

Università della Calabria

Facoltà di Lettere e Filosofia

Dipartimento di Linguistica

Dottorato di Ricerca in
Psicologia della Programmazione e Intelligenza artificiale

XXIII Ciclo

Settore disciplinare: M-PSI/01

Tesi di Dottorato

**Nuove tecnologie e laboratori sperimentali per la didattica
delle scienze.**

Candidata

Eugenia Lucia Bossio



Coordinatore del Collegio dei Docenti

Prof.ssa Eleonora Bilotta



Relatore

Prof. ssa Eleonora Bilotta



Anno Accademico: 2009/10

RENDE, NOVEMBRE 2010

A Costantino

Indice

Sommario	pag. 1
CAPITOLO 1. INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 2. LA COMUNICAZIONE SCIENTIFICA	7
2.1 La comunicazione e la scienza	7
2.2 Perché, come, a chi	9
2.3 Rapporto tra scienza e società	11
2.4 Programmi e Best Practice	12
2.5 Imparare a comunicare: progettare la comunicazione, raccontare la scienza ...	13
2.5.1 La proposta dei <i>Science Centre</i>	13
2.6 I talenti del divulgatore scientifico	15
2.7 Le visioni della scienza	17
CAPITOLO 3. METODI E MEDIA PER LA DIVULGAZIONE DELLA SCIENZA	18
3.1 Teorie dell'apprendimento	18
3.1.1 Il comportamentismo (Behaviorismo)	18
3.1.2 Il cognitivismo	20
3.1.3 Il costruttivismo	21
3.2 Le teorie dell'apprendimento nella sperimentazione pedagogica	23
3.3 Innovazioni nella didattica: fondamenti teorici e ruolo delle tecnologie	26
3.4 Tecnologie educative e sperimentazioni nella didattica	31
3.5 Metodi di insegnamento/apprendimento in ambienti costruttivisti.....	34
3.6 Edutainment	38
CAPITOLO 4. IL CAOS IN MATEMATICA E NELL'ARTE	42
4.1 Il concetto di dimensione e le geometrie frattali	43
4.2 Sistemi dinamici e sistemi caotici	50
4.3 Il caos matematico	57
4.3.1 Proprietà dei sistemi caotici	58
4.3.2 Complessità	62
4.3.3 Auto-organizzazione	63
4.3.4 Fenomeni emergenti	64
4.3.5 Esempi di sistemi caotici	65
4.4 Il circuito di Chua	67
4.4.1 Introduzione all'oscillatore di Chua e sue generalizzazioni	67
4.4.2 Strade verso il caos e biforcazioni	69
4.4.3 Modellazione e Simulazione	70
4.5 Applicazioni: Il caos e l'arte	71
4.5.1 La visualizzazione scientifica dello spazio dei parametri	72
4.5.2 La sonorizzazione del modello matematico	74

CAPITOLO 5. PERCORSI DIDATTICI E ATTIVITÀ DI LABORATORIO	76
5.1 Fondamenti teorici	78
5.2 Comunicare concetti di fisica avanzata nelle scuole	79
5.3 Il circuito e le sue semplificazioni	81
5.4 Metodologia didattica nelle scuole	85
5.4.1 Approfondimenti sul metodo	88
5.4.2 Materiali	91
5.4.3 Partecipanti	91
5.5 Organizzazione della sperimentazione	92
5.6 Procedura	94
5.7 Prove di verifica	98
5.7.1 Criteri di valutazione	99
5.8 Risultati	100
5.8.1 Analisi dei risultati, sperimentazione I	100
5.8.2 Analisi dei risultati, sperimentazione II	104
5.8.3 Analisi dei risultati, sperimentazione III	109
5.9 Estensione della sperimentazione	111
5.9.1 A un vasto pubblico: mostra espositiva	111
5.9.2 Ad artisti	113
5.10 Conclusioni e sviluppi futuri	114
CAPITOLO 6. ALTRE ESPERIENZE DI DIVULGAZIONE E MEDIA REALIZZATI	115
6.1 Video Documentario: Il circuito di Chua un viaggio tra arte e scienza	115
6.1.1 Scelta del linguaggio	115
6.1.2 Aspetti tecnici: la visualizzazione, la computer grafica e il caos	117
6.1.3 I contenuti	121
6.1.4 La sceneggiatura	122
6.1.5 Conclusioni e sviluppi futuri	135
6.2 Un sito internet dedicato al caos	135
6.2.1 Edutainment web site	135
6.2.2 Aspetti tecnici: interfaccia e tecnologie impiegate	137
6.2.3 Sezioni e contenuti	138
6.2.4 Attività educative	141
6.2.5 Conclusioni e sviluppi futuri	142
6.3 Teatro e scienza	143
6.3.1 L'esperienza di una rappresentazione teatrale	144
6.3.2 Maschere virtuali parlanti	145
6.3.3 Sceneggiatura in ambienti 3D	146
6.3.4 Conclusioni e sviluppi futuri	150
CAPITOLO 7. PRODOTTI CULTURALI TRA DIDATTICA E STRATEGIE DI MARKETING	151
7.1 Matematica e cultura	153

7.2 Cultura e marketing	154
7.3 Prodotti realizzati	155
7.3.1 Video	155
7.3.2 Copertine	156
7.3.3 Pubblicità	157
Capitolo 8. Conclusioni	158
Allegato 1	160
Allegato 2	162
Allegato 3	165
Bibliografia	169

Sommario

L'apprendimento in generale, e quello scolastico in particolare, coinvolge diverse funzioni cognitive quali la memoria, la capacità di attenzione, di ragionamento, tra questi, i fattori emotivi e motivazionali rivestono senza dubbio un'estrema importanza. In quella che viene definita società complessa, inoltre, appare evidente come gli aspetti cognitivi e metacognitivi vengano di continuo stimolati da diversi contesti e vari strumenti. Lo studio presentato in questa tesi si focalizza sugli aspetti metodologici per la costruzione di ambienti di insegnamento/apprendimento che promuovano il pensiero critico degli alunni. Educare soprattutto giovani studenti alla complessità risulta indispensabile per la formazione individuale. L'impalcatura teorica è quella costruttivista, che guida gli studenti verso modalità di ragionamento che attivano sia il pensiero critico, sia le competenze metacognitive. Per realizzare ciò si è proceduto all'allestimento di una rete metodologica che potesse stimolare gli studenti nell'apprendimento della teoria scientifica sul caos. Sono stati a questo scopo allestiti alcuni laboratori sperimentali, dotati sia di uno spazio adeguatamente attrezzato per la sperimentazione sia di percorsi didattici e di una metodologia reticolare per favorire un apprendimento attivo. Tutto ciò è stato sviluppato anche nell'ottica di un rinnovamento della didattica e dell'applicazione di modelli pedagogici di matrice costruttivista. Le esperienze sono state replicate più volte e i dati raccolti durante le valutazioni delineano un quadro incoraggiante e fortemente positivo, tale da porre questa metodologia come riferimento sia per ciò che concerne l'evoluzione dei ruoli nella complessità psicopedagogica, sia per un reale rinnovamento metodologico nella didattica delle scienze.

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

"L'obiettivo è di insegnare in modo tale da offrire il maggiore apprendimento col minimo di insegnamento. (...) L'altro fondamentale cambiamento necessario rispecchia un proverbio africano: se un uomo ha fame gli puoi dare un pesce, ma meglio ancora è dargli una lenza e insegnargli a pescare. "

Seymour Papert

Il presupposto da cui muove il lavoro svolto nel corso del triennio di Dottorato di Ricerca, raccolto e presentato in questa tesi, consiste nel valorizzare un argomento che da decenni interessa fortemente la comunità scientifica internazionale: il caos, e utilizzarlo da base per proporre a studenti molto giovani un processo originale di costruzione della conoscenza in ambito scientifico. Tale esigenza nasce principalmente dall'idea di sperimentare nuovi percorsi curriculari scolastici nell'ottica dell'integrazione fra tecnologie educative tradizionali e innovative. Stando alle più recenti statistiche, si evidenzia una crisi senza precedenti causata dalla mancanza di attrattiva delle carriere scientifiche e, più in generale, dalla scarsa diffusione della cultura scientifica tra i più giovani. Anche per questo motivo la ricerca psicopedagogica internazionale si è fortemente concentrata negli ultimi decenni sull'insegnamento delle scienze. La presente ricerca espone la progettazione e la sperimentazione di una metodologia che, muovendo da uno dei più affascinanti temi di ricerca del secolo appena trascorso: il caos, proposto attraverso lo studio del circuito elettronico di Chua (Chua, 1983), arrivi, attraverso l'integrazione multidisciplinare, a rendere accessibile alla comprensione un argomento che può rivelarsi assai ostico per i non specialisti. Attraverso l'attuazione di tale metodologia, si vuole intervenire, in un certo senso, sul rapporto tra i giovani e la scienza proponendo loro di "mettere le mani" sui concetti, e, nello stesso tempo, superando l'approccio hands-on, nell'ottica di una concreta interazione dei saperi, impiegare sperimentalmente per fini educativi nuove tecnologie per la didattica, focalizzate in un ben preciso settore scientifico. La metodologia, inizialmente proposta nell'ambito della scuola media è stata successivamente ampliata alla scuola superiore e ha coinvolto, con vari ruoli, più di seicento studenti. Affrontare temi scientifici può apparire, nel contesto storico in cui si vive, qualcosa di molto complesso; cercare di proporli in modo originale, meno difficile o distante, è sicuramente molto articolato. Con il prezioso ausilio di una serie di materiali e applicazioni multimediali precedentemente sviluppate nell'ambito delle ricerche sul caos e i sistemi complessi (Bilotta & Pantano, 2008) si è cercato di costruire e sperimentare un metodo che presentasse proprio ai e alle giovani una scienza non edulcorata, priva delle sue componenti dinamiche, conflittuali, non una scienza in pillole, avulsa dal contesto di origine, ma ricca di esempi applicativi e confronti multidisciplinari. Portare nelle scuole la ricchezza e

l'articolazione della ricerca scientifica, assieme anche all'inevitabile componente di incertezza, base e alimento del metodo scientifico, proponendo un percorso di studio, di partecipazione e di confronto è stato l'obiettivo principale che ha guidato tutta l'attività di ricerca, che si è arricchita mano a mano come un mosaico di esperienze preziosissime, che hanno portato all'integrazione, alla trasposizione e anche alla modifica in corso d'opera dei materiali didattici utilizzati. Costruire spazi e percorsi per favorire l'incontro tra i giovani e la scienza è un po' come costruire dei laboratori in cui gli studenti diventano parte del processo di apprendimento e nuovi protagonisti di una comprensione della scienza che possa portarli a diventare "piccoli inventori". Nella convinzione che tale argomento, il caos, appunto, visto, in particolare, dal privilegiato punto di osservazione rappresentato dal circuito di Chua, potesse essere un giusto contesto per affrontare l'articolazione complessa di una metodologia didattica, si è cercato di offrire impieghi diversificati delle rappresentazioni di tale argomento scientifico: dal punto di vista della visualizzazione scientifica, da quello della sonorizzazione e della creazione di musica, e infine da quello sperimentale e costruttivo relativo alla manipolazione fisica del circuito elettronico e alla verifica del suo comportamento caratteristico. Le possibilità applicative di questo specifico settore scientifico si presentano diversificate e ampie diventando, per tali motivi, un ambito di ricerca tanto interessante quanto originale per i suoi contenuti. Inoltre, è importante sottolineare come proporre un metodo di didattica della scienza a studenti molto giovani possa essere più rilevante che farlo in percorsi curriculari standard, poiché, numerosi studi nazionali e internazionali hanno evidenziato che le capacità relative allo studio delle materie scientifiche mostrano un andamento discendente con il procedere del percorso formativo (Oecd, 2007), e questo sembrerebbe essere legato soprattutto a come gli studenti percepiscono con scarsa fiducia le proprie capacità a comprendere le materie scientifiche, pensando di non possedere adeguate attitudini (Stefánsson, 2006). Tale fenomeno molto spesso si può correlare proprio con il tipo di offerta formativa, scarsamente propensa alle sperimentazioni interdisciplinari e fortemente alimentata da un privilegio di modalità didattiche tradizionali e una sostanziale reticenza alla introduzione di pratiche sperimentali innovative. Naturalmente l'obiettivo da raggiungere è arduo, risultano complessi i contenuti da presentare e, in un certo senso, da esemplificare, appare, dunque, alto il rischio legato a un eventuale fallimento della sperimentazione. Non riuscire a interessare e coinvolgere gli studenti o, ancora peggio, registrare i loro insuccessi, potrebbe comportare un effetto diametralmente opposto rispetto a quello perseguito: frustrazione, sensazione di incapacità e scarsa attitudine a svolgere i compiti richiesti. Per tali motivi, la proposta formativa è stata concepita con uno sguardo bene attento alle più recenti ricerche nell'ambito dell'edutainment e i contenuti educativi sono stati presentati anche attraverso una veste ludica. Pur mantenendo il necessario rigore scientifico i vari temi sono stati presentati in maniera semplificata, favorendo ampi spazi al dibattito e al confronto; il linguaggio è

stato adeguato anche per ragazzini undicenni; la proposta didattica è stata bilanciata in una successione di momenti dedicati alla presentazione rigorosa delle tematiche, di spazi di riflessione e di attività ludiche e creative. Il punto di partenza per l'ideazione di questa proposta didattica è stato valorizzare un apprendimento inteso non come memorizzazione delle informazioni, ma come comprensione per giungere a una reale capacità d'uso di strumenti e generalizzazione delle conoscenze. La sperimentazione si è svolta nel contesto scolastico, ma ha proposto un approccio all'insegnamento della scienza differente rispetto alle pratiche canoniche di comunicazione o di divulgazione. Il processo si presenta variegato poiché diversi sono gli scopi e le motivazioni, i tempi che condizionano i rapporti tra gli attori coinvolti nell'obiettivo dell'appropriazione del sapere, in particolare, diversi sono i rapporti del discente con l'argomento da imparare, con i suoi compagni, con chi insegna, con l'ambiente. Lo scopo ultimo è quindi quello di rendere capaci i giovani di trasferire le conoscenze acquisite in contesti nuovi, trasferire la conoscenza, concepire l'innovazione, acquisire un metodo, trasformando cioè in formazione e in cultura l'insieme delle potenzialità. Per questo motivo, si è pensato a un'offerta didattica diversificata, consci del fatto che la società ha bisogno di elevare la qualità dell'intervento formativo, che amplia, in questo modo, il suo significato, abbracciando ciò che di persistente e duraturo c'è nella formazione scolastica: il metodo. Il metodo scientifico, da un lato, e un approccio costruttivista dall'altro sono stati gli elementi privilegiati per condurre questa sperimentazione. Da un lato si introducono saperi compresi attraverso la verifica, la sperimentazione, i tentativi ripetuti, dall'altro si favoriscono gli approcci basati sull'apprendimento per manipolazione, per approccio fisico diretto e, contemporaneamente, per approccio tecnologico digitale e mediato. Metodi di questo tipo per lo studio delle scienze potrebbero risultare efficaci e l'istruzione scolastica in questo ambito trarne grandi vantaggi e ottimi risultati. Dalle statistiche e dalle ricerche più recenti si registra un forte decremento nelle richieste formative relative all'area scientifica; la principale causa di questo fenomeno viene individuata nella concezione epistemologica del sapere scientifico. Molto spesso ciò di cui parlano gli scienziati e i libri scolastici appare distante e avulso dalla vita quotidiana. Questa caratteristica si rimarca molto più profondamente nel momento in cui si considerano le modalità di insegnamento: la scienza viene descritta, i fatti argomentati attraverso la parola orale sono avvertiti come poco intuitivi, le verità trasmesse non sono discutibili e sembrano rispondere a domande e dare soluzioni che appaiono essere estranee al modo in cui si formulano i problemi nell'esperienza comune. Notevole aiuto, in questa visione conflittuale tra scienza e conoscenza, è arrivato dalla ricerca sui processi di apprendimento insegnamento. L'approfondimento di osservazioni raccolte in contesti scolastici ha permesso di capire meglio in che termini si pone tale conflitto e a quali condizioni può cessare di essere un vero ostacolo. Le rappresentazioni e memorizzazioni della conoscenza sono state scandagliate dalle scienze cognitive; così anche le relazioni tra

contenuti, processi e contesti di acquisizione della conoscenza e le interconnessioni tra la sfera emotiva e la cognizione. Le concezioni costruite sin dalla prima infanzia sono intuitive e aiutano a spiegare i fenomeni del mondo. Successivamente questi pensieri, per così dire ingenui, si distinguono da quei pensieri che si connotano come esperti grazie all'esperienza nel campo della scienza. La pratica scientifica rende sistematiche metodologie sia di azione, che di ragionamento tendendo a svincolare i processi dalla soggettività della percezione e dalla concretezza del particolare. La realtà dei processi sperimentali, per essere meglio compresa, può essere ricostruita e semplificata opportunamente. La rilevanza degli aspetti psicologici e sociali delle interazioni che si attuano in qualsiasi approccio didattico è fondamentale; in altri termini, non sono in gioco solo i saperi, ma le identità personali e sociali in costruzione. Non basta perciò sviluppare soltanto conoscenze, ma anche convinzioni, curiosità e motivazione.

Il seguito della presente tesi si articola in sette ulteriori capitoli. Il secondo capitolo presenta il tema della comunicazione scientifica secondo una prospettiva ampia e cerca di rispondere anche ad alcuni interrogativi salienti come, per esempio: perché comunicare la scienza, come a chi, in che modo. Sempre nello stesso capitolo sono analizzate le principali peculiarità dei più famosi istituti al mondo che applicano concretamente principi di multidisciplinarietà, coniugando tradizione e avanguardie tecnologiche: i science centre. Il terzo capitolo tratta i metodi e i media che possono essere utilizzati per la divulgazione della scienza. In particolare, prendendo velocemente in rassegna le principali teorie classiche dell'apprendimento, si giunge a trattare la loro influenza relativamente allo sviluppo delle varie metodologie pedagogiche. Saranno poi analizzati i fondamenti teorici e il ruolo ricoperto dall'introduzione delle tecnologie nella didattica e, in particolare, i metodi di insegnamento/apprendimento in ambienti costruttivisti. Infine, considerando le principali peculiarità dei sistemi di edutainment, si prenderà in esame come da tempo, soprattutto fuori i confini nazionali, si stia tentando di creare un humus di innovazione intorno allo sviluppo di approcci educativi interdisciplinari. Nel capitolo quarto sono introdotti in maniera sintetica e con i principi propri della divulgazione i temi scientifici oggetto della metodologia sperimentata: la teoria del caos e dei sistemi complessi. Da qui la trattazione segna un'ideale punto di rottura dalle argomentazioni teoriche e inizia a presentare il quadro applicativo e sperimentale sviluppato nel corso delle attività di ricerca compiute. Si prendono in esame dunque nei capitoli quinto, sesto e settimo: la struttura metodologica e la sua applicazione in tre diversi contesti scolastici, la realizzazione di percorsi divulgativi all'interno di una mostra espositiva sui temi scientifici del caos e della complessità, la realizzazione di media per la divulgazione della scienza. Si vuole precisare che alcuni di questi sono stati realizzati direttamente, anche da un punto di vista operativo, in altri invece, è stata svolta un'attività di ideazione, redazione e supporto. Tappa conclusiva della tesi è la trattazione di un tema molto dibattuto e avvertito come molto importante

nell'ambito delle ricerche scientifiche: la cultura e le ricerche scientifiche possono e, in un certo senso, devono uscire dai loro confini e interagire, anche con il mercato, nei modi e nei tempi più consoni, per abbracciare nella spirale della conoscenza un quanto più ampio pubblico che, probabilmente, curioso e recettivo non aspetta altro che questo abbraccio ideale si realizzi.

CAPITOLO 2. LA COMUNICAZIONE SCIENTIFICA

"Il progresso della scienza presuppone la possibilità di comunicare senza alcuna restrizione tutti i risultati e i punti di vista. Questa libertà di comunicazione è indispensabile per lo sviluppo e la diffusione della conoscenza scientifica."

Albert Einstein

La comunicazione della scienza è un campo di studi autonomo, se non proprio una nuova disciplina accademica, alla ricerca di una sua identità. Negli ultimi anni l'interesse nell'educazione scientifica è notevolmente aumentato. Oltre all'incremento dei musei scientifici, siano essi a carattere storico, interattivi o espositivi, si sono moltiplicate le iniziative nazionali, europee e mondiali verso una riscoperta e una valorizzazione della scienza nella società. A testimonianza di ciò si possono prendere in considerazione numerosi progetti e finanziamenti dedicati alla ricerca dedicati a tale ambito. La scienza vuole essere protagonista nella cultura del paese futuro e rinnovare le sue stesse priorità: più tecnologia, più immagine, più metafore narrative. Ma, come ricordava il filosofo statunitense Rorty "gli scienziati credono che il grande pubblico debba interessarsi delle ultime scoperte sul genoma umano, sulla localizzazione cerebrale, sullo sviluppo infantile o sulla meccanica quantistica, ma non sono in grado di spiegare perché esse dovrebbero interessarlo". Necessario è che si crei intorno ai temi scientifici un reale interesse determinato dalla presa di coscienza che la loro conoscenza sia necessaria. Negli anni Sessanta del secolo appena trascorso lo scienziato Buzzati Traverso si lamentava che "attaccati ancora alla concezione che il sapere sia e debba rimanere privilegio di una élite, molti studiosi ancor oggi guardano al collega divulgatore quasi come a un traditore" (Buzzati Traverso, 1962). E ancora, alcuni altri lo vedono come una figura borderline, non pienamente scienziato, ma nemmeno umanista. Questi e altri i temi trattati nel seguito di questo capitolo: perché e come comunicare la scienza, il rapporto tra scienza e società, progettare un'efficace comunicazione della scienza e le caratteristiche di chi questa missione la realizza.

2.1 La comunicazione e la scienza

La trasmissione delle conoscenze consolidate alle generazioni future è peculiare delle società umane. Comunicare conoscenza scientifica superando barriere di spazio e di tempo, offrendo alla scienza possibilità di progresso accelerato, espansivo e

globale e alle imprese un vantaggio competitivo reale, è esclusivo dell'ultima parte del secolo appena trascorso, che ha profondamente modificato stili cognitivi, tecnologie informative e accesso alle risorse.

Da alcuni anni si assiste a un moto in controcorrente e si rileva una crescente attenzione verso la divulgazione scientifica. Sostiene lo scienziato Rubbia come "la scienza non è un'attività ristretta, ma un fenomeno di interesse generale che deve raggiungere tutti gli strati sociali. Questa convinzione ha portato Galileo a rivolgersi a un pubblico vasto, in una lingua comprensibile" (Rubbia, 1996). A sostegno della necessità di un crescente ruolo della divulgazione delle scienze il matematico e scrittore Odifreddi ricorda che in testa alla classifica dei best seller del Novecento non c'era un romanzo, bensì un libro di divulgazione scientifica, *Dal Big Bang ai buchi neri*, del fisico Stephen Hawking, con trenta milioni di copie vendute (Odifreddi, 2000). Ciò convalida la sua tesi su come proprio le opere divulgative siano permanenti nel tempo e modellino la nostra cultura. Egli sostiene inoltre che la distinzione classica greca tra saperi esoterici ed essoterici sia stata rafforzata proprio da Pitagora, che pose la matematica all'origine dell'esoterismo classico, distinguendo le attività di insegnamento in due campi: quello della ricerca e quello della divulgazione. Il primo era rivolto a un pubblico specialistico di veri e propri apprendisti, il secondo a un pubblico generico di semplici uditori. Pitagora li chiamava, rispettivamente, matematici e acusmatici: parole derivanti da *mathema* e *akoustos*, che significano appunto "apprendimento" e "udito". I matematici erano dunque, in origine, gli apprendisti ai quali venivano comunicate quelle teorie che, per la loro complessità o per la loro delicatezza, non potevano essere di dominio pubblico. Oggi sembra invece sempre più essersi consolidata l'idea in filosofi e scienziati di ritenere la divulgazione come un'attività distinta dalla ricerca e a essa subordinata, ma importante per la sua diffusione. Alcuni studiosi invece si chiudono in un atteggiamento di snobistico disdegno della divulgazione e dei divulgatori, stigmatizzando, come fa Rota per esempio, lo zoo intellettuale (Rota, 2000), quello cioè di chi si improvvisa conoscitore di un dato argomento, occupando uno spazio che è stato lasciato libero a causa della "riluttanza dei matematici a spingersi fuori degli angusti confini della propria disciplina, e dalla loro inettitudine a tradurre il contenuto esoterico in slogan essoterici, com'è invece imperativo nell'era dei mezzi di informazione di massa". La matematica, come afferma Odifreddi, "è resa impenetrabile dal suo stesso linguaggio simbolico, che si può comprendere soltanto conoscendolo, e dall'astrazione dei suoi enti, che si possono percepire soltanto immaginandoli. La soluzione più facile e comoda per il matematico è di lasciare ad altri l'onere di semplificare quel linguaggio ed esemplificare quegli enti, abbandonando di fatto la divulgazione nelle mani di dilettanti che finiranno per seguire linee di minima resistenza, perdendosi dietro ad aneddoti e rompicapi". Il tentativo degli scienziati auspica Odifreddi deve essere più coraggioso e tendere a comunicare idee e risultati in quanto "le uniche opere che hanno una speranza di

rimanere negli anni sono appunto quelle divulgative, mentre, quelle di ricerca vengono velocemente dissolte dal tempo". L'azione, quindi, deve essere duplice da un lato la scienza deve uscire dal ghetto dell'esoterismo nel quale è stata, attivamente o passivamente, troppo a lungo confinata, per entrare finalmente a far parte della cultura dell'uomo contemporaneo, dall'altro, devono essere sfruttate al meglio le possibilità di comunicazione e le tecnologie messe a disposizione dai nuovi media. Per diversi anni si sono sovrapposte motivazioni illuministiche (la crescita dell'educazione, dell'alfabetizzazione, il conseguimento della piena democrazia), motivazioni strumentali (ottenere l'aumento delle risorse per la ricerca, delle iscrizioni alle facoltà scientifiche, del benessere nazionale ed economico), motivazioni culturali. In realtà, la scienza costituisce uno dei linguaggi dell'umanità, quello più strettamente legato alla tecnologia e al progresso. D'altra parte fino a quando, non si saprà parlare di scienza, non si potrà comprendere l'essenza stessa della vita.

