchamp o John Cage) che portarono taluni sperimentatori a rifiutare l'appellativo di artisti e a negare l'esistenza stessa dell'arte in ogni sua forma.

Questa logica è ben riassunta dalle parole del critico letterario Gianni Grana [Grana, 1993]: «Con la generazione dei nati intorno al 1880, si apre la dialettica dell'avanguardia che rivela non solo il conflitto con i padri, la rottura e il distacco dal passato, l'opposizione alla classe dirigente liberale - questo avveniva in tutta Europa - ma anche il pessimismo neoromantico, l'incontro con la secolarizzazione, la nevrosi attivistica della ricerca d'identità fuori dalla tradizione e, soprattutto, l'*ethos* eccentrico dell'intellettuale, la tendenza a drammatizzare la propria modernità, oggettivandola nell'avventura di un gruppo, nel dialogo convergente di un'amicizia ideologica e letteraria».

Il primo passaggio verso forme sonore nuove avviene sul finire del XIX secolo con la svolta dodecafonica inaugurata da Schönberg il quale fornisce un nuovo *frame* tonale su cui sperimentare al di fuori del tracciato armonico classico. Successivamente l'introduzione della tecnologia fornisce nuovi spunti su cui costruire percorsi musicali completamente inediti.

Se ne accorgono i futuristi che individuano nei rumori prodotti dalle tecnologie della modernità delle fonti sonore a cui attingere. In particolare è Luigi Russolo (l'inventore dei celebri intonarumori) che nel manifesto futurista "L'arte dei rumori" ipotizza nuovi scenari per la musica a venire: «Bisogna rompere questo cerchio ristretto di suoni puri e conquistare la varietà infinita dei "suoni rumori"» [Dolcetta, 2003].

Ma anche John Cage [Cage, 1961], musicista affascinato dall'impiego della tecnologia, sfrutta l'innovazione tecnica proponendo musiche basate sul concetto di *possibilità*. Al contrario degli altri compositori Cage non usa la tecnologia per migliorare il controllo dell'uomo sull'arte, ma la usa per proporre esperienze sonore aperte al possibile e all'aleatorio.

Nel corso della sua attività Cage userà gli I-Ching (strumenti in uso in alcune culture orientali che consentono di prendere decisioni affidandosi al caso), apparecchi radiofonici (per produrre suoni in cui l'alea arriva via etere e il compositore non ha più neanche il controllo sui materiali di partenza) e altre apparecchiature con il solo scopo di produrre musiche completamente scevre da criteri razionali di ogni genere. Cage arriverà a *preparare* (ovvero a manomettere) il suo pianoforte conficcando oggetti di ogni genere tra le corde al fine di alterarne il timbro e le tonalità (suscitando naturalmente il biasimo dei compositori accademici che vedevano nel musicista californiano una sorta di anti-musicista).

Ma altri importanti contributi alla musica elettronica provengono da artisti quali Karlheinz Stockhausen, Edgar Varèse, Steve Reich e Pierre Schaffer.

In particolare un musicista che ha saputo vedere nell'elettronica un serbatoio di nuove possibilità è il francese Pierre Boulez [Boulez, 1984] che, a differenza di altri compositori del periodo, tenta di superare la dicotomia acustico/elettronico cercando di integrare i due linguaggi in forme coerenti e perfettamente interagenti. Boulez coglie il potenziale insito nella tecnologia e in particolare comprende che

quest'ultima può servire oltre che per comporre, per produrre nuovi timbri e nuove scale e per trattare e alterare i suoni elettronicamente:

«La registrazione su nastro permette anche di agire sulla curva del suono. Senza soffermarci sul suono all'inverso e sui filtri di frequenza possiamo descrivere a quali permutazioni seriali si possa sottoporre un suono dato. [...] si ottengono delle curve artificiali che introducono una nuova dimensione nelle possibilità di variazione» [ibidem].

Non è un caso che, sul finire degli anni Settanta, Pierre Boulez abbia fondato a Parigi un istituto denominato IRCAM (Istituto per la Ricerca e il Coordinamento sull'Acustica e la Musica) la cui finalità è l'esplorazione della fisica acustica e della teoria e prassi musicale attraverso i mezzi tecnologici più all'avanguardia.

1.3- Musica Generativa ed Evolutiva.

1.3.1- Dalle avanguardie alla computer science

La musica generativa ed evolutiva [Bidlack, 1992; Gogins, 1991; Marsden, 2000; Pressing, 1988; Supper, 2001] può essere considerata una diretta discendente della sperimentazione sonora posta in atto dalle avanguardie artistiche. Colin G. Johnson [Johnson, 2003] individua tre istanze principali che hanno inaugurato il percorso della musica generativa ed evolutiva già a partire dalle ricerche nate all'inizio dello scorso secolo. Queste istanze sono *Randomness* (ovvero l'uso del caso e della casualità come elemento coinvolto nel processo compositivo), *Music and Parameters* (ovvero la concettualizzazione della musica come insieme di parametri) e *Emergence and Interaction* (l'interazione come elemento costitutivo della composizione).

Il primo elemento, la randomness è stato introdotto, secondo Johnson dal compositore americano John Cage. Come si è detto, Cage componeva utilizzando la randomness come vero e proprio paradigma. La musica diventa un'esplorazione del possibile e dell'aleatorio. Obiettivo di Cage è liberare la musica dai clichè e renderla aperta ad ogni possibilità.

Ma la randomness, come elemento costitutivo del processo di composizione non è solo casualità, come quella indagata da Cage attraverso l'uso degli I-Ching, essa può manifestarsi anche quando più performers interagiscono liberamente tra loro. Né è un esempio la composizione Cartridge Music in cui alcuni esecutori manipolano degli oggetti producendo suoni e altri controllano indipendentemente il volume. Secondo Cage è importante che il risultato di una performance non sia mai completamente nelle mani di un singolo esecutore. Nelle intenzioni di Cage la randomness favorisce nuove modalità di interazione e nuove relazioni tra compositore, esecutore e fruitore. Anziché porre l'accento sull'esito di una performance Cage è interessato al processo che determina uno specifico output, a prescindere dal risultato. In quest'ottica, anche lo spartito non è più da intendersi come una rigida lista di azioni da compiere bensì come una serie di indicazioni. In particolare uno dei concetti chiave dell'estetica cagiana è l'assenza di intenzionalità.

L'idea di una musica process-oriented, per quanto radicale, non può non essere considerata un'importante lezione per la musica algoritmica dal momento che in informatica è assolutamente normale dare una serie di istruzioni al computer in attesa di un determinato output.

Un terzo modo di impiegare la randomness in musica è stato introdotto, sempre secondo Johnson da Xenakis. Il lavoro di Xenakis [Xenakis, 1971] è importante perché utilizza il caso per comporre statisticamente manipolando distribuzioni statistiche in uno spazio sonoro. In quest'ottica comporre non significa disporre suoni-eventi nel tempo ma manipolare queste distribuzioni nello spazio sonoro usando schemi matematici.

Questo metodo sembra aver favorito la nascita di nuovi approcci come quelli che usano gli automi cellulari. In questo caso comporre consiste nella creazione di regole che definiscano l'interazione tra oggetti nel sistema. La differenza sostanziale consiste nel fatto che negli automi cellulari la manipolazione degli effetti globali è fatta con un approccio bottom-up, ovvero la musica emerge dagli effetti delle regole. Nell'approccio ipotizzato da Xenakis l'attitudine è maggiormente top-down, cioè legata alla manipolazione strutturale dello spazio in cui gli eventi sonori sono possibili.

In effetti, rileva Johnson, gli automi cellulari hanno alla base una logica semmai affine alla musica seriale di Pierre Boulez, dove parametri come pitch, volume, ecc., sono organizzati attraverso un continuo cambio di valori secondo un ordine prefissato.

La seconda caratteristica chiave, riscontrata da Johnson nella musica generativa ed evolutiva è la concettualizzazione di quest'ultima come insieme di parametri. Questa caratteristica evidentemente accomuna le musiche sperimentali sorte intorno alla metà del XX secolo con i modelli di musica legata all'Artificial Life [Emmeche, 1996].

Innanzitutto, varie tendenze musicali possono essere pensate, sempre secondo Johnson, come orientate allo sviluppo e all'espansione di un unico parametro. Ne è un esempio l'espansione delle scale melodiche, inizialmente scarse ed essenziali la cui progressiva complicazione ha portato ad intendere le tonalità come un semplice continuum misurabile in termini di Hertz.

L'idea di una musica interamente parametrizzata risale ai primi anni '40 ed è stata formalizzata da Joseph Schillinger. Schillinger traccia lo sviluppo di questa idea inizialmente impiegata come strumento di analisi e successivamente anche come tecnica compositiva. Possiamo ipotizzare che sia stata la componente analitica a fungere da modello per la costruzione di un processo *sintetico* di musica come esplorazione di parametri.

Ci sono diversi modi di intendere la musica come insieme di parametri, ad esempio Karheinz Stockhausen parla di azioni combinate nella parametrizzazione, ovvero misurare azioni fisiche nel suono realizzandole a partire da un singolo parametro comune.

Un'altra idea interessante proviene da Schönberg che ipotizza la manipolazione di manipolare il timbro trattandolo come fosse il tono. Ne è un esempio la composizione *Klangfarbenmelodie* in cui la traccia melodica principale è ottenuta come *sound colors* ovvero manipolando timbri diversi anziché tonalità differenti.

Assai interessanti a riguardo sono le considerazioni di Barret [Barret, 1995] secondo cui compositori come Boulez, Xenakis e Stockhausen intendono le composizioni come fossero "gemmate". L'espressione *gemmata* suggerisce l'idea di evolvere la composizione a partire da un determinato punto, questo punto

è pensabile come un luogo identificato all'interno di uno spazio dei parametri o addirittura in uno "spazio delle fasi" per usare un'espressione tipica della fisica teorica. Non è un caso che anche sistemi dinamici non lineari vengano spesso usati per comporre musica, o al contrario la musica venga impiegata come strumento per indagare la complessità insita in alcuni di questi sistemi.

Quest'attitudine è ben espressa dallo stesso Boulez:

Preferisco pensare ad una forma mobile come una *forma materiale*, ovvero considerarla come la base per una o più partiture "stabili" scelte tra la molteplicità di possibilità.

Ne è un esempio la musica prodotta attraverso il circuito di Chua [Chua, 1992], o con gli attrattori di Lorenz e Lotka-Volterra di cui si discuterà approfonditamente più avanti in questo stesso capitolo.

Il terzo elemento è l'interazione ovvero la possibilità di creare strutture emergenti in musica. Quella di emergenza è una delle nozioni chiave della complessità e della Vita Artificiale; questo termine identifica l'emergere del spontaneo di strutture nuove e non riducibili alle proprietà delle singole componenti del sistema, che si manifesta in automi cellulari, reti neurali artificiali ecc. L'emergenza in sostanza è una delle caratteristiche proprie della vita, ovvero il fatto che dal disordine o dalla ripetuta applicazione di poche semplici regole possano, in alcune occasioni, emergere per l'appunto, strutture auto-organizzate. L'approccio è rigorosamente bottom-up, cioè basato sull'emergere di strutture *dal basso*. Naturalmente, anche in questo caso la musica sperimentale ha fornito degli esempi. Ad esempio la composizione *The Great Learning* di Cornelius Cardew mostra evidenti affinità con le strutture auto-organizzate figlie della teoria della complessità. In questa *piece* i membri di un ensemble vocale cantano diverse sezioni di un testo. Alla fine di ogni verso un musicista può ascoltare una singola nota tra quelle cantate da altri cantanti. Con questa tecnica il brano nella totalità gradualmente si sposta verso una singola tonalità o al massimo verso poche tonalità complessive. Questo brano è un chiaro esempio di come l'organizzazione, mediante poche informazioni, a basso livello possa condurre verso un'organizzazione globale.

1.3.2- Alcuni esempi di *Generative and Evolutionary Music*

Uno degli approcci più interessanti alla musica generativa ed evolutiva è senz'altro quello ipotizzato da Eduardo Reck Miranda [Miranda, 1993, 1994, 1998, 2000] verso i primi anni Novanta. Miranda utilizza le grammatiche generative e trasformazionali di Chomsky per produrre musiche attraverso il computer. Questa tecnica è molto interessante oltre che da un punto di vista creativo anche sotto il profilo analitico giacché crea un'intrigante analogia tra linguaggio, semantica e musica. Inoltre rende possibile la creazione di un insieme di regole piuttosto semplici con le quali è possibile dar vita a costruzioni notevolmente elaborate (il che in parte ci riporta al discorso sull'emergenza e sull'auto-organizzazione di strutture complesse a partire da un numero relativamente esiguo di istruzioni).

La nozione di grammatica formale utilizzata da Miranda è frutto del lavoro del linguista americano Noam Chomsky [Chomsky, 1976]. Chomsky sostiene che alla base di ogni lingua naturale esista una grammatica formalizzabile in termini matematici che ne descrive il funzionamento. La grammatica è in grado di definire una lingua in modo obiettivo e senza lasciar spazio a congetture ed incertezze.

Le regole che stanno alla base di una grammatica consentono di formulare frasi e di trasformarle (non a caso Chomsky parla anche di grammatica trasformazionale).

Si consideri ad esempio la frase "A musician composes the music"² riformulata in termini di grammatica generativa diventa una semplice successione di sintagmi. Uno nominale (NS) e uno verbale (VS). Anche i due sintagmi possono tuttavia essere scomposti ulteriormente in sottunità ovvero, un articolo (A) e un nome (N), un verbo e un sintagma nominale (NS).

Questo processo può essere espresso sinteticamente dal formalismo:

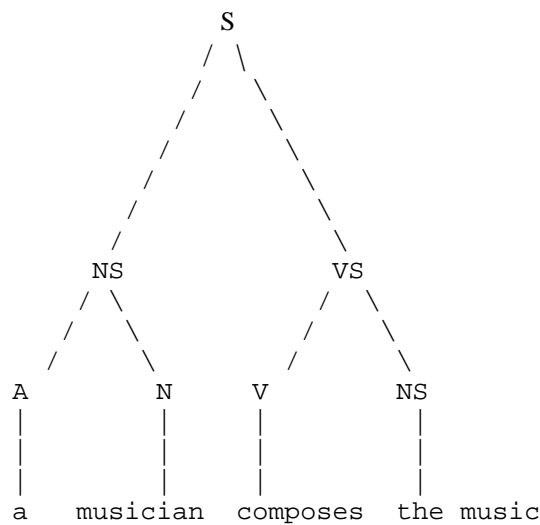
$$S = NS + VS$$

$$NS = A + N$$

$$VS = V + NS$$

² In italiano "Un musicista compone la musica".

o rappresentato graficamente mediante una struttura ad albero:



Questo formalismo può essere riscritto mediante dei linguaggi di programmazione. In questo modo è possibile dar vita ad un programma in grado di costruire frasi automaticamente. Una condizione essenziale affinché ciò sia possibile è che il calcolatore sia dotato di un repertorio di termini a cui attingere. Rifacendoci all'esempio precedente:

A = {the, a, an}

N = {dog, computer, music, musician, coffee}

V = {composes, makes, hears}

In questo caso sono state create tre classi di parole necessarie alla formazione di una frase: articoli (A), sostantivi (N) e verbi (V).

La combinazione di queste tre classi di parole consente al computer di generare frasi di senso compiuto (per esempio “a musician composes the music” o “a dog hears the musicians”³), ma anche frasi che pur mantenendo una certa coerenza formale non possiedono alcun significato (si pensi a frasi come “a coffee hears the computer” o “a musicians composes the dog”, esse sono strutturalmente identiche alle due precedentemente esaminate ma il loro significato è nullo).

³ Tutti gli esempi sono tratti direttamente da [Miranda, 2000]

L'introduzione di regole più specifiche possono ridurre la possibilità che emergano frasi prive di senso. Tuttavia la formulazione e l'introduzione di nozioni semantiche risulta essere un passaggio obbligato al fine di ottenere risultati che siano di un certo interesse. La sussistenza di questo tipo di regole definisce ciò che si chiama programma generativo, esse infatti permettono al calcolatore di creare frasi in modo assolutamente autonomo. Le regole di tipo *trasformativo* funzionano in modo analogo e solitamente vengono impiegate per verificare la correttezza delle frasi costruite in precedenza.

Ad esempio:

IF:

$S(0) = NS(n) + VS(m)$ and

$NS(n) = A(n) + N(n)$ and

$VS(m) = V + NS(m)$

THEN:

$S(t) = NS(m) + VS(n)$ and

$NS(m) = A(m) + N(m)$ and

$VS(n) = NS(n) + V$

Il formalismo appena riportato va interpretato nel modo seguente:

Sia S una frase da trasformare, composta da un sintagma nominale e uno verbale. Se il sintagma nominale è composto da un articolo e un nome e il sintagma verbale è composto da un verbo e da un secondo sintagma nominale (dello stesso tipo del primo) la frase trasformata sarà composta dal secondo sintagma nominale seguito da un secondo sintagma verbale composto dal primo sintagma nominale seguito dal verbo.

Se si applica questa regola trasformazionale alla frase "a musician composes the music" il risultato della trasformazione sarà: "The music a musician composes".

Il fatto che anche la musica sia infondo strutturata a partire da una serie di regole ha senz'altro favorito la nascita di questo approccio, ma a ben vedere lo studio delle relazioni tra linguaggio naturale e musica è un fatto tutt'altro che nuovo

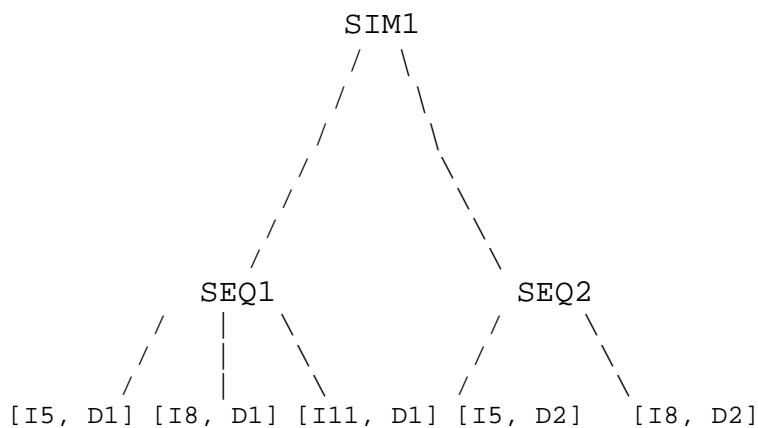
dunque non stupisce che Miranda abbia tentato di trasporre le regole della grammatica generativa in musica.

La creazione di una grammatica generativa implica una corretta definizione delle entità semplici (le parole) che consentiranno al computer di generare frasi. Nel caso di una grammatica musicale è necessario individuare degli elementi semplici come note, melodie, accordi ecc. Si considerino ad esempio le seguenti nozioni:

- (a) R_n = nota di riferimento (ad esempio $R_1 = C_4$)
- (b) I_n = intervallo tra due note (ad esempio I_1 = quinta perfetta)
- (c) D_n = direzione dell'intervallo (ad esempio D_1 ascendente)
- (d) SEQ_n = nozione di sequenza
- (e) SIM_n = nozione di simultaneità

Un esempio di regola generativa potrebbe essere dunque:

- (a) $SIM_1 = SEQ_1 + SEQ_2$
- (b) $SEQ_1 = [I_5, D_1] + [I_8, D_1] + [I_{11}, D_1]$
- (c) $SEQ_2 = [I_5, D_2] + [I_8, D_2]$



Il lessico della grammatica presa in esempio è il seguente:

I = {seconda minore, seconda maggiore, terza minore, terza maggiore, quarta perfetta, quarta aumentata, quinta perfetta, sesta minore, sesta maggiore, settima minore, settima maggiore, ottava, nona}

D = {ascendente, discendente, nulla}

La coppia [I5, D1] indica ad esempio che l'intervallo è una quarta perfetta (ovvero il quinto elemento della lista I) e la direzione dell'intervallo è a salire, dunque la regola appena descritta va interpretata come segue:

Un determinato brano è composto da due sequenze suonate simultaneamente. La prima sequenza è composta da tre note e l'altra da due. Le note della prima sequenza sono calcolate in base a una nota di riferimento in questo ordine: una quarta perfetta ascendente, una sesta minore ascendente e una settima maggiore ascendente. Le note della seconda sequenza sono calcolate usando la stessa nota di riferimento, in questo ordine: una quarta perfetta discendente, e una sesta minore discendente.

Oltre ad usare grammatiche generative, Miranda ha introdotto l'uso di sistemi dinamici complessi quali gli automi cellulari creando un sistema denominato CAMUS. CAMUS simula attraverso automi cellulari il comportamento di sistemi biologici per produrre sequenze di strutture musicali come accordi, melodie, scale ecc.

Un altro mirabile esempio di musica generativa proviene dall'E.S.G.- Evolutionary Systems Group dell'Università della Calabria. In particolare i lavori di Bilotta et al. [Bilotta, 2000a, 2000b, 2005] mostrano un approccio semiotico alla musica generativa prodotta con automi cellulari ed altri strumenti dell'artificial life come algoritmi genetici o con sistemi dinamici non lineari e caotici.

Il lavoro di Bilotta è importante perché inteso, oltre che come un metodo di creazione artistica e musicale anche come tecnica per l'indagine e l'analisi della complessità insita nei sistemi utilizzati.

Infatti, in analogia con il lavoro di Eco [Eco, 1975] il processo di creazione musicale viene pensato innanzitutto come processo semiotico, dunque la codifica dei dati prodotti dagli automi in musica crea, secondo Bilotta, un Triangolo di Musificazione [Fig. 1] ai cui vertici risiedono *configurazioni matematiche*

prodotte dai sistemi dinamici quali automi cellulari, *sistemi di codifica* e *tipi di rappresentazione*. Pensata in questi termini, la musica generativa ed evolutiva, diventa uno strumento semiotico in grado di render conto della complessità e delle proprietà emergenti che prendono vita dal comportamento dell'automa, oltre che un metodo creativo e, in ultima analisi anche educativo (utilizzabile ovverosia, per fini didattici).

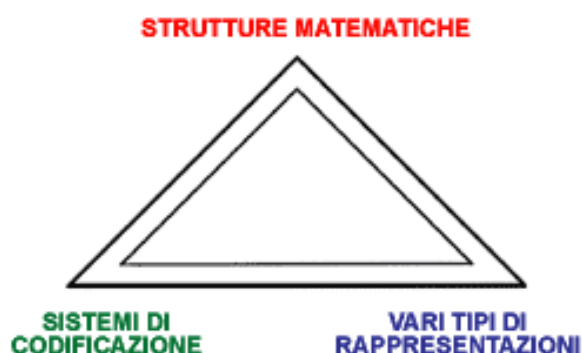


Fig. 1.1 Triangolo di musificazione

I codici di produzione e traduzione musicale ipotizzati da Bilotta sono molteplici, in particolare tra i più importanti si segnalano:

- a. Codici di Musificazione Locale
- b. Codici di Musificazione Globale
- c. Codici di Musificazione Misti

Prima di descrivere nel dettaglio queste tecniche è bene soffermarsi sul processo di traduzione in suono dei dati che viene qui definito processo di *Musificazione* il quale è a ben vedere diverso da quello detto di *Sonificazione* forgiato da Scaletti [Scaletti, 1994] nell'ambito della ricerca sull'*Auditory Display*⁴ [Cohen, 1994; Mayer-Kress et al., 1994].