2.2 Perché, come, a chi

Nella fase attuale comunicare la scienza è una necessità. Non da tutti è avvertita però con uguale priorità. Lo sviluppo tecnologico marca una forte differenza, in termini di tempistica, con il passato. Le scoperte e le invenzioni in campo scientifico e tecnologico sono tanto veloci da avere determinato una distanza profondissima nella conoscenza e nell'uso delle tecnologie tra le generazioni di giovanissimi e i loro nonni per come sembra non verificarsi tra figli e genitori. A questo va aggiunta una crescente confusione tra l'uso delle tecnologie e la conoscenza che si ha di esse. Molto spesso si usa anche agevolmente ciò che non si conosce e questo può essere un limite o talvolta diventare addirittura dannoso. Sovente l'uso dei mezzi tecnologici è inconsapevole, meccanico. Per realizzare la scrittura di questo documento si deve fare uso di tecnologie, così anche per memorizzarlo, stamparlo o diffonderlo. Il mondo moderno è permeato di tecnologia; la tecnologia si basa sulla scienza e la scienza ha un linguaggio suo, che è il linguaggio della matematica. Se queste tre cose non vengono comprese a fondo, difficilmente si potrà capire la tecnologia, la scienza e la matematica rischiando di vivere in un mondo di sogni, vittime di uno scollamento fra quello che succede nel mondo reale e quello che viene diffuso attraverso i media. L'informazione, in un'analisi realizzata da Odifreddi, dedica poco tempo alla diffusione dei risultati delle ricerche scientifiche per un duplice motivo: uno è quello dell'impossibilità di divulgare ciò che molto sovente non si conosce, l'altro è una sorta di chiusura da parte degli studiosi in una rete autoreferenziale. La difficoltà nasce dunque alla base: fare nascere la convinzione che le scienze siano utili e il loro studio e la loro conoscenza siano assolutamente necessarie. La priorità di diffusione di questo messaggio investe soprattutto le giovanissime generazioni, molto più esposte degli adulti ai messaggi pubblicitari del mercato e influenzati da un vero e

proprio bombardamento mediatico. Spesso i giovani sono fruitori inconsapevoli di tecnologia e scienza, in una misura tanto grande quanto la loro ignoranza in merito. Ciò che spesso si riscontra come fattore altamente negativo è la mancanza di pensiero critico, del sano porsi dubbi sul perché si usa un oggetto, se è quello il suo uso proprio, perché ciò che ci circonda funziona in un determinato modo e non in un altro. Per sciogliere il tema di come educare al pensiero scientifico, comunicando le scienze, ci sarà un'ampia trattazione di seguito che cercherà di fare chiarezza sui molti punti oscuri riguardanti questo tema. Per il momento alla domanda sul "come" si può rispondere semplicemente sottolineando che potrebbe essere la stessa scienza da sola a spiegare se stessa, utilizzando ciò che da questa deriva, la tecnologia, appunto. L'uso delle tecnologie può essere un mezzo senza dubbio efficace, ma non è sufficiente, l'altro modo fondamentale è quello tracciato dagli scienziati in secoli di storia, quello cioè della sperimentazione, degli esempi pratici, tangibili. Le complessità raggiunte nella comunicazione scientifica sono notevoli, ma notevole è anche lo sforzo per concretizzare l'idea che la scienza non è decisa da altri e presentata, ma verificabile, tangibile in ogni momento, in ogni azione che si compia. Ma bisogna essere consapevoli di una distinzione fondamentale: il problema del comunicare la scienza non è niente affatto simile o paragonabile al tentativo di realizzare una formazione scientifica. A comunicare in maniera anche massiccia ci pensano i media, primo fra tutti la rete, diventata ormai fonte di informazione e purtroppo anche di disinformazione. Altro problema invece è formare al pensiero scientifico, insegnare la scienza e possibilmente in maniera nuova. L'attenzione si rivolge soprattutto alle nuove generazioni, perché è fondamentale che in età scolare inizi a prendere consistenza una *forma mentis* scientifica, preconditione necessaria per qualsiasi approfondimento successivo. Il modo di procedere della scienza può in tal modo diventare un abito mentale, indispensabile nella formazione dei giovani. Divulgare attraverso dimostrazioni ed esempi è stata da sempre esigenza insaziabile degli stessi scienziati. Sin da Rouelle, chimico cui si deve una delle prime definizioni di sale, a de Vaucanson, uno tra i più grandi costruttori di automi, allo stesso Voltaire, cui dobbiamo la diffusione tra l'altro della leggendaria immagine di Newton sotto l'albero di mele (Castelfranchi e Pitrelli, 2007) per poi proseguire in esempi più noti fino ad arrivare ai nostri giorni, si sono avuti scienziati che hanno incarnato il ruolo di divulgatori, per comunicare le loro scoperte e invenzioni; e lo hanno fatto soprattutto attraverso dimostrazioni ed esperimenti, ma non solo. Come vedremo in seguito gli scienziati, ma prima ancora la cultura in generale hanno utilizzato le rappresentazioni visive. Questo, alla luce delle nuove tecnologie, risulta essere un'ottima base per realizzare e proporre materiali didattici innovativi, che risultino, soprattutto per i più giovani, accattivanti, stimolanti, capaci di suscitare interesse e curiosità.

2.3 Rapporto tra scienza e società

Sin dal 1985, la Royal Society metteva in guardia da un potenziale deterioramento nei rapporti tra scienza e opinione pubblica, evidenziando l'urgenza a incentivare una migliore comprensione delle scienze per la promozione del benessere della nazione, la maggiore qualità della vita pubblica, l'arricchimento della vita di ciascuno individuo, concludendo che era di vitale importanza che gli scienziati imparassero a comunicare con il pubblico e aggiungendo che questo doveva essere da loro considerato esattamente come un dovere. Certo è che risulta difficile fare previsioni sul futuro di teorie o scoperte della scienza. Emblematica è la famosa previsione di Thomas Watson, presidente dell'Ibm nel 1943, che affermò che il mercato mondiale, secondo la sua opinione, fosse aperto ad accogliere non più di cinque computer. L'era moderna è piena di "dinosauri tecnologici" (Nosengo, 2003), di tecnologie che, anche se molto promettenti non sono riuscite a diffondersi adeguatamente. Alcune volte, e solo in alcuni casi spesso, le scoperte della scienza sfociano in nuove produzioni tecnologiche che non trovano riscontro, applicabilità nel quotidiano e creano un certo scollamento con la vita che ordinariamente si affronta. Ma come la natura umana sta cambiando e come la tecnologia del ventunesimo secolo sta modificando il nostro modo di pensare e di sentire? Proponendo un percorso documentato, ma a tratti visionario, la neuro scienziata, divulgatrice e scrittrice Greenfield prova a dare delle risposte a tali quesiti, analizzando con grande profondità le conoscenze che si affacciano al nostro secolo, immaginando la vita nel prossimo futuro, sulla base delle potenzialità che le tecnologie odierne possono offrire (Greenfield, 2005). Ciò che emerge è un mondo senza più dolore e malattia, in cui il corpo è manipolato con appositi macchinari, lo stato d'animo con "droghe intelligenti", la natura biologica con terapie genetiche. Un mondo nel quale la tecnologia potrebbe cambiare il nostro modo di mangiare, di organizzare i rapporti familiari e sociali, di lavorare e anche di combattere le guerre, in cui, persino la nozione di individuo, come oggi la intendiamo, potrebbe apparire obsoleta. Gli scenari che si affollano sono spesso contraddittori e difficilmente riconciliabili ed emerge spesso la mancanza di una scala temporale, in certi casi il cambiamento è alle porte, in altri si affaccia su abissi di tempo completamente oscuri e citando *Icarus* di Bertrand Russell "ecco perchè la scienza minaccia di causare la distruzione della nostra civiltà", la Greenfield si chiede: "La scienza e la tecnologia del XXI secolo ci priveranno delle nostre passioni private, del nostro libero arbitrio? Le innovazioni tecniche e le scoperte scientifiche hanno condotto a una straordinaria fragilità delle società tecnologiche avanzate, evidenziando tremende sacche di emarginazione e povertà". Ma, poiché questa conclusione è espressa da uno scienziato militante, anziché leggerla in chiave pessimistica, la si potrebbe interpretare in maniera positiva: per non essere schiacciati dalla scienza, bisogna capirla. Questo è il punto più importante da considerare nel rapporto tra scienza e società: la scienza traccia delle strade, offre delle visioni, ma l'uomo grazie al libero

arbitrio deve assumersi le proprie responsabilità verso il mondo in cui vive e verso quello che lascerà alle nuove generazioni.

2.4 Programmi e Best Practice

L'impegno delle istituzioni mondiali nella divulgazione della scienza ha radici antiche, si pensi alla Royal Institution in Inghilterra la cui fondazione risale all'Ottocento o all'American Association for the Advancement of Science, che, negli anni Sessanta prese addirittura in considerazione l'ipotesi di aprire uffici di consulenza a Hollywood e New York per incentivare quantità e qualità dei contenuti scientifici nelle produzioni televisive e cinematografiche. L'impegno della comunità scientifica e dei piani nazionali d'istruzione in diversi paesi d'Europa e del mondo testimoniano l'enorme importanza rivestita dalla necessità di favorire e analizzare l'incontro tra scienza e società, entrambe complesse (Funtowicz *et al.*, 1999) e in divenire (Latour, 1998). Complesso non significa esattamente difficile o distante, ma articolato. In particolare, la comunicazione della scienza dovrebbe prevedere una simultanea coesistenza di differenti approcci di comunicazione (Bucchi, 2008). Le possibilità aperte in questo senso sono molto ampie, soprattutto alla luce degli sviluppi tecnologici realizzati negli ultimi decenni. Modellazioni tridimensionali, animazioni, simulazioni, tecniche di visualizzazione scientifica e computer grafica sono solo un esempio di come possa essere ampio e diversificato il modo di comunicare, non solo contenuti scientifici, ma di qualsiasi genere. Per realizzare ciò è necessario che i due filoni di studi sulla comunicazione della scienza e sull'educazione si incontrino e interagiscano sempre più profondamente (Turner, 2008). Diversi sono i programmi, le riviste, i modelli, le pratiche e le teorie legate alla comunicazione scientifica, che spesso si intersecano creando anche numerose sovrapposizioni. Si vogliono di seguito citare quattro programmi di comunicazione della scienza messi in atto in paesi diversi e divenuti, in un certo senso pietre miliari e riferimenti:

- in Inghilterra il *Public Understanding of Science* (educazione e comprensione)
- negli Stati Uniti la *scientific literacy* (alfabetizzazione)
- in Francia la *culture scientifique* (familiarizzazione)
- in Germania il *Public understanding of science and the humanities* (PUSH: *Wissenschaft im dialog*)

Per quanto riguarda i modelli è possibile affermare che non esistono best practices universali ed esportabili allo stesso tempo appare erroneo concepire modelli di comunicazione scientifica che siano lineari. Come già accennato le modalità più idonee sembrano quelle che usano le tecnologie più all'avanguardia, ma anche strumentazioni classiche in un compendio fra tradizione e tecnologia e, comunque, strutturando la comunicazione in maniera reticolare. Ai media

tradizionali si sono aggiunti quelli su web, entrambi hanno come elementi essenziali: testi, foto, video, animazioni. Le principali forme di comunicazione a un grande pubblico rimangono essenzialmente mostre e meeting di vario genere per approfondimenti. L'idea principale che sottende le azioni dedicate alla divulgazione della scienza sono, in ogni caso, d'integrare i vari media per individuare i punti centrali di un discorso su un esperimento, un laboratorio, una tecnologia. Per questo motivo, come sarà approfondito anche in seguito, i tentativi in questa direzione non si connotano come chiaramente collocabili in un settore specifico di ricerca, ma si fondano su collaborazioni fortemente interdisciplinari nel tentativo di superare le rigide barriere molto spesso esistenti tra discipline tradizionali e innovative, tra ricerca teorica ed empirica, tra discipline umanistiche e scientifiche. Un'esperienza pratica per la verifica di un fenomeno fisico ha quindi bisogno di una struttura reticolare che coniughi tecniche, tecnologie e approcci interdisciplinari.

2.5 Imparare a comunicare: progettare la comunicazione, raccontare la scienza

L'idea principale è trattare in ambito interdisciplinare un tema non presente nel curriculum didattico scientifico degli studenti più giovani, sviluppandone i vari aspetti teorici, sperimentali e pratici con gli strumenti caratteristici delle discipline coinvolte. Ciò dovrebbe essere realizzato nell'intento di fornire una forma di conoscenza integrata e più equilibrata dell'argomento, assieme a un aggancio concreto alla realtà fisica che ci circonda e a una maggiore motivazione allo studio delle materie scientifiche. L'approccio costruttivista è insostituibile per trasmettere agli studenti il corretto ruolo degli strumenti e della tecnologia nell'ambito scientifico. I progetti interdisciplinari sono adeguati a sviluppare e valorizzare le capacità progettuali e trasversali degli studenti, spesso penalizzate nel curriculum scolastico; la realizzazione di un oggetto fisico, sia esso un sismografo o un circuito può essere un'occasione di riflessione metodologica e di comunicazione di strumenti concettuali e saperi difficilmente formalizzabili e inquadrabili nell'insegnamento "ex cathedra". Pionieristici in tal senso sono state, senza dubbio le esperienze di formazione proposte nei science centre.

2.5.1 La proposta dei *Science Centre*

I science centre sono testimoni e interpreti di un nuovo e originale rapporto tra scienza e società, proponendosi, nei confronti dei visitatori di ogni età ed estrazione sociale, come luogo privilegiato per la costruzione e il consolidamento di una cittadinanza scientifica consapevole. Questi luoghi rappresentano effettivi compendi culturali e fucine per innovazioni non solo in campo scientifico, ma anche artistico e

pedagogico. Definiti con tale termine dalla cultura americana, a livello nazionale sono conosciuti come città della scienza, ma, in effetti, non hanno solo proposte formative di carattere scientifico, bensì, come si è già detto, favoriscono approcci di natura interdisciplinare: i visitatori sono stimolati nell'ingegno, nel ragionamento, nell'emotività, nelle capacità manipolatorie, poiché, questi sono luoghi speciali dove è possibile la coesistenza di diversi mondi avvertiti generalmente come distaccati o paralleli: quello scientifico e tecnologico, quello artistico, quello educativo. Il primo esempio di science centre risale al 1969 ed è l'Exploratorium, che ha sede nel Palace of Fine Arts di San Francisco. Proprio questa collocazione che potrebbe apparire casuale, in effetti, non lo è. Il suo stesso fondatore il fisico americano Frank Oppenheimer spiega come l'idea rivoluzionaria da comunicare attraverso la creazione di un simile centro culturale fosse non solo quella di proporre a un vasto pubblico l'esperienza scientifica in maniera viva, ma anche di riflettere su un'idea di autentica cooperazione tra i saperi. Egli affermava infatti che "scienza e arte servono per comprendere la natura coinvolgendo le persone. E, mescolandosi, entrano a far parte del processo pedagogico". Questo tipo di musei, sono particolari luoghi dove effettuare esperienze di apprendimento coinvolgenti e divertenti. I science centre, più che essere legati ai principi guida dei musei classici, quelli per esempio di paleontologia o di botanica o di minerali, l'idea cioè di raccolte e collezioni esposte e adeguatamente presentate attraverso didascalie o audio guide, sono ispirati a un progetto culturale in cui predomina l'attività pratica, esplorativa, sperimentale in cui, cioè, sia lo stesso spettatore a costruire da se la conoscenza. In molti casi, ci si trova di fronte a installazioni o esperimenti che non esisterebbero se non ci fosse la stessa interazione dello spettatore; l'installazione o l'esperimento vive in quanto esiste una persona che interagisce, agisce, sperimenta con questa e nello stesso tempo apprende. I vantaggi derivanti dall'integrazione delle tecnologie in ambienti istruttivi sono stati intensamente discussi e si trovano molti esempi in letteratura (Aldrich, 2005; Mitchell et al., 2004). L'uso della realtà virtuale ha determinato oggi lo sviluppo di spazi creativi multimodali e ambienti di apprendimento multidisciplinari e multi-attività nei quale l'utente può avere un ruolo attivo esplorando il contenuto, imparando dal gioco e dalla manipolazione. Gli spazi espositivi virtuali o no sono luoghi non di mera rappresentazione, ma sono strumenti per agire, interagire e imparare attuando le teorie costruttiviste (Bednar A.K. et al., 1995). Molti autori sostengono che l'interazione con ambienti virtuali 3D implichi un accrescimento della cultura, in effetti non è così poiché non tutti gli ambienti implicano l'apprendimento (Crawford, 1984; Lepper et al., 1987). Gli utenti sono coinvolti a livello emotivo e sensoriale per tale ragione possono imparare e migliorare le loro abilità; i meccanismi di interazione e le rappresentazioni visuali e spaziali, infatti, incentivano fortemente le capacità di coordinazione tra occhi e mani, ma non è affatto scontato che gli utenti apprendano dei contenuti. L'apprendimento avviene solo sotto determinate condizioni, ma ciò sarà approfondito in seguito. Per quanto riguarda i science centre,

anche in questo caso, i vari percorsi pratici interattivi e non che rendano possibile imparare, per esempio, la fisica, la matematica, la chimica non fanno a meno di una guida, un mediatore che faciliti la comprensione dell'esperimento. Ciò non avviene per le installazioni che sempre più spesso sono proposte in maniera stand alone. L'esempio californiano è solo uno dei tanti sparsi in tutto il mondo; altri esempi, solo per citarne alcuni, sono: la Cité des sciences Vilette di Parigi, il Museu de le Ciencies di Barcellona, il Science Museum di Londra. L'interpretazione fornita da Oppenheimer più di quaranta anni fa rimane unanimemente condivisa e pone i science centre come luoghi in cui, superando il puro approccio hands-on, ci si spinge verso quello heart- e mind- on; ossia, a essere coinvolti nella avventura della scoperta dei saperi della scienza non è solo il tatto, ma è la visione, l'emotività, l'intuizione. Gli esperimenti scientifici, dai meccanismi di trasmissione tra ruote dentate, alla propagazione delle onde in un fluido o sulla sabbia, al funzionamento elementare di un circuito cui è collegata una lampadina, solo per fare alcuni esempi, sono presentati in modo da potere rendere reale un rapporto ravvicinato e fisico dell'utente con gli oggetti. Oltre ai contenuti scientifici veicolati gli aspetti artistici sono anche molto curati, perché il contenuto di conoscenza arrivi più immediato negli spettatori, ne colpisca la fantasia, l'immaginazione, rimanendo in tal modo impresso nella memoria. Per questi e molti altri aspetti la proposta di una "scienza nuova", quella divulgata nei science centre appare pionieristica, in essa è infatti contenuta una visione virtuosa del rapporto tra scienza e società, entrambi finalmente fruitori di una fusione fruttuosa tra i saperi.

2.6 I talenti del divulgatore scientifico

L'importanza di una valida divulgazione scientifica aumenta in modo proporzionale al progresso dei risultati scientifici e tecnologici, pur essendo spesso accompagnata da un'inesorabile accentuazione delle specializzazioni. A rendere indispensabile l'opera del bravo divulgatore si aggiunge il particolare gergo utilizzato necessariamente dalle varie discipline scientifiche, prime fra tutte la matematica, che "è resa impenetrabile dal suo stesso linguaggio simbolico e dall'astrazione dei suoi enti, che si possono percepire soltanto immaginandoli" (Odifreddi, 2000). E' dunque quanto mai necessario un doppio anello di congiunzione fra chi produce risultati scientifici (il ricercatore) e chi li deve usare (il tecnologo e il professionista) e chi, semplicemente, vuol conoscere i vari risultati ossia ciò che può e deve essere considerato "cultura". Realizzare il primo anello è compito di chi insegna; realizzare il secondo anello spetta invece al divulgatore, anche se polemicamente Buzzati Traverso, nello stesso articolo già citato, sosteneva che "divulgazione ed insegnamento scientifico, eccezione fatta soltanto per i più elevati livelli della professione del docente in quanto egli si rivolge a gruppi di giovani già specializzati, possono ... venir considerati come sinonimi". Certamente l'ideale sarebbe che gli

stessi scienziati vestissero l'abito del divulgatore (e ciò è avvenuto in molti casi), ma non sempre ciò è possibile, perché le due qualità del "creativo" e del "didatta" non sono necessariamente legate l'una all'altra. Newton era un pessimo insegnante e il grande matematico Riemann risultava ostico e incomprensibile nelle sue lezioni, perfino a matematici di professione. Galileo Galilei, invece, era sommo non soltanto come insegnante, ma anche come divulgatore dell'epoca (basti ricordare le sue opere in forma dialogica); Enrico Fermi era grande come ricercatore teorico e sperimentale quanto come didatta è nota infatti la sua passione per l'insegnamento. Ma se divulgazione e insegnamento possono essere considerati sinonimi, sicuramente le finalità che li animano sono differenti, dunque, il divulgare è diverso dall'insegnare. Il divulgatore si rivolge a chi è completamente estraneo a quelle idee che intende comunicare e non è nella predisposizione di ascoltare con l'intento di studiare, bensì, soltanto di arricchire la propria cultura, rifiutando tutto ciò che può apparirgli troppo tecnico. Lo studente, invece, cui si rivolge l'insegnante, sa e accetta che deve imparare il particolare gergo della disciplina che studia; l'uomo della strada cui si rivolge il divulgatore, invece, vuol capire e sapere utilizzando soltanto il linguaggio comune, e, al più, è disposto a utilizzare qualche nozione tecnica elementare scolastica. Gli sforzi e i rischi che, quindi, il divulgatore scientifico accetta sono parte di una missione, di un atto di coraggio, e, come tali, vanno apprezzati, anche quando i risultati non sono quelli attesi.

Galileo era consapevole della difficoltà che avrebbe incontrato nel divulgare le sue idee. Da qui l'uso della lingua italiana al posto del latino, all'epoca ancora lingua dotta, e soprattutto la scelta di uno stile letterario, semplice e avvincente. Carlo Rubbia, premio Nobel per la fisica, commentando le capacità divulgative e la forza comunicativa di Galileo, scrive: "Nel divulgare la scienza Galileo cercava di risvegliare lo spirito scientifico moderno nelle menti del maggior numero possibile di persone. Cercò di portare la scienza fuori dalla cerchia ristretta degli scienziati facendone un fenomeno di interesse generale che permeasse tutti i livelli della società. E mise un'energia straordinaria in questo tentativo" (Rubbia, 1996). Gli strumenti utilizzati per realizzare quella che può essere definita a ragione la missione sociale della divulgazione della scienza naturalmente hanno subito un radicale mutamento così marcato, quanto il tangibile sviluppo delle tecnologie. Una cosa però sembra non essere mutata ed è la semplificazione, non solo attraverso l'esempio pratico o l'esperimento che, si è detto sono e rimangono irrinunciabili strumenti per la presentazione di un qualsivoglia fenomeno scientifico, quanto soprattutto attraverso le rappresentazioni artistiche.