Il processo di musificazione va inteso come un metodo di indagine della complessità attraverso l'uso di scale musicali e melodie le quali, se da un lato

⁴ Scaletti definisce *Sonificazione*: "a mapping of numerically represented relations, in the same domain under study, to relation in an acoustic domain, for the purpose of interpreting, understanding, or communicating relations in the domain under study".

hanno la funzione di creare un artefatto sganciandosi dunque dal sistema di riferimento per diventare creazione artistica generativa, dall'altro rappresentano un utile strumento per ottenere informazioni sonore sul sistema preso in esame.

I codici di musificazione, si è detto, sono di tre tipi. Il primo viene detto Locale e si basa sulla traduzione di sequenze e patterns isolati ed estrapolati dall'output dell'automa e successivamente musificati. Il codice di traduzione è il seguente: ad ogni colonna dell'automa è associata una determinata tonalità di un pianoforte, se il valore di una cella dell'automa è diverso da quello predefinito (ovvero se è diverso da 0), viene suonata la nota corrispondente [Fig 2].

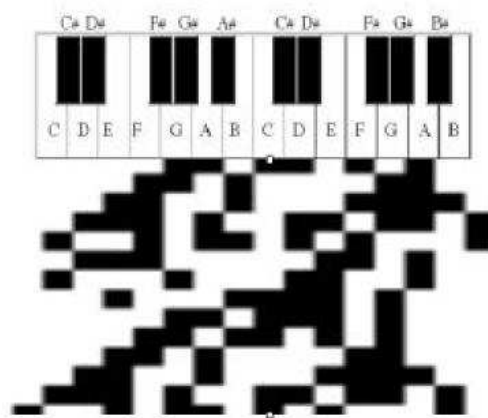


Figura 1.2 Esempio di musificazione locale di automi cellulari

Questo procedimento può essere effettuato con automi booleani o multistato. Nel secondo caso il risultato della musificazione è più vario ed interessante giacché i colori degli stati di ogni cella vengono interpretati come durate, dunque le composizioni acquistano maggiore aderenza a quelle prodotte dall'uomo. Un'altra tecnica consiste nell'associare una nota diversa ad ogni colore di un automa multistato: in questo caso i risultati diventano più interessanti man mano che aumenta il numero di stati. Il limite di questo metodo è che le durate delle singole note non possono essere variate.

I metodi di musificazione globale invece consentono una serie di risultati più vari e che tengono conto del comportamento d'insieme del sistema, ad esempio attraverso il calcolo della imput-entropy di Shannon, oppure tenendo conto delle popolazioni presenti ad ogni passo temporale in un automa cellulare multistato. Con questa tecnica viene assegnato un codice di musificazione che tiene conto

della quantità degli stati presenti nell'automata ad un determinato step. Queste misure vengono musicate contemporaneamente producendo armonie che in alcuni casi possono risultare piacevoli.

Allo stesso modo i metodi di musicazione misti tengono conto sia del comportamento locale di un automata che di quello globale. Uno di questi metodi, definito MINUET, suddivide le celle di un automata in gruppi di tre da destra a sinistra e dall'alto verso il basso. In ogni blocco i valori delle singole celle vengono sommati e, al valore del primo blocco viene associata una nota mentre al valore del secondo un tempo.

Oltre ad usare automi cellulari Bilotta e i suoi collaboratori hanno sviluppato tecniche di musicazione e sonificazione di sistemi non-lineari caotici come il circuito di Chua. Nel primo caso, i tre assi (x, y, z) del piano delle fasi che descrive il comportamento del circuito vengono considerati singolarmente in modo da avere un grafico bidimensionale avente i valori assunti da sistema sull'asse delle ascisse e il tempo sull'asse delle ordinate. L'onda prodotta viene discretizzata e a ciascun valore viene associata una nota. Come visibile nella figura [Fig. 3] viene utilizzata la nota C₄ come indice di riferimento, dunque i valori inferiori a 0 vengono associati a note posta sulla parte bassa della tastiera e, al contrario, i valori superiori a 0 sono associati alle note più alte. L'output dei tre parametri viene successivamente sommato (ovvero le note prodotte ad ogni intervallo temporale vengono sovrapposte creando accordi).

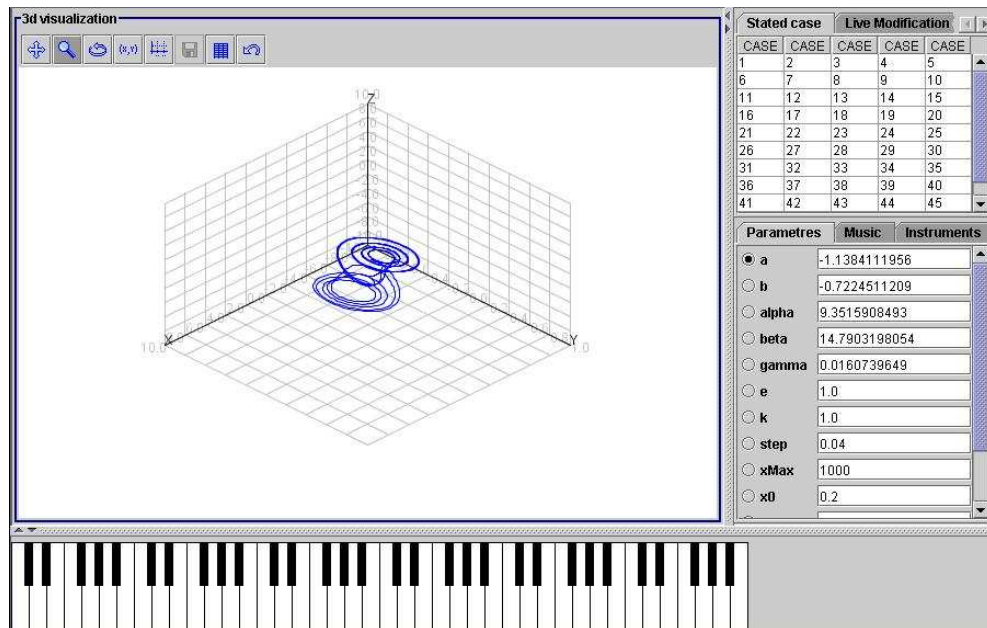


Figura 1.3 Musiche prodotte con l'attrattore di Chua.

Il processo di sonificazione funziona in modo analogo, ma anziché utilizzare le note di un pianoforte viene considerata una frequenza di riferimento (solitamente 440 Hz) che viene associata al valore 0 del grafico bidimensionale, in modo che l'oscillazione dei valori modula la frequenza di riferimento producendo suoni.

A differenza del metodo di musicificazione la sonificazione, che in alcuni casi diventa produzione di timbri e suoni [Dubnov, 2006; Rodet, 1993; Rodet et al., 1999a, 1999b] da sistemi complessi [Gleick, 2000] non prevede alcun processo di discretizzazione dunque non si verifica alcuna perdita nei dati provenienti dal sistema. Recentemente l' Evolutionary Systems Group ha prodotto un software per la creazione e il trattamento in real-time del suono denominato WFSound [Bilotta et al., 2003, 2004].

CAPITOLO 2

Introduzione alla Scienza delle Reti

2.1- Piccoli Mondi

Le reti sono divenute un importante strumento per la ricerca scientifica negli ultimi anni [Barabási, 2004; Buchanan, 2003; Strogatz, 2001, 2004]. L'interesse che molte discipline manifestano per questo settore di studi può tuttavia essere considerato come la conseguenza di un importante articolo apparso su Nature nel 1998. L'articolo in questione, scritto da Duncan J. Watts e Steven H. Strogatz [Watts et al., 1998] fornisce un modello alternativo ai cosiddetti *grafi random* di Erdős e Rènnyi per lo studio delle reti sociali.

Secondo una credenza popolare una qualsiasi persona sulla terra può essere connessa a qualsiasi altra attraverso una catena di conoscenze con massimo cinque intermediari. Questo fenomeno, conosciuto come “sei gradi di separazione” veniva spiegato usando la sopraccitata teoria dei grafi random, ma sebbene il modello Erdős/Rènnyi consentisse una spiegazione del fenomeno dei sei gradi, esso aveva tuttavia delle imprecisioni e non era in grado di render conto della natura delle reti sociali reali in cui le connessioni tra persone non sono sparse casualmente ma seguono dei criteri precisi.

Infatti, ognuno di noi possiede più amici e conoscenti nella propria città o in quelle immediatamente vicine, ipotizzare che le connessioni tra individui siano completamente random significherebbe sostenere che abbiamo la stessa

probabilità di conoscere e incontrare persone in altri stati e in altri continenti che non nel luogo in cui viviamo.

Il modello di Watts e Strogatz (o WS, o Small-World) è invece in grado di descrivere la natura al contempo regolare e caotica delle reti sociali. I due matematici della Cornell University hanno ipotizzato che un modello capace di spiegare un simile fenomeno doveva dunque possedere entrambe queste due caratteristiche ordine e disordine. La costruzione di questo modello è affidata ad una procedura definita *rewiring* (ri-cablaggio), ovvero all'applicazione di una probabilità p , a tutti i link di un grafo ordinato, di essere spostati. L'applicazione di questa probabilità determina un'incremento del disordine nella struttura. Infatti, per $p=0$ il grafo rimane completamente ordinato, e per $p=1$ il grafo diventa completamente random, ma per $0 < p < 1$ il modello diventa ibrido e mantiene caratteristiche proprie sia delle strutture ordinate che random.

Watts e Strogatz definiscono il modello Small-World in base a due parametri detti Path Length (o L) e Clustering Coefficient (o C). Il primo misura la distanza media tra due nodi generici nella rete, il secondo determina la presenza di strutture ordinate. In particolare il concetto di coefficiente di clustering è centrale per il modello Small-World poichè permette di distinguere matematicamente una rete random da una *piccolo-mondo*. I grafi regolari possiedono infatti una separazione media tra nodi piuttosto elevata e un alto coefficiente di clustering (che, come si è detto in precedenza, altro non è che una misura dell'ordine nella struttura). I grafi disordinati invece hanno bassi valori sia di L che di C . Ciò equivale a dire che sono strutture poco aggregate e in cui con pochi passaggi è possibile giungere da un nodo all'altro della rete. La caratteristica del modello WS è di mantenere una bassa separazione tra nodi senza che ciò comporti la disgregazione della struttura (questo modello verrà descritto nel dettaglio nelle prossime sezioni di questo capitolo).

Un modello alternativo di rete piccolo mondo è stato fornito da Albert-Làszlo Barabàsi [Albert et al., 1999, 2000, 2002; Barabasi et al., 1999; Barabasi, 2004]. Barabàsi e il suo entourage hanno empiricamente studiato le proprietà di reti quali il World Wide Web definendo il concetto di rete a invarianza di scala o *Scale-Free*. Le ricerche di Barabàsi hanno inoltre dimostrato che il modello scale-free è

caratteristico di numerosi sistemi quali Internet, le reti telefoniche, le reti di citazioni negli articoli scientifici ecc.

Le reti scale-free sono in realtà molto diverse da quelle ipotizzate da Watts e Strogatz. In primo luogo una rete a invarianza di scala è caratterizzata dalla presenza di *hubs*, ovvero nodi iperconnessi. La presenza di hubs determina una notevole differenza nella distribuzione dei collegamenti della rete, infatti esiste una grossa sproporzione tra la quantità di link di un hub e quella degli altri nodi. La *degree distribution* di una rete a invarianza di scala segue una legge di potenza (laddove nel modello WS la distribuzione segue una curva a campana).

Infine, un'interessante modello di rete piccolo mondo è stato proposto da Newman il quale propone una rete in cui la separazione media tra i vertici viene diminuita attraverso l'introduzione di nodi iperconnessi anzicchè con la procedura del rewiring. Ciò determina un decremento del valore di L senza però il rischio di disaggregazione di alcune aree della rete.

2.2- Grafi Regolari e Random

Le reti vengono studiate in matematica mediante la teoria dei grafi. Un grafo è costituito da un insieme di nodi connessi tra loro da archi. Possiamo pensare un grafo come un insieme $G=\{P, E\}$ dove P è una serie di nodi ed E è una serie di link. Il metodo di rappresentazione grafica solitamente impiegato per la visualizzazione delle reti è costituito da un insieme di punti connessi da linee.

La teoria dei grafi nasce nel XVIII secolo grazie al lavoro di Leonardo Eulero.

I grafi studiati da Eulero erano regolari e costituiti per lo più da pochi nodi. La moderna teoria dei grafi random nasce invece nel XX secolo e si avvale di metodi statistici e probabilistici. Per grafo random si intende una rete in cui gli archi sono distribuiti in modo completamente casuale. Le reti complesse hanno talvolta principi organizzativi sconosciuti, dunque lo studio di grafi random è spesso usata nello studio delle reti complesse.

I primi ad occuparsi di grafi irregolari furono Paul Erdős e Alfréd Rényi [Erdős et al., 1960]. Il loro lavoro dimostrò l'utilità di metodi probabilistici nella

risoluzione di problemi sui grafi. I due matematici si sono dedicati allo studio di grafi in cui la distribuzione degli archi era completamente casuale. In ogni grafo con N nodi esistono $N(N-1)/2$ archi possibili, dunque esistono anche $C_{N(N-1)/2}^n$ conformazioni possibili.

Esiste tuttavia un modello alternativo di grafo definito binomiale. In questo modello (sostanzialmente equivalente a quello costruito da Erdős e Rényi) ad ogni coppia di nodi viene associata la probabilità p di essere connessa, dunque il numero totale di archi è una variabile con valore $E(n)=p[N(N-1)/2]$.

Utilizzando questo processo un generico grafo G , in cui i nodi sono P_1, P_2, \dots, P_N , ogni grafo possibile ha una probabilità di emergere uguale a $P(G_0)=p^n(1-p)^{[N(N-1)/2] - n}$.

L'importanza della teoria dei grafi random è notevole, infatti questa disciplina studia con strumenti probabilistici l'evoluzione di grafi con $N \rightarrow \infty$. Erdős e Rényi sostengono che ogni grafo possiede una proprietà Q (ovvero che ogni coppia di nodi sia connessa da un cammino di archi consecutivi) se la probabilità di avere Q si avvicina ad 1 man mano che $N \rightarrow \infty$.

Erdős e Rényi hanno condotto le loro ricerche mosse da una serie di importanti interrogativi su quali dinamiche governino l'evoluzione strutturale di un grafo irregolare, ad esempio se un grafo è genericamente connesso, se esistano al suo interno triangoli connessi e in base a quali leggi la taglia di un grafo influenzi il suo diametro.

Il processo attraverso cui un grafo viene costruito è solitamente detto evoluzione, questa tecnica è basata sulla reiterata aggiunta di archi casuali per ogni coppia contenuta nel set di nodi N . Ad ogni nuova aggiunta corrisponde un aumento della probabilità p , a termine della quale si ottiene un grafo completamente connesso (dunque con $p=1$). Il massimo numero di nodi di un grafo è $n= N(N-1)/2$.

La teoria dei grafi random studia i modi con cui p influenza l'insorgere di un determinato tipo di grafi. Erdős e Rényi hanno scoperto che molte proprietà di grafi appaiono dopo poche iterazioni. Ad esempio Q (la proprietà secondo cui ogni coppia di nodi è connessa da un path finito), si verifica per quasi tutti i grafi ad una data probabilità al di sotto della quale quasi nessun grafo diventa connesso.

Allo stesso modo il transiente tra l'esistenza di una data proprietà e la sua assenza è estremamente rapido. Per molte di queste proprietà esiste una probabilità critica $p_c(N)$. Se $p(N)$ cresce più lentamente di $p_c(N)$ per $N \rightarrow \infty$, allora quasi tutti i grafi non possiedono Q . Se $p(N)$ cresce più velocemente di $p_c(N)$ allora quasi tutti i grafi avranno Q .

2.3- Il Modello Small-World

Molte reti reali hanno caratteristiche *small-world* (ovvero una separazione media tra i vertici molto bassa) ma possiedono anche un coefficiente di clustering tipicamente alto. Il coefficiente di clustering non è influenzato dalle dimensioni della rete. Questa caratteristica è propria delle reti regolari e dipende dal numero di archi presenti nella struttura e da come vengono distribuiti. Per esempio, in una rete unidimensionale con condizioni periodiche al contorno, in cui ogni nodo è connesso a K nodi vicini molti dei vicini di un nodo sono anche vicini tra loro, cioè la rete è clusterizzata. Per questa griglia il coefficiente di clustering è:

$$C = \frac{3(k-2)}{4(k-1)}$$

Le reti regolari, non hanno un path length basso: per una griglia ipercubica d -dimensionale la distanza media tra nodi scala come $N^{1/d}$, che cresce molto più velocemente con N rispetto all'incremento logaritmico osservato nelle reti random e nei grafi reali. Il primo tentativo di generare grafi con C alto e L basso è stato compiuto da Watts e Strogatz.

Watts e Strogatz hanno prodotto un modello ad un parametro basato sull'interpolazione tra strutture ordinate e grafi random. L'algoritmo dietro questo modello è il seguente:

- Si parte con una griglia ad anello in cui ogni nodo è connesso ai suoi K nodi più vicini.
- Si applica la procedura di *rewire* ad ogni link della griglia con probabilità p escludendo le autoconnessioni o i link raddoppiati. Grazie a questo processo nella

struttura emergeranno $pNK/2$ link a lungo raggio che connettono nodi facenti parte di diversi vicinati. La transizione tra ordine ($p=0$) e randomness ($p=1$) varia dunque al variare di p e può essere osservata man mano che la struttura evolve.

Questo modello ha le proprie origini nelle reti sociali dove ogni persona ha più amici e conoscenti nella propria città e nella strada dove vive.

D'altro canto ognuno possiede amici in altre nazioni o in posti molto lontani. Queste conoscenze sono rappresentate dai links a lungo raggio ottenuti attraverso il ricablaggio del modello WS.

Per capire la coesistenza di path length brevi e clustering noi studiamo il comportamento del clustering coefficient $C(p)$ e il path length medio $l(p)$ come funzione della probabilità di rewiring p .

Per una griglia ad anello con $l(0) \approx N/2K \gg 1$ e $C(0) \approx 3/4$, l scala linearmente con la taglia del sistema e il coefficiente di clustering è alto. D'altra parte per $p \rightarrow 1$ il modello converge verso un grafo random per cui $l(1) \sim \ln(N)/\ln(K)$ e $C(1) \sim K/N$, dunque l scala logicamente con N e il coefficiente di clustering decresce con N . Questi casi limite possono suggerire che C grandi sono sempre associati a l grandi e C piccoli sono associati a l piccoli. Al contrario Watts e Strogatz scoprirono che c'è un breve intervallo di p dove $l(p)$ è vicina a $l(1)$ e $C(p) \gg C(1)$. Questo regime ha origine in un rapido calo di $l(p)$ per valori piccoli di p , mentre rimane $C(p)$ quasi inalterato, ciò risulta in reti che sono clusterizzate ma hanno un path length breve. Una simile coesistenza di piccoli l e grandi C è assolutamente in accordo con le reti reali discusse prima.

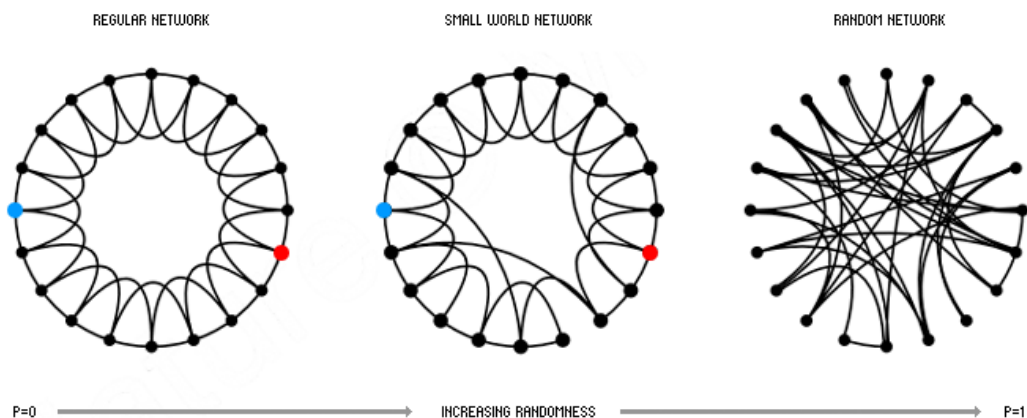


Figura 2.1 Esempio di Rete Piccolo Mondo

2.4- Il Modello Scale-Free

Il fatto che molte reti avessero una degree distribution che segue una legge di potenza è stato empiricamente verificato da Barabási e Albert, i quali hanno scoperto che la natura a “invarianza di scala” delle reti reali è radicata in due generici meccanismi comuni a molte reti. Le reti di cui si è discusso finora mantengono un numero di nodi costante. Nella realtà, molte reti sono sistemi aperti in cui nuovi nodi vengono continuamente aggiunti a quelli pre-esistenti. Si inizia con un piccolo numero di nodi, successivamente vengono inseriti nuovi elementi. Ad esempio il World Wide Web è una rete in costante crescita dal momento che vengono continuamente aggiunte nuove pagine.

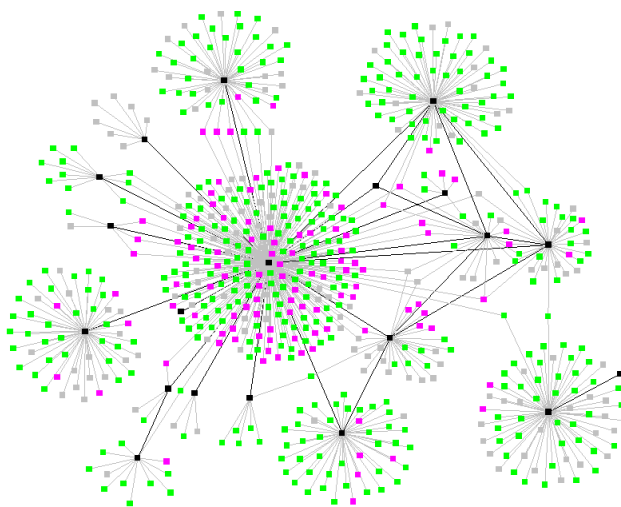


Figura 2.2 Esempio di Rete a Invarianza di Scala

Inoltre, nelle reti esaminate in precedenza, la probabilità che nuovi link siano aggiunti ai nodi presenti è uguale per tutti i nodi e non dipende in nessun modo dalla quantità di link che il nodo possiede. Una delle caratteristiche salienti delle reti reali è invece il *collegamento preferenziale*, ovvero il processo secondo cui la scelta del un nodo a cui conettersi non è casuale. Ne è un esempio ancora una volta il World Wide Web in cui le nuove pagine non vengono connesse

casualmente ma seguendo dei criteri ben precisi, o il fatto che un articolo scientifico molto citato ha più possibilità di ricevere ulteriori citazioni rispetto a quelli meno noti (questo è ciò che Barabàsi definisce preferential attachment).