2.7 Le visioni della scienza

La scienza ha fornito delle sue scoperte e delle sue teorie immagini e suggestioni, allo scopo di parlare di se. La prima forma di comunicazione della scienza che, realizzata da secoli, continua ancora oggi a essere fondamentale riferimento, è infatti quella per immagini. La storia della scienza, che ha rivoluzionato le conoscenze umane può essere, infatti, raccontata tramite una sorprendente galleria di immagini. Ma le immagini di cui si parla non sono quelle che quotidianamente ci bombardano: stimoli visivi, figure segni, simboli, ma quelle che dai tempi più remoti hanno saputo imprimersi in maniera indelebile nella nostra mente e costruire conoscenza (Barrow, 2009). Alcune di queste hanno rappresentato e rappresentano momenti cruciali per la costruzione del sapere, documentano l'evoluzione del mondo, forniscono un'idea della bellezza dell'universo, parlano della storia dell'uomo in secoli di scoperte e invenzioni. Si pensi per esempio alle prime rappresentazioni della volta celeste, le orbite dei pianeti, le prime cartine topografiche di Matteo Ricci. Molti tra artisti e gli stessi scienziati si sono sforzati per fornire immagini semplificate della scienza. Il pittore Cigoli, per esempio, interpretò le osservazioni sulla luna di Galileo nell'affresco dell'*Assunzione della Vergine* sul soffitto della cappella di Santa Maria Maggiore. Ma cosa fa di un'immagine un oggetto significativo nel processo di apprendimento, non è piuttosto, l'immagine, puro mezzo di comunicazione fine a se stessa? Cosa garantisce che sia significativa? In effetti, è molto difficile pensare alle immagini come mezzo efficace e unico, eventualmente, per comunicare concetti scientifici, ciò è dovuto al fatto che la nostra è una società essenzialmente verbo centrica. Eppure se provassimo a spiegare o proporre il concetto della molecola del DNA attraverso le sue definizioni, questo, apparirebbe molto arduo senza l'utilizzo dell'immagine di Watson e Crick della doppia elica. L'uso delle immagini e, in generale, della multimedialità e della tecnologia, che si innestano dentro spazi di vita sempre più ampi, scardina gli "assoluti" della pedagogia. Non è necessario sapere parlare sulle immagini spiegarle e, secondo il linguaggio della pedagogia ufficiale, decodificarle; le immagini, in generale, le comunicazioni visive, non hanno bisogno di grammatiche o storie poiché parlano anche a chi non sa parlarne (Maragliano, 2007). Esistono poi particolari ambiti scientifici, in cui, utilizzare le immagini per comunicare i concetti risulta indispensabile; cosa sarebbe stata la teoria del caos senza il famoso attrattore a forma di farfalla di E.N. Lorentz? Proprio in tale ambito si può verificare l'efficacia pedagogica della simulazione, della visualizzazione scientifica, che fornisce, se non proprio contenuti e concetti, sicuramente, una forma più concreta, più reale del fenomeno fisico preso in esame. Vedremo in seguito come l'uso della visualizzazione scientifica delle traiettorie caotiche possa risultare molto efficace per l'apprendimento, prendendo in esame un software utilizzato nelle sperimentazioni didattiche che consente la creazione di rappresentazioni auditive e visuali delle traiettorie caotiche.

CAPITOLO 3. METODI E MEDIA PER LA DIVULGAZIONE DELLA SCIENZA

*"Non c'è un vedere che non sia anche un guardare,
né un sentire che non sia anche un ascoltare;
e il modo in cui guardiamo e ascoltiamo
è plasmato dalle nostre attese, dalla nostra posizione
e dalle nostre intenzioni."*

Robert Woodworth

(Reinforcement of perception, in American Journal of Psychology, 1947)

Dalle pratiche pedagogiche tradizionali fino ai più recenti dispositivi di e-Learning è necessario, per comprendere meglio i metodi pedagogici, introdurre le basi delle teorie dell'apprendimento. La psicologia può essere considerata come la disciplina delle teorie dell'apprendimento, poiché da decenni (dagli inizi del 1900) fornisce e analizza risultati e concetti fondamentali. Le teorie psicologiche sulle quali si fondano le teorie pedagogiche, come sostiene Gérard Barnier "contribuiscono a rinnovare i metodi di insegnamento e delle pratiche di apprendimento" (Barnier, 2009). Ciò, prosegue, non significa che la psicologia dovrebbe indicare agli insegnanti come insegnare. Non esiste alcun rapporto di relazione causa-effetto tra le teorie psicologiche e le pratiche didattiche, le prime non sono prescrittive per ciò che riguarda le pratiche di insegnamento. E così anche bisogna eliminare l'ambiguità sul fatto che le teorie dell'apprendimento non sono prescrittive nei confronti delle pratiche di insegnamento. C'è dunque bisogno di concepire una visione più ampia della psicologia come risorsa che può fornire strumenti, concetti e modelli utili agli insegnanti per gestire meglio la loro pratica professionale, fornendo maggiore consapevolezza sul modo in cui gli studenti imparano.

3.1 Teorie dell'apprendimento

Di seguito prenderemo in considerazione le teorie psicologiche sulle quali si fondano le teorie pedagogiche, insieme ai rispettivi fondatori.

3.1.1 Il comportamentismo (Behaviorismo)

E' un approccio sviluppato nel 1913 dalla penna dello psicologo americano John Watson, le cui idee condussero a una "rottura" nel campo della psicologia. Da allora

infatti questa fu elevata al rango di scienza oggettiva. La nozione di "comportamento" divenne allora una nozione di riferimento. Si tratta dell'insieme delle reazioni adattative oggettivamente osservabili, che un organismo innesca in risposta a degli stimoli, anch'essi oggettivamente osservabili provenienti dall'ambiente nel quale vive. La psicologia comportamentista, come egli stesso afferma, non deve essere vista come una mera succursale sperimentale delle scienze naturali. Il suo scopo teorico è la predizione e il controllo del comportamento. La psicologia deve essere intesa non come studio della coscienza, ma come studio del comportamento. E' sempre Watson ad affermare che l'idea dell'introspezione come l'unico metodo a disposizione della psicologia è sbagliata che e, pertanto, non è necessario ricorrere a fenomeni coscienti (Watson, 1913). Per i behaviorismi, l'apprendimento è un cambiamento di comportamento. L'idea centrale è che non esista una realtà oggettiva esterna che noi apprendiamo attraverso i nostri sensi. Esiste un apprendimento nel momento in cui l'individuo dà una risposta corretta (manifesta un comportamento previsto) a un dato stimolo. I comportamenti sono determinati dalle condizioni ambientali, poiché i behavioristi ritengono che l'essere umano sia un essere passivo, e che sia sufficiente manipolare le condizioni ambientali per ottenere i comportamenti voluti (Doré *et al.*, 1998).

Dal termine inglese *behaviour*, appunto, comportamento, il comportamentismo è anche detto *behaviorismo* e, come già accennato, privilegia l'uso del metodo sperimentale per studiare il comportamento (risposta) in relazione all'ambiente (stimolo). Il fondatore e il principale teorico del behaviorismo, Watson, si contrappose al predominio dei metodi soggettivi e introspettivi precedentemente usati in psicologia, per esempio, da Wilhelm Wundt. Watson non negava l'esistenza dei sentimenti, sosteneva tuttavia che essi non potessero essere oggetto di studio, in quanto non osservabili direttamente. Egli in realtà fu influenzato dagli studi di Ivan Pavlov sul condizionamento animale. Il fisiologo russo, Pavlov stabilì agli inizi del secolo che ogni comportamento dell'organismo è una risposta, governata da leggi precise, all'azione di un agente ambientale, famosa è l'esperienza del riflesso condizionato nel cane, realizzata nel 1927. Watson si spinse oltre formulando una serie di procedure sperimentali i cui risultati fossero statisticamente significativi, in modo da poter allineare la psicologia alle scienze naturali (fisica, chimica, biologia). Attraverso la teoria denominata "dello stimolo e della risposta", prese in considerazione tutti i comportamenti complessi dell'essere umano (emozioni, abitudini) costituiti da elementi fisiologici (muscolari ed endocrini) che potevano essere osservati e misurati, teorizzando, ad esempio, che anche le emozioni potevano essere considerate delle risposte fisiologiche a stimoli ambientali. Il Comportamentismo, diventato scuola dominante nella psicologia americana degli anni cinquanta, fu ulteriormente sviluppato anche a livello internazionale, grazie a ricercatori come Edward Tolman, Clark Leonard Hull e Burrhus Skinner, i quali, avvalendosi della ricerca sperimentale e non dell'introspezione, formularono nuove

teorie sull'apprendimento. La posizione di Skinner, nota come "behaviorismo radicale", differiva da quella di Watson in quanto ammetteva la possibilità di studiare con metodi scientifici anche alcuni comportamenti complessi come il linguaggio e la risoluzione di problemi per i quali era innegabile l'importanza di processi interiori, non direttamente spiegabili in termini di stimolo e risposta. Skinner sottolineò inoltre l'importanza degli stimoli ambientali nel produrre un particolare apprendimento, detto "condizionamento operante", in cui interviene il meccanismo psicologico da lui definito "rinforzo" (Canestrari & Godino, 1994). La posizione comportamentista relativa all'apprendimento sarà criticata in quanto insufficiente a spiegare le modificazioni spontanee del comportamento e, soprattutto, poiché non giustificerebbe la produzione di risposte insolite o di idee creative. Nello stesso periodo in cui Watson in America pubblicava il suo primo scritto, i Gestaltisti, in Europa costituivano un nuovo movimento che indagava i fenomeni percettivi. L'apprendimento attraverso le leggi dell'associazione, secondo i Gestaltisti, è solo una caricatura priva di senso dell'apprendimento reale, che è, a loro avviso, caratterizzato piuttosto dalla penetrazione e dalla comprensione del cuore di una situazione, dei suoi aspetti essenziali, della comprensione della natura e della struttura del materiale oggetto dell'apprendimento, e dall'effetto rinforzante in quanto soddisfacente. I Gestaltisti sostengono una teoria dell'apprendimento per intuizione o *insight*, in cui non si tratta di aggiungere qualcosa di nuovo a ciò che è già noto, ma di riorganizzare e di ristrutturare gli elementi cognitivi in un tutto significativo in maniera più complessa e consapevole. In tal modo la soluzione non viene colta gradualmente secondo un processo per prove ed errori, ma improvvisamente e con minore probabilità di dimenticare quanto è stato fatto proprio (Bilotta, 1999).

3.1.2 Il cognitivismo

Il cognitivismo è una filiazione diretta del comportamentismo in cui si attribuisce maggiore importanza all'elaborazione cognitiva. In particolare, si tende a modellizzare i processi di acquisizione delle conoscenze, della ricerca e dell'elaborazione dell'informazione. Intorno agli anni '50 si afferma la corrente cognitivista che si distingue nettamente dalla corrente behaviorista. Il termine designa "l'insieme delle attività e dei processi interni inerenti all'acquisizione delle conoscenze, all'informazione, alla memoria, al pensiero, alla creatività, alla percezione, come pure alla comprensione e alla risoluzione dei problemi" (Legendre, 1993). L'interesse focale è secondo i cognitivisti ciò che succede nella testa degli individui che apprendono. Le informazioni provengono dall'esterno e arrivano agli individui, attraverso i sensi, nella memoria sensoriale oppure vengono prima riconosciute e trattenute qualche secondo prima di essere trasmesse alla memoria a

breve termine (MBT) nell'arco temporale di una ventina di secondi, in seguito vengono immagazzinate nella memoria a lungo termine (MLT). Nel momento in cui un individuo deve produrre un comportamento deve ricercare tra le informazioni immagazzinate nella MLT, quelle pertinenti e deve riportarle nella MBT. Ciò che è importante, è la maniera in cui le informazioni vengono immagazzinate nella memoria. Per essere riutilizzabili, esse devono essere organizzate nella MLT. L'essere umano è, dunque, un elaboratore attivo di informazioni, simile a un computer e l'apprendimento si definisce come una modificazione all'interno delle strutture mentali dell'individuo. E' da rimarcare anche il fatto che il cognitivismo fa la propria comparsa pressoché nello stesso periodo del computer. Tra i maggiori esponenti del cognitivismo ricordiamo Norbert Wiener, matematico americano che durante la seconda guerra mondiale, partecipando alla progettazione di sistemi difensivi, lavorò sui problemi di comunicazione e di comando. Allargando le sue riflessioni alla neurofisiologia, alla regolazione biochimica e agli elaboratori, e fondò nel 1948 la cibernetica. Altro importante esponente fu Alan M. Turing, britannico matematico che elaborò tra il 1936 e il 1938, il concetto teorico di macchina per il calcolo "universale" (macchina di Turing) che simula le procedure di elaborazione delle informazioni al loro livello più analitico. A partire dal 1950, Turing si interessò di intelligenza artificiale che è una disciplina caratterizzata da un punto di vista proprio delle scienze umane che, tenendo conto della relatività dei diversi ambienti culturali ritiene che la realtà psicologica, socio-cognitiva sia il risultato di un insieme di interrelazioni tra il soggetto e il suo ambiente.

3.1.3 Il costruttivismo

Il costruttivismo propone tre principi fondamentali per la formazione: la conoscenza viene costruita dal discente e non è trasmessa o immagazzinata; l'apprendimento richiede l'impegno di un discente attivo che costruisce le proprie rappresentazioni grazie a delle interazioni con il materiale o le persone; infine il contesto gioca un ruolo determinante all'interno del processo di apprendimento. Vista l'importanza del contesto di apprendimento e le attività rivolte ai discente, sono dunque indispensabili contesti che integrino l'aspetto cognitivo, metacognitivo, affettivo e psicomotorio. Questo nuovo paradigma in educazione esige una rottura in termini di concezioni che vengono generalmente seguite in ciò che concerne l'insegnamento, l'apprendimento e i ruoli e le responsabilità delle insegnanti e degli insegnanti, al pari di quelle degli allievi (Tardif, 1998). L'apprendimento di nuovi comportamenti rappresenta lo strumento escogitato dall'evoluzione per assicurare l'adattamento superando i meccanismi innati. Il processo per il quale la struttura cognitiva si ritrova modificata in modo permanente consiste nell'apporto di conoscenze o di connessioni tra le conoscenze precedenti. Il costruttivismo si afferma

a partire dagli inizi degli anni '90. Esso vede l'apprendimento come un processo attivo di costruzione delle conoscenze piuttosto che un processo di acquisizione del sapere. Non esiste un apprendimento oggettivo, solo delle interpretazioni personali della realtà, ognuno crea le proprie interpretazioni che restano valide solo per un dato tempo; esse sono "percorribili" per un dato tempo e possiedono questa proprietà poiché esse si realizzano all'interno di una comunità che accetta le stesse basi e gli stessi valori. L'insegnamento assume la forma di sostegno a questo processo. L'insegnante e gli altri allievi guidano l'allievo verso la sua propria ricerca di senso. L'individuo cerca di comprendere le molteplici prospettive tramite le sue interazioni con il mondo esterno. Su più punti la posizione dei costruttivisti è simile a quella dei cognitivisti. L'apporto delle nuove tecnologie sembra aver dato al costruttivismo un nuovo slancio basato sul principio di auto-costruzione del sapere. Ognuno è in grado da casa sua di costruire la propria rete di conoscenze attive. Questa tendenza all'autonomia sposta dunque la responsabilità dell'apprendimento sulla tecnologia e sull'allievo, mentre l'insegnante gioca piuttosto il ruolo di un tutore a distanza. Tra i principali fautori del costruttivismo citiamo Jean Piaget, psicologo ed epistemologo svizzero fondatore dell'epistemologia genetica, si è dedicato a rendere conto dei meccanismi di formazione delle conoscenze, per comprenderne i progressi. Ha studiato in modo specifico lo sviluppo dell'intelligenza nel bambino, elaborando una teoria strutturale dello sviluppo per stadi. Il bambino attraversa diversi stadi: l'intelligenza sensorio-motrice, l'intelligenza prelogica o simbolica, l'intelligenza operativa concreta, l'intelligenza operativa formale. Secondo Piaget, questa sequenza è determinata geneticamente, ma dipende anche dall'attività del soggetto sul proprio ambiente. L'intelligenza si costruisce grazie a un processo di bilanciamento delle strutture cognitive, in risposta a sollecitazioni o costrizioni da parte dell'ambiente. Vi contribuiscono due azioni: l'assimilazione e l'accomodamento. L'assimilazione è l'azione dell'individuo sugli oggetti che lo circondano, in funzione delle conoscenze e delle attitudini acquisite dal soggetto. Ma vi è, all'inverso, un'azione dell'ambiente sull'organismo, denominata accomodamento, che attiva degli aggiustamenti attivi in quest'ultimo. Altro costruttivista fu Lev Semenovitch Vygotski, che si dedicò allo studio dello sviluppo delle funzioni mentali superiori. A causa della brevità della sua carriera scientifica e del ritardo con il quale la sua opera fu conosciuta fuori dall'Unione Sovietica (la sua opera principale fu tradotta solo nel 1956 sotto il titolo di Language and Thought), la sua influenza fu soprattutto postuma. L'opera di Vygotski verte sullo sviluppo mentale del bambino, l'educazione e la psicologia. Il suo contributo più significativo risiede senza dubbio nella concezione che propone del ruolo del linguaggio nello sviluppo mentale. Egli pone in primo piano il linguaggio detto egocentrico, linguaggio che ha una funzione non comunicativa e costituito da monologhi che accompagnano l'azione. Il ruolo svolto da questo tipo di linguaggio nel bambino è molto rilevante dai cinque o sei anni, come Piaget aveva già rimarcato. Tuttavia, mentre in quest'ultimo tale linguaggio scompare

per fare posto a un linguaggio socializzato con funzione comunicativa, Vygotski ritiene che esso si conservi, ma interiorizzandosi, e che, sotto tale forma, sia uno strumento molto importante nella regolazione dell'attività: orienta quest'ultima e permette di accedere a una modalità di regolazione di tipo intenzionale.

3.2 Le teorie dell'apprendimento nella sperimentazione pedagogica

Come le teorie psicologiche del behaviorismo, del cognitivo e del costruttivismo hanno influenzato la strutturazione dei diversi metodi pedagogici è argomento di questa breve trattazione. È difficile stabilire i confini nei metodi in uso, poiché spesso, in linea a una maggiore personalizzazione dell'approccio pedagogico, si evidenzia un percorso multi direzionale di formazione. La pedagogia differenziata conduce opportunamente il formatore ad adattare il proprio approccio pedagogico al profilo di apprendimento dello studente, utilizzando diverse metodologie in funzione degli studenti a cui si rivolge. Un metodo è la cosiddetta pedagogia per progetto. Questo tipo di approccio permette di chiarire gli obiettivi che ci si è prefissati per poterlo attuare, dando un senso alle attività che vengono intraprese. Il progetto del discente, quello del formatore e quello dell'istituzione devono mettersi in relazione. Altra metodologia è quella definita pedagogia per obiettivi (PPO). Benjamin Bloom ha formulato per primo i principi della PPO o "pedagogia della padronanza", proponendo una tassonomia di comportamenti cognitivi e affettivi. Contrariamente ai programmi determinati in anticipo, gli obiettivi pedagogici permettono di definire un'attività precisa del discente e di precisare i criteri che serviranno alla valutazione. Il suo interesse è quello di focalizzarsi sul discente e, rimettendo in causa le forme tradizionali di valutazione, essere completamente orientato verso il successo: l'analisi degli obiettivi è stata di gran voga negli anni '70. Tuttavia, la PPO è oggi criticata per gli eccessi di cui è stata oggetto. Altro metodo da citare è la pedagogia differenziata. In base a questa, lo sviluppo delle ricerche sulla costruzione dei saperi e della personalità, sugli stili cognitivi, sulla relazione educativa, ha messo in rilievo la complessità dell'atto dell'apprendimento e la diversità degli individui di fronte a tale processo. L'eterogeneità degli allievi spinge a proporre loro delle strategie di apprendimento diverse. La pedagogia differenziata varia le pratiche didattiche, le forme di lavoro, i supporti utilizzati e, rispettando la singolarità di ciascuno, permette una forma di individualizzazione dei percorsi degli allievi all'interno degli iter scolastici. I metodi cosiddetti attivi (o nuovi metodi) sono nati con il tentativo di comprendere e aiutare i bambini con difficoltà. Grandi pedagoghi hanno partecipato alla loro realizzazione: Decroly, Claparède, Ferrière, Freinet, Dewey, Cousinet, Rogers. I valori essenziali sono: l'interesse spontaneo dei bambini, che genera la motivazione allo sforzo; la loro libertà di invenzione, di creazione, di iniziativa; queste libertà non devono essere confuse con un lassismo del maestro o degli allievi; la considerazione

delle componenti affettive e sociali nello sviluppo degli individui. La componente sociale è stata molto presente nella pedagogia di Freinet, soprattutto perché ha visto nella portata sociale delle ricerche o delle produzioni dei bambini un potente motivo di apprendimento: la corrispondenza scolastica, la stampa a scuola e le biblioteche di lavoro corrispondono a questa convinzione. Le metodologie pedagogiche attuali sono emerse lentamente, nell'arco temporale di mezzo secolo, a partire dai lavori di ricerca nella psicologia, e più precisamente nella psicologia cognitiva. Il loro orientamento scientifico è innegabile; e le nozioni chiave che le caratterizzano contrastano sia le metodologie dette tradizionali e metodi detti nuovi, anche se non rinnegano né l'idea dello sforzo, né quella della motivazione. Tra le nozioni più caratteristiche, occorre notare: la nozione di rappresentazione che tiene conto delle immaginazioni e dei concetti embrionali, a partire dai quali si elabora la conoscenza e che impone ai maestri di partire da ciò che l'allievo sa, o crede di sapere; la nozione di awareness o presa di coscienza, traduzione approssimativa del termine, che crea nel soggetto discente una sorta di "chiarezza" cognitiva che lo aiuta nel suo cammino di apprendimento; la nozione di contratto pedagogico che finalizza lo sforzo del discente in rapporto a un fine determinato, e assegna un termine temporale dello sforzo; la nozione di contratto didattico, che trascende il precedente, e descrive la situazione pedagogica triangolare nella quale si trovano il professore, l'allievo e il sapere, o il professore, la classe e il sapere. I ruoli di ciascuno, costitutivi della relazione pedagogica, devono essere conservati ineluttabilmente, in assenza di ciò non vi è alcun apprendimento; il concetto di conflitto, sia che si tratti di conflitti socio-cognitivi, quello che oppone una concezione a quella di altri e pone allora la questione della verità, o, più modestamente, della giusta soluzione, o del conflitto intellettuale, quello che lascia il soggetto temporaneamente disarmato rispetto al problema da risolvere.

Il ragionamento ipotetico-deduttivo è la capacità che ha l'allievo di dedurre delle conclusioni a partire da pure ipotesi e non solo da un'osservazione reale. Si tratta di un processo di riflessione che tenta di formulare una spiegazione di tipo causale di un fenomeno qualunque. L'allievo che utilizza questo tipo di ragionamento comincia con il formulare un'ipotesi e prova in seguito a confermare o confutare la propria ipotesi. La procedura deduttiva consiste nel tenere per veritiera, provvisoriamente, questa prima proposizione che definisce in logica il predicato e a trarne tutte le conseguenze logicamente necessarie, cioè a ricercarne le implicazioni. Se la proposizione P è relazionata a Q, cioè la proposizione P implica necessariamente Q, non esiste caso in cui si possa enunciare P senza Q, come per esempio l'essere umano e la sua mortalità. Questo esempio è quello di un'implicazione stretta, come quella che si può ritrovare nel sillogismo. Piaget ha dimostrato che il ragionamento ipotetico-deduttivo si elabora progressivamente nel bambino, a partire dai 6 – 7 anni, e che questo tipo di ragionamento non viene utilizzato sistematicamente, partendo da una funzione preposizionale stretta a cominciare dagli 11-12 anni.