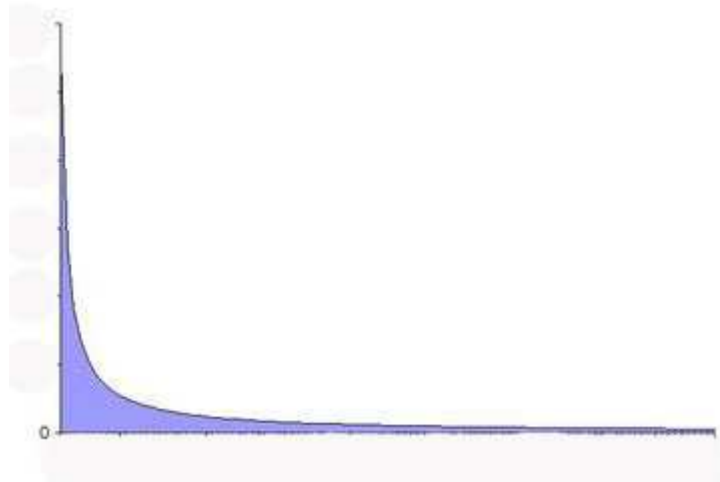


Figura 2.3 Esempio di distribuzione a legge di potenza

Questi due elementi, ovvero la crescita e il collegamento preferenziale, determinano l'architettura Scale-Free, ovvero il modello di rete introdotto da Barabàsi e Albert. Come verificato dai due autori, questi due elementi sono entrambi necessari perchè una rete assuma la conformazione a invarianza di scala, inoltre la presenza di questi due fattori è sufficiente affinché la rete sia *scale-free*.

1- *Crescita*

Si inizia con un numero di nodi (m_0) e ad ogni step si aggiunge un nuovo nodo con $m(\leq m_0)$ archi che connettono il nuovo nodo a m nodi presenti nella rete.

2- *Collegamento preferenziale*

La probabilità che un nuovo nodo venga connesso ad uno preesistente dipende dalla degree distribution di quest'ultimo. Ad ogni nuovo passo temporale si ottiene una nuova rete con $N = t + m_0$ ed mt archi.

Risultati ottenuti attraverso simulazioni indicano che una rete costruita con questa tecnica evolve in una rete scale-free in cui la degree distribution segue una legge

di potenza anziché una curva a campana (come accade per le reti precedentemente esaminate).

2.5- Tolleranza ad Attacchi ed Errori

Una delle ricerche più interessanti sulle reti piccolo mondo riguarda la loro capacità di resistere ad eventuali attacchi, errori e malfunzionamenti. Questo tipo di studi è divenuto attuale soprattutto alla luce dell'importanza che Internet e il WWW stanno acquistando a vari livelli (economico, sociale, ecc.).

Quando un malfunzionamento locale rende inagibile parte della rete numerose quantità d'informazione rimangono inaccessibili per periodi a volte molto lunghi. Questo, se si considera la quantità di dati scambiati sul Web in pochi minuti, può rappresentare un serio problema con ripercussioni anche economiche per tutti i siti che forniscono servizi o vendono prodotti via internet (si pensi ad e-bay ad esempio).

Barabási ha effettuato una serie di studi sulla conformazione del web e sulla sua capacità di resistere sia a errori che ad eventuali attacchi mirati ed ha poi confrontato la robustezza delle reti a invarianza di scala con quella di reti random, costruite con il sistema di Erdős e Rényi. L'efficienza di una rete viene stimata in termini di scambio d'informazione tra i singoli nodi, dunque una rete è più efficiente se la distanza media tra vertici è bassa (e quindi le informazioni circolano con maggiore facilità all'interno della struttura).

Per valutare le qualità di una rete, Barabási ha simulato il comportamento di un grafo random valutando la sua capacità di restare aggregato a seguito rimozioni reiterate di clusters di nodi. Questi clusters vengono rimossi in modo casuale (simulando un malfunzionamento) o mirato (simulando un attacco, in cui vengono presi di mira innanzitutto i nodi considerati più importanti). Lo stesso sistema è stato utilizzato per la valutazione dell'efficienza di una scale-free network, e dunque per effettuare un confronto tra il comportamento dei due diversi modelli.

Il confronto effettuato è basato sulle differenze nella degree distribution delle varie tipologie di reti dunque, dal momento che il modello small-world ha una

distribuzione analoga a quella dei grafi indagati da Erdős e Rényi⁵, questo modello non è stato preso in considerazione.

I risultati ottenuti dimostrano che le reti a invarianza di scala sono estremamente efficienti nel resistere a malfunzionamenti ed errori, a differenza delle reti random che invece collassano con maggiore facilità. Se sul web si verificano problemi a clusters di nodi, il diametro della struttura non subisce alterazioni significative, mentre, la rimozione di strutture in un grafo random causa presto problemi rilevanti alla connettività della rete.

Questo comportamento si spiega facilmente se si pensa che in un grafo random la quantità di link per nodo è analoga per tutti i vertici della struttura, dunque ogni nodo contribuisce in egual misura all'aggregazione della rete. Assai diverso è invece il comportamento di una scale-free network in cui nodi iperconnessi coesistono a nodi con degree drasticamente inferiore (in alcuni casi numerosi ordini di grandezza). Una rimozione casuale dunque, non pregiudica il funzionamento della rete, perchè la presenza di hubs consente alle varie aree di comunicare tra loro.

Al contrario, se i nodi vengono rimossi seguendo dei criteri (ad esempio se dovesse verificarsi un attacco gli attentatori per far collassare la rete tenterebbero di abbattere innanzitutto i nodi maggiormente connessi) il comportamento dei due modelli diventa pressoché analogo. Ovvero, la rimozione reiterata di strutture comporta un immediato aumento del diametro, inoltre la rete presto si sfalda in strutture isolate (gruppi di nodi) che non comunicano tra loro.

Esiste una soglia limite oltre cui le reti resistono ad attacchi ed errori, questa soglia è piuttosto alta per le reti a invarianza di scala nel caso di malfunzionamento di alcune aree, ma è estremamente bassa nel caso di attacchi. In poche parole il vantaggio della conformazione scale-free è estremamente ampio quando aree isolate sono soggette ad errore ma pressoché nullo in caso di attacchi.

⁵ Che segue un andamento a campana, dove cioè la quantità di archi per ogni nodo non differisce mai in modo sostanziale

2.6- Esempi di Reti Piccolo-Mondo

La più grande rete attualmente conosciuta è il World Wide Web (o Web, o WWW), per WWW si intende non la rete fisica di computers e routers (solitamente denominata Internet) bensì lo spazio occupato dalle pagine dei siti, (i nodi) e i links (le URL) che fungono da archi. La grandezza del web è stimata in 1 miliardo di nodi all'incirca (dati risalenti al 1999). Albert, Yeong e Barabàsi hanno studiato nel 1999 una sottorete del Web contenente più di 300.000 pagine ed hanno riscontrato la conformazione a legge di potenza sia nei link entranti che in quelli uscenti per ogni pagina⁶.

Nonostante sia una rete estremamente vasta, il web evidenzia un effetto piccolo mondo, ovvero possiede una separazione media tra vertici estremamente ridotta. Infatti nel 1999 Jeong e Barabàsi hanno scoperto che per un sottografo di 300.000 nodi la separazione media è di 11.2, mentre la stima effettuata dai due autori per l'intero web è di 19 clicks. Alcune misurazioni successive, effettuate su un campione di 200 milioni di nodi, mostrano, in ottemperanza alle previsioni di Barabàsi che l'average path length si assesta intorno ai 16 clicks.

Il fatto che nel web esistano dei link orientati rende assai problematica una stima del coefficiente di clustering. Questo problema è stato affrontato da Adamic⁷. Adamic ha proposto una misurazione parziale del web escludendo tutti i nodi aventi link orientati (solo in ingresso o solo in uscita). Il campione preso in esame da Adamic è di 153.127 nodi, il risultato ottenuto è $C=0.1078$. Questo risultato può apparire insignificante ma in realtà dimostra che la distribuzione delle connessioni del web è tutt'altro che casuale se si pensa che un grafo random della stessa misura avrebbe un coefficiente di clustering di $C_{rand}=0.00023$.

⁶ Quando si parla del WWW bisogna operare una distinzione tra link in entrata e link in uscita di una pagina. Ad esempio una pagina web può contenere un rimando ad un altro sito ma il sito in questione può non essere a sua volta connesso alla pagina iniziale. Pertanto, nel fare una stima della degree distribution del web è necessario tenere in considerazione questo dato.

⁷ Si veda [Albert et al. 2002].

Allo stesso modo Internet (l'insieme fisico di cavi, routers, computers ecc.) ha una conformazione a invarianza di scala. Lo studio di questa rete può essere effettuato in due modi. Il primo consiste nel considerare la rete globalmente, il secondo invece tiene conto solo dei domini, in questo modo centinaia di routers e computer vengono unificati in un singolo nodo. [Faloutsos et al. 1999] hanno studiato la topologia di Internet a vari livelli e in entrambi i casi la degree distribution segue una legge di potenza. Allo stesso modo la separazione media dei vari nodi nella rete internet oscilla tra 3.70 e 3.77, mentre il coefficiente di clustering è stimato tra 0.18 e 0.3 (a fronte dello coefficiente di una rete random che è $C_{rand}=0.001$).

Un altro noto esempio di rete piccolo mondo è quella costituita dagli attori e dalle loro collaborazioni. I dati su questa rete possono essere facilmente rinvenuti sull'Internet Movie Database⁸, dove sono conservate informazioni su tutti i film a partire dalla fine del XIX secolo. In questa rete i nodi sono costituiti dagli attori professionisti e i links rappresentano le collaborazioni tra di essi. Se due attori hanno girato un film insieme esiste un link tra di essi e il loro numero (la loro distanza) è uno. Se invece un determinato attore X ha recitato in un film con un altro attore Y che ha a sua volta recitato con Z allora la distanza tra X e Z è due. E così via. La rete che definisce le collaborazioni tra attori contava nel 1998 circa 200.000 nodi. Naturalmente questa rete si arricchisce continuamente di nuovi nodi e nuove aggiunte, ad esempio già nel 2000 la sua misura era stimata in circa 400.000 nodi. La separazione media tra i 400.000 nodi è di 3,5 (a fronte dei 2,9 di una rete con stessi nodi e links ma completamente random), ma il suo coefficiente di clustering è circa 100 volte maggiore.

Questi dati per quanto interessanti sono tuttavia perfettamente in linea con quanto asserito da Barabási, ovvero che una rete in cui sono presenti crescita costante e collegamento preferenziale assume spontaneamente la caratteristica a invarianza di scala. Infatti è evidente che le collaborazioni tra attori sono costantemente in crescita, nuovi film vengono girati ogni giorno e che le collaborazioni seguono dei criteri precisi. Ovvero, un attore quotato (dunque con molti link che lo connettono ad altri colleghi) ha molte più probabilità di girare nuovi film di uno sconosciuto

⁸ L'IMD è consultabile gratuitamente all'indirizzo www.imdb.com.

attore alle prime armi. Infatti la presenza di un attore di successo garantirà al film una certa notorietà e questo è un requisito importante per ottenere buoni incassi. Allo stesso modo la rete che descrive le collaborazioni tra ricercatori all'interno delle pubblicazioni scientifiche segue la tipica conformazione a coda lunga. Questa rete, inevitabilmente segue le stesse dinamiche proprie delle collaborazioni cinematografiche, ricercatori in vista generalmente vengono privilegiati dunque la rete segue la logica del collegamento preferenziale. Lo confermano i valori di average path length ($L_{\text{math}}= 9.5$) e coefficiente di clustering ($C_{\text{math}}= 0.59$).

Rete	Dimensione	L	L_{rand}	C	C_{rand}
WWW (unidirezionale)	153.127	3.1	3.35	0.1078	0.00023
Collaborazione tra attori	225. 226	3,65	2,99	0,79	0,00027
Collaborazioni tra matematici in articoli scientifici	70. 975	9,5	8,2	0,59	5.4×10^{-5}
Ricorrenza di parole	460.902	2,67	3,03	0,437	0,0001
Internet	3015 - 6209	3,7	3,76- 6,36	6,18 - 0,18	0,3 - 0,001

Un'altra rete che presenta caratteristiche small-world e degree a invarianza di scala è quella costituita dal linguaggio umano. Una ricerca condotta da [Cancho et al., 2001] sull'insieme delle parole presenti nella lingua inglese ha evidenziato risultati estremamente interessanti.

Infatti, se si crea una rete i cui nodi sono le parole e i cui link sono rappresentati dalla loro vicinanza nelle frasi (ovvero, viene inserito un link ogni coppia di parole che ricorrono un dopo l'altra in una frase) si ottiene una rete a invarianza di scala la cui separazione media è di $L=2.67$ (a fronte dei 3.3 di una rete completamente random) e il cui coefficiente di clustering $C=0.437$ (con $C_{rand}=0.0001$).

CAPITOLO 3

Rappresentazione e Analisi di Composizioni Musicali Attraverso la Scienza delle Reti

3.1- Introduzione

Quello della rappresentazione musicale è un problema posto in evidenza dall'introduzione del calcolatore come strumento per la creazione musicale. Si è già accennato alle modalità con cui il computer abbia comportato una sorta di punto di non ritorno per la musica; questo fatto vale per la fase creativa, ovvero per il processo compositivo, ma anche per quella analitica. Il computer, sin dall'inizio è stato visto come uno strumento utile per avere una corretta comprensione della musica quale fenomeno extra-musicale, ovvero è stato usato per estrarre dalla musica (con tecniche e metodi di vario genere) informazioni visive e numeriche. Non è un caso che da più di un decennio si siano moltiplicati gli studi sulla rappresentazione e l'analisi musicale al punto che anche un istituto come l'IRCAM abbia recentemente istituito un dipartimento completamente devoto alla formalizzazione di strutture musicali con tecniche e metodi *computer-assisted* (il team di Rappresentazione Musicale, per l'appunto).

Le tecniche usate per questo tipo di studi sono molteplici, in questo capitolo si tenterà di fornire una breve panoramica dei vari approcci al problema e successivamente verrà illustrato un metodo alternativo per la visualizzazione e lo studio di composizioni musicali basato sull'uso di reti complesse.

3.1.1- Rappresentazione ed Analisi Musicale

Il primo esempio di analisi scientifiche applicate alla musica, proviene dagli studi del linguista americano George Kingsley Zipf [Zipf, 1949], il quale nel 1949 pubblicò uno studio sulle relazioni tra significato e ricorrenza delle parole nei linguaggi naturali. Questo testo, oltre a presentare importanti risultati che avrebbero di lì a poco influenzato la linguistica moderna, ha anche avuto delle ripercussioni nello studio di altre discipline. La relazione individuata da Zipf nella ricorrenza delle parole è in realtà propria di molti sistemi auto-organizzati tra i quali figura anche la musica. Questa legge (definita per l'appunto legge di Zipf) è stata recentemente impiegata come elemento per l'analisi di composizioni musicali. Il fatto che anche la musica seguisse la stessa organizzazione era stato compreso già dallo stesso linguista, che nel testo offre una panoramica assai ampia di fenomeni caratterizzati dalla tipica distribuzione Zipf-like.

Brevemente, la legge di Zipf asserisce che:

Dato un testo, se si effettua un conto delle parole presenti, e si rappresentano le ricorrenze dei singoli lemmi, su un grafico bi-logaritmico avente sulle ordinate la frequenza (delle ricorrenze) e sulle ascisse le parole poste in ordine decrescente, si ottiene un grafico a legge di potenza con pendenza -1. Inoltre, se si moltiplica il numero di occorrenze di ogni parola per la sua posizione nella lista (dalla più ricorrente alla meno ricorrente) si ottiene una costante, ovvero un numero che oscilla all'interno di una range piuttosto contenuto. Questa legge è stata verificata empiricamente da Zipf che ha personalmente condotto degli su testi quali la Divina Commedia di Dante e L'Ulisse di Joyce. La legge di Zipf è stata successivamente studiata e perfezionata da [Mandelbrot, 1966] che ha aggiunto una serie di considerazioni e studi sperimentali.

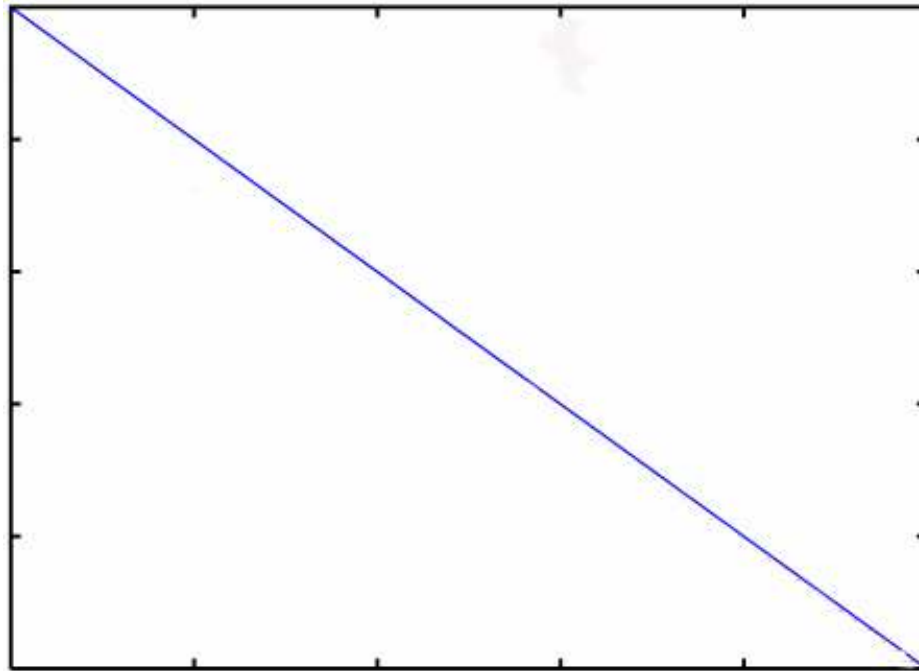


Figura 3.1 Esempio di legge di Zipf.

Nella prima metà degli anni Settanta alcuni ricercatori effettuarono degli studi sull'organizzazione fisica della musica e del suono trovando numerose similitudini con il lavoro di Zipf. E' questo il caso di Voss e Clarke [Voss et al., 1975, 1978] che trovarono il caratteristico grafico a legge di potenza nelle fluttuazioni di ampiezza di musica e parlato e nelle fluttuazioni di tono in musica. Lo studio di Voss e Clarke è molto importante non solo perché mostra come il suono da noi percepito come gradevole abbia la stessa organizzazione del linguaggio e di altri sistemi ma, soprattutto perché mostrò un nuovo modo di intendere la musica con analisi non strettamente legate alle regole imposte dall'accademia musicale, ma anche con tecniche maggiormente scientifiche.

Recentemente la legge di Zipf è stata adottata come tecnica di confronto tra musiche di autori diversi, nonché come criterio di valutazione della gradevolezza di una composizione. [Manaris et al., 2003, 2005] hanno eseguito uno studio su brani di vari generi musicali al fine di individuare una correlazione tra musica, organizzazione e stile della composizione. Manaris et al. Iniziano studiando un corpus di oltre 100 composizioni per verificare in che modo esse rispettino la legge di Zipf.

Il metodo adottato da Manaris è lo stesso ipotizzato dallo stesso Zipf, ovvero, si consideri una composizione musicale, e si faccia un conto della ricorrenza di ogni singola nota in essa presente. Si avranno complessivamente 12 note ordinate in base alla loro ricorrenza partendo da quella maggiormente presente. Successivamente si rappresenta graficamente la sequenza di parole su un piano bidimensionale bi-logaritmico e si valuta l'aderenza alla legge. I parametri utilizzati da Manaris per la valutazione sono due:

- 1- *Slope*: ovvero la pendenza della retta (che dovrebbe idealmente tendere a -1)
- 2- R^2 : quanto la retta si sovrappone a quella ideale perfettamente dritta (Manaris considera buone le rette in cui R^2 è almeno 0.7).

Il lavoro in questione però non si limita al solo conteggio delle note ma è basato complessivamente su 40 diverse metriche (tono, durata, durata per tono, intervalli armonici, intervalli melodici ecc.). Alcune di queste metriche sono semplici, altre vengono dette *frattali* ovvero, vengono applicate a porzioni di melodia per valutare in che modo la distribuzione è presente in tutte le sezioni di un brano. Questo accorgimento è molto importante perché anche una sequenza di note disposte a caso ma le cui ricorrenze rispettano la distribuzione di Zipf potrebbero essere scambiate per musica. Verificando che questa distribuzione sia tipica anche di parziali di melodia si evita di incorrere in questo tipo di errore.

I risultati ottenuti da Manaris sono estremamente interessanti giacché essi evidenziano che:

- a- gran parte delle composizioni rispetta la legge di Zipf
- b- diversi generi musicali corrispondono diversamente alla legge
- c- è possibile, semplicemente valutando l'aderenza di un gruppo di composizioni alla legge di Zipf, stabilire con approssimazione tutto sommato trascurabile, il compositore di una musica o addirittura l'esecutore di una determinata versione del brano.

Altre tecniche di analisi impiegano invece il calcolo della dimensione frattale di un brano per determinare un certo tipo di classificazione. [Cha set al., 2005] propongono uno studio fatto digitalmente (non in formato MIDI dunque ma analizzando l'onda fisicamente) su un corpus di composizioni indiane suddivise in tra categorie (classica, semiclassica, leggera).

Il calcolo della dimensione frattale avviene selezionando dei samples di circa 11 secondi per brano (un singolo canale a 8 bit e un sampling rate di 11 kbps). Ogni sample contiene circa 120000 punti che vengono processati automaticamente per ottenere la dimensione frattale D del brano che si calcola con la formula:

$$D = \lim_{R \rightarrow 0} [\log N / \log R]$$

Dove R è la dimensione di una traiettoria in uno spazio delle fasi e N è la quantità di quadrati necessari a coprire l'intera superficie della curva.

I risultati ottenuti da Cha set al. Sono estremamente significativi, in quanto rivelano che il calcolo della dimensione frattale consente di rilevare matematicamente differenze sostanziali tra composizioni di diversi generi. Infatti le composizioni considerate classiche hanno una dimensione frattale abbondantemente più alta delle altre (ben al di sopra del 3) laddove quelle leggere stanno al di sotto e quelle semiclassiche hanno valori compresi tra i due estremi.

Uno studio assai interessante sulla rappresentazione musicale proviene dal team di Musical Representation dell'IRCAM, istituto fondato negli anni settanta dal compositore musicologo e direttore d'orchestra Pierre Boulez. Questo team si interessa di estrarre strutture musicali e di rappresentarle graficamente per studiarle in termini scientifici. Gerard Assayag [Assayag et al., 2004], leader di questo team da tempo porta avanti ricerche basate su tecniche statistiche per creare modelli per la modellizzazione e la sintesi musicale. Queste tecniche sfruttano il modello delle catene di Markov tentano di costruire una serie di grammatiche per la creazione musicale. In particolare l'intento di Assayag è quello di applicare tecniche di machine learning, basate sull'analisi di esempi per modellizzare determinati stili compositivi.

Tra i lavori prodotti dal team guidato da Assayag è opportuno segnalare anche quelli di Olivier Lartillot [Lartillot, 2002°, 2002b, 2003, 2004] che ha costruito un modello di rappresentazione basato anch'esso sulle catene di Markov ma la cui peculiarità deriva dal sistema di grafico di visualizzazione allestito che fa uso di strutture ad alberi in cui le note interagiscono reciprocamente mediante collegamenti.

Questo sistema, viene istruito attraverso l'analisi di composizioni musicali in formato MIDI e permette di creare strutture interattive organizzate come fossero grafi. Il modello di Lartillot viene anche detto induttivo giacché fa uso di elementi cognitivi basati su analogie, induzione e similarità locali. In questo modo il sistema stiva al suo interno ogni tipo di configurazione e pattern appreso durante la fase di analisi ed è in grado di riutilizzarlo nella fase di sintesi.

3.1.2 –Rappresentazione Musicale e Scienza delle Reti

Tra le intuizioni di Lartillot è importante in questa sede sottolineare quella di associare la struttura interna della musica ad una rete in cui note connesse tra loro interagiscono dando vita a strutture via via più articolate. Secondo Lartillot la musica è in se stessa una rete in cui strutture aggregate interagiscono tra loro e i vari stili musicali sono visti come super-reti che unificano strutture specifiche all'interno di brani come elementi ricorrenti dei linguaggi comuni.

Il fatto che le reti siano pensate come metafora di strutture sistemi caratterizzati da forte interazione tra le parti non è completamente nuova, inoltre anche i ricercatori che si occupano di scienza delle reti lo sostengono. Vito Latora [Latora et al., 2001, 2003; Marchiori et al. 2000], sostiene infatti che viviamo in un mondo di reti, infatti ogni sistema complesso può essere rappresentato mediante una rete in cui i nodi rappresentano gli elementi del sistema e gli archi mostrano in che modo questi ultimi interagiscono tra loro.

Che la musica sia in se stessa un sistema complesso lo dimostrano numerosi studi [Voss et al., 1975; Manaris et al., 2005] dunque è parso ragionevole tentare di indagare la struttura interna della musica utilizzando strumenti presi a prestito dalla scienza delle reti. Quella della rappresentazione musicale è una sfida

intellettuale assai intrigante e la moderna ricerca legata alla computer science tenta di confrontarsi con essa con varie tecniche e modalità. Un metodo che pare assai fruttuoso riguarda proprio la scienza delle reti e tenta la formalizzazione e l'indagine di composizioni musicali attraverso grafi e strutture interconnesse. Con questa tecnica la musica è pensata come una rete di note interagenti e viene rappresentata graficamente come una serie di nodi (che rappresentano le note) e archi (che evidenziano gli intervalli melodici utilizzati dal compositore). A differenza delle reti ipotizzate da Lartillot in questo caso le strutture sono chiuse, o comunque più affini ai grafi regolari o random che non a strutture ad albero.

Ipotizziamo di voler modellizzare una composizione musicale sotto forma di grafo, si inizierà con la prima nota presente nel brano e la si connette con la seconda, procedendo in questo modo fino alla fine della composizione. Ovviamente non verranno inserite nel grafo le note ripetute (si entrerà maggiormente nel dettaglio su questa tecnica nel prossimo paragrafo) e verrà fatta distinzione di ottava (ovvero, A4 e ad esempio A5 verranno considerate due note diverse).

Il risultato sarà una rete apparentemente disordinata, ma che in realtà avrà al suo interno delle strutture organizzate e una sua coerenza nonostante la presenza di randomness che la rende assai vicina al modello studiato da Watts e Strogatz.

La rete ha il vantaggio di offrire informazioni visive non immediatamente rinvenibili in altri metodi di visualizzazione. Innanzitutto essa permette di visualizzare in un unico colpo d'occhio la struttura e l'interplay tra le note, evidenziando tutti gli intervalli presenti nella composizione e mostrando per ogni nota le connessioni con altri nodi (altre note). Naturalmente la mappatura delle reti avviene in rispetto delle adiacenze tra note. Ovvero, viene inserito un link solo tra note che sono disposte una dopo l'altra all'interno del brano. La rete diventa una sorta di mappa della composizione, ovvero un set di percorsi possibili tra quelli effettuati dal compositore. Si può pensare all'insieme dei voli gestiti da uno o più aeroporti, o alle strade di una città. La rete consente di dare una dimensione perfettamente spaziale ad una composizione. Naturalmente ciò avviene a discapito dell'elemento tempo, essa è infatti una rappresentazione statica di un fenomeno

propriamente dinamico perciò è naturale che essa sia una riproduzione parziale e utile solo al fine di condurre determinate analisi di un brano musicale.

Altri vantaggi dall'impiego delle reti possono essere rinvenuti in [Weinberg, 2005]. Weinberg usa la struttura a rete per favorire la collaborazione e l'interazione tra musicisti in vari modi producendo risultati sonori talvolta assai suggestivi ma comunque degni di nota se non altro per la tecnica di interplay che ne determina il risultato. Un altro elemento su cui Weinberg si sofferma è quello pedagogico ovvero, le *Interconnected Musical Networks* (definizione che lo stesso autore da al proprio lavoro) favoriscono la collaborazione e l'apprendimento di nozioni musicali. Questa riflessione potrebbe essere estesa all'uso di reti complesse in musica che si propone in questo lavoro. Infatti la struttura a rete in quanto estremamente intuitiva e comunque legata ad analogie visive può essere d'aiuto per i meno esperti o supportare l'apprendimento di concetti quali quello di intervallo musicale o scala melodica ecc.

Una rete può essere orientata o meno. Nel primo caso i link in essa presenti hanno un verso. E' possibile che in un brano l'autore suoni ad esempio l'intervallo Do-Re ma non il contrario (Re-Do). Questo tipo d'informazione può essere conservata solo se il grafo contiene i versi di *percorrenza* altrimenti viene effettuata una generalizzazione e il link che connette i due nodi diventa percorribile in entrambi i versi. Nel paragrafo dedicato alle analisi si vedrà come questo tipo di informazione può tornare utile in taluni casi per avere una corretta comprensione della musica analizzata.

I grafi vengono solitamente gestiti attraverso matrici di adiacenza, analoghe a quelle usate spesso per gli Automi Cellulari, non a caso recentemente il modello di Watts e Strogatz sia usato per creare Automi Cellulari small-world [Serra et al., 2004; Tomassini et al., 2005; Watts, 1999]. Se esista un arco tra due nodi viene inserito un 1 nello spazio corrispondente altrimenti vi è uno 0. Nel caso in cui il grafo sia pesato (ovvero vi siano distanze o altre informazioni associate ai collegamenti la matrice non sarà booleana). Come si è detto di solito la struttura interna delle composizioni è spesso analoga a quella delle reti piccolo mondo, in particolare al modello W-S, giacché quello a invarianza di scala è tipico di reti caratterizzate da collegamento preferenziale e crescita. La composizioni musicali

hanno una struttura basata su collegamenti preferenziali ma non crescono, ovvero non sono soggette all'aggiunta continua di altri nodi, dunque non rientrano all'interno di questo modello.

3.2- SWAP (Small-World Analyser and Player)

La rappresentazione sotto forma di rete di una composizione avviene per mezzo di un software implementato appositamente per questo scopo. Il software si chiama SWAP (acronimo che sta per Small-World Analyser and Player) [Campolongo et al. 2005b, 2005c, 2006] e consente di effettuare una serie di operazioni di analisi e di sintesi musicale utilizzando una struttura di note interconnesse.

SWAP è interamente implementato in C# ha una struttura modulare, basata su classi, che consente una buona performatività e flessibilità. SWAP consente di importare musiche in formato MIDI e visualizzarle sotto forma di rete, avere completo accesso alle informazioni analitiche sulla rete (coefficiente di clustering, average path length, numero di ricorrenze per nota, ecc.), e sui singoli nodi (link in entrata e in uscita, coefficiente di clustering del singolo nodo ecc.). Il sistema di rappresentazione è estremamente sofisticato e consente di visualizzare la rete in diversi modi, di effettuare degli zoom su particolari aree e di ruotare la struttura a 360° sia in orizzontale che in verticale. L'importazione di una rete può avvenire in diversi modi, è possibile analizzare una rete singolarmente o processare interi cluster di reti simultaneamente. Ciò avviene attraverso la Batch Analysis che consente di importare fino a diverse centinaia di composizioni contemporaneamente e di avere in pochi secondi tutte le informazioni su ognuna di esse. Le reti estratte dai file vengono salvate automaticamente in una cartella e le informazioni vengono raccolte su un file di Excel.

SWAP consente di utilizzare le reti estratte da composizioni musicali per produrre musiche auto-generate (che sfruttano gli intervalli presenti nella struttura) o addirittura di creare nuove reti.

Gli algoritmi per la produzione di melodie sono due. Il primo è basato sulla ricerca dei cammini minimi (sfruttando l'algoritmo di Floyd-Warshall) mentre il secondo è un algoritmo random.

Nel primo caso il software trova il cammino minimo tra due nodi (scelti dall'utente) e suona la scala relativa al path. Questo algoritmo non è particolarmente interessante sotto il profilo musicale ma è un utile strumento per studiare le dinamiche delle rete da attraverso il suono.

Il secondo algoritmo è denominato *walking*. E' un algoritmo random, paragonabile a una catena di markov in cui le probabilità sono equamente ripartite, ma è un modello ancor più semplice che sfrutta gli intervalli presenti nella rete per creare scale.

Entrambi questi metodi verranno più ampiamente discussi nel prossimo capitolo.

3.2.1 – L'interfaccia e le funzioni di SWAP

L'interfaccia di SWAP può essere sommariamente suddivisa in tre parti:

- a- il pannello di controllo (posto in alto a destra);
- b- la finestra contenente le informazioni sui grafi (in basso a destra);
- c- la finestra di log (che occupa gran parte dell'interfaccia grafica).

La prima sezione dell'interfaccia è quella dove sono posti i controlli che permettono di effettuare tutte le operazioni con SWAP. La seconda è quella che mostra tutte le informazioni sui grafi e sui singoli nodi. La terza è quella che documenta tutte le operazioni effettuate da SWAP.

A queste tre parti va ad aggiungersi l'area di visualizzazione delle reti, che viene richiamata mediante un controllo posto in alto sull'interfaccia e consente di far apparire il grafo con il sistema di visualizzazione scelto. I sistemi di visualizzazione sono due, denominati *embedding circolare* e *embedding in movimento*. Ognuno di questi sistemi esiste in versione 2-D e 3-D, cosicché complessivamente esistono 4 diversi metodi per visualizzare una rete.

La visualizzazione di una rete avviene su una finestra a se stante, essa può essere richiamata dal comando "Embedding" posto in alto sull'interfaccia. Una volta

scelto l'embedding la finestra net view compare sullo schermo e la rete può essere visualizzata.

Le informazioni sulla rete possono essere richiamate attraverso il controllo "network info" posto all'interno del pannello di controllo. Esso consente di visualizzare il numero complessivo di archi delle rete, l'average path length, il coefficiente di clustering e se la rete è orientata o meno.

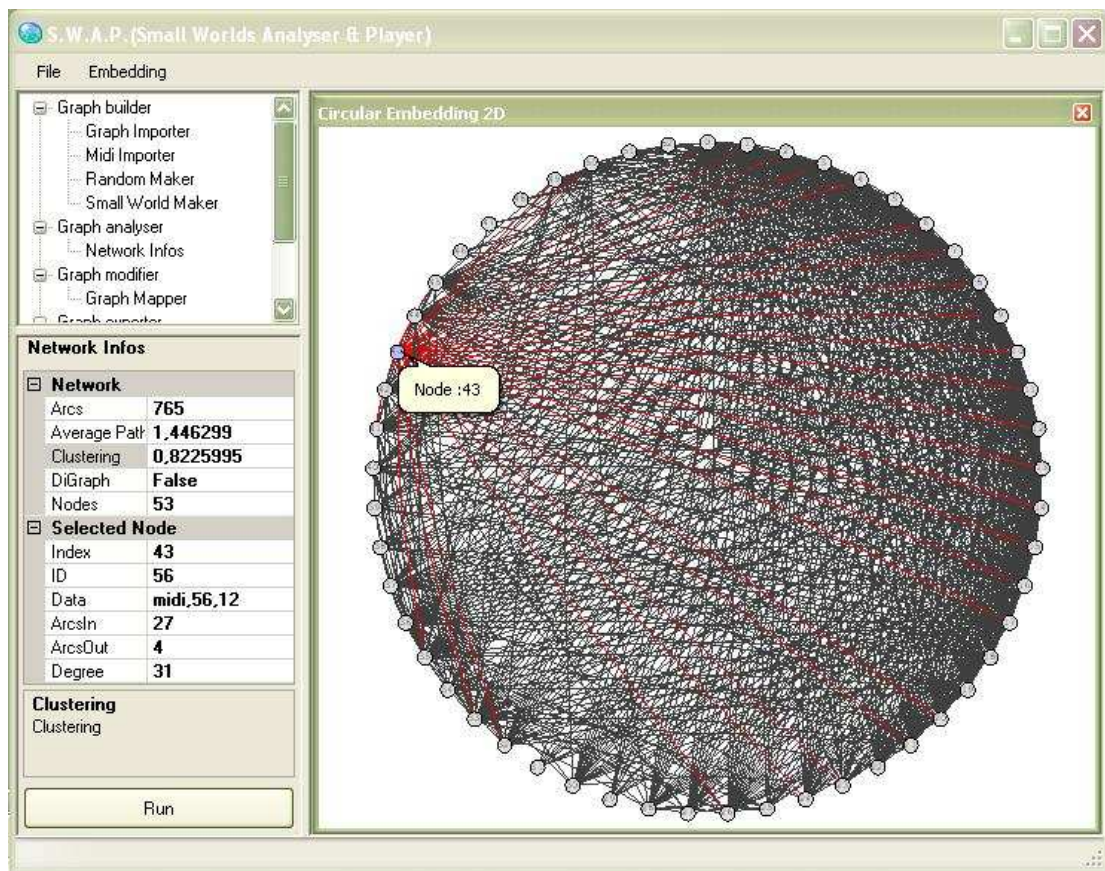


Figura 3.2 Screenshot di SWAP.

Allo stesso modo grazie alla net view window è possibile selezionare un nodo, che si evidenzia automaticamente sul grafico ed avere tutte le informazioni relative ad esso nella node info window. Essa mostra gli archi in ingresso e in uscita dal nodo, la nota di riferimento, il suo numero nella rete ecc.

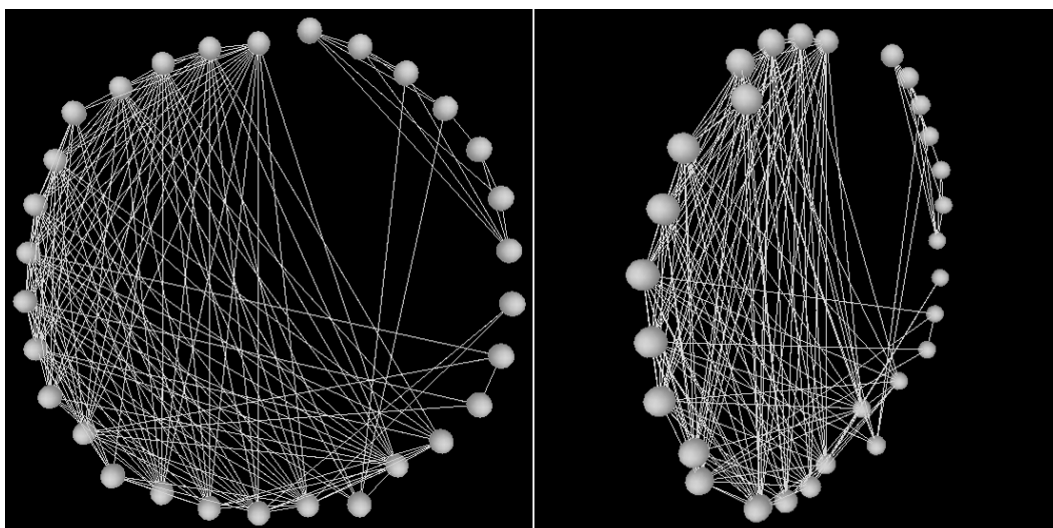


Figura 3.3 Esempio di rappresentazione sotto forma di rete.

I file MIDI analizzati da SWAP, una volta mappati possono essere salvati sotto forma di file .VRML e visualizzati con un browser come Internet Explorer o Mozilla. Questo metodo consente di avere maggiore flessibilità nella visualizzazione, infatti permette di visualizzare la rete sotto diversi punti di vista, di ruotare e di effettuare degli zoom per meglio osservare parti della rete.

3.2.2 – Rappresentazione e analisi

Si prenda come esempio il brano Yesterday dei Beatles. Per rappresentarlo sotto forma di rete ed analizzarlo è sufficiente caricarlo in SWAP attraverso il pannello di controllo e la rete è immediatamente visibile. La Fig 3.4 mostra il risultato del processo. La rete ottenuta è composta complessivamente da 44 nodi e 344 archi (7,81 archi per nodo). Il suo coefficiente di clustering è $C=0,7170003$ mentre il suo average path length è $L=1,641649$. Nella figura è inoltre ben visibile il nodo selezionato (il numero 41) che si evidenzia automaticamente e consente di prendere visione dei nodi direttamente connessi ad esso (i cui archi si colorano automaticamente di rosso).

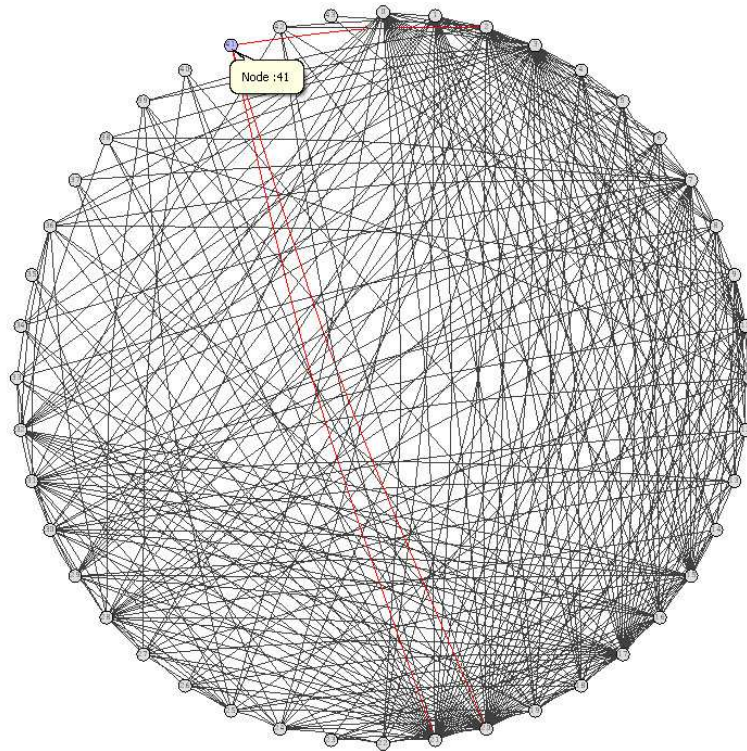


Figura 3.4 Evidenziazione del vicinato del nodo 41 in una rete non orientata.

Il nodo 41 è connesso a tre altri nodi attraverso altrettanti link, due dei quali sono orientati verso l'esterno e connettono il nodo 41 ai nodi 20 e 21 mentre il terzo link in ingresso proviene dal nodo 2. Queste ultime informazioni sono verificabili se si considera un grafo orientato (specificandolo attraverso un comando). La Fig 3.5 mostra la stessa rete orientata e i tre archi colorati in modo diverso per meglio distinguere graficamente gli archi in ingresso da quelli in uscita. Naturalmente questo comando altera anche i due valori inizialmente estratti dalla rete che diventano $C=0,677720845$ e $L=1,86627913$. Come vedremo più avanti la distinzione tra grafi orientati e non orientati può risultare estremamente utile.

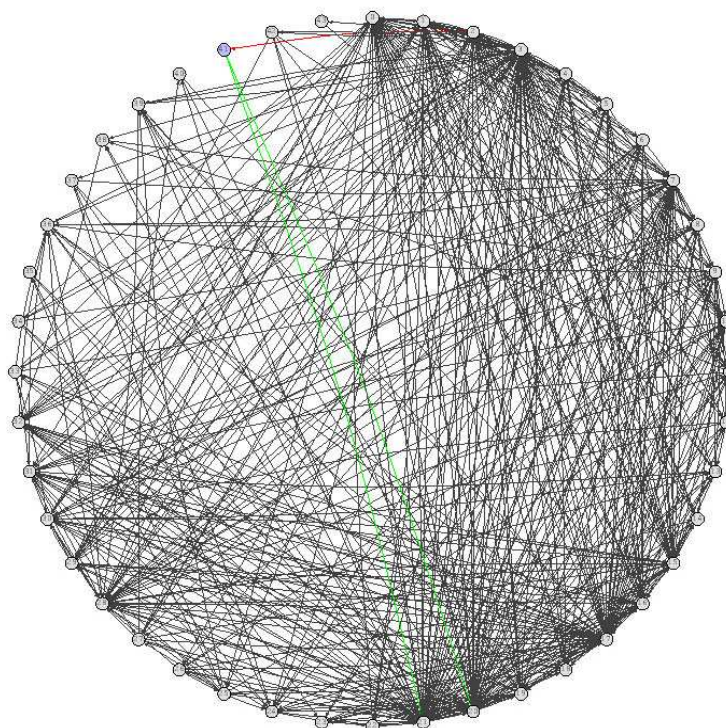


Figura 3.5 Vicinato in una rete orientata.

SWAP consente inoltre di rappresentare una rete in 3-D. Questo metodo di rappresentazione è meno ordinato del precedente ma ha il vantaggio di offrire una serie molto ampia di possibilità di visualizzazione tra cui quella di ruotare la rete permettendo una visualizzazione meno statica e più interattiva. Come si vede nella Fig. 3.6 questo sistema di raffigurazione consente una visione dettagliata e estremamente minuziosa soprattutto esso permette di cogliere molti particolari della struttura (in particolare la distribuzione degli archi).

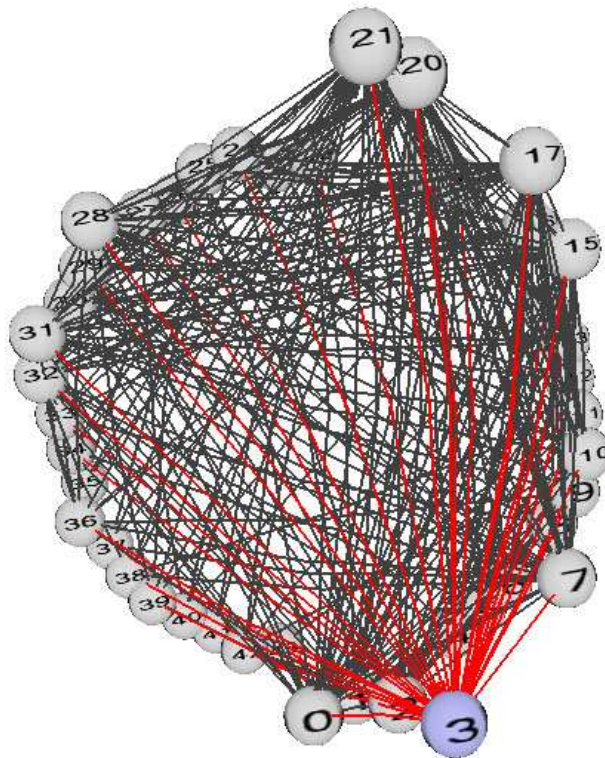


Figura 3.6 Esempio di visualizzazione 3-d.