Il ragionamento induttivo è altresì un'operazione mentale che consiste nel prendere come punto di partenza dei fatti specifici reciprocamente associati e di trarre da tali associazioni una proposizione generale che enuncia la probabilità che tali associazioni si manifestino in altre occasioni (Fortin, 1996). E' possibile anche definire il ragionamento induttivo quale metodo di acquisizione delle conoscenze a partire da osservazioni di casi particolari che si generalizzano a un insieme più ampio di casi. Il ragionamento induttivo è quello che conduce a una conclusione generale a partire da una struttura specifica. Il ragionamento deduttivo è un'operazione mentale che consiste nel prendere come punto di partenza una proposizione di portata generale e a trarne un'ipotesi che verte su casi particolari (Fortin, 1996). E' possibile inoltre definire il ragionamento deduttivo quale metodo di acquisizione di conoscenze a partire da un ragionamento fondato su delle premesse e che scaturisce in una conclusione. Il ragionamento deduttivo è quello che permette di stabilire ciò che è vero per una popolazione, è vero per un campione di soggetti che proviene da tale popolazione. Nella formulazione di una teoria, si parte da un'osservazione o dalla raccolta di certi fatti o dati che hanno un significato per il problema allo studio. In seguito, si riprendono i dati raccolti o i fatti osservati e le loro mutue relazioni per spiegare come e perché i fenomeni sono associati gli uni agli altri e per essere in grado di anticipare gli avvenimenti e loro relazioni. Nella verifica di una teoria attraverso il metodo o il ragionamento deduttivo, si inizia con la teoria e si passa a osservazioni specifiche che consentono di spiegare e di predire le relazioni esistenti tra i fatti, ciò che si definisce ipotesi. Infine, il ragionamento adduttivo è un ragionamento logico che si serve di tre forme principali di inferenza: la deduzione, insieme al sillogismo, l'induzione, che permette di costruire una relazione da verificare tramite l'esperienza, e l'adduzione che, poco conosciuta, viene particolarmente stimolata dall'uso delle reti digitali. Per Charles Peirce, cui si deve questa nozione, l'adduzione o inferenza adduttiva è in qualche maniera l'anticamera dell'induzione e della deduzione. Si produce nel momento in cui cerchiamo la spiegazione di un fatto, di una circostanza, che noi troviamo molto curiosa. Supponiamo, quindi, che tale circostanza sia un'applicazione della regola generale, che ci sforziamo di costruire. E noi facciamo nostra questa supposizione. Questa regola arricchisce la riserva delle nostre strutture cognitive. Tale processo invita a esplorare l'utilizzo che ne facciamo nella costruzione del sapere, che sia informale o educativa. Questo ragionamento appare evidente nelle situazioni di giochi informatizzati. Grazie all'adduzione, l'utilizzatore costruisce delle ipotesi, da cui desume dei sistemi esplicativi. Nessuna modalità di utilizzo si accompagna a quest'ultimi, sia che si trovino su CD-Rom o che siano accessibili online. La lettura risulterebbe spossante, poiché implica spesso centinaia e se non migliaia di regole. E' preferibile scoprirle per tentativi all'inizio, poi attraverso un'esplorazione sistematica, rimarcando la circostanza che troviamo curiosa e tentando di inferire la regola che la produce.

3.3 Innovazioni nella didattica: fondamenti teorici e ruolo delle tecnologie

Negli ultimi anni, l'applicazione delle tecnologie nell'insegnamento è diventato sempre più diffuso. In particolare, le tecnologie telematiche hanno consentito di realizzare processi di apprendimento collaborativo anche a distanza, dando luogo a modelli di insegnamento/apprendimento in cui:

- la comunicazione è bidirezionale e interattività;
- lo scambio di informazioni è libero;
- la circolazione di idee avviene in maniera sincrona e asincrona.

Alcune applicazioni sono dedicate anche alla sperimentazione di momenti di produzione di artefatti artistici e non, in cui lo spazio telematico diventa luogo di scambio e collaborazione artistico-creativa. Studenti e docenti possono impegnarsi in attività insieme ad altri studenti remoti, nello stesso paese o in altri paesi; accedere a informazioni e condividerle; costruire la propria conoscenza in una dimensione non più locale, ma virtualmente planetaria e scoprire che certi problemi possono essere meglio risolti lavorando insieme. Come già puntualizzato, questo interesse per la cooperazione non è limitato al settore della didattica, ma si colloca nel quadro più generale dell'interesse nell'ambito delle attività di tipo intellettuale e cognitivo. Grazie alla cooperazione possono essere privilegiate forme di apprendimento legate al lavoro di gruppo, attività di ricerca, richiesta di informazioni, condivisione di esperienze, confronto culturale, cooperazione al raggiungimento di obiettivi comuni, solo per citare alcune possibilità. Il termine "apprendimento collaborativo" fa riferimento a un metodo educativo attraverso il quale gli studenti, a vari livelli di prestazione, lavorano insieme verso un obiettivo comune; non è soltanto un'attività socialmente distribuita ma anche un'attività in cui gli obiettivi di ciascuno dipendono da quelli intrapresi e condivisi dagli altri partecipanti alla situazione di apprendimento. I concetti di apprendimento collaborativo, apprendimento a distanza e apprendimento aperto sono nati certamente in epoche precedenti la diffusione della telematica, ma hanno potuto trovare in essa la base concreta per realizzare arricchimenti e sviluppi legati soprattutto alla possibilità di operare nell'ambito di gruppi virtuali di individui che interagiscono a distanza. Internet consente il libero scambio di informazioni, la circolazione di idee, l'interazione fra soggetti (in modalità sincrona e asincrona) e fa sì che la parola scritta, considerata a scuola uno strumento per comporre testi sottoposti poi al giudizio del docente, diventi mezzo di comunicazione interpersonale, di confronto di idee ed esperienze e, in ultima analisi, strumento sociale. Quanto finora espresso trova fondamento in teorie psicopedagogiche, che oggi, grazie all'utilizzo di reti telematiche e di sofisticate tecnologie applicate all'insegnamento/apprendimento, possono raggiungere anche a distanza modelli di realizzazioni che in passato non erano prevedibili. L'interesse per l'apprendimento collaborativo è suggerito da orientamenti culturali che sottolineano

il valore educativo delle interazioni fra gli attori nei vari contesti; la circostanza è tale per cui gli studenti, a vari livelli di prestazioni, lavorano insieme verso un obiettivo comune. Collaborare attraverso il computer vuol dire lavorare insieme, il che implica una condivisione di compiti e un'esplicita intenzione di aggiungere valore per creare qualcosa di nuovo o differente attraverso un processo collaborativo. Un'ampia definizione di apprendimento collaborativo potrebbe essere l'acquisizione da parte degli individui di conoscenze, abilità o atteggiamenti che sono il risultato di un'azione di gruppo o detto più chiaramente, un apprendimento individuale come risultato di un processo di gruppo (Kaye, 1994). Molte scuole psicologiche concordano nel considerare il sistema sociale come una rete di relazioni che costituisce lo spazio elaborativo delle cognizioni. Oggi questo spazio non può più essere inteso in termini materiali: lo sganciamento dell'interazione dalla compresenza fisica degli interlocutori è ormai sancito dalla strutturazione di contesti interattivi caratterizzati da spazi virtuali telematici. Fondamentalmente oggi è possibile affermare che per la costruzione e la realizzazione delle funzioni cognitive nell'interazione, oltre alla compresenza fisica è attuabile anche una compresenza telematica. Di seguito vengono riportate sinteticamente alcune delle teorie più significative sul valore psicopedagogico dell'apprendimento collaborativo; queste teorie sono nate prima dello sviluppo delle reti telematiche, tuttavia oggi sono facilmente applicabili anche per la realizzazione di processi di apprendimento collaborativo in rete. Il ruolo dell'interazione con gli altri nello sviluppo cognitivo, in particolare con gli aspetti socioculturali dell'ambiente fu messo in evidenza soprattutto da Vygotskij, rappresentante della scuola psicologica sovietica. Il principio generale che egli formula come "legge genetica generale dello sviluppo culturale" è che ogni funzione psichica superiore compare nello sviluppo dell'individuo due volte, dapprima come attività collettiva, sociale, e poi come attività individuale. Pertanto, ciò che è mentale, interno, è stato preceduto da una fase esterna, sociale, e le relazioni tra le persone sono geneticamente prioritarie per tutte le funzioni superiori. Il processo di sviluppo della conoscenza avviene prima come attività esterna, a seguito delle collaborazioni sociali e in un secondo momento, attraverso una serie di trasformazioni elaborate attraverso un processo interno. Vygotskij indica una serie di mezzi di mediazione per sviluppare apprendimento, come le mappe, gli aiuti mnemonici, tuttavia la sua attenzione è principalmente rivolta al linguaggio, cioè a uno dei principali strumenti per la costruzione di conoscenza e per il passaggio e l'interiorizzazione delle operazioni cognitive da un livello di funzionamento interpsicologico a quello intrapsicologico. Il ruolo attribuito al linguaggio, ai suoi molteplici usi e alle sue varie funzioni è assolutamente centrale: con esso è possibile mettere in ordine pensieri, percezioni ed azioni che riguardano la realtà, dunque uno strumento di comunicazione e di transazione con gli altri. Il linguaggio è allo stesso tempo un'attività sociale e una mediazione interna, rappresenta un modello per ogni apprendimento, è il mezzo sociale del pensiero, in due sensi: come prodotto

dell'evoluzione storico-culturale, e in quanto presente nelle dinamiche di interazione sociale tra individui. Tratto fondamentale dell'apprendimento è quello di costituire una zona di sviluppo prossimale, cioè di richiamare alla vita, di risvegliare ed animare, un'intera serie di processi di sviluppo interiori che sono in quel dato momento possibili per lo studente soltanto nell'ambito della comunicazione con il docente e della collaborazione con i compagni, ma che una volta interiorizzati, diverranno una conquista interiore del soggetto. Anche Jean Piaget riconosce il ruolo determinante delle relazioni sociali nello sviluppo cognitivo; ma a differenza di Vygotskij che colloca l'uomo fin dall'inizio nel sociale, la linea di sviluppo va dall'individuale al sociale. Piaget (1926) sostiene che la conoscenza sociale convenzionale - linguaggio, valori, regole, moralità, e sistemi di simboli - può essere appresa soltanto interagendo con gli altri. L'interazione tra pari o coetanei è importante per lo sviluppo del pensiero logico-matematico, per favorire il graduale superamento dell'egocentrismo infantile e per fornire una verifica significativa della validità delle sue costruzioni logiche. "La comunicazione produce il bisogno di verificare e confermare i pensieri, un processo che è caratteristico del pensiero adulto" (Piaget, 1923). Riferendosi allo sviluppo, Piaget riconosceva un ruolo di primo piano ai fattori sociali sia ad un livello interpersonale, che storico-culturale: "la vita sociale è una condizione necessaria per lo sviluppo della logica". Verso la fine della sua vita, ritornando sullo stesso tema, affermava: "l'aspetto più significativo del modo in cui la conoscenza viene costruita... è che essa presenta una natura collettiva ed individuale". Per Bruner l'apprendimento è un processo di costruzione sociale di conoscenze e competenze, ovvero "un ingresso nella cultura tramite il sostegno dei membri più competenti" (Bruner, 1986), in un contesto sociale si apprendono anche le procedure culturali di ragionamento. La priorità delle relazioni sociali e l'onnipervasiva presenza degli strumenti culturali, ambedue mediatori tra il soggetto ed il mondo, sono riconosciute dall'autore che, assumendo una prospettiva dichiaratamente evolutiva, afferma: "noi non costruiamo una realtà semplicemente sulla base di incontri privati con degli esemplari di situazioni naturali. Perlopiù, il nostro approccio al mondo è mediato dalle nostre relazioni con gli altri". Il funzionamento individuale è parte di un più ampio funzionamento sociale "situato" in uno specifico contesto definito anche dalla presenza di altri ed è "distribuito" non solo fra i soggetti partecipanti alla situazione, ma anche fra gli artefatti cognitivi e tecnologici di cui ciascuno si serve: gli archivi del computer, le fonti di informazione che si possono consultare, i libri, ecc. (Bruner, 1990). Con la nozione di "amplificatori culturali", Bruner intendeva far riferimento alla gamma variabile di strumenti che è offerta dalle diverse culture e che sostiene lo sviluppo cognitivo. Essi modificano la struttura ed il funzionamento della memoria e sono sociali in un doppio senso: il prodotto di un'evoluzione socio-culturale e una "presenza" operante nella dinamica interattiva tra individui. Sostanzialmente, Bruner evidenzia come l'apprendimento sia un processo costruttivo basato sull'elaborazione dell'informazione, sull'uso di strategie e sulla verifica di ipotesi, in un contesto che

non può prescindere dalla collaborazione tra i partecipanti. Inoltre, egli crede che i metodi di apprendimento collaborativo migliorino le strategie di risoluzione dei problemi, poiché gli studenti possono confrontarsi con le varie interpretazioni e prospettive di una data situazione. Il supporto dei pari consente al discente di interiorizzare sia le fonti esterne di conoscenza, che le abilità di pensiero critico, e di convertirli in strumenti per il funzionamento intellettuale. John Dewey, espresse già quasi ottant'anni fa la necessità di un cambiamento radicale nel campo educativo, ovvero il passaggio da un modello basato sull'insegnante ad uno centrato sul discente, valorizzando nel contempo l'interazione tra pari. "Ogni individuo è cresciuto e sempre dovrà crescere, in un medium sociale. Le sue risposte diventano intelligenti o hanno senso, semplicemente perché egli vive ed agisce in un medium di significati e di valori condivisi..." (Dewey, 1916). "L'ambiente sociale è realmente educativo nei suoi effetti proprio nel grado con cui un individuo condivide o partecipa a molte attività congiunte. Nel condividere forme di attività associate, l'individuo si appropria degli scopi per cui le svolge, diventa familiare con i suoi contenuti e metodi, acquisisce le abilità necessarie e si riempie del suo spirito emotivo". E' evidente la preoccupazione di Dewey rispetto alla spaccatura tra l'esperienza diretta e l'apprendimento che si verificava nelle scuole del suo tempo, una preoccupazione che si ingigantisce nella realtà di oggi. Grazie ad Internet, lo studente può trovarsi nella situazione di avere nella propria casa ambienti di apprendimento più ricchi di quelli che si possono trovare nelle scuole e nelle università tradizionali. Il cambiamento prospettato da Dewey in materia di apprendimento si basa sulla necessità di ridurre la distanza tra vita nella scuola e fuori della scuola. Egli sottolinea come la realizzazione di un apprendimento efficace non può prescindere dall'esperienza concreta caratterizzata dallo scambio creativo e costruttivo di informazioni. Importante ed estremamente attuale è il concetto di tecnologia collaborativa in quanto strumento che consente agli individui di impegnarsi congiuntamente nella produzione e condivisione di conoscenza. Una tecnologia collaborativa vera e propria è quella che consente ai partecipanti di trasformare un'esperienza condivisa carente di chiare opportunità di intervento, in un'esperienza che può essere gestita dalle comunità di appartenenza dei partecipanti medesimi; una tecnologia collaborativa è uno strumento che stimola lo scambio di saperi. Anche per le moderne teorie costruttiviste, l'apprendimento è un'attività che si connota come collaborativa e attiva. Alla partecipazione e all'interazione con l'ambiente circostante viene attribuito un ruolo di primo piano. Secondo queste teorie gli ambienti di apprendimento dovrebbero essere strutturati in modo da coinvolgere gli studenti nel processo di costruzione di conoscenza e grazie a queste teorie sono state individuate quattro dimensioni per l'implementazione di tali ambienti:

- 1) Contesto.
- 2) Costruzione.
- 3) Collaborazione.

4) Conversazione.

Il contesto dovrebbe presentare caratteristiche tali da renderlo simile a situazioni reali in cui i compiti vengono portati a termine naturalmente. Prestare attenzione al contesto significa restituire fluidità all'apprendimento evitando di cristallizzarlo in sequenze predeterminate (Brown *et al.*, 1989). Inoltre, poiché la costruzione della conoscenza è frutto del funzionamento cognitivo individuale, delle esperienze personali e delle loro interpretazioni (Jonassen, 1991), possiamo parlare di ambienti di tipo costruttivista, solo se questi consentono di creare uno spazio per comunicare e riflettere, piuttosto che imporre l'interpretazione di tali esperienze da parte degli educatori. La collaborazione tra studenti caratterizza tutto il corso del processo di apprendimento: si arricchiscono le opportunità di scambio e di confronto delle opinioni, nonché di revisione delle stesse; inoltre, è possibile costruire nuove strutture di conoscenza e modificare quelle già esistenti. Pertanto, la cooperazione è la pietra miliare delle attività di apprendimento secondo il modello costruttivista. Notiamo che la conversazione è una componente essenziale per l'elaborazione del significato, poiché la conoscenza è mediata dal linguaggio; all'interno dei gruppi facilita la negoziazione di piani e strategie per risolvere problemi specifici. I contributi forniti da questi autori supportano chiaramente la convinzione che l'ingrediente concettualmente più interessante e pregnante (sul piano educativo) dei modelli di insegnamento/apprendimento basati sulla telematica, è la dimensione cooperativa. Grazie a questa possono essere privilegiate forme di apprendimento tradizionalmente meno presenti nei sistemi scolastici: lavoro di gruppo, attività di ricerca documentale, richiesta di informazioni, condivisione di esperienze, confronto culturale, cooperazione per il raggiungimento di obiettivi comuni. Le esperienze di Reingold dimostrano l'esistenza di "comunità elettroniche", con individui che condividono informazioni favorendo un apprendimento collaborativo. Reingold chiama in causa l'idea che, essendo l'individuo sociale per natura tenderà di dar vita a una comunicazione basata sull'interrelazione, tramite qualsiasi oggetto capace di offrire un senso di interattività. Questo succede anche durante la condivisione di un database da parte di più utenti che, non passivi ma veri e propri produttori di informazione, trasformano il database stesso in una risorsa capace di stimolare l'indagine, la discussione e la costruzione sociale della conoscenza. Secondo F. Henri, una delle più comuni giustificazioni alla base dei progetti di applicazione della telematica al campo educativo e professionale è la convinzione che le reti di computer alimentano l'apprendimento collaborativo, l'osmosi sociale e la circolazione di idee determinando acquisizione e consolidamento di nuove conoscenze. In sostanza le reti creano classi virtuali e laboratori dove l'apprendimento ha luogo. Una volta che l'apprendimento risulta contestualizzato e situato, la conoscenza acquista significato e può essere elaborata a un livello cognitivo più profondo consentendo una comprensione più ricca. Alcuni compiti, con l'ausilio del computer, stimolano la crescita cognitiva mediante la produzione di

alcune forme di interazione sociale, spesso caratterizzate dalla risoluzione di alcuni conflitti cognitivi. La telematica diviene parte integrante del processo di apprendimento. In sostanza, le reti creano classi virtuali e laboratori (Harasim *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 1994); gli incontri virtuali offrono a insegnanti, studenti e a altri utenti, il contesto necessario per investire di significato l'informazione. Una volta che l'apprendimento risulta contestualizzato e situato, la conoscenza acquista significato e, di conseguenza, può essere elaborata a un livello cognitivo più profondo consentendo una comprensione più ricca. Infatti, un altro motivo che alimenta l'entusiasmo per i progetti delle reti telematiche nei vari campi di applicazione, è la constatazione che gli studenti ricorrendo a queste reti diventano capaci di contestualizzare e di situare cognitivamente i compiti di apprendimento. L'interazione sociale è considerata parte integrante del processo di apprendimento a distanza attraverso le reti telematiche. La cooperazione è la strategia più efficace per conseguire determinate finalità, per stimolare l'impegno di tutti i membri del gruppo a collaborare produttivamente, e per attivare dinamiche psicologiche positive che possono consolidarsi soltanto all'interno di un contesto collettivo. Studi sull'effetto dei processi sociali sulle attività cognitive di ordine superiore, hanno rilevato che alcuni compiti, con il supporto del computer, stimolano la crescita cognitiva mediante la promozione di alcune forme di interazione sociale, spesso caratterizzate dalla risoluzione di conflitti cognitivi (Clements *et al.*, 1992). La ricerca sull'apprendimento si sta orientando con decisione verso la valorizzazione dell'intreccio tra cognizione e interazione, aspetto che trova un riscontro immediato nelle attività svolte attraverso le reti di computer.

3.4 Tecnologie educative e sperimentazioni nella didattica

Le tecnologie educative non vanno intese come pura e semplice strumentazione didattica, ma come l'insieme di applicazioni risultanti del complesso sviluppo del processo pedagogico nel campo delle conoscenze disciplinari e interdisciplinari. Una valutazione significativa delle tecnologie educative deve avvenire a partire dai processi pedagogici a loro volta basati sulle teorie psicologiche dell'apprendimento. Numerosi sono i modi, le circostanze in cui, nel corso del tempo o in riferimento a diverse teorie, si è sviluppata la Tecnologia Educativa. In particolare, in Italia, il trasferimento di tecnologie negli ambiti didattici è stato per lo più limitato al trasferimento degli strumenti e non, più in generale, alla gamma di innovazioni scaturite dalle ricerche educative nel campo dell'istruzione. Per meglio comprendere la terminologia in uso si cercherà di distinguere i vari ambiti e le possibili applicazioni. La "Tecnologia degli Strumenti" è stata la prima dal punto di vista storico e ha posto l'attenzione sull'impiego, a fini educativi, di "modelli didattici", di "macchine per insegnare", di "giochi educativi", di "materiale audiovisivo", della televisione, di film e

del computer. L'introduzione alla "Tecnologia degli Strumenti" può essere facilitata se non è separata dallo studio della "Tecnologia dei Sistemi Educativi", che si occupa del modo in cui gli strumenti educativi possono essere utilizzati in maniera efficace nell'ambito di un particolare sistema scolastico. I temi di studio della "Tecnologia dei Sistemi Educativi" sono infatti quelli della pianificazione e dell'organizzazione dell'intervento educativo delle tecniche di diffusione dell'innovazione, per esempio l'insegnamento a distanza, la selezione di strumenti e i sistemi di insegnamento. In pratica l'"Educational Technology", diventa oggi "New Information Technology" tendendo a una progressiva fusione con una "Multimedia Technology". Le Tecnologie Educative, volte a introdurre tecnologie della comunicazione e dell'informazione nella scuola, aprono molte prospettive, non ultima quella di chiarire il compito della ricerca. In un campo segnato da continue evoluzioni come quello delle tecnologie dell'elaborazione e della comunicazione dell'informazione, le Tecnologie Educative non aspirano soltanto ad adeguare la scuola al mondo che cambia, ma al contrario tendono ad adeguarle al fine principale della scuola ossia innalzare la qualità e la quantità degli apprendimenti. Dunque, piuttosto che parlare di una scuola che insegue il mondo per adeguarsi, si dovrebbe riflettere, con consapevolezza e capacità di analisi, su una scuola che impiega gli artefatti e i concetti che emergono dal mondo tecnologico, adattandoli alle proprie necessità. I programmi di ricerca e i filoni derivati dalle Tecnologie Educative sono vari e differenti, qui di seguito ne sono elencati alcuni:

- come supporto all'istruzione tradizionale (uso di lavagna luminosa, slideshow, audiovisivi, a supporto delle lezioni frontali);
- come costruzione di ambienti d'apprendimento (gioco, micromondo, simulazione al computer, simulazione come costruzione di un contesto sociale);
- come mutamento epistemologico indotto dall'impiego di nuovi artefatti;
- come analisi delle trasformazioni indotte dai cosiddetti "nuovi media" nei processi di lettura/scrittura;
- come strumento per "adeguare" processi di lettura/scrittura alle caratteristiche cognitive umane (ipertesti, ipermedia).

Le teorie storiche della didattica che si affermano nell'ottocento e, a seguire, nel novecento portano con se una varietà di approcci didattici che si possono sintetizzare nel seguente elenco:

- idealistico-gentiliano in cui l'accento è posto sull'insegnamento;
- positivistico-sperimentale orientato all'elaborazione di tecniche altamente razionalizzate e sperimentalmente verificabili;
- l'attivismo di derivazione deweyana (individualizzazione, socializzazione, espressività);
- strutturalista-cognitivista, centrato sull'apprendimento come funzione della connessione delle strutture della mente alle strutture della disciplina;

- comportamentistica-tecnologico, in cui l'apprendimento è modificazione deterministicamente programmata del comportamento e la didattica diventa tecnologia dell'istruzione;
- costruttivista, per molti versi collegata alla categoria sociale e filosofica della complessità (Prellezo, 1995).

All'interno dei paradigmi teorici di riferimento sono stati privilegiati negli anni anche gli strumenti tecnologici a disposizione per la didattica, a tal proposito si deve considerare come sono notevolmente cambiate le prospettive. A cominciare dagli anni settanta i sistemi di ICAI (Intelligent Computer Assisted Instruction) e di ITS (Intelligent Tutoring Systems) si affiancarono progressivamente quelli di CAI (Computer Assisted Instruction) o CBT (Computer Based Training), ai quali si demandava interamente l'iniziativa dell'interazione didattica basata su un approccio di tipo tutoriale ed esercitativo. Con il termine tecnologie didattiche si indicano le tecnologie utilizzabili in ambito educativo e la loro storia generalmente si riferisce alla storia delle tecnologie informatiche. Il computer, infatti, ha sostituito nel metodo la sua funzione educativa aumentando in flessibilità e varietà. Basti pensare, per esempio, alle modificazioni subite con il passare del tempo dalle interfacce, che sono oggi basate molto più massicciamente su finestre, menù a tendine e icone, modalità che facilitano molto la comprensione di particolari applicativi e agevolano l'uso per chi non ha competenze tecniche. Attualmente lo scopo delle interfacce è quello di partecipare al processo di apprendimento-costruzione attraverso vari meccanismi. Un aspetto di particolare importanza delle interfacce è la "multimedialità", ricercata nel mondo delle tecnologie educative molto tempo prima che fosse disponibile dal punto di vista tecnologico. Con il termine "multimedialità" si fa riferimento quasi esclusivamente a una forma di comunicazione che, supportata da tecnologie informatiche, si fonda sull'impiego integrato di audio, video, testi e immagini statiche. La caratteristica fondamentale del mondo virtuale sintetizzata dal computer è quella di essere indistinguibile dal mondo reale e risale agli anni settanta il primo ingresso dell'intelligenza artificiale nell'ambito della didattica. Le due appendici dell'intelligenza artificiale di particolare interesse per la didattica sono: i Sistemi Esperti e gli Intelligent Tutoring System (ITS). I programmi didattici basati sui sistemi esperti non offrono risultati eccellenti perché tendono a riproporre, a chi impara, il punto di vista dell'esperto; per cui andrebbero utilizzati come strumento di supporto per chi deve svolgere un compito professionale. Al contrario gli ITS nascono dal desiderio dei ricercatori in intelligenza artificiale di trovare applicazioni su cui esercitare la propria disciplina. Generalmente gli ITS esistenti sono oggetti pre-costruttivisti, ed hanno lo scopo di trasferire una determinata conoscenza al discente, cercando di farlo nel modo migliore e rispettando i ritmi individuali di apprendimento, ma pur sempre trasferendo l'informazione nel tradizionale rapporto precettore-studente. Le tecnologie didattiche si sono quindi sviluppate secondo due linee distinte e parallele:

- la scienza dei mezzi utilizzabili nella didattica e l'applicazione alla didattica dei principi dell'istruzione programmata, "teaching machines" (ricerca di strumenti in grado di gestire percorsi individualizzati), CAI (inizia l'uso del computer con il cosiddetto Computer Assisted Instruction);
- l'*attivismo*: un approccio più sociale che mentale, cioè il fare la motivazione, la socializzazione, l'antiautoritarismo.

Nel 1954 Skinner pubblica: *"La scienza dell'apprendimento e l'arte dell'insegnamento"* segnando la nascita di un campo di studi basati sull'istruzione programmata e sull'utilizzazione di macchine nei processi di apprendimento. In Italia lo sviluppo di questo settore di ricerca, ebbe inizio negli anni settanta con la comparsa del termine *Tecnologie Didattiche*. A partire dagli anni ottanta in poi verrà messo profondamente in crisi il paradigma comportamentista-cognitivista questo perchè la struttura della mente è complessa e i modelli deterministici nella didattica così come nelle scienze non funzionano più. Spiega infatti Calvani: "L'attività della mente è descritta come un processo di elaborazione delle informazioni (...) ma via via si scopre che la mente non funziona sempre secondo il modello della rete semantica, (...) la conoscenza ha carattere distribuito, ovvero è situata nella mente, ma contestualmente distribuita negli strumenti esterni di supporto" (Calvani, 2000). Sempre negli stessi anni si afferma la didattica che dalla progettazione curricolare si sposta gradatamente verso l'allestimento di ambienti di apprendimento, si va affermando il paradigma del costruttivismo: la conoscenza deve essere intesa come esplorazione e costruzione attiva di significati (Prellezo, 1995).

Oggi, definitivamente tramontate le speranze di sistemi didattici in grado di sostituirsi interamente alla figura dell'insegnante, le nuove generazioni di strumenti, dagli ipertesti multimediali agli ambienti virtuali per la comunicazione basati su reti telematiche, dalla realtà virtuale alle costruzioni cibernetiche, fino ai videogiochi educativi, si collocano in quei contesti in cui anche il recupero degli aspetti comunicativi ed emotivi profondamente legati all'apprendimento umano diviene una componente essenziale (Eisenberg, 1986). Da quanto detto risulta, dunque, che le Nuove Tecnologie sono in grado di favorire modalità di pensiero complesse e articolate, di produrre ed elaborare nuovi significati, valori e letture del mondo, oltre che di fornire risposte diversificate a istanze che provengono da stili di apprendimento diversi.

3.5 Metodi di insegnamento/apprendimento in ambienti costruttivisti

Il costruttivismo si configura, oggi, come un complesso e variegato arcipelago teorico composto da psicologi, epistemologi, informatici, scienziati cognitivi, pedagogisti e ricercatori didattici. "Esso scaturisce dal crollo di un modello epistemico razionale, lineare, dell'idea che la conoscenza possa essere esaustivamente

rappresentata in particolare avvalendosi di modelli logico-gerarchico e proposizionali" (Calvani, 1998). L'istruzione non è causa dell'apprendimento, essa crea un contesto in cui l'apprendimento prende posto come fa in altri contesti, quali la famiglia o il gruppo dei pari, quindi: "l'insegnante non determina l'apprendimento. L'apprendimento è un processo in fieri, che può utilizzare l'insegnamento come una delle tante risorse strutturali. A questo riguardo, l'insegnante e i materiali d'istruzione diventano risorse per l'apprendimento in molti modi complessi" (Varisco, 2007). In altre parole, il docente può svolgere efficacemente e consapevolmente la sua funzione, solo riconoscendo l'illusorietà del rapporto diretto e causale tra insegnamento e apprendimento, giocando prevalentemente il proprio ruolo come "costruttore di ambienti di apprendimento", progettati intenzionalmente per consentire percorsi attivi e consapevoli in cui lo studente sia orientato ma non diretto. Gli ambienti di apprendimento sono dunque luoghi in cui "coloro che apprendono possono lavorare aiutandosi reciprocamente, avvalendosi di una varietà di strumenti e risorse informative in attività di apprendimento guidato o problem solving". Più numerose sono poi le strategie didattiche utilizzate, maggiori sono le opportunità di successo formativo, in quanto il "focus" è sulla personalizzazione del percorso. È opportuno tracciare una distinzione tra individualizzazione e personalizzazione. Per individualizzazione si intende l'insieme delle strategie didattiche che mirano a garantire a tutti i discenti il raggiungimento degli obiettivi del percorso formativo con differenti tempi, modi, condizioni: obiettivi che permangono identici per tutti i soggetti in formazione. Personalizzazione, invece, significa valorizzazione del potenziale che ciascuno esprime, valorizzazione del processo di apprendimento come condivisione piena e come piena capacità di porsi in una posizione collaborativa e non competitiva, di empatia e di partecipazione attiva ai processi di sviluppo che ogni individuo può esprimere. La personalizzazione, quindi, si propone di far raggiungere a ciascun discente una propria forma di eccellenza cognitiva, sviluppando pienamente le potenzialità e i talenti di ogni individuo e perseguendo obiettivi diversi per ciascuno (Guspini, 2005). In un'accezione più ampia, l'ambiente va inteso non solo come luogo fisico o virtuale, con la conseguente disposizione delle persone che ogni luogo strutturato induce, ma anche come luogo mentale, definito in coerenza con le caratteristiche del compito proposto, le azioni richieste, le modalità relazionali che vengono sollecitate, il tipo di valutazione, l'azione di sostegno del docente o del tutor (scaffolding) e il clima emotivo e cognitivo che permea il processo di apprendimento. In questo senso, il concetto di ambiente di apprendimento si sovrappone a quello di "setting", integrando, in un sistema organico e coerente, gli elementi fisici implicati nel processo di apprendimento, gli obiettivi che ci si è dati e le modalità attraverso le quali si pensa di raggiungerli. Allestire un ambiente di apprendimento significa quindi tenere sotto controllo vari aspetti interagenti, alcuni dei quali è importante vengano concordati con i discenti, in modo da renderli effettivamente responsabili e pienamente

partecipi alle pratiche di una comunità di apprendimento. Gli elementi che compongono un ambiente di apprendimento possono essere così schematizzati:

- ambiente fisico (spazi a disposizione, sistemazione funzionale dell'aula);
- tempi di operatività determinati e distribuiti;
- insieme degli attori che agiscono al suo interno e delle relazioni che determinano il clima relazionale e operativo;
- insieme di aspettative e interpretazioni concettualmente concordate;
- comportamenti, regole e vincoli condivisi;
- compiti e attività;
- strumenti o artefatti, oggetto di osservazione, lettura, argomentazione, manipolazione;
- la metacognizione attivata nei processi di apprendimento.

Numerosi autori hanno delineato linee guida per la progettazione di ambienti di apprendimento costruttivista, prevedendo o meno l'uso di tecnologie informatiche; un contributo di grande interesse ci viene offerto da Jonassen (Jonassen, 1994) che presenta un interessante modello di riferimento a scatola cinese, in cui si individuano sei macro-componenti di tipo strutturale, identificabili con le cornici dai contorni curvilinei, e tre relazioni, o funzioni di supporto, che corrispondono alle tre frecce che attraversano tutti gli strati della struttura (Fig. 3.1).

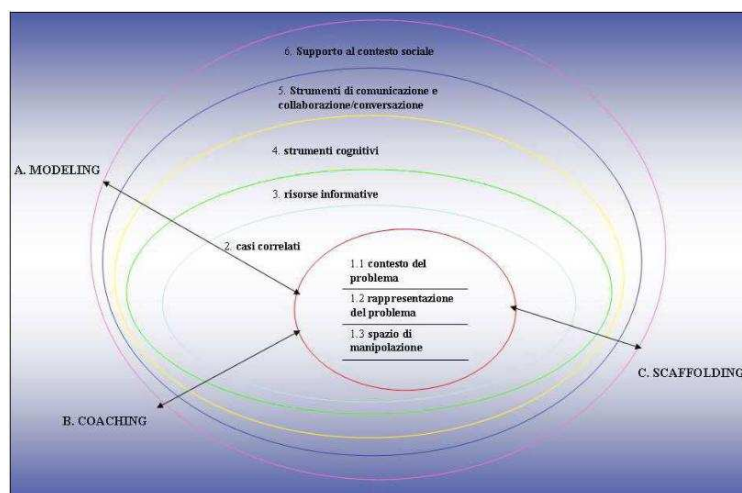


Fig. 3.1 Modello generale per la progettazione di ambienti di apprendimento costruttivista

I sei strati rappresentano le risorse, le funzioni e gli strumenti che permettono lo svolgimento di tutte le attività didattiche previste dal modello concettuale di riferimento, e corrispondono, procedendo dall'interno verso l'esterno, ai seguenti elementi:

1. l'oggetto concreto su cui si richiede di organizzare l'attività di tipo risolutivo, che può consistere in una situazione problematica, un progetto, un compito, una domanda; cioè nella progettazione del nucleo dell'ambiente problematico, intorno al quale si sviluppano tutte le attività di apprendimento successivo, è fondamentale prevedere la compresenza di tre "spazi":
 - lo spazio del contesto, in cui si colloca il problema, che definisce l'insieme dei fattori ambientali, sociali e lavorativi che lo determinano;
 - lo spazio della rappresentazione del problema, che deve stimolare, sfidare e coinvolgere il discente;
 - lo spazio della manipolazione, che consente allo studente di interagire, attraverso modifiche, prove ed esplorazioni concrete, con gli oggetti, reali o virtuali che siano, della sua investigazione conoscitiva.
2. un certo numero di casi correlati al problema;
3. le risorse di tipo informativo, messe a disposizione con la finalità di arricchire e sostenere le basi di conoscenza possedute;
4. gli strumenti per le attività di tipo cognitivo, denotati anche come strumenti per la costruzione della conoscenza; cioè i *mind tools* che sono al servizio della mente, ci aiutano ad amplificare la portata del nostro pensiero e a esternalizzare i nostri ambienti mentali, per rendere visibili i nostri modi di pensare; inoltre sono utilizzati per analizzare i problemi e rappresentano modelli per facilitare il processo di apprendimento e supportare i discenti nella creazione di nuove categorie mentali. Nel momento in cui utilizziamo i *Mind tools*, ci trasformiamo in progettisti della conoscenza e apprendiamo insieme alla tecnologia e non dalla tecnologia;
5. gli strumenti per la collaborazione e per la comunicazione;
6. il supporto per il contesto sociale, che consente l'adattamento allo specifico contesto in cui concretamente si opera nelle attività che prevedono le interazioni con l'ambiente.

Le fasi di *modeling*, *coaching* e *scaffolding* sono graficamente rappresentate da frecce bidirezionali che attraversano tutti gli elementi del modello, per evidenziare sia la bidirezionalità della relazione, sia la possibilità di ricorrervi in tutti i momenti di lavoro; si tratta di azioni per il supporto, il rinforzo e il controllo dei processi di ricerca, di riarticolazione dei significati o di riflessione critica che vengono attivati di volta in volta e che, in quanto strumenti di tutoring, sono disponibili a tutti i livelli della struttura e rispecchiano, nella loro modalità realizzativa, sia le caratteristiche operative, sia la complessità propria del livello nel quale agiscono. Da questi principi derivano alcuni modelli didattici costruttivisti che possono essere utilizzati come base

teorica per elaborare metodologie di insegnamento/apprendimento delle scienze e la progettazione e creazione di ambienti, virtuali e non, di apprendimento.

3.6 Edutainment

In uno dei più famosi libri di Johan Huizinga, "Homo Ludens", sin dal 1939, anno della sua pubblicazione, si propone il gioco come fondamento di ogni cultura nell'organizzazione sociale e si evidenzia il principio secondo cui, dal momento che anche gli animali giocano, il gioco rappresenta un fattore preculturale. Tale analisi ha influenzato e influenza ancora oggi diversi movimenti culturali. «L'Homo Ludens vorrà lui stesso trasformare e ricreare l'ambiente e il mondo secondo i suoi bisogni. L'esplorazione e la creazione dell'ambiente verranno allora a coincidere perché l'Homo Ludens, creando il suo territorio da esplorare, si occuperà di esplorare la propria creazione» (Careri, 2002). La cultura deve essere intesa come gioco poiché l'evasione ludica permea la cultura riuscendo a sottrarre l'uomo dal dolore della vita in un sogno atemporale. La seconda metà del secolo scorso segna l'inizio della corroborazione di tali concetti e lega lo sviluppo dei computers e di internet alla nascita di nuove espressioni di comunicazione. In particolare, intorno al 1960, si va affermando una nuova disciplina volta a sviluppare e affinare il processo di comunicazione tramite immagini, tra uomo e computer nasce un nuovo rapporto destinato a segnare profondamente l'evoluzione culturale degli anni futuri: la Computer Graphics. Le tecniche e le operazioni rese possibili dai calcolatori hanno avuto da allora una crescita esponenziale, dall'ascesa dalle rappresentazioni bidimensionali, inizialmente imprecise e a volte grottesche, fino agli attuali risultati di rendering tridimensionale altamente realistici che possono essere visualizzati oggi facilmente sui monitor. Gli scenari virtuali sono in grado di proporre con dovizia di particolari, sia ambienti reali, sia ambienti integralmente frutto di costruzioni fantastiche. Nel 1964 lo studioso Marshall McLuhan pronunciò una frase molto significativa: "Coloro che fanno distinzione fra intrattenimento ed educazione forse non sanno che l'educazione deve essere divertente e il divertimento deve essere educativo". Dopo più di quarant'anni questo messaggio si ritrova nel termine edutainment, traducibile in italiano come "imparare giocando". Nata dall'unione di due termini inglesi, educational (educativo, didattico) ed entertainment (intrattenimento, gioco), l'espressione edutainment si riferisce al carattere ludico delle attività didattiche non tradizionali, per le quali l'interazione con il computer, internet, i DVD diventano punto centrale del processo educativo. Giocando, i bambini conoscono le tecnologie più avanzate e, attraverso esse, apprendono le materie più tradizionali come la storia, la matematica e l'inglese. Su questa scia si sono moltiplicati negli ultimi tempi i luoghi dedicati all'edutainment, ne sono un esempio i numerosi science centre, solo per citarne alcuni. Si tratta di exhibit interattivi, spazi

espositivi in cui il visitatore sperimenta fenomeni naturali come l'eruzione di un vulcano, vede da vicino come è fatto un computer o uno studio televisivo. Utilizzando il computer il bambino gioca con strumenti multimediali e interattivi, guarda, ascolta interagisce, scopre e applica delle regole, impara a gestire diverse informazioni. Negli ultimi anni, l'approfondimento interdisciplinare, lo sviluppo tecnologico e i mutamenti nelle modalità e nei tempi di comunicazione hanno portato a un rapido rinnovamento della proposta educativa. Il termine anglosassone, edutainment, attorno al quale si è collocato un settore di ricerca che si amplia mano a mano di nuovi contenuti, suggerisce già da solo il suo significato. La filosofia di fondo racchiusa nelle intenzioni di chi coniò questo termine, Heyman, documentarista del National Geographic, era di coniugare l'educazione al gioco, creare cioè una forma multimediale che avesse lo scopo di educare e allo stesso tempo quello di divertire. Con l'edutainment si cerca di istruire o educare attraverso quelle che sono le forme d'intrattenimento più conosciute: i programmi televisivi, i video games, i film, la musica, i siti web, i software, applicazioni sul cellulare, gli esperimenti fisici o manipolatori, enfatizzandone la componente ludica. Caratteristica comune, che soprattutto negli ultimi tempi, sembra essere basilare è rendere accessibili tali strumenti da parte dell'utente ogni volta lo desidera e ovunque si trovi. Questo, più che un valore, sembra essere, dal punto di vista psicologico, un vero e proprio rischio, che potrebbe implicare non pochi e seri problemi di dipendenza, annullamento della personalità dell'utente dietro al mezzo tecnologico. Inoltre, non è affatto scontato che un'applicazione per quanto tecnologica e accattivante sia, implichi apprendimento, sicuramente, può servire da stimolo per potenziare esperienze sensoriali, ma perché ci possa essere anche formazione, si vedrà anche in seguito, devono essere rispettati determinati valori. L'interesse spontaneo di chi apprende, che genera la motivazione allo sforzo, la libertà di invenzione, di creazione risultano valori essenziali: l'esperienza vissuta e la creatività devono essere rivalutate, lo stesso Dewey parla di un rapporto stretto che può nascere tra matematica e creatività. Egli sottolinea come la realizzazione di un apprendimento efficace non può prescindere dall'esperienza concreta caratterizzata dallo scambio creativo e costruttivo di informazioni (Dewey, 1934). Lo stesso Bruner sostiene come l'apprendimento sia un processo costruttivo (Bruner, 1990), attraverso la manualità si possono scoprire i contenuti del mondo: gli oggetti stimolano il pensiero a formulare ipotesi, verificare empiricamente gli aspetti del problema costruendo passo dopo passo la propria conoscenza, inoltre, egli parla della necessità di coinvolgere chi apprende, in una sorta di piacere della scoperta che non è tanto legato al fare, quanto, alla possibilità di costruire operazioni logiche o mentali. Altro punto critico proviene, inoltre, dalla tecnologia telematica, da internet e dalla realtà virtuale che sostanzialmente può spostare l'attenzione dall'apprendimento, alla spettacolarità. Nelle parole di Marshall McLuhan (1999), si avverte la necessità di inserirsi dietro le quinte per esaminare e valutare in modo corretto tutti i processi che portano informazione: "Dal momento

che il nostro mondo è formato dalle tecniche, gli inconsapevoli, che le considerano come meri strumenti, sono dominati da queste, nella loro percezione del mondo: ogni medium ha il potere di imporre agli incauti i propri presupposti. Solo un artista autentico può essere in grado di fronteggiare impunemente la tecnologia, proprio perché è un esperto consapevole dei mutamenti che intervengono nella percezione sensoriale". Dall'uso banale di programmi di video scrittura o di videogiochi, gli utenti possono effettivamente essere inconsapevoli sull'uso dei mezzi tecnologici. Molte operazioni vengono svolte senza che si abbia conoscenza o consapevolezza e gli stimoli che si ricevono non siano altro che mera illusione del reale. Le tecnologie dedicate all'edutainment non solo propongono di realizzare l'illusione del reale, ma cercano di immergere, l'utente all'interno dei più diversi ambienti multimediali, virtuali, interattivi. Il modo di concepire la formazione viene a essere stravolto anche nei linguaggi e nelle terminologie: ambienti immersivi tridimensionali, augmented reality, virtual reality, interfacce multimodali o interattive, motion tracking sono solo alcune delle terminologie tecniche che si aprono a chi voglia approfondire tali tematiche. Lontani dalla possibilità di approfondire con la dovuta completezza tali argomenti, ci si vuole limitare ora solo alla presentazione di alcune possibili applicazioni di edutainment: la fruizione dei beni culturali, lo sviluppo di video giochi e la robotica. Per la fruizione dei beni culturali, il migliore ambiente di sviluppo percettivo-cognitivo per la rappresentazione e classificazione del paesaggio, sono i sistemi di realtà virtuale, tecnologie che permettono una vera e propria integrazione di processi psico-percettivi con straordinarie ricadute dal punto di vista psico-cognitivo. Un esempio rilevante nell'ambito di ricostruzioni d'interesse culturale è senz'altro rappresentato dal progetto di ricostruzione di Roma antica realizzato da Fischer. Una buona parte del lavoro archeologico viene dedicato alla ricostruzione virtuale dei monumenti poiché gli stessi si sono negli anni deteriorati e l'unico modo per renderli fruibili risulta essere la realizzazione di modelli 3D dei monumenti che si prestano ai più disparati usi: la conservazione in banche dati, la creazione di musei virtuali e il restauro digitale. Per quanto riguarda lo sviluppo di video giochi, in Giappone alcuni colossi come Nintendo, Sony, ecc. si contendono il settore dell'edutainment. Lo sviluppo delle abilità viene considerato parte integrante del prodotto. C'è da considerare un interessante aspetto legato allo sviluppo di queste tecnologie: non tutti i prodotti di edutainment sono focalizzati su contenuti puramente didattici. Molti puntano infatti sull'aspetto ludico piuttosto che sui contenuti, poiché purtroppo il potenziale educativo offerto dalle nuove tecnologie è spesso sacrificato al successo commerciale. Al contrario di ciò che si ritiene, le proposte educative in questi contesti hanno origini antiche, basti pensare, per esempio, all'origine dei "Lego Mindstorm" nati dal progetto "Logo" messo a punto al MIT da Seymour Papert nel 1967. Con questo progetto che sarebbe poi diventato celebre in tutto il mondo si voleva raggiungere l'obiettivo di incoraggiare l'apprendimento nelle fasce di età infantile seguendo la pratica del learning by doing.