Il secondo metodo di rappresentazione (quello definito embedding in movimento) invece è decisamente più versatile del primo e permette di interagire direttamente con la rete a più livelli. Ad esempio è possibile cambiare la disposizione dei nodi e modificare la conformazione complessiva della rete per ottenere la configurazione desiderata. Ciò, naturalmente permette di meglio osservare i sottografi e i cluster (o vicinati) di un nodo. E' comunque importante sottolineare che lo spostamento nello spazio dei nodi non comporta un'alterazione sostanziale della struttura che rimane pressoché invariata. La forma assunta dalla rete (che solitamente viene rappresentata in modo circolare per comodità) è un fatto meramente estetico che non influenza i dati che hanno a che fare con le adiacenze tra nodi e la distribuzione dei collegamenti nel grafo.

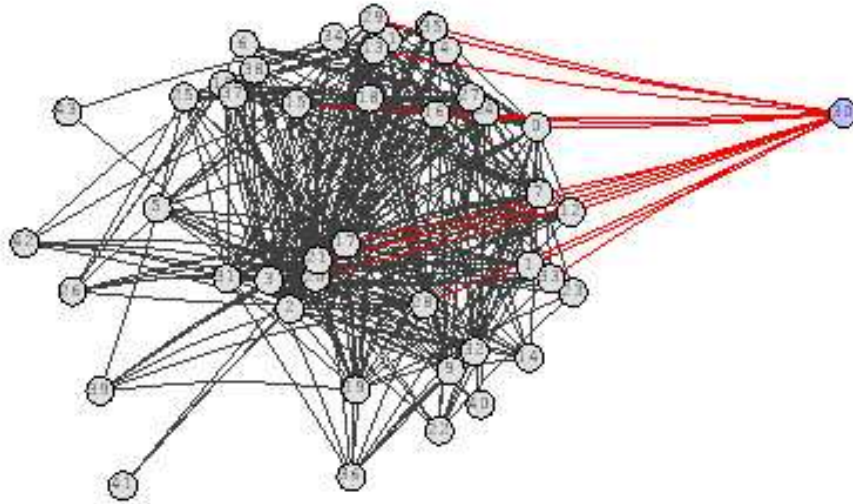


Figura 3.7 Rappresentazione di una rete mediante il sistema di embedding in movimento.

3.2.3- Batch Analysis

Lo stesso tipo di analisi può essere effettuato con gruppi di composizioni simultaneamente. Ad esempio se si vuole analizzare un insieme di composizioni di Bach o Mozart è possibile farlo mediante la Batch Analysis. Come discusso nel paragrafo precedente questo metodo consente di confrontare gruppi di composizioni e di visualizzarne i dati immediatamente attraverso un file di log.

3.3- Analisi di Reti Derivate da Composizioni Musicali

La prima fase di questo lavoro è stata la definizione di un metodo per la rappresentazione di composizioni musicali. Questo metodo consente di formalizzare strutture musicali come grafi e di osservarne l'organizzazione interna. Al fine di meglio esaminare la struttura presa in esame sono state condotte una serie di analisi su musiche di diversi autori. Le analisi effettuate sono basate sui parametri creati da Watts e Strogatz per la valutazione di una rete (coefficiente di clustering e average path length). Innanzitutto sono stati effettuati dei confronti tra i parametri estratti dalle reti e quelli provenienti da reti analoghe (ovvero

aventi lo stesso numero di nodi e link) completamente ordinate e completamente random. Successivamente i valori di reti ottenute da gruppi di composizioni di diversi autori sono stati confrontati per verificare se esistono differenze sostanziali tra di essi.

Il primo confronto mostra interessanti analogie tra le reti Small-World di Watts e Strogatz e le reti ottenute modellizzando composizioni musicali di vari generi musicali. La distribuzione dei link è infatti tutto sommato ordinata ma con piccole quantità di disordine. Inoltre, i valori dei parametri estratti da queste reti hanno particolari caratteristiche direttamente riconducibili all'autore delle composizioni, come si vedrà in modo più accurato nel prossimo paragrafo.

3.3.1- Risultati

I file MIDI analizzati sono oltre 100, scelti tra composizioni di diversi generi musicali (classica, pop, rock ecc). La Fig. 3.8 mostra le analisi effettuate su un campione di brani di Bach. Come si vede i valori provenienti dalle composizioni analizzate sono perfettamente intermedi tra quelli provenienti da reti random e quelli propri delle reti ordinate. Naturalmente il confronto è stato fatto tra reti di dimensioni analoghe.

C	BWV 532	BWV 570	BWV 526	BWV 572	BWV 551
Regular	.69	.6	.69	.66	.30
Network	.60	.5	.62	.52	.63
Random	.19	.095	.35	.18	.68
L	BWV 532	BWV 570	BWV 526	BWV 572	BWV 551
Regular	3.34	5.5	2.17	3.5	2.43
Network	2.56	3.24	1.88	2.58	2.15
Random	1.91	2.42	1.72	2.00	1.79

Figura 3.8 Confronto tra i valori di reti analizzate con reti regolari e random.

Come si è detto nel capitolo relativo alla scienza delle reti, le reti piccolo mondo sono caratterizzate dalla compresenza di strutture ordinate e caotiche. Nonostante i risultati di queste analisi siano significativi, il fatto che le composizioni musicali siano organizzate come reti piccolo mondo non stupisce più di tanto. La musica è

in se stessa frutto dell'incontro tra le regole di composizione e l'estro del musicista, dunque la creatività sembra introdurre in musica una lieve quantità di randomness all'interno di un modo fatto di ordine.

Come si vede, il coefficiente di clustering delle composizioni è sensibilmente più vicino a quello delle reti ordinate mentre il cammino minimo medio è più affine a quello delle reti disorganizzate. Un comportamento analogo lo si riscontrava con il processo di rewiring introdotto da Watts e Strogatz, che consentiva di abbassare sensibilmente la distanza media tra i nodi della struttura senza compromettere il coefficiente di clustering (che rimaneva abbastanza alto).

Nell'immagine successiva (Fig. 3.9) si vede il variare dei due parametri in funzione della randomness p all'interno di un piano bidimensionale. Ogni rete è individuata sul piano dal valore di C (sulle ascisse) e L (sulle ordinate). Le icone bianche rappresentano la simulazione del processo di rewiring mentre quella nera è la composizione BWV 570 di Bach. La rete, per $p=0$ ha $C=0,6$ e $L=5,5$ mentre a termine dl processo, con $p=100$ (ovvero completamente random) ha $L=2.42$ e $C=0,095$. Come di vede la rete relativa alla composizione BWV 570 è situata in prossimità della rete cui è stato applicato il 5% della randomness il che ci fa supporre che la quantità di disordine presente nella composizione in questione sia sostanzialmente analogo (approssimativamente del 5-7%). Il suo coefficiente di clustering ($C=0,5$) è assai prossimo a quello della rete con $p=0$ (quella ordinata) mentre la separazione media tra nodi ($L=3,24$) è analoga a quella delle rete random ($p=100$).

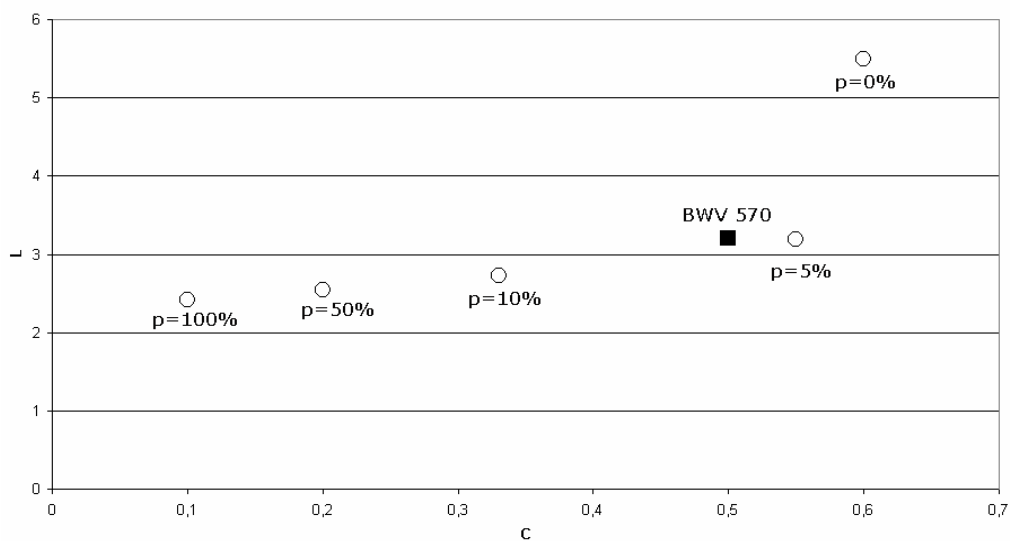


Figura 3.9 Variazione dei parametri C e L al variare di p .

Successivamente si è tentato di confrontare tra loro i valori di reti estratte da composizioni di diversi musicisti allo scopo di individuare differenze sostanziali tra di essi. Per questo ci si è serviti dello spazio bidimensionale usato per il grafico in figura 3.10 per visualizzare la distribuzione delle reti di autori diversi su di esso. La figura 3.11 mostra la distribuzione di composizioni di Bach (cerchi) e Mozart (quadrati) a confronto.

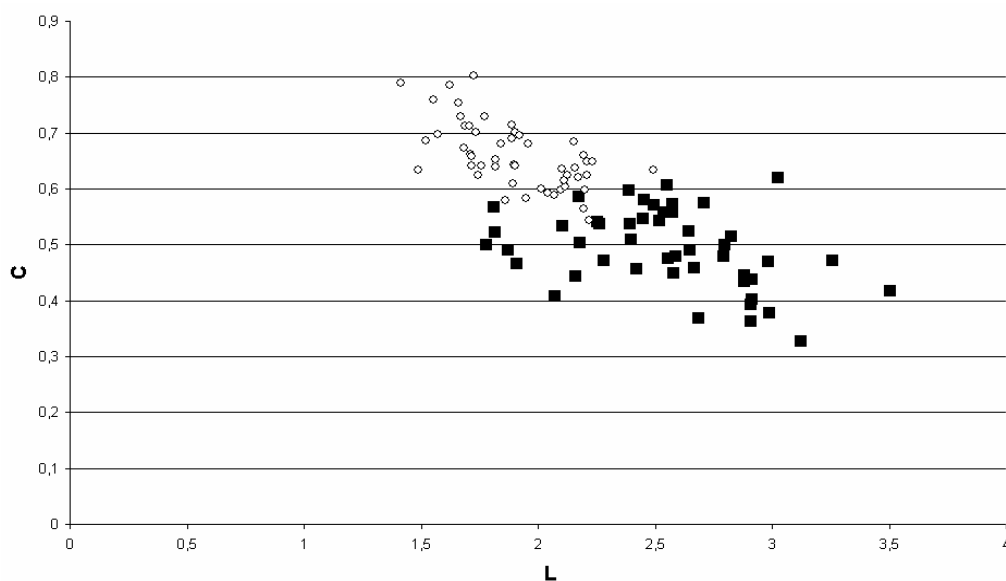


Figura 3.10 Piano L-C. Rappresentazione di gruppi di reti estratte da composizioni di Bach (cerchi) e Mozart (quadrati).

Come evidente, nonostante alcune sovrapposizioni in alcuni punti, le icone tendono ad occupare aree diverse dello spazio. Questo dato lascia supporre che sia possibile rinvenire una sorta di *fingerprint* dell'autore utilizzando i dati ottenuti dalle analisi sulle reti. Nel prossimo paragrafo verranno descritte alcune analisi statistiche effettuate proprio sui valori delle reti studiate.

3.4- Analisi Statistiche

Le analisi svolte sinora mostrano che la struttura interna delle composizioni studiate (ovvero la distribuzione dei legami al loro interno) hanno peculiarità piccolo-mondo. Inoltre i valori di C ed L di queste reti sembrano essere caratteristici di determinati autori, ovvero se rappresentati sul piano L-C assumono conformazioni che sembrano diverse per ogni gruppo di composizioni. Si è proceduto dunque all'analisi di questi valori per mezzo di un'ANOVA (Analisi Of VARIance, analisi della varianza) con lo scopo di verificare statisticamente se questi dati consentono di identificare l'autore di un brano per mezzo di questi dati. L'ANOVA consente per l'appunto di stabilire se tra i gruppi di dati confrontati esistono delle differenze significative.

Sono stati scelti 111 brani di 5 compositori diversi ed è stato effettuato un confronto su tre diversi parametri ovvero il coefficiente di clustering C, la separazione media tra vertici L e la separazione media relativa ovvero L/N.

I compositori presi in considerazione sono musicisti di impostazione estremamente diversa che spaziano dal pop al rock alla musica classica. Gli autori sono J. S. Bach, W. A. Mozart, G. F. Handel, i Beatles, Franco Battiato e Frank Zappa.

3.4.1- Risultati

I risultati ottenuti da questa analisi sono estremamente interessanti giacché mostrano che tutti e tre i parametri sono estremamente significativi. I valori di L, C e L/N di gruppi di composizioni di diversi autori e divergono significativamente

l'uno dall'altro. La tabella riportata in basso mostra i dati ottenuti da questa analisi.

L	F(5, 111)=2.347 p<.05
L/N	F(5, 111)=5.792 p<.000
C	F(5, 111)= 3.974 p<.005

Figura 3.11 Risultati ANOVA.

Come si vede le differenze individuate dall'analisi della varianza sono sostanziali, infatti il parametro p indica proprio la probabilità che lo stesso tipo di analisi se effettuata nuovamente possa dare risultati differenti. Il parametro p risulta essere inferiore a 0,05 nel caso di L, inferiore a 0,005 nel caso di C e addirittura inferiore a 0.000 nel caso di L/N. Questi risultati oltre ad essere estremamente interessanti indicano che il margine d'errore per questo tipo di analisi è molto basso inferiore al 5% nel primo caso e inferiore all'1% negli altri due.

Appendice – Dati estratti dalle composizioni analizzate

1- Bach

Nome	N	k	k/N	L	L/N
BWV526	47	564	12	2,066143	0,044916
BWV527	48	496	10,33333	2,264184	0,048174
BWV578	46	323	7,021739	2,661353	0,059141
BWV579	77	411	5,337662	4,700615	0,06185
BWV582	48	681	14,1875	1,937057	0,041214
BWV583	46	280	6,086957	2,76715	0,061492
BWV584	44	235	5,340909	3,379493	0,078593
BWV585	44	311	7,068182	2,965645	0,068968
BWV586	42	230	5,476191	2,979675	0,072675
BWV587	43	216	5,023256	2,91639	0,069438
BWV588	46	426	9,26087	2,319807	0,051551
BWV589	44	368	8,363636	2,384249	0,055448
BWV590	47	701	14,91489	1,847826	0,04017
BWV592	42	485	11,54762	1,984901	0,048412
BWV593	47	549	11,68085	2,037928	0,044303
BWV594	48	730	15,20833	1,890071	0,040214
BWV595	46	523	11,36957	2,118841	0,047085
BWV596	46	668	14,52174	1,884541	0,041879
BWV597	41	225	5,487805	3,318902	0,082973
BWV598	25	197	7,88	1,791667	0,074653
BWV766	45	575	12,77778	1,941919	0,044135
BWV767	47	611	13	1,936633	0,042101
BWV768	48	666	13,875	1,937943	0,041233

2- Battiato

Nome	N	k	k/N	L	L/N
Bandiera bianca	44	231	5,25	2,911734	0,067715
Summer on a solitary beach	39	196	5,025641	2,77193	0,072946
Caffè de la paix	44	536	12,18182	1,825053	0,042443
Centro di gravita'	43	273	6,348837	2,784053	0,066287
Chanson egocentrique	40	560	14	1,680769	0,043097
Cuccurucucu'	51	334	6,54902	2,7388	0,054776
E ti vengo a cercare	55	849	15,43636	1,745118	0,032317
Gli uccelli	66	1246	18,87879	1,810723	0,027857
I treni di tozeur	38	574	15,10526	1,64936	0,044577
La cura	45	317	7,044445	2,846465	0,064692
La stagione dell'amore	32	198	6,1875	2,589718	0,083539
L'era del cinghiale bianco	53	410	7,735849	2,810651	0,054051
Prospettiva nevski	25	126	5,04	2,21	0,092083
Segnali di vita	42	617	14,69048	1,676539	0,040891
Sentimento nuevo	41	653	15,92683	1,679268	0,041982

Shock in my town	50	836	16,72	1,738367	0,035477
Vite parallele	34	498	14,64706	1,599822	0,048479
Voglio vederti danzare	56	468	8,357142	3,572078	0,064947

3- Beatles

Name	N	k	k/N	L	L/N	C
AHardDaysNight	41	385	9,390244	2,739634	0,06849085	0,748138
ALLUNED	40	329	8,225	2,461539	0,06311637	0,671556
AsABird	49	491	10,02041	2,571854	0,05358028	0,698197
Imagine	38	457	12,02632	1,727596	0,04669179	0,763206
CMETOG	40	221	5,525	2,726282	0,06990467	0,582335
Eleanor	36	157	4,361111	3,006349	0,08589569	0,359236
HELP	42	322	7,666667	2,606853	0,06358177	0,694385
holdhand	34	275	8,088235	2,235294	0,06773619	0,667025
LOVMEDO	32	176	5,5	2,546371	0,082141	0,54201
MICHEL	44	213	4,840909	3,001057	0,06979202	0,448895
Oblada	49	434	8,857142	2,251302	0,04690212	0,599532
SHECAME	41	338	8,243902	2,476219	0,06190548	0,589282
Yesterda	30	244	8,133333	2,655172	0,09155767	0,648937
YLLWSUB	33	168	5,090909	2,909871	0,09093348	0,499412

4- Handel

Name	N	k	k/N	L	L/N
03 - Comfort Ye, My People	39	323	8,282051	2,282726	0,060072
04 - And The Glory Of The Lord	46	757	16,45652	1,840097	0,040891
07 - And He Shall Purify	56	671	11,98214	2,193506	0,039882
09 - Oh Thou That Tellect Good Tidings	41	424	10,34146	2,086585	0,052165
12 - For Unto Us A Child Is Born	47	620	13,19149	2,017114	0,04385
13 - Pastoral Symphony	27	81	3	2,22807	0,085695
14 - There Were Shepherds	49	252	5,142857	2,957447	0,061613
17 - And Suddenly There Was With The	31	203	6,548387	2,496774	0,083226

Angel					
18 - Glory To God In The Highest	41	324	7,902439	2,465854	0,061646
20 - Then Shall The Eyes Of The Blind	39	232	5,948718	2,738866	0,072075
21 - He Shall Feed His Flock	43	318	7,395349	2,604651	0,062016
22 - His Yoke Is Easy	36	201	5,583333	2,564286	0,073265
23 - Behold The Lamb Of God	42	311	7,404762	2,476771	0,060409
24 - He Was Despised	39	235	6,025641	2,631579	0,069252
25a - Surely He Hath Borne Our Grievs	49	469	9,571428	2,231337	0,046486
25b - And With His Stripes We Are Healed	45	400	8,888889	2,16374	0,049176
25c - All We Like Sheep	50	572	11,44	2,093061	0,042716
27 - He Trusted In God	44	445	10,11364	2,142706	0,04983
32 - Lift Up Your Heads	44	495	11,25	2,114693	0,049179
34 - Let All The Angels	38	316	8,315789	2,238976	0,060513
36 - The Lord Gave The Word	38	320	8,421053	2,282361	0,061685
42 - Hallelujah Chorus	46	551	11,97826	2,101449	0,046699
44 - Since By Man Came Death	49	608	12,40816	1,96131	0,040861
48b - But Thanks Be To God	49	962	19,63265	1,633078	0,034022
50 - Worthy-Blessing And Honour-Amen	52	646	12,42308	2,074284	0,040672
Concerto No. 5, Op. 4, Mov. 1	31	308	9,935484	1,934409	0,06448
Concerto	36	320	8,888889	2,174603	0,062132

No. 5, Op. 4, Mov. 2					
Concerto No. 5, Op. 4, Mov. 3	32	221	6,90625	2,84375	0,091734
Concerto No. 5, Op. 4, Mov. 4	34	254	7,470588	2,375223	0,071976
Largo (2)	25	303	12,12	1,503333	0,062639
Suite For Harpsichord In D minor	39	367	9,410256	2,075573	0,05462
Violin Sonata No. 3, Mov. 1	41	362	8,829268	2,225	0,055625

5- Zappa

Name	N	k	k/N	L	L/N
The air	24	71	2,958333	2,462838	0,10708
Theblackpageiii	28	225	8,035714	2,019841	0,074809
Cosmic debris	58	377	6,5	2,91591	0,051156
Dog breath	51	331	6,490196	2,675785	0,053516
Hungry freaks daddy	33	153	4,636364	2,732008	0,085375
Im the slime	43	302	7,023256	2,871882	0,068378
King kong	25	95	3,8	3,253333	0,135556
Oh no!	43	355	8,255814	2,439646	0,058087
Sharleena	53	546	10,30189	2,459724	0,047302
St. Alphonso's pancake breakfast	31	133	4,290323	3,082796	0,10276
Twenty small cigars	47	296	6,297873	2,559204	0,055635
Yo_mama	51	542	10,62745	2,103922	0,042078

CAPITOLO 4

Alcuni Esempi di Sintesi Musicale

4.1- Algoritmi per la Produzione Musicale

Come già accennato in precedenza, gli algoritmi per la produzione di scale sono essenzialmente due. Il primo algoritmo è basato sulla ricerca dei cammini minimi all'interno di una rete. Il secondo è un algoritmo random che sfrutta la struttura della rete per creare scale.

Questi due algoritmi verranno descritti ne dettaglio nei paragrafi seguenti.

4.2- Ricerca dei Cammini Minimi

Quello della ricerca dei cammini minimi all'interno di una rete è uno dei problemi centrali nella teoria dei grafi come nella scienza delle reti. Dai cammini minimi dipende il parametro L delle reti piccolo mondo, ma è anche un comune problema di ottimizzazione delle distanze impiegato in numerose discipline.

In poche parole, dato un grafo (di qualsiasi tipologia) e selezionati al suo interno due nodi generici, esistono tra i due nodi in questione infiniti cammini possibili. Il cammino minimo tra due nodi è invece quello più breve, ovvero quello che, partendo da un determinato nodo, permette di raggiungere il nodo desiderato passando dal minor numero possibile di nodi intermedi. Gli algoritmi usati per questo compito sono molteplici e ognuno di essi è particolarmente adatto in determinate situazioni. I due metodi più usati sono probabilmente l'algoritmo di

Floyd-Warshall quello di Dijkstra. Il primo, consente di trovare tutti i cammini minimi all'interno di un grafo con un unico procedimento. Il secondo invece è particolarmente indicato quando si lavora con grafi aventi $N > 1000$. Per l'algoritmo musicale di SWAP è stata usata la tecnica di Floyd-Warshall.