Questa nuova tendenza ha portato a risultati pratici sorprendenti, soprattutto sugli studenti, e, grazie a una forte convergenza tra la tecnologia, il divertimento e il disegno (Wurman, 1984). L'edutainment è caratterizzato sostanzialmente da tre differenti aspetti distintivi: strettamente legato alla sperimentazione di nuove forme di apprendimento; il commerciale, legato al games design; rivolto alla fruizione dei beni culturali tramite ricostruzioni di realtà virtuale. Una società belga, Eduline, sta cercando di realizzare l'obiettivo di introdurre i bambini all'utilizzo di internet in modo istruttivo e divertente, guidandoli attraverso il mondo delle nuove tecnologie, somministrando loro lezioni on line. E-learning, giochi per computer e console, prodotti multimediali, istruzione, tecnologia, pubblicità sono diventati tutti possibili settori applicativi dell'edutainment. Si è detto che anche la robotica è stata coinvolta in sperimentazioni di questo tipo, e, si può affermare, alla luce dei risultati che le intuizioni sono state realmente vincenti e le aspettative non sono state deluse. È il caso a esempio del progetto europeo di robotica, basato sullo studio di un robot che apprende e riesce, da recenti ricerche condotte nei laboratori dell'Istituto Italiano di Tecnologie di Genova, a interagire efficacemente con bambini con deficit cognitivi, riuscendo a insegnare l'interazione tattile in virtuale, per rendere capace il bambino di replicarla nel reale. Tra gli stati mondiali, il governo giapponese è sicuramente tra quelli che maggiormente incentivano progetti esplicitamente indirizzati allo sviluppo di materiale culturale dedicato all'educazione e all'edutainment. Il settore dei robot da intrattenimento rappresenta tuttavia in generale un vasto e florido settore entro il quale esperti di software, computers, sensori, comunicazione e meccanica, possono testare, sviluppare e applicare le ultime tecnologie.

CAPITOLO 4. IL CAOS IN MATEMATICA E NELL'ARTE

*“Lo scienziato non studia la natura perché è utile,
ma perché ne prova piacere e ne prova piacere perché è bella.
Se la natura non fosse bella, non varrebbe la pena studiarla e la vita non
varrebbe la pena di essere vissuta.”*

Henry Poincaré

Negli ultimi anni concetti come complessità, disordine, caos hanno assunto un rilievo sempre più centrale in fisica, chimica e biologia, favorendo una rivisitazione radicale delle impostazioni di base di queste e altre scienze. Nei due secoli intercorsi tra la pubblicazione dei "Principia di Newton" e l'avvento della teoria quantistica, il determinismo fu il paradigma della scienza classica; il suo dominio si estese persino alle scienze sociali, quali l'economia, la sociologia o la psicologia sperimentale, e finì con l'imporsi anche nelle scienze biologiche. La possibilità di prevedere esattamente il comportamento dei sistemi osservati, l'ideale di Laplace, divenne il contrassegno caratterizzante dell'intero discorso scientifico. La visione newtoniana del mondo trova forse la sua espressione migliore nella famosa affermazione di Laplace secondo cui un'intelligenza superiore, conoscendo perfettamente il presente e il passato dell'universo, sarebbe in grado di prevedere qualsiasi evento futuro. Ma le certezze della fisica newtoniana sono illusorie e dipendono solo da semplificazioni artificiali della realtà, o meglio, da semplificazioni che sono valide solo sotto determinate condizioni. Il mondo reale è fluttuante, rumoroso, caotico, ben diverso dal meccanismo perfetto dell'universo newtoniano. Il determinismo della meccanica classica era già stato messo in crisi dalla meccanica quantistica. In seguito la teoria del caos ha favorito l'emergere di una nuova scienza che non si limita più all'analisi riduttiva di situazioni semplificate, ma si propone di affrontare lo studio del mondo reale in tutta la sua complessità: una nuova scienza che fonda le sue basi su concetti nuovi come quelli di struttura dissipativa, di instabilità, di sensibilità alle condizioni iniziali, di distribuzione di probabilità, nel tentativo di restituire al tempo tutta la sua sostanza. Il mondo deterministico governato da leggi ferree e il mondo assurdo in preda all'arbitrio del caso, fanno luogo a una nuova visione del mondo in cui le leggi della fisica assumono un senso nuovo e in cui c'è posto per la creatività della natura e dell'uomo. Se soprattutto la meccanica quantistica ha segnato, all'inizio del Novecento, un momento di grave crisi nel dominio della scienza classica, le certezze della fisica sono state messe in forse dall'osservazione e dallo studio di una nuova serie di fenomeni di natura caotica scarsamente trattati fino a quel momento dalla comunità scientifica per la mancanza di strumenti adeguati a tale scopo, primo fra tutti il computer. Diversi fenomeni spesso banali che accompagnano la quotidianità di ciascun individuo, come il gocciolamento di un rubinetto, l'evoluzione delle

condizioni meteorologiche, la dinamica di una popolazione animale, non obbediscono al paradigma della scienza classica, pur rimanendo in una cornice deterministica. Il caos, infatti, rende impossibili le predizioni non per una sua intrinseca natura indeterministica, ma per la sua estrema sensibilità alle condizioni iniziali, che dovrebbero essere date con un'enorme precisione. La traiettoria di un pallone è completamente determinata dal calcio del tiratore: a due condizioni iniziali identiche corrisponderanno due traiettorie identiche. È impossibile tuttavia lanciare un pallone, o un dado, esattamente nello stesso modo due volte di seguito: ci sarà sempre una differenza, anche se solo di un atomo, e questa differenza, per quanto minuscola, darà luogo a una variazione macroscopica del comportamento del sistema stesso. Una delle principali caratteristiche dei sistemi caotici consiste proprio in questa naturale tendenza ad amplificare nel tempo in maniera esponenziale piccolissime fluttuazioni dovute al cambiamento delle condizioni del sistema. Il presente capitolo vuole essere un'introduzione alla teoria matematica del caos attraverso alcuni esempi: il caso forse più noto di discrepanza tra cause impercettibili all'occhio dell'osservatore ed effetti di ampie proporzioni, l'effetto farfalla di Edward Lorenz e il circuito elettronico di Chua. Si propone inoltre una breve introduzione ai sistemi complessi e all'uso di strumenti informatici per la visualizzazione scientifica dei dati. La teoria della complessità sostiene che il "tutto è più delle parti che lo costituiscono". Non si tratta di un abbandono del riduzionismo, ma della constatazione che alcuni fenomeni complessi possono emergere solo dall'interazione coerente delle componenti microscopiche del sistema. Infine viene, presentata un'analisi dell'uso dei sistemi complessi per fini artistici e creativi.

4.1 Il concetto di dimensione e le geometrie frattali

Dietro fenomeni o eventi apparentemente inspiegabili si può ritrovare una logica e delle strutture matematiche. Pioniere nello studio di strutture caratterizzate da una geometria complessa è stato lo scienziato Benoit Mandelbrot, matematico rivoluzionario, studioso di quella che viene definita geometria frattale. Egli scoprì di possedere la capacità innata di "manipolare" mentalmente concetti geometrici complessi ricorrendo all'aiuto di un limitato numero di calcoli algebrici. Una notevole quantità di figure geometriche gli divennero familiari e riuscì a identificarle facilmente in qualsiasi problema gli venisse posto dinanzi. E' lo stesso Mandelbrot ad affermare che nel disegnare forme geometriche gli capitava molto spesso di percepire l'assenza di una serie di elementi che rendevano la figura esteticamente incompleta. L'esecuzione di alcune trasformazioni consentivano invece di rendere la stessa struttura maggiormente armoniosa. Grazie agli studi condotti da Mandelbrot, e da molti altri studiosi, alcuni problemi, che inizialmente sembravano colmi di difficoltà, divennero di semplice risoluzione. Nello sviluppo di questa ricerca bisogna

anche considerare il crescente impiego dei calcolatori che rendeva sempre più possibile e semplice un approccio alla risoluzione dei problemi basato sull'impiego del calcolo numerico. Secondo questo approccio anche i calcoli più lunghi e complicati potevano essere risolti in breve tempo portando per la prima volta a maturare l'idea che una giusta dose di "diversità" è indispensabile sia alla scienza che alla società. Quello di Mandelbrot fu quindi non un mero studio sulla geometria frattale, ma, in un certo senso, un'introduzione pionieristica a un approccio differente verso la matematica che sostiene come questa possa essere compresa e possa incuriosire anche solo attraverso le straordinarie forme che è in grado di elaborare. Inoltre, secondo la sua visione ogni campo scientifico dovrebbe mantenere ampi spazi di libertà. Proseguendo i suoi studi sulla geometria frattale, Mandelbrot ha avuto la certezza di essere riuscito a concepire e sviluppare una geometria della natura che trova ordine nelle forme e nei processi cosiddetti "caotici" e applicazioni che vanno dalla matematica alla biologia, dall'astronomia, alla finanza. La novità introdotta dal matematico polacco fu descrivere in termini grafici forme e processi naturali attraverso rigorosi metodi matematici. A differenza della geometria euclidea, così rigida nel rappresentare il mondo visibile, e così lontana dal poter raffigurare le forme reali, la geometria dei frattali è capace di rappresentare i profili di una montagna o di una costa, le nuvole, le strutture cristalline, molecolari e addirittura le galassie. La parola «frattali» definisce una rappresentazione grafica composta di linee spezzate (dal latino «fractus»), dall'andamento apparentemente irregolare, che sono in sostanza delle strutture matematiche, capaci di esprimere comportamenti variabili in spazi anche molto piccoli. Questa teoria si è dimostrata molto fertile per applicazioni che abbracciano un vasto campo della ricerca scientifica e tecnologica. In particolare, la geometria frattale ha trovato un naturale sbocco nella Computer Graphics per la simulazione di oggetti naturali. La matematica classica, non contemplava dimensioni frazionarie come caratteristiche di un sistema matematico ed era infatti incentrata sull'idea delle dimensioni naturali. Generalmente si è da sempre accettato il concetto che i sistemi esistenti possano avere:

- dimensione 0, come i punti;
- dimensione 1, come le linee;
- dimensione 2, come le figure piane e le superfici;
- dimensione 3, come i solidi nello spazio;
- dimensione 4, come gli oggetti 3D in movimento nello spazio-tempo.

Molti oggetti in natura non sono tuttavia descrivibili attraverso le forme della geometria canonica. Si pensi, per esempio, alle coste frastagliate o ai profili di una montagna. Queste e altre tipologie di forme complesse hanno da sempre attirato l'attenzione di scienziati e matematici al fine di individuare strumenti matematici in grado di descriverle in modo rigoroso. Il matematico russo Georg Cantor decise di attuare un piccolo trucco per risolvere il problema delle dimensioni: cercò di

costruire una linea in un modo curioso ricorsivo. Cantor considerò un segmento di lunghezza 1, eliminò la parte centrale nel ricostruire un altro segmento, in sequenza divise ulteriormente i segmenti rimanenti eliminando sempre la terza parte di questi disposti centralmente (Fig. 4.1).

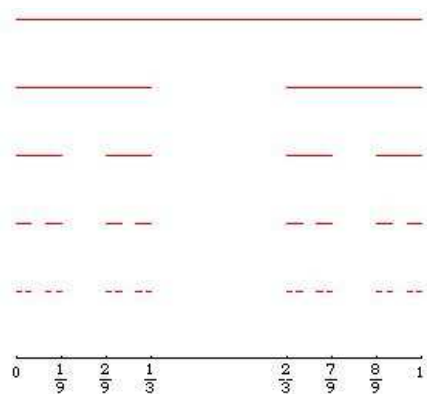


Fig. 4.1 Set di Cantor

Cantor immaginò cosa potesse avvenire dall'iterazione prolungata del metodo. Il problema consiste nel fatto che non si può calcolare all'infinito ogni passo di questo processo, ma teoricamente il risultato finale può essere costituito da oggetti puntiformi raggruppati in una piccola area.

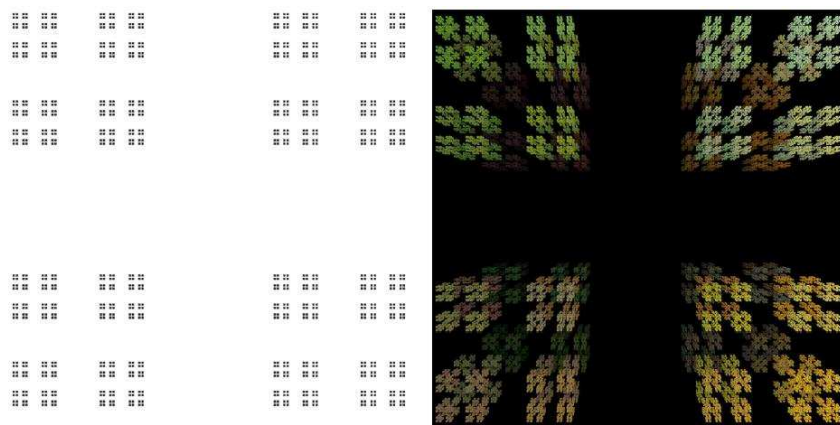


Fig. 4.2 'Polvere' di Cantor in 2D e 3D

I matematici dell'epoca furono scioccati da due risultati che apparivano allora evidenti: l'esecuzione infinita del processo non poteva terminare con un numero finito di oggetti zero dimensionali, ciò che si otteneva invece non erano punti ma linee di lunghezza infinitamente piccola. Nel 1906 Helge von Koch scoprì che è possibile che una regione del piano abbia un'area finita, ma un bordo infinito. Basta considerare un triangolo equilatero, dividere ciascuno dei tre lati in tre parti uguali,

considerare il terzo centrale di ciascuno come la base di un nuovo triangolo equilatero, e ripetere il processo all'infinito. Il risultato finale è una figura a forma di fiocco di neve, che ha appunto un'area finita, ma un bordo infinito (a ogni passo la lunghezza del bordo si moltiplica per $4/3$).

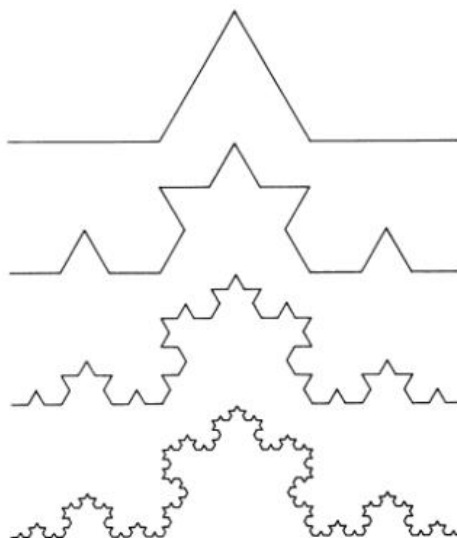


Fig. 4.3 Quattro iterazioni sul 'Fiocco di neve' di Koch

A causa della simmetrica ripetitività del procedimento che lo definisce, il bordo della figura di Koch ha la proprietà di essere auto simile: se si trasformano due qualunque segmenti delle varie approssimazioni si ottiene sempre la stessa curva al limite, soltanto in scala diversa. Sierpiński nel 1915 propose un'idea simile attraverso un frattale molto semplice che si può ottenere anche per via geometrica. Da un punto di vista strettamente geometrico viene generato con una serie di rimozioni. Si inizia con un quadrato pieno da cui si rimuove un quadratino di lato pari alla metà del quadrato iniziale, ottenendo tre quadrati. Da ciascuno di questi quadrati si elimina il quadratino in basso a destra e si ottiene una figura formata da nove quadratini. In questo modo si continua ripetutamente fino ad arrivare al risultato finale. Allo stesso risultato si arriva se si segue un metodo iterativo considerando come figura di partenza un triangolo equilatero: poniamo per comodità il lato 1. Si elimina dalla sua superficie il triangolo che ha come lati i segmenti che uniscono i punti medi dei lati del triangolo precedente e si ottengono 3 triangoli di lato $1/2$. Ripetendo il procedimento su ognuno dei 3 triangoli che si sono così formati si ottengono 9 triangoli di lato $1/4$. Ripetendo il procedimento su ognuno dei 9 triangoli che si sono formati si ottengono 27 triangoli di lato $1/8$. Successivamente 81 triangoli di lato $1/16$, e così via. Si può osservare che di volta in volta il numero di triangoli si triplica, mentre il lato di ciascuno di essi si dimezza. E' quindi facile dedurre che al passo k :

- la misura di un lato è 2^{-k}
- il numero di triangoli è 3^k

Un importante assioma della geometria ci assicura che è possibile dividere un segmento in un qualsiasi numero di parti uguali: il procedimento descritto può essere ripetuto senza limite. Si ottiene così il triangolo di Sierpiński, uno dei primi frattali studiati. Le caratteristiche sono di auto similitudine: si osserva dalla figura come il triangolo abbia la caratteristica peculiare che se ne viene ingrandita anche una piccola parte, si riproduce in scala la stessa figura di partenza. Altra caratteristica è il perimetro infinito. Il perimetro del triangolo diventa ogni volta $\frac{3}{2}$ del precedente, infatti, come già detto, i triangoli si triplicano restando simili a se stessi mentre il loro lato si dimezza. Si può dunque affermare che, al crescere del numero dei passi, anche il perimetro crescerà indefinitamente tendendo a infinito quando anche il numero di passi tende ad infinito. Anche l'area è caratteristica in quanto tende a annullarsi. L'area del triangolo diventa ogni volta $\frac{3}{4}$ della precedente, infatti a ogni passo viene eliminato il triangolo formato dalle parallele ai tre lati che uniscono i punti medi dei lati stessi. Si può dunque affermare che, al crescere del numero dei passi, l'area decrescerà indefinitamente, tendendo a zero quando il numero di passi tende a infinito. Infine, la sua dimensione è frazionaria: in base al metodo esposto si può dedurre che la dimensione del triangolo di Sierpiński è $\log_3/\log_2 = 1,5849625$, cioè è più di una linea e meno di una superficie! Con procedimenti analoghi sono stati nel tempo sviluppati il tappeto di Sierpiński e la spugna di Menger (Fig.4.4).

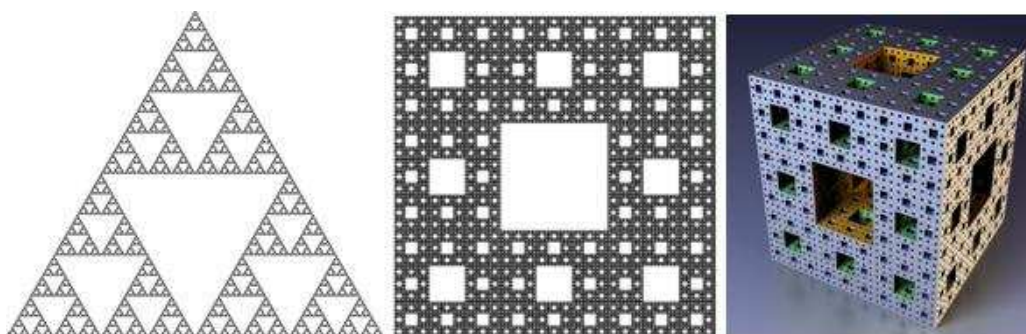


Fig. 4.4 Esempi di frattali matematici

Questi e altri oggetti matematici, sono diventati vere e proprie icone nello studio della geometria frattale e, favorite da una serie di applicazioni sviluppate intorno a loro, possono risultare degli ottimi esempi per applicazioni divulgative. Ritornando a Mandelbrot, quando negli anni sessanta iniziò a formulare la sue teorie dimensionali probabilmente non sapeva che si sarebbe fatto promotore di una trasformazione delle idee matematiche fino allora prevalenti, innescando capovolgimenti soprattutto

per quanto riguarda l'idea di auto-similarità dei sistemi su una scala infinita. Perché alberi e rami hanno forme simili nella struttura a vasi sanguigni, fulmini e confluenti di fiumi? Perché le forme di vita unicellulari sembrano condividere simili attributi comportamentali di creature molto più grandi e morfologicamente complesse? Perché i cavolfiori e altre strutture naturali sembrano avere la stessa forma quando sono osservate fino ai pezzi più piccoli? La nostra immaginazione ci permette di esplorare direttamente il nostro pianeta. Ciò che sembrava a quei tempi essere interessante era imparare qualcosa sulla natura della vita e la crescita dell'universo, studiando i rapporti tra forme presenti in natura, sui computer e nella nostra immaginazione. L'osservazione di alcuni processi naturali e di strutture complesse stimolò Mandelbrot a elaborare delle espressioni matematiche in grado di rappresentarle. Egli definì questo tipo di strutture complesse che presentavano su scale differenti forme simili a sé stesse, geometrie frattali. L'espressione matematica fu denominata "Mandelbrot set" può essere espressa da $z_{n+1} = z_n^2 + c$. Ma da dove ha origine questa espressione? L'insieme di Mandelbrot si basa su un calcolo dinamico iterativo con numeri complessi che ha zero come punto di partenza. La produzione caotica di numeri creata dalla formula $z_n^2 + c$ e l'ordine che ci sta dietro può essere visualizzato solo attraverso i calcoli computazionali e le loro rappresentazioni grafiche. In caso contrario, la formula appare come un elenco del tutto casuale e senza senso, di numeri. Solo quando milioni di calcoli sono meccanicamente eseguiti e tracciati su un piano bidimensionale dello schermo di un computer, si rivela un ordine geometrico nascosto dell'insieme di Mandelbrot. L'ordine delle trame visualizzate sotto forma di grafico bidimensionale sullo schermo del computer presenta modelli che contengono ricorsività su scala infinita. Da allora la geometria frattale si è mostrata in grado di descrivere da un rigoroso punto di vista matematico i profili di una montagna o di una costa, le nuvole, le strutture cristalline o molecolari e addirittura le galassie. Poiché le curve e le strutture frattali, avendo lunghezza infinita, non si possono misurare usando i consueti strumenti geometrici e matematici, nel 1918, Felix Husdorff propose di misurare almeno il grado di auto-somiglianza, estendendo la nozione di dimensione. L'idea alla base della auto-similarità applicata alle dimensioni consiste nel considerare una struttura matematica che, anche se allargata duplicata o ridotta, si presenta esattamente simile alla figura originaria. Proprio il rapporto tra l'allargamento e la duplicazione determina la dimensionalità di un oggetto. Prendendo in considerazione un oggetto bidimensionale, come un quadrato con lato di lunghezza x , possiamo dividerlo in 2 o in 4 generando figure di quadrati con lato $x/2$. Se volessimo ritornare alla figura di base nel caso di due divisioni basterebbe $2(x/2) = x$, mentre l'area dell'originario quadrato la si ottiene $4(x^2/4) = x^2$. Considerando in maniera analoga un cubo di lato x e suddividendo ciascuno dei suoi lati in due si otterranno 8 cubi di lato $x/2$. Se si volesse ricostruire il cubo originario da quello con lati di lunghezza $x/2$, avremmo bisogno di 8 cubi, Tab. 4.1.

Figura	Ingrandimento (b)	Duplicazione (c)	Dimensione (d)
Linea	2	2	1
Quadrato	2	4 = (2*2)	2
Cubo	2	8 = (2*2*2)	3

Tab. 4.1 Schema dimensioni

Da quanto detto si rileva che, se si considera un oggetto con ingrandimento/riduzione n , gli elementi necessari per ricomporlo, per così dire, cioè le duplicazioni sono pari a n elevato alla dimensione dell'oggetto: quindi n per un oggetto a 1-dimensione, n^2 per un oggetto a due dimensioni e n^3 per un oggetto a 3-dimensioni. Considerando d = dimensione, b = fattore d'ingrandimento e c = duplicazione, si può affermare che la relazione che intercorre sia $\log_b c = d$ e utilizzando le proprietà dei logaritmi $\log_b c = \log_n c / \log_n b$ da qui l'espressione dimensionale $d = \log c / \log b$. Richiamando Cantor si può osservare come egli crei la "polvere" attraverso segmenti di lunghezza n . Considerando il modo in cui va a formarsi la "polvere", si è visto che si divide il segmento originario in tre reiterando l'operazione. Se si volesse ricostruire l'originale, si dovrebbe moltiplicare la sua lunghezza di un fattore tre. La sua dimensione frazionaria è $\log(2)/\log(3)$, cioè circa 0.631, vale a dire più di un punto e meno di una linea.

Allo stesso modo si può ricavare la dimensione del triangolo di Sierpiński. Per ogni ingrandimento di due dobbiamo duplicare la nostra figura per tre. Quindi la sua proprietà è che non sarà mai infinito o zero, ma $\log(3)/\log(2)$, che fornisce una dimensione approssimativa di 1.585. Lo studio di tali enti matematici ha portato Mandelbrot a stabilire che esiste un'altra possibile dimensione per descrivere gli oggetti: una dimensione frazionaria. Se consideriamo un oggetto di dimensioni lineari unitarie indicando con d la dimensione Euclidea e riducendo le sue dimensioni di un fattore $1/L$, in ogni direzione dello spazio, ci vorrà N =numero di oggetti simili per coprire l'oggetto originale. La dimensione definita da

$$d = \frac{\log N(l)}{\log l}$$

dove il logaritmo può essere di qualsiasi base, è ancora pari a quella euclidea.