Immaginiamo di avere un grafo con le seguenti caratteristiche:

$N=50$, $k=100$, $p=10\%$

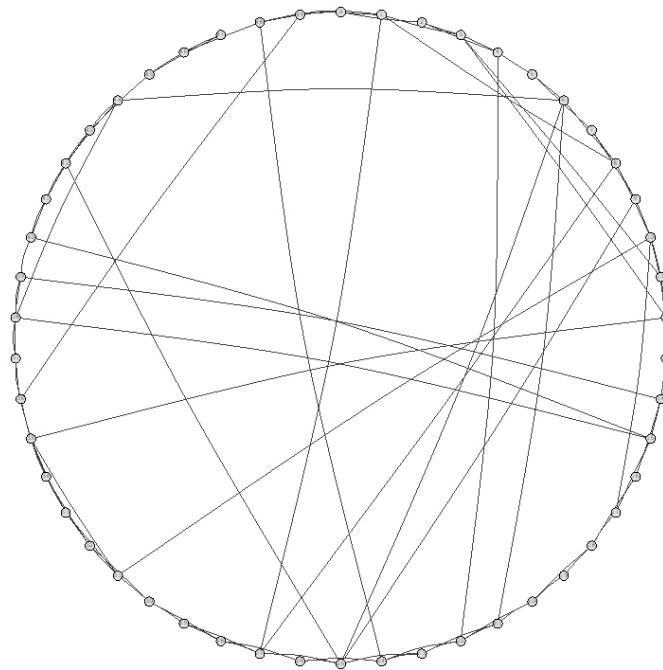


Figura 4.1 Rappresentazione di una rete piccolo-mondo creata da SWAP.

In un grafo del genere esisterà un cammino minimo per ognuna delle 25 coppie di nodi presente. Ognuno di questi path minimi può essere tradotto in una scala musicale. Infatti, associando ad ogni nodo del grafo una nota musicale è possibile ottenere brevi cicli melodici che documentano il cammino effettuato all'interno della struttura. Questo algoritmo rappresenta un modo estremamente interessante per esplorare le dinamiche proprie della rete usando il suono. Considerato in quest'ottica questo algoritmo rappresenta al contempo un metodo per la produzione musicale e una tecnica d'analisi della complessità della rete.

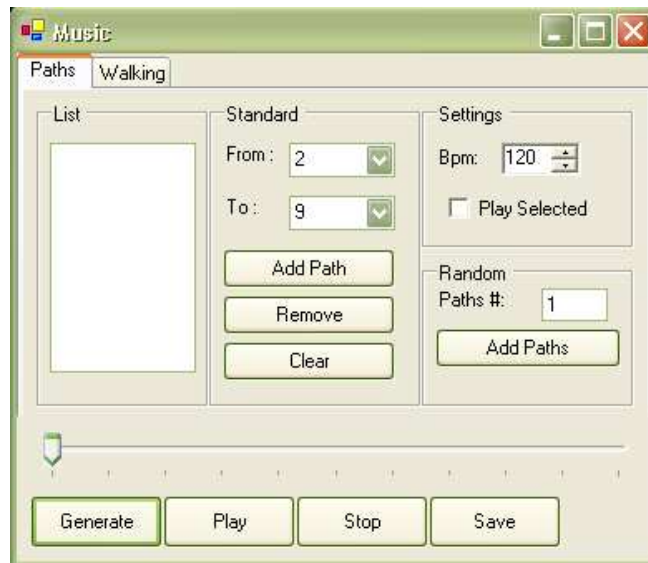


Figura 4.2 Pannello di controllo per la ricerca di cammini minimi.

Ogni path, viene tradotto in musica, dunque ogni scala rappresenta uno dei cammini minimi nella rete. Le scale prodotte da questo metodo sono scarsamente interessanti da un punto di vista musicale, esse sono tutto sommato monotone e dissonanti ma racchiudono interessanti informazioni sulla rete e sulle sue proprietà. Questo metodo permette infatti di creare delle relazioni estremamente interessanti tra suono e dati numerici, nonché visivi. Infatti quando un path incorre in uno degli *shortcuts*⁹ della rete si verifica un salto tonale piuttosto sensibile. I cammini solitamente procedono per toni e semitoni, quando si incorre in intervalli maggiori il path ha usato un collegamento che è stato spostato durante il processo di rewiring. Questa corrispondenza tra intervalli tonali e randomness è estremamente interessante e potrebbe essere oggetto di ulteriori studi anche di natura percettiva oltre che musicale o matematica.

4.3-Walking

Il secondo algoritmo, denominato walking, è ancor più semplice del precedente ma, i risultati che si ottengono con questa tecnica sono molto più musicali e meno

⁹ Per shortcut si intende un collegamento tra nodi distanti in un grafo regolare che di solito è conseguenza diretta del processo di rewiring.

dissonanti. Il walking è un algoritmo completamente random che permette di produrre scale auto-generate usando reti importate da un file MIDI o reti create appositamente per questo compito.

Il walking può essere paragonato ad una catena di Markov, ma in sostanza è un metodo ancor più spartano. Per capirlo ci si può immaginare una catena di Markov in cui le probabilità sono equamente ripartite tra le varie strade. I due metodi divergono tuttavia in alcuni aspetti:

- a. il walking innanzitutto, è un algoritmo che viene applicato ad una struttura statica (la rete) che non cresce né si modifica come accade invece in una catena di Markov;
- b. una catena di Markov è un algoritmo basato su un modello statistico ben definito che viene modellato a partire da alcuni fenomeni osservati in precedenza. Nel walking invece esiste semplicemente una sequenza random di eventi che sfrutta la conformazione della rete.

In poche parole la piacevolezza delle melodie che emerge non è frutto dell'algoritmo ma della struttura sottostante.

Il fatto che le scale prodotte da questo algoritmo siano più interessanti di quelle create con la tecnica dei cammini minimi risulta naturale giacché le scale musicali cui siamo abituate non hanno la struttura di un cammino minimo ma sono ricche di ripetizioni e ridondanze. Una scala che ottimizza la distanza tra due nodi difficilmente potrebbe somigliare ad una melodia scritta dall'uomo.

Nel caso del walking la casualità giunge talvolta a produrre risultati molto gradevoli, anche se indubbiamente perfettibili.

Il dato interessante è che la distribuzione degli intervalli a offrire un frame entro cui lavorare. Dunque, se in una rete sono presenti intervalli consonanti è molto più facile che la melodia emergente sia più gradevole che in altri casi. Ad esempio in alcune occasioni il walking è stato usato su reti estratte da composizioni musicali pre-esistenti come ad esempio brani di Bach o Mozart.

Nelle composizioni classiche infatti i musicisti, sono molto attenti a distribuire in modo ordinato gli intervalli che tendenzialmente rispettano le leggi dell'armonia e della melodia. Dunque gli intervalli presenti nella composizione sono gradevoli e non dissonanti (questo discorso naturalmente non è valido per molti compositori contemporanei quali Schönberg, Webern o Boulez e tutti i compositori d'avanguardia). Un dato importante che è bene porre in rilievo è che nel caso di scale prodotte usando reti pre-esistenti (ovvero reti che "mappano" un file MIDI) la somiglianza con la composizione originaria è pressoché nulla. Ovvero, non vi è similarità alcuna tra la melodia auto-generata e il brano che ha creato la rete e ciò perché la nel walking non vi è alcun criterio compositivo ma una semplice sequenza casuale. Ciò suggerisce l'idea che una struttura ben organizzata (la rete) sotto il profilo armonico può essere sufficiente a produrre melodie interessanti anche con un algoritmo estremamente semplice.

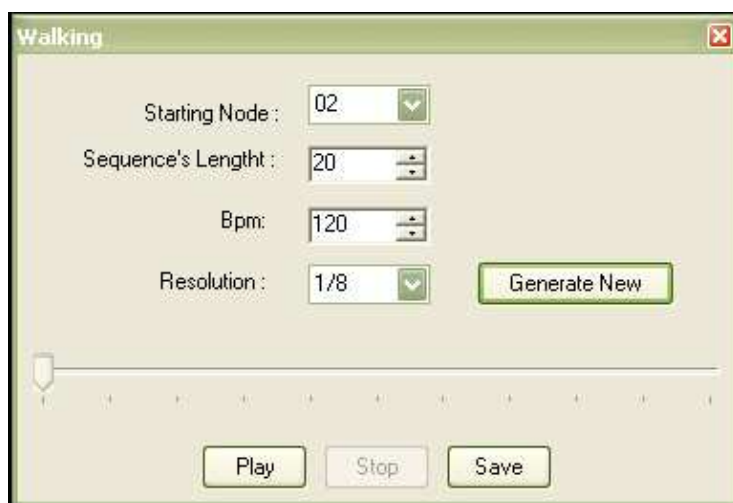


Figura 4.3 Pannello di controllo per la generazione di melodie random.

Il walking tuttavia consente una serie di operazioni. E' possibile definire la nota iniziale della scala (ovvero il nodo di partenza) ma non quella conclusiva (infatti in questo caso non si sta cercando un cammino minimo ma una scala random). E' possibile definire la lunghezza della scala (ovvero in numero complessivo di

passi) la velocità (espressa in battiti per minuto) e la sua risoluzione (crome, semicrome, ecc.).

Il principale limite di questa tecnica consiste nella sua eccessiva regolarità ritmica. Infatti tutte le note eseguite possiedono lo stesso valore e quindi la stessa durata, caratteristica questa che assai di rado si trova nelle composizioni musicali scritte dall'uomo. Per risolvere questo problema si è tentato di creare un algoritmo che conferisca diverso valore alle note in modo da avere scale più varie sotto il profilo ritmico. Questa tecnica si è tuttavia rivelata infruttuosa giacché una distribuzione casuale di diverso valore negli intervalli ritmici delle note rende il risultato assai irregolare e disordinato.

CAPITOLO 5

Algoritmi Genetici

5.1- Introduzione agli Algoritmi Genetici

Quella degli algoritmi genetici [Mitchell, 1996] è una tecnica di calcolo e simulazione molto versatile, inventata verso la fine degli anni '60 da John Holland. La peculiarità di questa tecnica consiste nel fatto che prende ispirazione dalla natura e dai principi dell'evoluzione ipotizzati da Charles Darwin.

I sistemi biologici sono estremamente capaci di adattarsi anche i condizioni avverse. Essi, nonostante siano in grado di escogitare tecniche di conservazione assai efficaci, non sono il frutto di un progetto determinato a priori, ma il risultato di un processo evolutivo che affonda le proprie radici nei millenni e basato sulla riproduzione e sulla selezione degli individui più adattivi. Gli assunti principali della teoria evolutiva darwiniana sono per l'appunto:

- L'evoluzione agisce sul genotipo degli individui e non sul fenotipo.
- La selezione naturale favorisce la riproduzione degli individui le cui caratteristiche costituiscono un miglioramento dell'adattabilità all'ambiente.
- Il nucleo del processo evolutivo risiede nella riproduzione e in tutte quelle mutazioni casuali che possono intervenire sul codice genetico.
- L'evoluzione opera su intere popolazioni di individui influenzati da contingenze ambientali e dall'interazione tra individui.

Gli algoritmi genetici sfruttano questi assunti e li applicano su popolazioni di cromosomi artificiali. Questi ultimi vengono selezionati e fatti riprodurre. La selezione viene attuata sulla base di criteri precisi che hanno a che fare con un problema da risolvere, perciò gli individui vengono valutati come adatti in base alla loro capacità di risolvere il problema in questione. La riproduzione avviene invece con una tecnica chiamata crossover e talvolta è corredata da piccole mutazioni casuali del corredo cromosomico.

Naturalmente i cromosomi artificiali di cui si parla rappresentano una semplificazione rispetto al modello biologico cui s'ispirano. Essi semplicemente sono rappresentati da sequenze di simboli, solitamente stringhe in codice binario, cui corrispondono delle codifiche inerenti al problema da risolvere.

Un altro concetto chiave degli algoritmi genetici è quello di valutazione o *funzione di fitness* che rappresenta l'elemento che consente di stimare la capacità dell'individuo a risolvere il problema. La funzione di fitness può essere paragonata metaforicamente all'ambiente esterno. Essa valuta l'efficienza dell'individuo a fornire una risposta adeguata al problema, così come nel corrispettivo biologico l'individuo deve sviluppare una capacità d'adattamento che gli permetta di sopravvivere.

A questo punto entra in gioco la selezione che premia con la riproduzione le stringhe che hanno valori di fitness più alti. Si può pensare alla riproduzione selettiva come alla legge di sopravvivenza in natura. Dunque, più è alto il valore di fitness di un individuo più probabilità avrà quest'ultimo di riprodursi. Le stringhe selezionate vengono poi accoppiate per creare la generazione futura. L'operatore predisposto per la ricombinazione genetica è il crossover. Per ciascuna delle coppie di individui viene scelto un punto d'incrocio attorno al quale avverrà lo scambio genetico. Se ad esempio le stringhe di due individui sono

00010101

e

01010100

E viene scelto il quarto punto della stringa come punto di crossover, la riproduzione avverrà nel modo seguente:

genitore 1

0001-0101

figlio 1

→ 00010100

figlio 2

→ 01010101

genitore 2

0101-0100

Terminato il processo si otterranno un numero di stringhe genetiche, discendenti della generazione precedente, della quale conserveranno pregi e difetti, ma variamente ricombinati tra loro. Il ciclo costituito da valutazione-selezione-riproduzione viene reiterato per un determinato numero di volte, finché uno degli individui non rappresenterà la soluzione (o quantomeno una delle soluzioni) soddisfacente al problema da risolvere.

5.2- Algoritmi Genetici per la Creazione di Reti Piccolo-Mondo

Come si è detto nel Capitolo 3, le reti studiate sono state proiettate su uno spazio bidimensionale, denominato piano L-C. In questo piano ogni rete è identificata da un punto attraverso i due parametri L e C (situati rispettivamente sugli assi x e y del piano).

Questo metodo di visualizzazione è stato usato per osservare la distribuzione di gruppi di reti estratte da composizioni di diversi autori. Come si è visto, gli insiemi di composizioni considerate tendono ad occupare aree diverse sul piano, pur con alcune sovrapposizioni.

Questo dato, oltre a fornire interessanti informazioni sulle reti analizzate, ha suggerito l'idea di usare gli algoritmi genetici per creare reti piccolo-mondo con determinate caratteristiche. Ad esempio, reti con determinati valori di coefficiente di clustering o di path length. Questo tipo di algoritmo può rivelarsi utile non solo

per applicazioni musicali, come nel presente lavoro, ma anche per ricerche di altro tipo (come ad esempio problemi di ottimizzazione).

Dal momento che le reti si distribuiscono in modo piuttosto omogeneo su specifiche aree, si è pensato di creare un algoritmo che produca reti situate in determinati spazi del piano L-C mediante la ricerca di determinati valori dei suddetti parametri. Per questo motivo è stato implementato un simulatore la cui fitness è basata sulla minimizzazione della distanza da un punto sul piano. In poche parole, vengono premiate le reti che si situano il più possibile in prossimità di un determinato punto.

In questo modo si ottengono popolazioni di reti le cui caratteristiche salienti sono un alto coefficiente di clustering e una separazione media tra vertici estremamente ridotta, in poche parole reti che rispecchiano il modello di Watts/Strogatz. I valori ricercati possono essere definiti tra quelli possibili di C, che oscilla tra 0 e 1 e L, che assume valori tra 1 e N-1. Dunque la coppia di valori scelta identifica un punto sul piano che verrà a costituire il massimo valore della fitness.

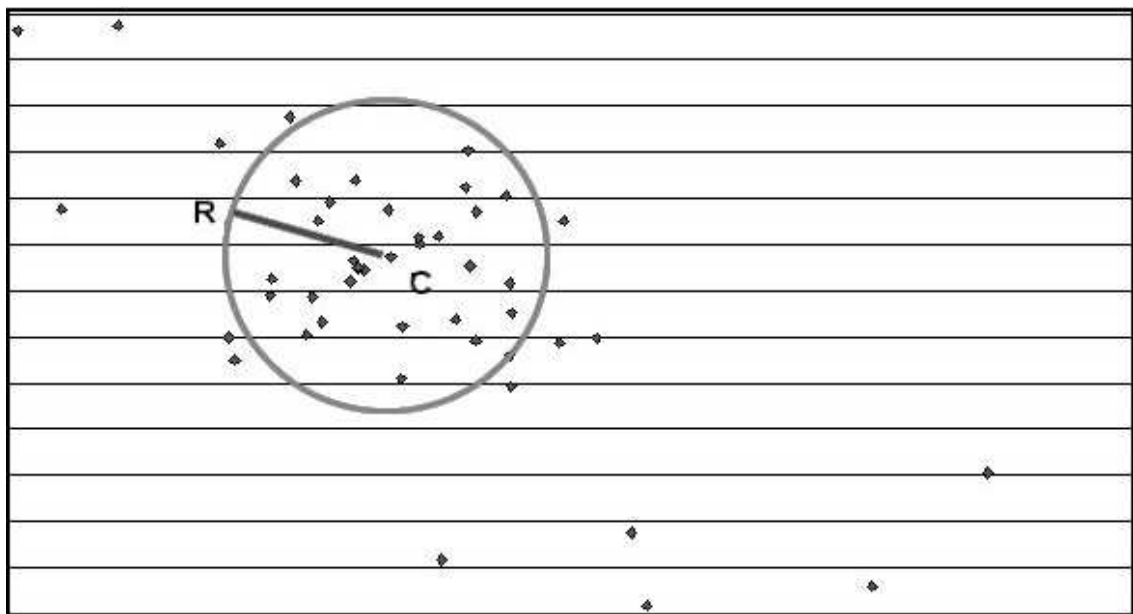


Figura 5.1 Rappresentazione grafica della target area dell'algoritmo genetico.

Ogni individuo della popolazione è una rete. Le reti sono codificate utilizzando matrici di adiacenza. Quindi presi due nodi i e j se esiste un arco che unisce i due nodi la cella i,j della matrice conterrà il valore 1 altrimenti 0. Quindi il

cromosoma dell'individuo è costituito dalle celle della matrice. La dimensione del cromosoma è $n*n$ dove n è il numero di nodi della rete.

Per accedere ad un singolo gene si usa questa formula di indirizzamento :

$$M[i,j] = C(x);$$

$$i = x/n \text{ (divisione intera)}$$

$$j = x \% n \text{ (modulo)}$$

dove M è la matrice di adiacenza associata alla rete, C è il cromosoma e x è l'indice del gene da ottenere.

Ad ogni evoluzione per ogni individuo viene calcolata la funzione di fitness. Dell'intera popolazione una percentuale di individui viene selezionata per la riproduzione (Elite). Questi individui sono i migliori della popolazione ovvero hanno un elevato valore di fitness.

L'elite viene inserita nella nuova popolazione. Gli individui rimanenti vengono inseriti attraverso l'incrocio (crossover). A questo punto presi due individui appartenenti all'elite c'è una probabilità pC che essi si ricombinino. Se essi si ricombinano danno origine a due nuovi individui.

L'incrocio avviene nel modo seguente.

Si scelgono due punti casuali all'interno del cromosoma di ognuno degli individui. Questi due punti danno origine a tre sotto insiemi di geni per ogni cromosoma. Le porzioni di cromosoma selezionate vengono scambiate tra i genitori in questo modo. La parte 1 del genitore A si scambia con la parte 1 del genitore B. Quando la popolazione è completa si passa alla fase di mutazione. A questo punto ogni singolo gene di ogni singolo individuo ha probabilità pM di mutare. La mutazione avviene in modo completamente casuale.

5.2.1- Funzione di Fitness

Approssimativamente la funzione di fitness adoperata può essere definita come la distanza dal centro T di un cerchio di raggio r . Se, ad esempio, si ricercano reti aventi $C=0,6$ e $L=3$, i due valori ricercati identificheranno sullo spazio L-C un punto che costituirà il centro di un cerchio avente r come raggio. La fitness raggiunta dalle reti cresce al diminuire della distanza da T . Man mano che le reti, visualizzate tramite i valori di L e C sul piano, si avvicinano al punto ottimale, la loro fitness aumenta. La funzione che definisce la fitness è la seguente:

$$f(d) = 1 - d^{[\log(1-t)]/\log r}$$

dove d è la distanza dal centro e t è un parametro di controllo. L'andamento della funzione è osservabile dalla figura 5.1. Come evidente, il centro della circonferenza rappresenta la massima fitness, mentre il raggio e il parametro t consentono di creare una funzione in cui la fitness decresce assai rapidamente all'aumentare della distanza d . Ciò è ben evidente in fig. 5.2 che mostra come la funzione decresce in modo ripido distanziandosi velocemente dal massimo.

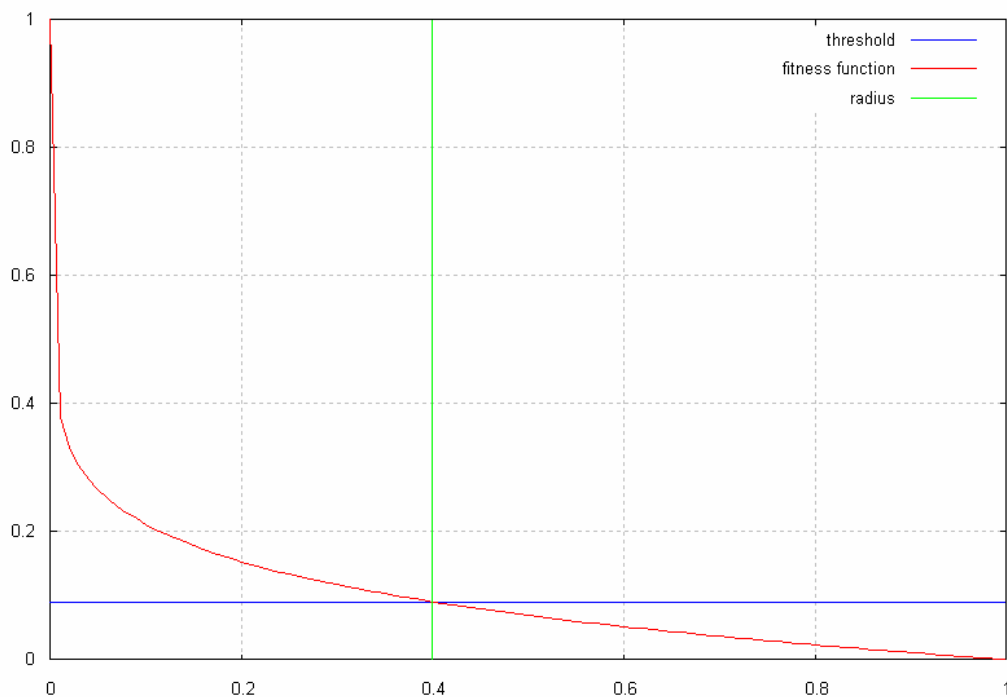


Figura 5.2 Rappresentazione grafica della funzione di fitness.

5.3- GA Finder

Il simulatore implementato per gli algoritmi genetici è denominato GA Finder. Esso permette di simulare l'evoluzione di popolazioni di reti con un numero prefissato di nodi. Questo dato è molto importante, infatti, per poter confrontare due o più reti, è necessario che esse abbiano un numero analogo di nodi ed archi. Infatti, due reti con diverso numero di nodi non sono confrontabili perché i loro valori assumono significati diversi. Ad esempio, immaginiamo di avere una rete il cui parametro L è 6. Se la rete ha 50 nodi questo valore è piuttosto elevato, al contrario però, se lo si riferisce alla rete degli abitanti della terra (oltre 5 miliardi di persone) esso è decisamente un valore molto basso.

Allo stesso modo, variando il numero di archi in una rete, il suo coefficiente di clustering aumenterà e allo stesso tempo il suo average path length tenderà a diminuire fino ad ottenere una rete avente $L=1$ e $C=1$ ovvero una rete in cui ogni coppia di nodi è connessa e in cui in ogni sottografo esiste un arco per ogni coppia di nodi. Dunque il confronto tra due reti può essere effettuato solo a patto che le loro dimensioni siano equivalenti.

Questo dato è piuttosto importante oltre che problematico, dal momento che per creare un algoritmo con una funzione di crossover, non è possibile tenere fissato sia il numero di nodi che quello di archi. Per questo motivo, le popolazioni di reti sono state create mantenendo un numero fisso di nodi e variando quello dei link. Ovviamente, il numero di link complessivi viene inserito tra le caratteristiche richieste dalla funzione di fitness, dunque vengono premiate le reti aventi un numero di archi il più possibile vicino a quello desiderato.

Le caratteristiche inserite nella funzione di fitness vengono definite attraverso un file di configurazione. La tabella qui sotto mostra un esempio di configurazione.

```
<Config>
<Population>200</Population>
<Epochs>1000</Epochs>
<Genes>10000</Genes>
<Mutation>0,0003</Mutation>
<Crossover>0,4</Crossover>
<Selection>0,11</Selection>
  <archi>50</archi>
</Config>
```

In questa immagine è ben evidente il numero della popolazione di reti (200), le epoche ovvero le iterazioni (1000), il numero di geni, che corrisponde al quadrato di N (10000), il la percentuale di mutazione per ogni epoca e quella di crossover (rispettivamente 0,0003 e 0,4) la percentuale di reti da selezionare per costituire la generazione futura (11), nonché il numero di archi che complessivamente dovrebbe possedere la struttura.

5.4- Risultati

In queste simulazioni si è tentato di creare reti piccolo mondo aventi L e C il più possibile vicini ad 1. Nelle tabelle sottostanti sono visibili i risultati di alcune simulazioni effettuate con il Net Finder. Per ogni simulazione vengono riportati i dati inseriti come input ovvero, population (numero delle reti facenti parte della popolazione), epoche (numero di iterazioni), numero di geni (che corrisponde al quadrato dei nodi della rete, ovvero a tutte le celle della matrice di adiacenza), mutation rate (probabilità di mutazione di uno o più geni), crossover (punto di incrocio), selection (percentuale delle popolazione che viene selezionata per riprodursi), arcs (numero di archi che la struttura deve possedere per essere premiata).

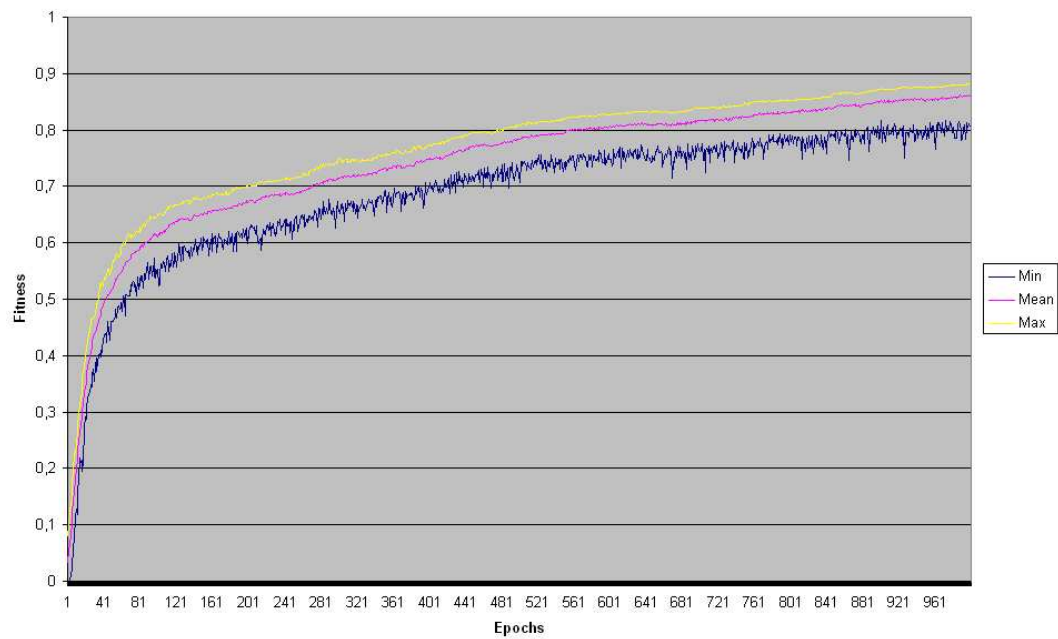
Come evidente i risultati sono incoraggianti, la fitness raggiunta oscilla tra l'80 e il 90% e in alcuni casi raggiunge il 93%, mentre i valori medi sono sempre leggermente inferiori. Per ogni simulazione è riportata anche una rete della popolazione come esempio (corredata dai dati relativi alla sua struttura). Le reti ottenute hanno ottimi valori di path length e coefficiente di clutsering (L non supera mai i 2,5 e C è sempre maggiore di 0,8) e hanno un numero contenuto di archi per nodo (tra 1,5 e 7).

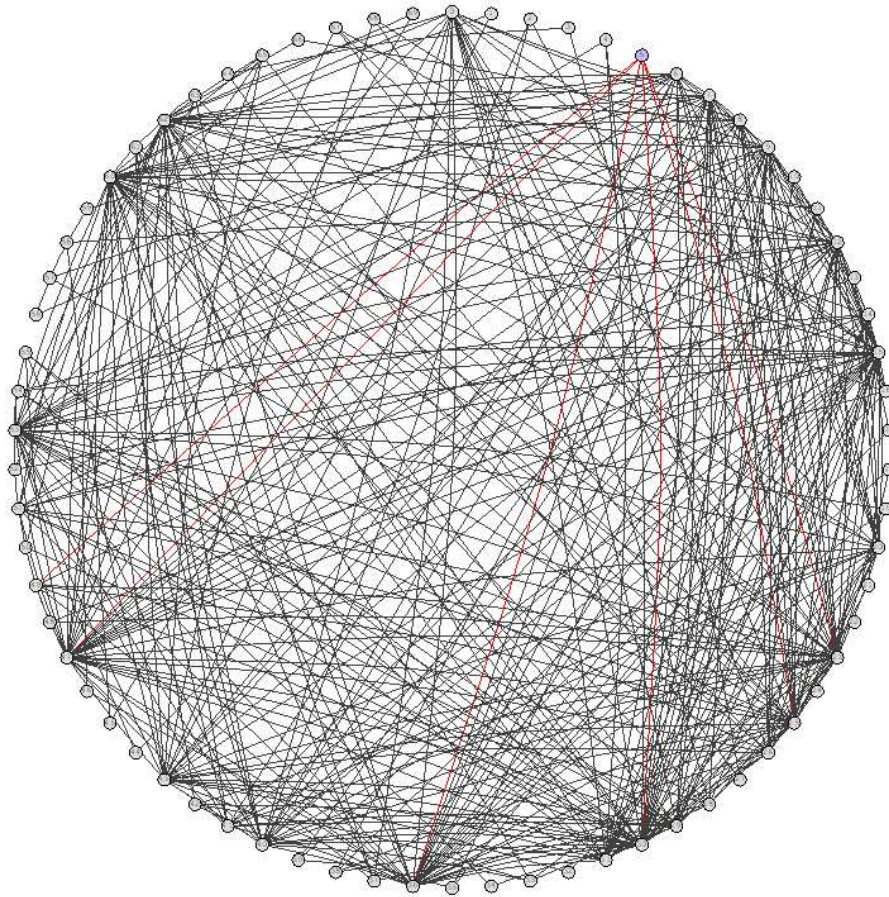
I Esempio

Input Algoritmo

Population	200
Epochs	1000
Genes	4900
Mutation	0,0012
Crossover	0,8
Selection	0,1
Arcs	50

Output





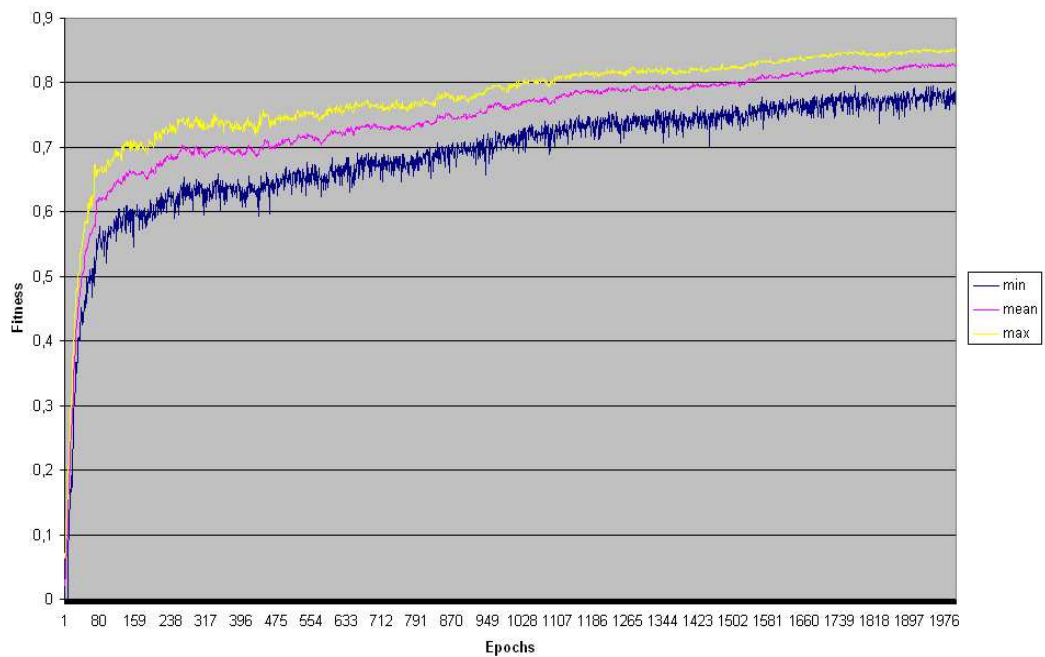
Dati Rete

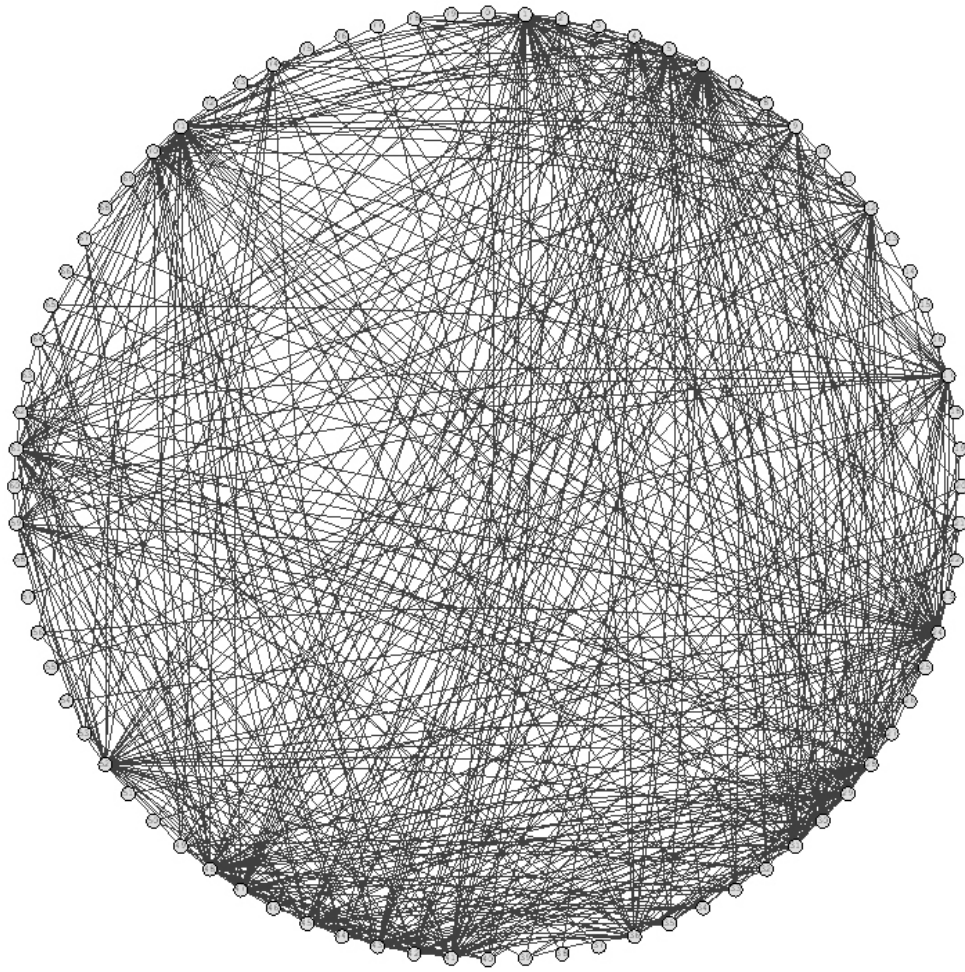
k	378
L	2,06639576
C	0,879918039
k/N	5,4

II Esempio

Input Algoritmo

Population	200
Epochs	2000
Genes	6400
Mutation	0,0011
Crossover	0,8
Selection	0,1
Arcs	100





Dati Rete

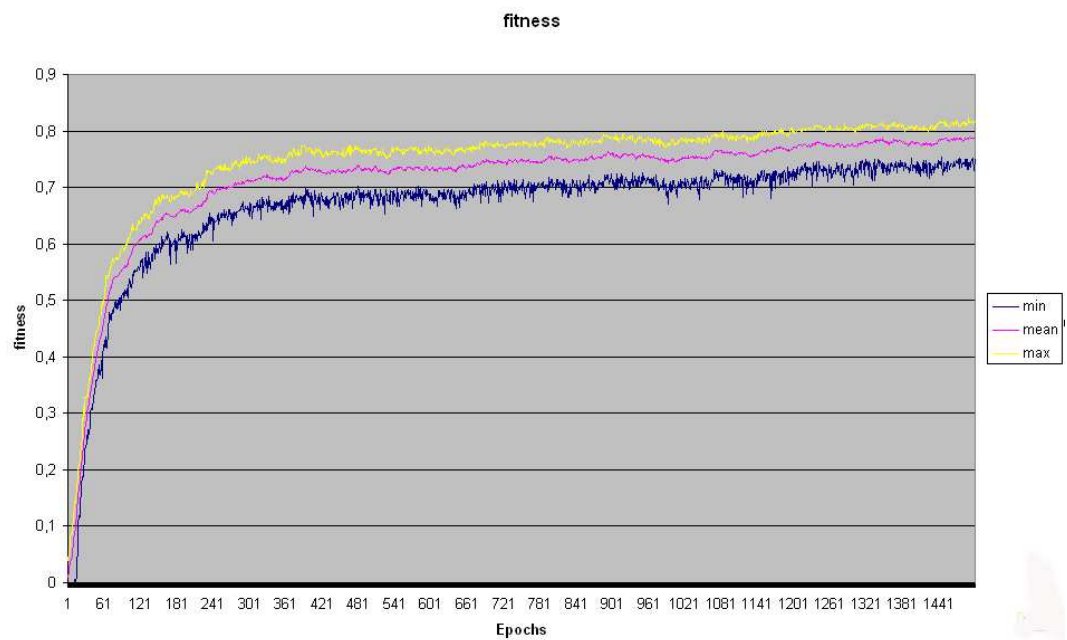
k	560
L	2,0341413
C	0,85921526
k/N	7

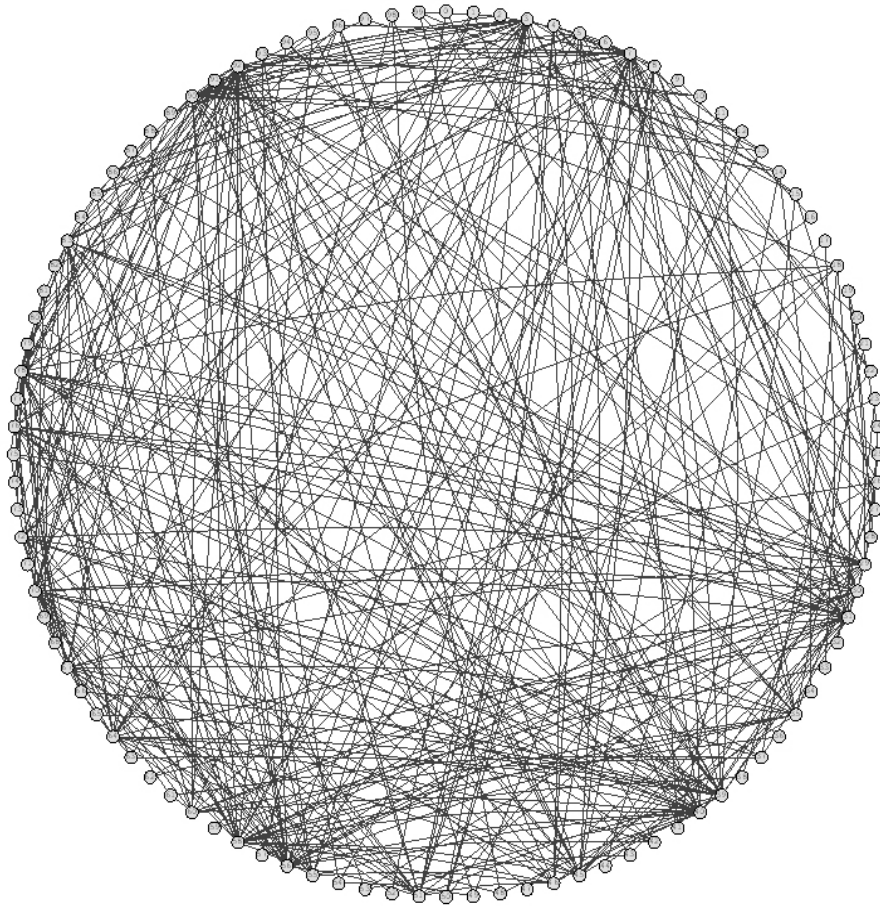
III Esempio

Input Algoritmo

Population	200
Epochs	1500
Genes	10000
Mutation	0,0005
Crossover	0,5
Selection	0,2
Arcs	50

Output





Dati Rete

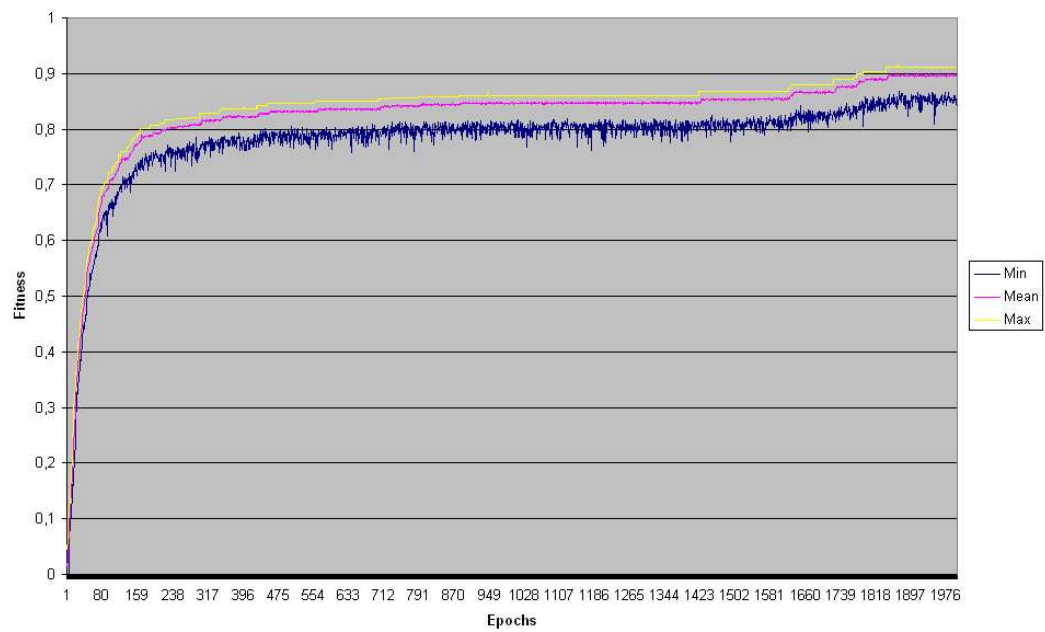
k	378
L	2,588001
C	0,8086509
k/N	3,78

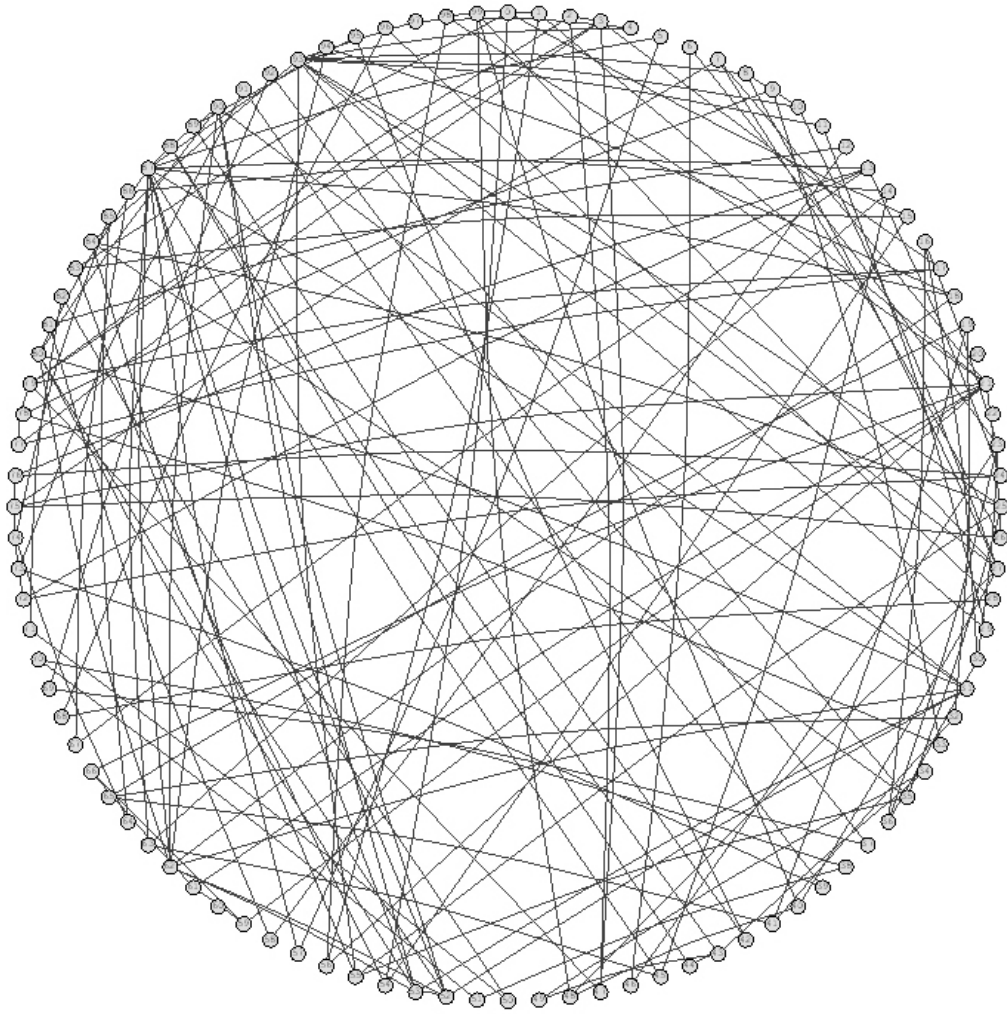
IV Esempio

Input Algoritmo

Population	200
Epochs	2000
Genes	10000
Mutation	0,0003
Crossover	0,6
Selection	0,1
Arcs	50