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}}$$

Applicando l'equazione sopra relativa alla struttura frattale, si ottiene la dimensione dell'intera struttura frattale rappresentata da un numero non intero, cioè la

dimensione di Hausdorff, mentre $N(\epsilon)$ è il numero di strutture auto-simili di dimensione lineare ϵ necessarie per ricostruire l'intera struttura. La geometria frattale, si manifesta, in alcuni casi, anche nei fenomeni caotici. La relazione tra le due caratteristiche non è bidirezionale, ma è interessante sottolineare come alcune forme caotiche possano avere geometrie frattali. La visualizzazione delle serie temporali prodotte dai sistemi dinamici non lineari può aiutare a meglio comprendere il fenomeno del caos.

4.2 Sistemi dinamici e sistemi caotici

La teoria dei sistemi lineari non riesce a fornire una descrizione adeguata dei fenomeni oscillatori che si manifestano in natura, alcuni fenomeni osservati non solo in natura, ma anche comunemente nei circuiti e nei sistemi di elaborazione dei segnali possono essere, infatti, descritti solo attraverso modelli dinamici non lineari. Erroneamente fino a qualche decennio fa la logica newtoniana della semplificazione è stata da guida anche nello studio di tali sistemi non lineari complessi. Per un certo numero di anni, non essendo stati sviluppati modelli teorico matematici, i fenomeni non lineari, pur manifestandosi nell'evidenza sperimentale, sono stati trascurati. Un esempio di questo tipo ci viene dagli studi realizzati su una lampada al neon (Van der Pool, 1927), durante gli esperimenti si evidenziavano delle irregolarità nel circuito, classificate come rumore e non ulteriormente approfondite. Sono dovuti trascorrere molti anni, sono stati necessari modelli matematici di sintesi su tali sistemi, ma, soprattutto, è stato fondamentale l'uso del calcolatore prima che questo rumore fosse spiegato con precisione matematica e certezza sperimentale (Chua, 1986). Negli ultimi cinquant'anni, i sistemi dinamici sono uno dei più dibattuti temi della matematica e promettono, anche nel nuovo secolo, di rimanere tali. Come già accennato, le scoperte scientifiche su questi sistemi influenzano non solo la matematica, ma anche altre discipline scientifiche, la fisica, la chimica, la biologia, le neuroscienze, le discipline economiche, finanziarie e sociali, poiché forniscono nuovi paradigmi sull'analisi e la decodifica dei fenomeni naturali, l'evoluzione dei sistemi sociali, finanziari ed economici. Non a caso, infatti, i concetti e i temi approfonditi da questi studi hanno dato avvio a riflessioni filosofiche molto profonde e interessanti sui concetti di caso, caos, riduzionismo e determinismo. Le applicazioni sviluppate a partire da tali temi teorici hanno trovato un fiorente terreno di collaborazione con l'informatica, che ha reso possibile il calcolo numerico, la simulazione e la visualizzazione grafica di fenomeni che altrimenti sarebbero rimasti al di fuori delle possibilità di studio. Un sistema dinamico è caratterizzato da una legge matematica ben definita che ne stabilisce la sua evoluzione nel tempo. Lo spazio delle fasi, ossia lo spazio matematico costituito da un certo numero di variabili proprie del sistema che consentono di definire in maniera univoca il suo stato, e la legge matematica che

descrive la sua evoluzione temporale rappresentano le due componenti essenziali che costituiscono un sistema dinamico. I sistemi dinamici, a seconda che la legge matematica fondante sia di natura continua o discreta, possono essere distinti in: sistemi dinamici continui o sistemi dinamici discreti. Matematicamente i sistemi dinamici continui sono descritti da un'equazione differenziale ordinaria oppure da un sistema più o meno ampio di equazioni differenziali. Le equazioni differenziali ordinarie sono relazioni matematiche note fin dal diciassettesimo secolo e fondamentali per moltissime applicazioni che spaziano dall'ingegneria fino alle discipline economiche. La novità relativa al campo dei sistemi dinamici non consiste negli oggetti che studia, ma nel tipo di domande che si pone su di essi. Gli studi sui sistemi dinamici hanno avuto origine dalla ricerca sul comportamento di un certo numero di corpi soggetti alla reciproca attrazione gravitazionale. Un esempio paradigmatico di questo problema, cosiddetto problema degli n corpi, è dato dal nostro Sistema Solare. Il punto di partenza è una domanda molto interessante: come evolve nel tempo un sistema di questo tipo? La posizione nello spazio di ciascun corpo, o ciascun pianeta, è descritta da $6n$ variabili, poiché ciascun corpo ha una posizione e una velocità; e ciascuna di queste è descritta a sua volta da tre coordinate, una per ciascuna dimensione spaziale. Anche lo spazio delle fasi cioè l'insieme delle possibili configurazioni del sistema è uno spazio a $6n$ dimensioni. La variazione nel tempo di posizione e velocità degli n corpi, a partire da una data configurazione iniziale, può essere determinata attraverso la legge della gravitazione universale che fornisce, in sostanza, una legge matematica che descrive l'evoluzione del punto rappresentativo dello stato del sistema all'interno dello spazio delle fasi. Dalla teoria delle equazioni differenziali ordinarie, nota la configurazione iniziale, il sistema può evolvere in modo unico: lo stato iniziale del sistema ne determina completamente l'evoluzione futura. Descrivere l'evoluzione del sistema, data la configurazione iniziale, significa risolvere il problema degli n corpi. Lo sviluppo del calcolo infinitesimale da parte di Newton e Leibniz prese le mosse proprio dallo studio del problema dei 2 corpi. Newton mostrò, confermando le intuizioni di Keplero, che, nel caso di due soli corpi le orbite sono o ellittiche o paraboliche o iperboliche con un fuoco corrispondente al centro di massa di uno dei due corpi. I rapporti fra masse, velocità e posizioni iniziali determinano la tipologia dell'orbita; considerando due corpi se uno presenta massa e velocità minore rispetto all'altro, questo seguirà un'orbita ellittica intorno all'altro. Il caso descritto è quello verificato da Keplero riguardo al sole e i pianeti che gravitano intorno a esso. Il problema dei 3 corpi si rivelò fin dall'inizio molto più complesso. Lagrange provò a determinare alcune soluzioni particolari, ma nonostante ciò, questo problema rimase fuori dalla portata dei matematici e dei fisici del diciottesimo e diciannovesimo secolo, fino alle fondamentali deduzioni di Poincaré del 1890. Considerando il caso dell'interazione tra sole, terra e luna, l'espressione matematica che consente di studiare il moto dei tre corpi non può avere una soluzione analitica, ovvero, per il caso dei tre corpi in

interazione reciproca l'uno con l'altro non è possibile trovare soluzioni analitiche, salvo casi molto speciali. Questa conclusione fu avanzata da Henri Poincaré, che in altre parole sostenne che le traiettorie di tre corpi celesti (o tre corpi qualunque) in interazione gravitazionale l'uno con l'altro non sono calcolabili in maniera esatta. Il moto dei tre corpi è perfettamente deterministico, poiché le equazioni del moto non contengono nessun termine stocastico, ma non sappiamo esprimere la loro traiettoria con una funzione, per questo è necessario ricorrere a soluzioni approssimate. Siccome la conoscenza delle condizioni iniziali del moto dei tre corpi è solo approssimata, e gli effetti dell'imprecisione sulla conoscenza delle condizioni iniziali vengono amplificati con lo scorrere del tempo a causa della non linearità delle relazioni matematiche, e infine le soluzioni delle equazioni del moto sono note solo in maniera approssimata, il risultato analitico che è possibile ottenere sarà sempre scarsamente affidabile per tempi sufficientemente lunghi.

Le conseguenze di questa affermazione, dimostrata matematicamente da Poincaré sono che:

- la stocasticità delle traiettorie di un sistema dinamico costituito da almeno 3 corpi è essenzialmente un fatto inevitabile;
- la predicibilità di un sistema dinamico con almeno 3 costituenti è possibile solo entro intervalli temporali finiti, tanto più lunghi quanto più sono accurate le misure delle condizioni iniziali e quanto più è accurata la descrizione formale del sistema;
- il miglioramento delle capacità di misura e di calcolo, anche qualora non si dovesse scontrare con altri limiti fisici o concettuali, non potrà mai cancellare la stocasticità intrinseca di un sistema meccanico.

L'idea cruciale di Poincaré, che rivoluzionò completamente il modo di affrontare questi problemi e gettò le fondamenta per la teoria moderna dei sistemi dinamici, fu di domandarsi cosa esattamente si volesse arrivare a conoscere sul problema dei 3 corpi. Fino a quel tempo, risolvere il problema dei 3 corpi aveva significato trovare soluzioni esplicite e quantitative ossia formule che fossero in grado di determinare in qualsiasi momento e con precisione l'evoluzione del sistema. Rivoluzionando quindi gli orientamenti scientifici fino a quel momento espressi dai suoi colleghi, Poincaré sostenne per la prima volta quanto piuttosto fosse importante indagare sull'andamento qualitativo a lungo termine del sistema. In altri termini egli non focalizzò l'analisi sull'ultimo decimale per stabilire il comportamento preciso del sistema in esame, ma prese in considerazione le soluzioni generiche che si manifestano su orbite periodiche o non periodiche, dopo una eventuale fase transitoria. Poincaré era interessato alle soluzioni preponderanti, esaminava l'aspetto globale se, per esempio, il sistema continuava a evolversi all'infinito oppure se era modificato da catastrofi o eventi improvvisi o se il sistema poteva dirsi stabile, cioè piccole perturbazioni non ne modificano il comportamento qualitativo. L'obiettivo diventò quindi descrivere il comportamento qualitativo asintotico, ossia relativo a un periodo di tempo sufficientemente lungo, della maggior parte delle orbite,

identificando in particolare le orbite stabili. La correttezza delle intuizioni di Poincaré è stata dimostrata proprio negli anni più recenti, sia per i sistemi dinamici in generale sia per lo studio del problema degli n corpi e del Sistema Solare in particolare. Nel 1903 Poincaré infatti scriveva: “Una causa piccolissima che sfugga alla nostra attenzione determina un effetto considerevole che non possiamo mancare di vedere, e allora diciamo che l’effetto è dovuto al caso”. E proseguiva affermando: “Se conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell’universo all’istante iniziale, potremmo prevedere esattamente la situazione dello stesso universo in un istante successivo. Ma se pure accadesse che le leggi naturali non avessero più alcun segreto per noi, anche in tal caso potremmo conoscere la situazione iniziale solo approssimativamente. Se questo ci permettesse di prevedere la situazione successiva con la stessa approssimazione, non ci occorrerebbe di più e dovremmo dire che il fenomeno è stato previsto. Ma non è sempre così; può accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne producano di grandissime nei fenomeni finali. Un piccolo errore nelle prime produce un errore enorme nei secondi. La previsione diviene impossibile ...”. I sistemi dinamici continui, non descrivono con buona approssimazione tutti i sistemi che si evolvono nel tempo. La dinamica delle popolazioni, per esempio, è un tipico caso che non si presta a essere descritto in maniera continua, ma è più opportuno impiegare una rappresentazione discreta del tempo. Una colonia di cellule, per esempio, varia il numero della propria popolazione seguendo intervalli di tempo discreti, tramite una legge ben precisa, magari raddoppiando da un intervallo di tempo al successivo. Questo è un tipico esempio di sistema dinamico discreto, chiamato così proprio perché evolve seguendo intervalli di tempo discreti. Anche in questo caso, come si era già visto per il continuo, a essere interessante non è la definizione di una formula che permetta di calcolare tutti i possibili stati del sistema, ma piuttosto, è interessante capire il comportamento qualitativo a lungo termine delle orbite generiche e quando si verifica la stabilità nel comportamento del sistema rispetto a perturbazioni del punto iniziale dell’orbita. Se si osserva quindi l’evoluzione del sistema a intervalli di tempo discreti, a ogni sistema dinamico continuo è naturalmente associato un sistema dinamico discreto; in un certo senso è come se sistemi dinamici continui e discreti fossero due facce di una stessa medaglia. Come è ben noto la procedura intrinseca al metodo scientifico suggerisce proprio l’osservazione di un fenomeno naturale a intervalli regolari di tempo; così come l’analisi delle serie temporali associate a un fenomeno è spesso cruciale per la comprensione delle dinamiche che regolano l’evoluzione del fenomeno stesso. L’interesse per l’analisi delle serie temporali, non ha solo un carattere teorico, ma soprattutto applicativo poiché è fondamentale per lo sviluppo su calcolatore dei sistemi dinamici continui, in altri termini è fondamentale per la simulazione. La logica dei calcolatori è intrinsecamente basata su intervalli di tempo discreti, la rappresentazione di un sistema dinamico continuo mediante l’uso di un calcolatore è resa possibile dall’approssimazione realizzata impiegando un

sistema dinamico discreto, che rende possibile passare da un'equazione differenziale ordinaria a uno schema iterativo. La simulazione su calcolatore dell'evoluzione di sistemi dinamici anche molto complessi è stata possibile grazie a tale semplificazione. Lo studio dei sistemi dinamici ha permesso una serie di importanti applicazioni, ma non solo, ha fornito la possibilità di confronto tra andamento del modello ed evoluzione reale dei fenomeni presi in considerazione, e ha inoltre consentito di testare ipotesi teoriche su ampie classi di sistemi dinamici. Un sistema dinamico continuo viene approssimato con uno discreto grazie a tecniche informatiche e di analisi numerica molto sofisticate; questa caratteristica è necessaria, poiché qualsiasi approssimazione introduce un errore, e, si vedrà di seguito nelle proprietà, i sistemi dinamici possono essere estremamente sensibili agli errori. I sistemi dinamici tipicamente meno interessanti sono quelli lineari la cui funzione o equazione differenziale che li rappresenta è lineare: la variazione del fenomeno, in sistemi di questo tipo come per esempio quello già considerato dell'evoluzione della popolazione di cellule, è proporzionale alla variazione dello stimolo. Osservando fenomeni naturali o sociali su un intervallo di tempo abbastanza lungo si nota come le semplificazioni, spesso applicate in campo ingegneristico, sono utili ma troppo grossolane, poiché spesso ci si trova davanti a evoluzioni non lineari che non si prestano a essere descritte dalla semplicità delle orbite proprie dei sistemi lineari. La complessità di comportamento rilevata dai sistemi dinamici non lineari anche semplici risulta ideale per descrivere determinati fenomeni, quindi, comportamenti complessi possono essere rappresentati da sistemi dinamici non lineari anche molto semplici. In altri termini, la funzione che genera o schematizza il sistema può essere anche semplice la complessità è introdotta dalla iterazione di tale funzione. Ciò è coerente con quanto accade frequentemente in natura, rispettando un giusto principio di economicità: un fenomeno complesso viene generato ripetendo moltissime volte azioni elementari, è sufficiente, quindi, che il sistema preso in considerazione sia esso biologico, fisiologico, fisico, economico sia in grado di generare azioni elementari a livello microscopico per ottenere comportamenti complessi a livello macroscopico. I sistemi dinamici presentano dei comportamenti tipici, il più semplice tra questi è definito: punto fisso (o stazionario, o di equilibrio). Il sistema, in questo caso, ha un'evoluzione costante nel tempo definita tramite un unico punto nello spazio delle fasi. Alcuni punti attraggono tutte le orbite che partono sufficientemente vicino a esso, è il caso questo dei punti fissi attrattivi; altri ancora respingono tutte le orbite che partono sufficientemente vicino, in questo caso si parla di punti fissi repulsivi; in altri casi avviene che i punti attraggono le orbite lungo alcune direzioni e le respingono lungo altre direzioni, i punti fissi con tali caratteristiche sono classificati come punti fissi iperbolici; se i punti intrappolano le orbite vicine impedendo loro di allontanarsi, ma senza farle avvicinare troppo, come delle circonferenze attorno a un centro si parlerà di punti fissi ellittici; esistono poi altri tipi ancora di punti fissi, in grado di generare comportamenti locali

particolarmente complessi. Altro comportamento tipico e semplice dei sistemi dinamici è quello definito dall'esistenza di punti periodici, la particolarità è che l'orbita dopo un numero finito di iterazioni, ossia un intervallo di tempo finito, torna esattamente al punto di partenza. Allo stesso modo dei punti fissi, i punti periodici possono essere classificati come attrattivi, repulsivi, iperbolici, ellittici, a seconda del comportamento locale delle orbite in prossimità degli stessi punti. Se anche ci si allontana dal punto periodico il comportamento locale delle orbite ha spesso influenza sull'evoluzione globale del sistema dinamico. I sistemi dinamici possono presentare una cosiddetta orbita densa, in questo caso saranno definiti topologicamente transitivi; la caratteristica dei punti a orbita densa è che dopo un tempo sufficientemente lungo, l'orbita giunge arbitrariamente vicino a qualsiasi altro punto dello spazio delle fasi. Le orbite dense sono piuttosto comuni nei sistemi dinamici e alcune volte è possibile suddividere un sistema dinamico in più sottosistemi topologicamente transitivi indipendenti. Concetti importanti per i sistemi dinamici, come già visto, sono quelli di attività locale e globale, a questo si può aggiungere la ricorrenza: le orbite dense sono un esempio estremo di tale caratteristica. Se l'orbita torna arbitrariamente vicino al punto, questo si definisce ricorrente. Si possono manifestare molte forme di ricorrenza: una è data, per esempio da punti periodici e punti con orbita densa. Un'altra condizione di ricorrenza è quella di punto vagante che è definito tale se l'orbita di tutti i punti abbastanza vicini a lui si allontana senza mai tornare indietro, è stato dimostrato che la dinamica a lungo termine dei sistemi è concentrata vicino al sottoinsieme dei punti non vaganti dello spazio delle fasi. Spesso, per questo motivo, lo studio della dinamica può essere ricondotto all'analisi di ciò che accade vicino all'insieme dei punti non vaganti. I sistemi dinamici più interessanti sono quelli in cui coesistono punti periodici e orbite dense, vicino a qualsiasi punto dello spazio troviamo orbite con comportamenti diametralmente opposti (dense oppure periodiche). Di conseguenza, il sistema si può definire sensibile alle condizioni iniziali: cambiando arbitrariamente poco il punto di partenza dell'orbita, il comportamento dell'orbita sul lungo periodo può mutare drasticamente. La sensibilità alle condizioni iniziali è la principale caratteristica dei sistemi dinamici caotici, chiamati così proprio perché hanno orbite dal comportamento apparentemente caotico. Questa forma di caos è il caos deterministico, che non presenta un'evoluzione casuale del sistema. Se le informazioni sul punto di partenza dell'orbita e sulla legge che descrive il sistema dinamico fossero complete, si sarebbe in grado di predire con esattezza l'evoluzione di tutta l'orbita, nulla sarebbe lasciato al caso. Nel caso dei sistemi reali, però, è praticamente impossibile ottenere in maniera completa tali informazioni, spesso, le condizioni iniziali possono essere misurate solo con un ben definito grado di approssimazione. In questi casi è vano qualsiasi tentativo di predire il comportamento dell'orbita sul lungo periodo e ciò è dovuto alla sensibilità per le condizioni iniziali. L'effetto che si evidenzia è che l'approssimazione iniziale viene

amplificata fino a rendere apparentemente casuale il comportamento dell'orbita. Questa caratteristica dei sistemi dinamici caotici non deve essere ritenuta una debolezza poiché ne amplia l'applicabilità. Sistemi dinamici caotici possono essere ottenuti utilizzando anche semplici modelli quadratici, quindi si possono riprodurre comportamenti apparentemente casuali con modelli semplici. I sistemi fisici, naturali, biologici ma anche economici sono spesso soggetti a perturbazioni piccole ma casuali, che influenzano sia pure di poco e in maniera apparentemente non prevedibile l'evoluzione del sistema. Questa caratteristica dovrebbe rendere difficile l'uso di tali modelli deterministici in contesti del genere. Invece non è così, i sistemi dinamici caotici sono esattamente il modello giusto da utilizzare in questi casi, infatti è stato dimostrato che in mancanza di precisione assoluta, il comportamento di un sistema perturbato casualmente è indistinguibile dal comportamento di un sistema deterministico; in assenza di precisione assoluta non si è in grado di distinguere un sistema soggetto a piccole perturbazioni casuali da un sistema dinamico caotico completamente deterministico. L'uso di modelli stocastici o di modelli deterministici per lo studio di questi fenomeni diventa discrezionale per lo scienziato. I sistemi dinamici possono contenere attrattori: sottoinsiemi dello spazio delle fasi che attirano tutte le orbite che partono da punti vicini. Un esempio sono i punti fissi o periodici attrattivi, ma esistono attrattori (detti attrattori strani) con struttura geometrica molto più complessa, spesso frattale. Storicamente, gli attrattori strani sono stati uno dei motivi della nascita della teoria dei sistemi dinamici caotici. Esperimenti numerici effettuati da Lorenz alla fine degli anni '50 con un semplice modello dinamico non lineare dell'atmosfera rivelarono il fenomeno della sensibilità alle condizioni iniziali: punti di partenza lievemente diversi davano origine a orbite macroscopicamente diverse. Eppure, le orbite sembravano accumularsi su uno stesso sottoinsieme dello spazio delle fasi, la cui struttura geometrica rivelava nuovi dettagli a ogni ingrandimento, tipico fenomeno frattale. In altre parole, gli esperimenti numerici di Lorenz suggerirono l'esistenza di un attrattore strano; e tutte le orbite uscenti da punti vicini avevano comportamento qualitativo a lungo termine paragonabile, pur evolvendo in maniera quantitativamente diversa. Un altro importante modello, questa volta discreto, che presentava caratteristiche analoghe a quello di Lorenz fu introdotto qualche anno dopo da Hénon. La presenza di un attrattore permette quindi di controllare il comportamento a lungo termine delle orbite anche in presenza di sensibilità alle condizioni iniziali. Occorre però sottolineare che le simulazioni numeriche possono solo suggerire l'esistenza di un attrattore strano, e non dimostrarne la presenza; potrebbe essere un artefatto creato dalle approssimazioni numeriche e non esistere nel sistema dinamico originale. Le simulazioni numeriche, che introducono da se approssimazioni ed errori, danno risultati significativi quando il sistema studiato è strutturalmente stabile cioè variando di poco il sistema la dinamica qualitativa non cambia e l'attrattore persiste. La complessità della geometria degli attrattori, e più in generale dell'evoluzione delle

orbite, ha portato alla necessità di misurarne in qualche modo la significatività e l'influenza, e alla nascita di diversi modi di quantificare questa complessità. Nel caso degli attrattori, una misura molto importante è la dimensione di Hausdorff. Si è visto in precedenza come nella geometria usuale, un punto ha dimensione zero, una curva dimensione uno, una superficie dimensione due, e un volume dimensione tre. La dimensione si riflette sulla crescita della misura degli insiemi: un disco bidimensionale ha area che cresce come il quadrato del raggio, mentre una palla tridimensionale ha volume che cresce come il cubo (la terza potenza) del raggio. Insiemi complessi quali gli attrattori strani hanno misure che crescono come potenze intermedie del raggio; questa potenza è chiamata dimensione di Hausdorff dell'insieme, ed è spesso un numero non intero (la dimensione di Hausdorff dell'attrattore di Lorenz è stimata essere circa 2.06, per cui l'attrattore di Lorenz è in un certo senso più ampio di una superficie, ma meno di un volume). Maggiore la dimensione di Hausdorff, più complesso è l'attrattore e maggiore è la sua influenza sul sistema dinamico; alcuni fenomeni possono avvenire solo in presenza di attrattori di specifica dimensione di Hausdorff.

Negli ultimi anni, il caos ha catturato l'attenzione di una grande parte della comunità scientifica, travalicando ogni confine disciplinare, e con i frattali, cui strettamente si connette, costituisce uno dei temi attualmente più discussi. Gli effetti degli studi in materia hanno investito metodi e problemi di cui la scienza si occupa. Concetti solo apparentemente distanti, come semplice e complesso, determinismo e probabilità, richiamandosi vicendevolmente hanno subito un'ulteriore elaborazione proprio a partire dalla scoperta del caos deterministico. L'imprevedibilità dei risultati dell'evoluzione di un sistema dinamico a partire da piccolissime variazioni delle sue condizioni iniziali costituisce il tratto saliente di qualunque comportamento caotico.