Output





Dati Rete

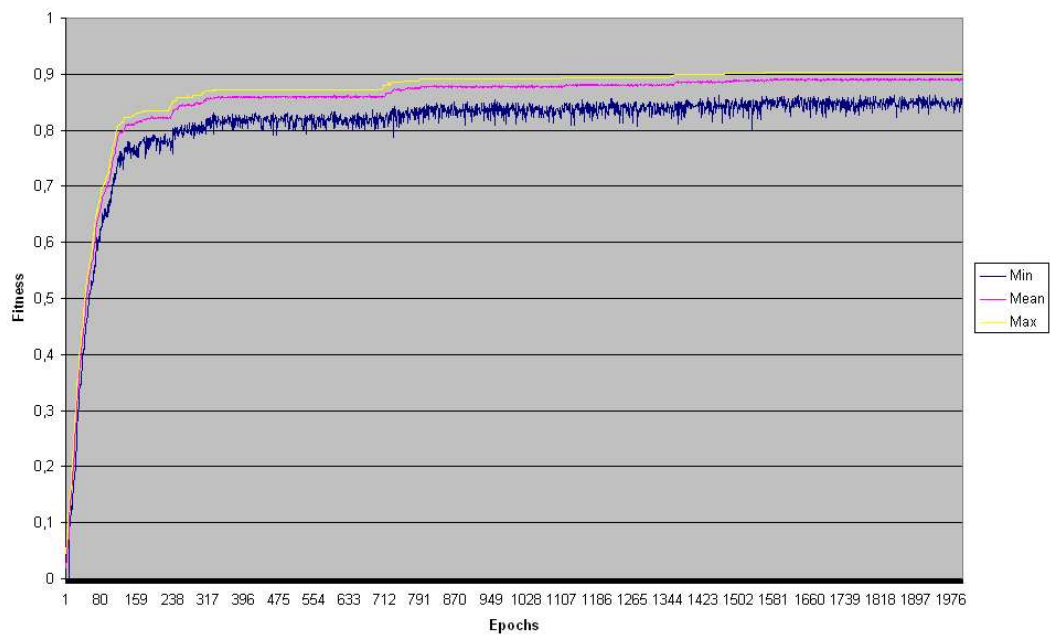
k	155
L	1,60895526
C	0,9110823
k/N	1,55

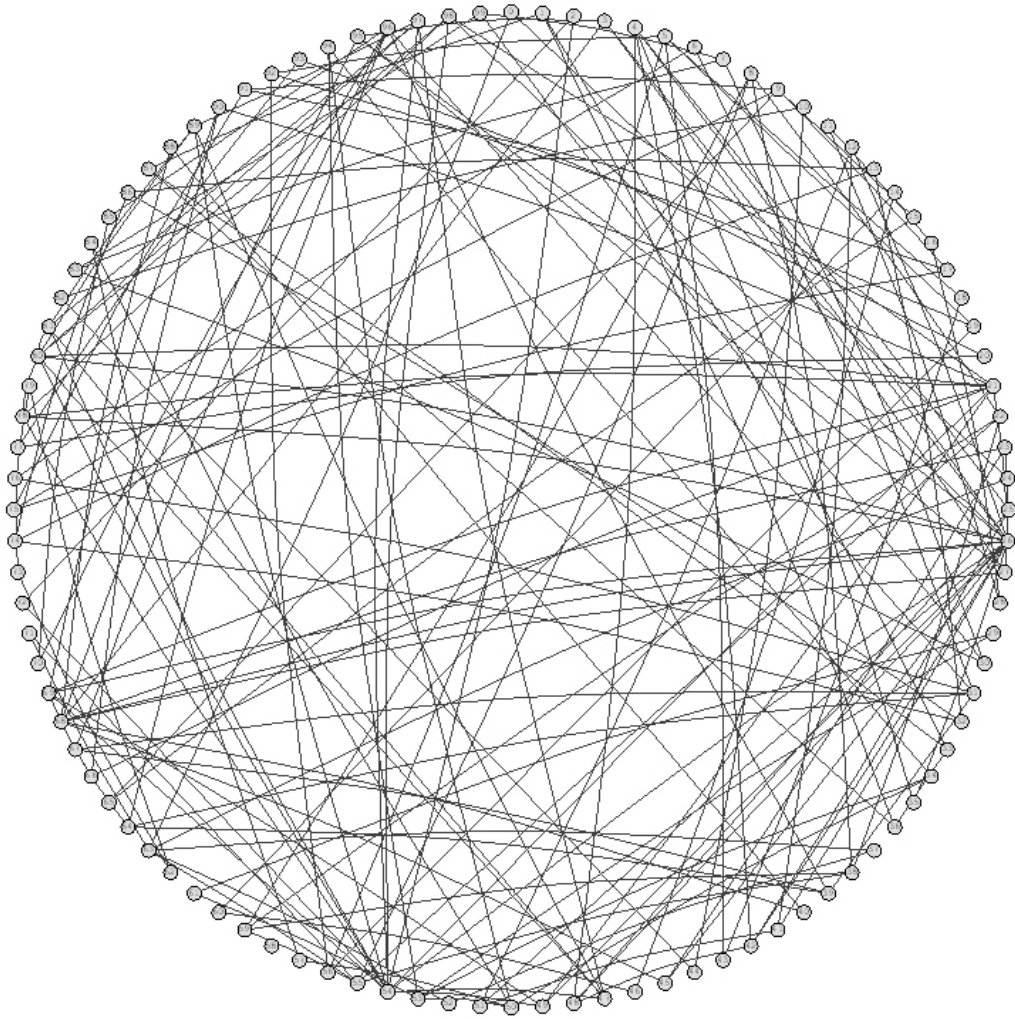
V Esempio

Input Algoritmo

Population	200
Epochs	2000
Genes	10000
Mutation	0,0003
Crossover	0,4
Selection	0,11
Arcs	50

Output





Dati Rete

k	178
L	2,04719758
C	0,9040794
k/N	1,78

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi si è tentato fornire un framework per nuovi approcci alla musica generativa ed evolutiva. Le ricerche svolte sono state per lo più orientate alla creazione di nuovi modelli matematici per la formalizzazione di strutture musicali, alla sintesi di melodie e alla creazione di un algoritmo genetico in grado di riprodurre i modelli studiati.

I modelli utilizzati per la fase di rappresentazione ed analisi sono strutture reticolari complesse, ovvero grafi la cui organizzazione interna è caratterizzata da una compresenza di disordine e regolarità.

L'uso di questi modelli ha prodotto risultati incoraggianti soprattutto nella fase di analisi ma anche gli esiti della fase di sintesi e l'utilizzo degli algoritmi genetici hanno offerto materiali interessanti.

Nel dettaglio, i dati prodotti nel presente lavoro possono essere così riassunti.

La prima fase di questo lavoro ha riguardato l'utilizzo di reti complesse con la finalità di modellizzare e studiare analiticamente composizioni musicali in formato MIDI. Questa tecnica si è rivelata interessante giacché ha permesso di rappresentare graficamente composizioni musicali ponendo in evidenza gli intervalli presenti nel brano, nonché l'interplay tra le note. Ogni nota della composizione viene infatti rappresentata come un nodo della rete, e gli archi rappresentano le adiacenze tra le note così come sono presenti nel brano.

Le reti ottenute sono state successivamente analizzate con metodi statistici. I risultati mostrano che l'organizzazione delle composizioni musicali studiate è analoga a quella delle reti studiate da Watts e Strogatz dunque essi risultano essere buoni modelli per lo studio della musica. Inoltre lo studio dei dati numerici estratti dalle reti ha permesso di individuare differenze significative tra gruppi di composizioni di diversi autori.

L'uso di reti piccolo mondo ha prodotto risultati degni d'attenzione anche sul versante della sintesi di melodie. Le reti che contengono buoni intervalli melodici hanno offerto buoni risultati prodotto scale e musiche interessanti anche con algoritmi random come quello denominato walking. Ciò suggerisce l'idea che la presenza di una struttura ben organizzata è in grado di garantire risultati interessanti anche con algoritmi scarsamente sofisticati.

L'ultima fase della presente ricerca riguarda la realizzazione di un algoritmo genetico capace di creare reti piccolo mondo tentando di riprodurre la caratteristiche delle reti studiate. Gli esiti prodotti da questa ricerca sono assai validi e incoraggianti in quanto le reti creati dall'algoritmo rispettano perfettamente i criteri delle reti indagate da Watts e Strogatz.

Questi risultati, per quanto interessanti rappresentano il primo contributo verso la formalizzazione di un nuovo approccio alla musica generativa nonché un nuovo esempio di analisi musicale basata sull'uso di sistemi complessi.

Il dato più interessante che emerge da queste ricerche è tuttavia che la tecnica proposta in questa tesi, non va intesa come una semplice esposizione di metodi di rappresentazione creazione musicale bensì, come il primo tentativo di formalizzazione di un metodo di analisi estendibile a tutti i sistemi caratterizzati dalla presenza di più elementi che interagiscono reciprocamente.

Riferimenti Bibliografici

- 1- Agon, C., Andreatta, M., Assayag, G., and Schaub, S., [2004]. Formal Aspects of Iannis Xenakis's Symbolic Music: A Computer-Aided Exploration of Compositional Processes, *Journal of New Music Research*, vol. 33, n° 2, pp. 145-159.
- 2- Albert R., Jeong H., and Barabási A. L., [1999]. Diameter of the World Wide Web. *Nature*, vol. 401, pp. 130-131.
- 3- Albert R., Jeong H., and Barabási A.L. [2000]. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406, 378 -382.
- 4- Albert R., and Barabási A. L., [2002]. Statistical Mechanics of Complex Networks. *Reviews of Modern Physics*, 74 (1), 47-97.
- 5- Assayag, G., and Dubnov, S., [2004]. Using Factor Oracles for Machine Improvisation, *Soft Computing*, vol. 8, n° 9, September, pp. 1432-7643.
- 6- Barabási A. L., Albert R., [1999]. Emergence of scaling in random networks. *Science*, vol. 286, pp. 509-512.
- 7- Barabasi, A.L., [2004]. *Link. La Nuova Scienza delle Reti*. Einaudi, Torino.
- 8- Barrett, R., [1995]. Michael Finnissy – an overview. *Contemporary Music Review*, 13(1): 23-24.
- 9- Bianchi, S., [1995]. *La musica futurista : ricerche e documenti*. LIM, Lucca.
- 10- Bidlack, R., [1992]. Chaotic Systems as Simple (but Complex) Compositional Algorithms. *Computer Music Journal*, 16:3, 33-47.
- 11- Bilotta, E., Pantano, P., and Talarico, V., [2000a]. Synthetic Harmonies: an Approach to Musical Semiosis by means of Cellular Automata. In M.A. Bedau, J.S. McCaskill, N.H. Packard and S. Rasmussen (Eds.). *Artificial Life VII*, August 2000, Cambridge, Massachusetts MIT Press.

- 12- Bilotta, E., Pantano, P., and Talarico, V. [2000b] Music Generation through Cellular Automata: How to Give Life to Strange Creatures, Proceedings of *Generative Art GA 2000*, Milano, Italia.
- 13- Bilotta, E., Campolongo, G., Caruso, A., and Pantano, P., [2004]. Sounds from Chaos. Proceedings del *VII Congresso SIMAI*, Venezia.
- 14- Bilotta, E, Pantano, P., and Vena, S., [2004]. Producing New Timbres from Chaos. Proceedings of the IV Conference, Understanding and Creating Music, Caserta.
- 15- Bilotta, E., Gervasi, S., and Pantano, P., [2005]. Reading Complexity in Chua's Oscillator Through Music. Part 1: A New Way of Understanding Chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15, No. 2, 253-382.
- 16- Boulez, P., [1984]. *Punti di Riferimento*. Einaudi, Torino.
- 17- Buchanan, M., [2003]. *Nexus*. Mondadori, Milano.
- 18- Cage, J., [1961]. *Silence*, Middletown, CT: Wesleyan University Press.
- 19- Campolongo, G., [2005a]. Antropologie Artificiali. *Ou. Riflessioni e Provocazioni*, Vol. XV.
- 20- Campolongo G., and Vena S., [2005b]. Complessità e Musica. Analisi e Generazione di Melodie con Reti Small-World. Proceedings of the Conference *Mathematics, Art and Cultural Industry*. Bertacchini, P. A., Bilotta E., Francaviglia M., and Pantano P. (Eds.), Cetraro (CS) May 19-21.
- 21- Campolongo G., and Vena S., [2005c]. Analysing and Creating Music through Small-World Networks. Proceedings of *V International Conference Understanding and Creating Music*, Seconda Università di Napoli, Caserta, November 27-30.
- 22- Campolongo, G. & Vena, S [2006]. Science of Networks and Music: A New Approach on Musical Analysis and Creation. Proceedings of *EvoMUSART-4th European Workshop on Evolutionary Music and Art*. (Berlin: Springer-Verlag), pp. 642-651.
- 23- Cancho R.F., and Solè, R.V., [2001]. The small world of human language. *Proc. R. Soc. Lond. B* 268, 2261-2265.

- 24- Carnet, G.E., [2001]. The Aesthetic of Interactive Computer Music. *Computer Music Journal*. 25:1, 21-33.
- 25- Chomsky, N., [1976]. Syntactic Structures. The Hague, Moutoun.
- 26- Christensen, E., [1996]. *The Musical Timespace: a Theory of Music Listening*. Alborg University Press, Alborg.
- 27- Chua, L.O., [1992]. The Genesis of Chua's Circuit. *Archiv fur Electronic und Ubertragung-technik*, 46, 250-257.
- 28- Cohen, J. [1994]. Monitoring Background Activities. In *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, edited by G. Kramer. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XVIII. Reading, MA: Addison Wesley, 499-531.
- 29- Das, A. and Pritha D., [2005]. Classification of Different Indian Songs Based on Fractal Analysis. *Complex Systems*, 14, 253-259.
- 30- Dolcetta, M., [2003]. *Avanguardie del '900*. Rai Eri, Roma.
- 31- Dubnov, S., [2006]. Spectral Anticipations. *Computer Music Journal*, 30:2, 63-83.
- 32- Eco U. [1975]. *Trattato di semiotica*, Milano, Bompiani.
- 33- Emmeche, C., [1996]. *Il Giardino nella Macchina. La Nuova Scienza dlla Vita Artificiale*. Bollati Boringhieri, Torino.
- 34- Erdős, P. & Rényi, A., [1960]. On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* 5, 17–61.
- 35- Gleick, J., [2000]. *Caos. La Nascita di una Nuova Scienza*. Rizzoli, Milano.
- 36- Gogins, M., [1991]. Iterated Functions Systems Music. *Computer Music Journal*, vol. 15:1, 40-48.
- 37- Grana, G., [1993]. *Novecento. Realismo e avanguardia*. Marzorati, Milano.
- 38- Jeong H., Neda Z., and Barabási A.L., [2003], Measuring preferential attachment in evolving networks. *Europhys. Lett.* 567—572.
- 39- Johnson, C.G., [2003]. Towards a Prehistory of Evolutionary and Adaptive Computation in Music. *Proceedings of EvoMUSART2003 1st European Workshop on Evolutionary Music and Art*. Berlin: Springer-Verlag (pp.

- 502-509).
- 40- Kippen, J., [1992]. Music and the Computer: Some Anthropological Considerations. *Interface*, Vol. 21, 257-262.
- 41- Lartillot, O. [2002a]. Generalized Musical Patterns Discovery by Analogy from Local Viewpoint, *Proceedings of Discovery Science. 5th International Conference, DS 2002, Lübeck, Germany*, (Berlin: Springer-Verlag).
- 42- Lartillot, O. [2002b]. Integrating Pattern Matching into an Analogy-Oriented Pattern Discovery Framework. *ISMIR: 3rd International Conference on Music Information Retrieval*, Paris.
- 43- Lartillot, O. [2003]. *Modelling Musical Pattern Perception As An Incremental System of Inductive Inferences. ESCOM 5*, Hanovre.
- 44- Lartillot, O. [2004]. A Musical Pattern Discovery System Founded on a Modeling of Listening Strategies, *Computer Music Journal*, vol. 28, n 3, pp. 53-67.
- 45- Latora V., and Marchiori M., [2001]. Efficient behaviour of small-world networks. *The American Physical Society*, volume 87 issue 19.
- 46- Latora V., and Marchiori M., [2003]. Economic Behavior in Weighted Networks. *Eur. Phys. J. B* 32, pp. 249-263.
- 47- Manaris B., Vaughan D., Wagner C., Romero J., and Davis R. B., [2003]. Evolutionary Music and the Zipf-Mandelbrot Law: Developing Fitness Functions for Pleasant Music. Proceedings of *EvoMUSART2003 – 1st European Workshop on Evolutionary Music and Art*. Berlin: Springer-Verlag.
- 48- Manaris B., Romero J., Machado P., Krehbiel D., Hirzel T., Pharr W., And Bavis R. B., [2005]. Zipf's Law, Music Classification and Aesthetics. *Computer Music Journal*, 29:1, , pp 55-69, MIT Press.
- 49- Mason, R.M., [1989]. *Modern Methods of Music Analysis Using Computers*. Schoolhouse Press, Peterborough.
- 50- Mandelbrot, B., [1966]. Information theory and psycholinguistics: a theory of word frequencies. *Readings in Mathematical Social Science*. Lazarfeld

- P., Henry N. (Eds.), Chicago: Science Research Associates, Cambridge, MA, 350-368.
- 51-Marchiori M., and Latora V., [2000]. Harmony in the Small-World. *Physica A* 285, pp. 539-546.
- 52-Marsden, A., [2000]. Music, Intelligence and Artificiality. *Readings in Music and Artificial Intelligence*. Marwood Academic Publishers, Amsterdam.
- 53-Mayer-Kress, G., Bargar, R., and Choi, I., [1994]. Musical Structures Data from Chaotic Attractors. In *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, edited by G. Kramer. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XVIII. Reading, MA: Addison Wesley, 341-367.
- 54-McNabb, M., [1990]. Computer Music: Some Aesthetic Considerations. *The Language of Electronic Music*. McMillan, London, 141-153.
- 55-Miranda, E.R., [1993]. Cellular Automata and Music: An Interdisciplinary Project. *Interface*, 22, 3-21.
- 56-Miranda, E.R., [1994]. Music Composition using Cellular Automata. *Languages of Design*, 2, 105-117.
- 57-Miranda, E.R., [1998]. *Computer Sound Synthesis for the Electronic Musician*. Focal Press, Oxford.
- 58-Miranda, E.R., [2000]. Regarding Music, Machines, Intelligence and the Brain: An Introduction to Music and AI. *Readings in Music and Artificial Intelligence*. Marwood Academic Publishers, Amsterdam.
- 59-Mitchell, M., [1996]. *An Introduction To Genetic Algorithms*. Bradford.
- 60-Newman M.E.J., [2001]. Clustering and preferential attachment in networks. *Physical Review E*, 64, p. 25102.
- 61-Newman M.E.J., [2000]. Models of the Small World. *A Review*, *J. Stat. Phys.* 101, 819-841.
- 62-Newman M. E. J., and Watts D. J., [1999]. Scaling and percolation in the small-world network model. *Phys. Rev. E* 60 7332.
- 63-Pressing, J., [1988]. Nonlinear Maps as Generators of Musical Design. *Computer Music Journal*, vol. 12:2, 35-45.

- 64- Risset, J.C., and Wessel, D.L., [1982]. Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis. In Deutch Diana, *The Psychology of Music*, Academic Press, San Diego.
- 65- Risset, J.C. [1992]. The Computer as an Interface: Interlacing Instruments and Computer Sounds; Real-time and Delayed Synthesis; Digital Synthesis and Processing; Composition and Performance. *Interface*, Vol. 21, 9-20.
- 66- Rodet, X., [1993]. Sound and Music from Chua's Circuit. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 3(1):49-61. (Special Issue: Chua's Circuit: A Paradigm for Chaos)
- 67- Rodet, X. and Vergez, C., [1999a]. Nonlinear Dynamics in Physical Models: Simple Feedback-Loop Systems and Properties. *Computer Music Journal*, 23:3, 18-34.
- 68- Rodet, X. and Vergez, C., [1999b]. Nonlinear Dynamics in Physical Models: From Basic Models to True Musical Instrument Models. *Computer Music Journal*, 23:3, 35-49.
- 69- Salvatore, G. (a cura di), [2000]. Frank Zappa Domani, Castelvecchi, Roma.
- 70- Scaletti, C., [1994]. Sound Synthesis Algorithms for Auditory Data Representation. In *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, edited by G. Kramer. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XVIII. Reading, MA: Addison Wesley.
- 71- Serra, R., Villani, M., and Agostini, L. [2004]. A Small-world Networks Where all Nodes Have The Same Connectivity, with Application to the Dynamics of Boolean Interacting Automata. *Complex Systems*, 15, 137-155.
- 72- Strogatz, S.H., [2001]. Exploring complex networks. *Nature* 410: 268-276.
- 73- Strogatz, S.H., [2004]. *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. Vintage, London.
- 74- Sundberg, J., [1991]. *The Science of Musical Sounds*. Academic Press, San Diego.

- 75- Supper, M., [2001]. A Few Remarks on Algorithmic Composition. *Computer Music Journal*, 25:1, 48-53.
- 76- Tomassini, M., Giacobini, M., and Darabos, C. [2005]. Evolution and Dynamics of Small-World Cellular Automata. *Complex Systems*, 15, 261-284.
- 77- Truax, B., [1990]. Computer Music Language Design and the Composing Process. *The Language of Electronic Music*. McMillan, London, 155-173.
- 78- Vercoe, B., [1997]. Computational Auditory Pathways to Music Understanding. In *Perception and Cognition of Music*, Deliege, I. and Sloboda, J. (Eds.). Psychology Press, Hove.
- 79- Voss, R.F., and Clarke, [1975]. 1/f Noise' in music and Speech. *Nature*, 258, 317-318.
- 80- Voss, R.F., and Clarke, [1978]. 1/f Noise' in Music: Music from 1/f Noise. *Journal of Acoustical Society of America*, 63, 258-263.
- 81- Xenakis, I., [1971]. *Formalized Music*. Indiana University Press, Bloomington (IN).
- 82- Watts, D.J., and Strogatz, S.H., [1998]. Collective dynamics of «small-world» networks. *Nature* 393, pp 440-442.
- 83- Watts, D.J., [1999]. *Small Worlds: The Dynamics of Networks Between Order and Randomness*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- 84- Weinberg, G., [2005]. Interconnected Musical Networks: Toward a Theoretical Framework. *Computer Music Journal*, 29:2, pp 23-39, Summer, MIT Press.
- 85- Witten, M., [1996]. The Sounds of Science: II. Listening to Dynamical Systems – Toward a Musical Exploration of Complexity. *Computers Math Applic.* Vol. 32, No. 1, 145-173.
- 86- Zipf G.K., (1949). *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Addison-Wesley, Cambridge, MA.