4.3 Il caos matematico

A questo punto è necessario semplificare più nel dettaglio come affrontare l'analisi di un sistema caotico dal punto di vista matematico. Nel caso di sistemi dinamici non lineari, risolvere analiticamente le equazioni differenziali che lo rappresentano non è la via più facilmente percorribile. Metodi di risoluzione numerica mediante calcolatore permettono efficacemente di simulare l'evoluzione del sistema e di individuare l'orbita del sistema nello spazio delle fasi, anche se in modo approssimato. Ciò che conta lo si è già sottolineato è infatti il comportamento globale del sistema. Dunque, il sistema di equazioni differenziali che rappresenta il sistema dinamico non lineare viene risolto numericamente, generalmente si dice che si procede con l'integrazione numerica del sistema di equazioni differenziali. Da tale operazione si ottengono una serie di dati che possono essere visualizzati come una sequenza discreta di punti. La successione di tali punti genera l'orbita caratteristica

del sistema che rappresenta una soluzione numerica approssimata dell'evoluzione che subisce nel tempo il sistema dinamico continuo.

4.3.1 Proprietà dei sistemi caotici

Le proprietà dei sistemi dinamici caotici sono state già in parte anticipate nelle sezioni precedenti, introducendo i concetti fondamentali legati alla sensibilità alle condizioni iniziali e alla presenza dei cosiddetti attrattori. Ci si propone però ora di analizzare sistematicamente e approfonditamente le caratteristiche dei sistemi dinamici caotici. Le proprietà che caratterizzano i sistemi caotici sono:

- sensibilità alle condizioni iniziali,
- le orbite evolvono verso attrattori strani,
- si ha la presenza di differenti strade verso il caos,
- i bacini di attrazione nello spazio delle fasi presentano confini di tipo frattale.

Variazione delle condizioni iniziali comportano variazioni molto significative sull'evoluzione globale del sistema caotico. Le variazioni sui parametri che determinano lo stato del sistema possono essere anche molto piccole. La scoperta che passò poi alla storia con la denominazione di "butterfly effect" ossia "effetto farfalla" fu rilevata per la prima volta da Lorenz, che, come riporta Gleik (1989), dal suo Royal McBee, dal Massachusetts Institute of Technology, osservava dal modello matematico della meteorologia da lui prodotto, come "nulla accadeva mai due volte nello stesso modo". Egli intuì "meglio di chiunque altro il carattere estremamente incerto della previsione", ma per questo problema era sicuro dovessero esserci delle cause a livello matematico. Lorenz si accorse delle motivazioni scatenanti il fenomeno quando, nell'introdurre dati nella memoria del suo computer, fece delle approssimazioni sulle ultime tre cifre decimali e notò la notevole divergenza dei tracciati. Un piccolo errore numerico aveva causato una variazione notevole sull'evoluzione globale del sistema. Nel suo modello matematico a dodici equazioni, piccoli errori avevano effetti catastrofici "errori e incertezze si moltiplicavano, diffondendosi a cascata attraverso una catena di elementi di turbolenza (...)": era il caos. Fu così che l'effetto farfalla divenne il nome tecnico per indicare la dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali in un sistema caotico. Si può, introducendo il modello matematico di Lorenz nel calcolatore, ripercorrere l'esperienza dello scienziato verificando che se si considera l'evoluzione di un sistema dinamico nel suo spazio delle fasi, due traiettorie distinte, che hanno origine in punti inizialmente molto vicini fra loro, possono manifestare dopo un certo tempo andamenti molto differenti che evidenziano una divergenza dei tracciati esponenziale (Fig. 4.5).

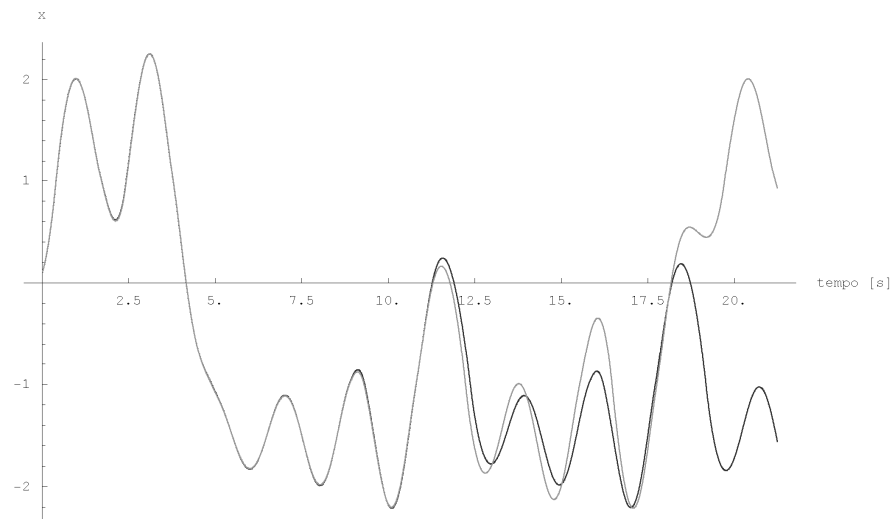


Fig. 4.5 Divergenza dei tracciati a partire condizioni iniziali quasi identiche

Questa particolare proprietà implica l'estrema difficoltà a realizzare previsioni sull'evoluzione futura del sistema caotico. Le leggi deterministiche risultano quindi essere del tutto insufficienti per la previsione dell'evoluzione del sistema poiché è impossibile conoscere con una elevata precisione lo stato iniziale del sistema. In tali condizioni si può affermare che coesistono determinismo e imprevedibilità a lungo termine, essendo i valori riferibili alle condizioni iniziali sempre affetti da imprecisione. L'imprevedibilità insorge in un sistema deterministico proprio per questo motivo: lo stato iniziale ha sempre insita una piccola componente di casualità i cui effetti si amplificano al crescere del tempo. Se è vero che lo stato di un sistema nell'istante iniziale non può essere fissato in modo preciso, è vero tuttavia anche assumere che esso sia distribuito secondo una certa distribuzione di probabilità. L'evoluzione globale del sistema avrà dunque, in ogni altro istante di tempo una distribuzione casuale che potrà essere dedotta dalla distribuzione relativa all'istante iniziale utilizzando le leggi deterministiche che descrivono matematicamente l'evoluzione del sistema. Lasciando quindi, a causa della dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, una piccola quantità iniziale al caso può conseguire, in un momento successivo, una grande quantità di caso o di indeterminazione. Quindi si può dedurre che il determinismo non esclude totalmente il caso e non esiste alcuna incompatibilità logica fra caso e determinismo fisico (Ruelle, 1992). La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali rappresenta una proprietà caratteristica dei sistemi dinamici non lineari, che, anche se in teoria perfettamente deterministici, molto spesso, manifestano dei comportamenti caotici. Si è già discusso a livello qualitativo

analizzando i sistemi dinamici continui sul concetto di attrattore. Nonostante sia difficile definire univocamente questa entità matematica, si potrebbe dire che un attrattore rappresenta l'insieme di punti dello spazio delle fasi che definiscono l'orbita lungo cui evolve il punto rappresentativo del sistema dinamico dopo un tempo abbastanza lungo. Si può altresì affermare che l'attrattore manifesta la situazione di regime del sistema dopo l'estinzione dei fenomeni transitori, condizione legata all'esistenza di fenomeni o meccanismi capaci di dissipare energia nel sistema che evolve nello spazio delle fasi di dimensione infinita verso un insieme di punti che rappresenta l'attrattore. Sempre la natura dissipativa dei sistemi caotici fa sì che le orbite nello spazio delle fasi siano confinate in delle regioni limitate ben determinate e il sistema manifesti un comportamento stabile senza divergere verso l'infinito. Alcuni attrattori sono definiti strani, poiché dal punto di vista geometrico presentano un aspetto irregolare: non sono curve o superfici lisce, ma oggetti con dimensione frattale e dall'analisi delle frequenze temporali rivela un continuo di frequenze. Dalle equazioni di Lorenz, per proseguire con quelle di Rössler (1976), fino alle più recenti scoperte di Chua, la visualizzazione degli attrattori strani è stata resa possibile dall'uso dei calcolatori elettronici che hanno consentito di simulare l'evoluzione dei sistemi dinamici.

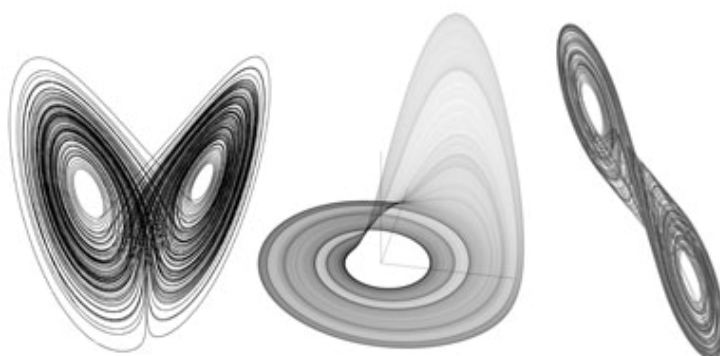


Fig. 4.6 Gli attrattori strani di Lorenz, Rössler, Chua

Come appare evidente dalla Fig. 4.6 mentre l'attrattore visualizzato da Lorenz presenta due lobi caratteristici, possiamo notare come gli stessi, simili si ripresentino nel sistema di Rössler e infine in quello di Chua, dove però le due orbite formano quello che viene definito in gergo tecnico come double scroll. L'evoluzione temporale del punto che rappresenta lo stato del sistema dopo aver compiuto un certo numero di giri attorno al lobo destro dell'attrattore, passerà varie volte attorno al lobo sinistro, per tornare successivamente a destra, e così via. Se venissero modificati anche in maniera impercettibile, i valori iniziali del sistema i particolari della figura risulterebbero completamente modificati: a variare non sarebbe l'aspetto globale dell'attrattore, ma diventerebbero del tutto diversi i numeri di giri successivi a

sinistra e a destra. Questo ancora una volta è dovuto alla sensibile dipendenza dell'evoluzione temporale degli attrattori dalle condizioni iniziali. Il numero di cicli compiuti a sinistra e a destra è apparentemente aleatorio e irregolare.

Il comportamento caotico può insorgere a seguito del manifestarsi di alcuni meccanismi fondamentali, definiti dagli studiosi del settore come strade verso il caos:

- raddoppiamenti di periodo in cascata;
- intermittenza;
- torus break down.

Il raddoppiamento di periodo in cascata fu studiato da Feigenbaum, questa condizione si verifica quando al variare dei parametri di controllo si osservano fenomeni di biforcazione cioè il raddoppiamento del periodo dell'orbita che descrive l'evoluzione del sistema. Un'orbita periodica viene sostituita da un'altra, prossima alla prima, in cui però è necessario prima di tornare al punto di partenza compiere due giri. Il periodo della nuova orbita risulta con buona approssimazione il doppio di quella precedente. Un aspetto interessante consiste nella presenza in cascata di questo raddoppiamento di periodo presentando orbite con periodo 4, 8, 16, 32, 64, volte maggiore alla prima. L'intermittenza è l'altra manifestazione che, per così dire, annuncia il caos nei sistemi dinamici. Questo stato è caratterizzato dalla presenza alterna nel sistema di comportamenti periodici e comportamenti caotici. Si tratta di una sorta di transizione che si riduce via via che il comportamento caotico diventa del tutto predominante. Il terzo modo con cui un sistema può giungere al caos si ha quando insorge un attrattore quasi periodico, rappresentato matematicamente tramite un toro attorno a cui si avvolge la traiettoria del sistema, quando il toro perde di stabilità e avviene la sua rottura, chiamata torus breakdown si ha l'insorgere del comportamento caotico.

L'ultima tra le proprietà dei sistemi caotici, ma per questo non meno importante, è la configurazione dei bacini di attrazione di tipo frattale. Con bacino d'attrazione di un attrattore si indica l'insieme di tutti i punti dello spazio delle fasi che, se assunti come condizione iniziale, portano a ottenere un'evoluzione secondo quel dato attrattore. Il confine di un bacino di attrazione è costituito dall'insieme di punti che separano i bacini di attrazione di due attrattori diversi. Tali confini possono avere delle forme geometriche semplici, costituiti da curve o superfici, oppure possono avere delle forme molto complicate, spesso caratterizzate anche da strutture frattali. Queste complicate strutture sono anche causa dell'impossibilità di predire il comportamento a lungo termine del sistema. Risulta realmente difficile, infatti, stabilire a priori, data una condizione iniziale, caratterizzata da una precisione finita, a quale bacino essa appartenga se i confini fra i diversi bacini sono di natura frattale.

4.3.2 Complessità

Il termine complessità è molto utilizzato, a volte anche in maniera impropria, per indicare un concetto che fa parte del quotidiano, molte volte lo si usa anche a livello intuitivo soprattutto in riferimento a ciò che è più strettamente correlato ai fenomeni naturali. In realtà non è stata ancora fornita una definizione rigorosa in termini scientifici, tale per cui il termine possa essere assunto a pieno titolo nell'ambito delle scienze. In realtà l'ambiguità consiste nel fatto che complessità è una parola utilizzata in ambiti sempre più inter e trans disciplinari da rendere difficile, appunto, un inquadramento univoco. Riferendo quelli che sono stati i tentativi di definire in qualche modo la complessità, va sicuramente citato Ruelle secondo cui un oggetto, fisico o intellettuale che sia, è complesso se contiene informazioni difficili da ottenere. Come si può notare, tale affermazione contiene già di per se delle ambiguità poiché è difficile da stabilirsi cosa significhi difficili da ottenere. In generale, si può sostenere che il termine si contrappone direttamente al concetto di semplicità. L'uso scientifico del termine è stato tuttavia preponderante da quando Seth Lloyd, fisico del MIT e del Santa Fe Institute, nei primi anni '90 classificò trentadue esempi di situazioni che potevano essere definite complesse dando così vita alla teoria della complessità. L'indagine scientifica ha sempre con maggiore convinzione associato il concetto di complessità all'assenza di linearità, per indagare più a fondo il comportamento dei sistemi dinamici. Parlando infatti di teoria della complessità si associa inevitabilmente la teoria del caos, il comportamento emergente di molti sistemi, la complessità delle reti, il comportamento che i sistemi esibiscono quando sono lontani dall'equilibrio e le facoltà di auto-organizzazione. Anche se appare arduo, dunque, fornire una precisa definizione di complessità risulta abbastanza evidente che i comportamenti complessi debbano essere collocati in un territorio intermedio posto fra ordine e disordine, poiché sono caratterizzati da evoluzioni che non sono né regolari e prevedibili, né d'altra parte casuali o completamente caotiche. Un sistema che sia capace di mostrare dei comportamenti complessi è tipicamente costituito da una collezione di agenti distinti, caratterizzati da un elevato grado di autonomia, che sono opportunamente connessi fra loro da una serie di legami che introducono un certo grado di mutua dipendenza fra i diversi agenti. La natura delle interazioni che avvengono fra gli agenti è frequentemente di tipo non lineare determinando, dunque, un'evoluzione del sistema tipicamente non prevedibile e non controllabile. I comportamenti complessi sono frequentemente caratterizzati da un elevato grado di imprevedibilità che coesiste con una naturale tendenza del sistema all'auto organizzazione. Questa proprietà induce il sistema a dare vita spontaneamente a delle strutture organizzate su scala globale che sorgono a partire dalle interazioni tra agenti operanti su scala locale. I processi di auto organizzazione trasformano l'insieme dei singoli agenti in tutto unico che manifesta

delle proprietà, chiamate emergenti, che non possono essere comprese e spiegate esclusivamente a partire dal comportamento dei singoli elementi che costituiscono il sistema. In tali circostanze, i singoli elementi interagiscono tra loro su scala locale e la loro cooperazione, legata a fenomeni di sinergia, determina il comportamento globale del sistema fornendo anche proprietà che possono essere completamente estranee agli elementi singoli che costituiscono il sistema stesso.

4.3.3 Auto-organizzazione

Altre manifestazioni delle interazioni non lineari tra le componenti di un sistema sono legate ai fenomeni di auto-organizzazione. Questi sono forme di sviluppo del sistema che attraverso influenze e limiti provenienti dagli stessi elementi del sistema interagiscono e permettono di raggiungere un maggior livello di complessità. Questo concetto riveste particolare importanza nell'ambito della teoria dei sistemi e in campo multidisciplinare, tanto nel campo delle scienze naturali quanto in quello delle scienze umane. Sistemi auto organizzanti esibiscono comportamenti emergenti, infatti, l'auto organizzazione può essere definita come l'emergenza spontanea di strutture globali a partire dalle interazioni che avvengono su scala locale. Il fenomeno emergente è spontaneo cioè non esiste alcun agente, interno o esterno al sistema, che è responsabile direttamente del controllo del processo di organizzazione. Le varie interazioni tra gli elementi del sistema, che operano a livello locale, possono instaurare sinergie e fenomeni di organizzazione che tendono ad avere ripercussioni su scala globale, tramite la costituzione di strutture o di comportamenti che coinvolgono l'intero sistema. Ma come mai sono così importanti i processi di auto organizzazione? Sono importanti e interessanti nell'analisi dei sistemi dinamici dal momento che rendono possibile, a partire da sistemi dominati da evoluzioni caotiche, la creazione di strutture ordinate, processi collettivi in quanto distribuiti su tutti gli agenti che compongono il sistema. I sistemi in cui insorgono fenomeni di auto organizzazione appaiono particolarmente robusti e resistenti nell'affrontare eventuali danni e perturbazioni provenienti dall'ambiente esterno. Tale robustezza è dovuta principalmente alla natura distribuita delle funzioni e al fatto che non esistono componenti o parti fondamentali per il funzionamento complessivo del sistema. Adattamento ed evoluzione sono le caratteristiche di un sistema auto organizzato, infatti, se si manifestassero cambiamenti locali nel funzionamento del sistema, magari indotti dall'esterno, ciò non comporterebbe che tutto il sistema vada verso l'instabilità, bensì potrebbe verificarsi con più alta probabilità che il sistema auto organizzato si adatti al cambiamento controbilanciando il proprio stato interno, tramite una opportuna modifica. In tal modo il sistema adattandosi è come se compisse una ricerca continua di equilibrio dinamico che ridefinisce costantemente il rapporto tra il sistema e l'ambiente in cui esso è immerso. L'auto organizzazione è,

dunque, un meccanismo che rende possibile la trasformazione di un insieme di agenti singoli in un tutto unico che manifesta delle proprietà emergenti, che possono essere completamente estranee agli elementi singoli che costituiscono il sistema stesso.

4.3.4 Fenomeni emergenti

I fenomeni emergenti si manifestano quando nei sistemi vengono esibite proprietà inspiegabili relativamente alle leggi che governano le sue componenti. Tali fenomeni scaturiscono da interazioni non lineari tra le componenti stesse. Nonostante sia più facilmente riscontrabile in sistemi di organismi viventi, di individui sociali oppure in sistemi economici, l'emergenza si manifesta anche in contesti molto più elementari, come ad esempio la fisica delle particelle e la fisica atomica. L'emergenza può essere definita come un processo di formazione di schemi complessi a partire da regole più semplici, un esempio è fornito dal gioco Game Of Life di Conway, nel quale poche semplici regole fissate per pochi individui di base possono condurre a evoluzioni assai complesse. Come si è visto precedentemente i processi di auto organizzazione possono determinare il costituirsi di proprietà emergenti, spiegabili in termini di proprietà locali dei costituenti elementari. I singoli elementi che costituiscono il sistema perdono parte della loro autonomia per dare vita a un'organizzazione che rappresenta una nuova globalità che, proprio grazie alle proprietà emergenti, si trasforma in qualcosa di più della somma delle singole parti che lo costituiscono. Si è detto che tali fenomeni compaiono dall'interazione di un numero di elementi che agiscono non da singoli ma da collettività, dando origine a comportamenti più complessi. A pesare su tale proprietà non sono il numero di interazioni, tra le entità che costituiscono il sistema poiché nonostante aumenti in modo combinatorio con il numero delle componenti, non è garantito che un grande numero di interazioni possa determinare un comportamento emergente. Molte interazioni potrebbero infatti essere irrilevanti, oppure annullarsi a vicenda. Anzi addirittura in alcuni casi, un elevato numero di interazioni può sortire effetti di contrasto all'emergere di comportamenti interessanti, creando un rumore di fondo che di fatto può annullare l'insorgere di nuove proprietà globali. Inoltre non è affatto detto che una proprietà emergente sia necessariamente più complicata delle proprietà dei singoli agenti che l'hanno generata. Questo può verificarsi nelle scienze del comportamento, ma può non accadere in fisica dove si verifica spesso che i comportamenti globali siano particolarmente semplici, mentre le leggi che governano le interazioni tra le singole particelle siano invece complesse. Quindi il termine emergenza, per esempio in fisica, non è usato per indicare complessità, quanto piuttosto per distinguere quali leggi e concetti si applicano a macrosistemi e quali a sistemi microscopici. In questi casi bisogna considerare che l'esistenza di un fenomeno emergente a un livello macroscopico può ancora essere spiegata

considerando le interazioni tra le componenti microscopiche che lo compongono. I fenomeni emergenti allontanano dai principi della teoria riduzionista, che considera ogni sistema come la somma delle sue componenti e abbandona l'idea che solo in strutture gerarchiche possa nascere un comportamento emergente. L'evoluzione dei sistemi non è determinata da rigide leggi matematiche e relazioni causa effetto, ma da interazioni il cui effetto non è prevedibile a priori. Un comportamento emergente può nascere per esempio anche da strutture organizzative decentralizzate in cui è del tutto assente qualsiasi tipo di organizzazione gerarchica. Generalmente, prima che si possa presentare qualsiasi forma di comportamento emergente, il sistema deve raggiungere comunque una certa soglia di diversità, organizzazione e connettività. Dal punto di vista strettamente epistemologico, tutto ciò conduce a prediligere, per l'analisi di sistemi con molte componenti, una visione globale, ispirata a un approccio di tipo olistico, in netto contrasto con l'impostazione scientifica classica basata, invece, sull'approccio riduzionista. I fenomeni emergenti possono dunque essere definiti come frutto di un processo di formazione di schemi globali nuovi a partire dall'interazione di un insieme di agenti che operano secondo regole diverse. Un fenomeno, per essere definito emergente, deve essere inaspettato e imprevedibile se analizzato mediante lo studio delle proprietà degli elementi a un livello di osservazione più basso. Inoltre, il fenomeno deve coinvolgere l'intera collettività di agenti ed, essendo intrinsecamente distribuito su tutta la collettività, deve far sì che in molti casi il fenomeno globale non sussista o sia presente soltanto in piccole tracce ai livelli più bassi. Alcune proprietà infine sono definite emergenti poiché a partire dai comportamenti semplici o complessi ma comunque ben definiti dei singoli componenti del sistema, nasce un comportamento globale non imputabile direttamente al funzionamento delle singole parti. Le proprietà emergenti non sono attribuibili a un singolo evento, a una precisa regola opportunamente codificata nel sistema, o a qualche agente esterno che impartisce ordini e controlla il sistema, ma alla interazione cooperativa e non di tutti gli agenti che compongono il sistema stesso. Comportamenti emergenti sono riscontrabili non solo nei modelli sociali, ma anche chimici, biologici, fisici e suggeriscono suggestioni e flessibilità imprevedibili. Esempi di tali manifestazioni possono essere dati dalle colonie di formiche, dagli stormi di uccelli, ma anche dalla forma delle galassie o dall'evoluzione di moderni sistemi di comunicazione, condivisione e scambio dell'informazione, come i modelli informatici basati su tecnologia wiki.

4.3.5 Esempi di sistemi caotici

Accade spesso che sistemi dinamici semplici tramite un processo d'iterazione mostrino comportamenti caotici anche molto complessi, che, per le caratteristiche legate sostanzialmente alla loro formulazione matematica, possano essere utilizzati

come esempi didattici molto esplicativi ed efficaci. E' il caso, per esempio, della mappa logistica, tipico esempio di sistema dinamico discreto non lineare a una dimensione. Resa celebre da Robert May biologo che dedicò molti studi all'evoluzione delle popolazioni in alcune specie biologiche, la mappa logistica è una mappa polinomiale che può essere scritta in termini matematici come:

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

dove, in corrispondenza dell'iterazione n e $n+1$, i due termini in x rappresentano lo stato della mappa, definite nell'intervallo $(0, 1)$, α è il parametro di controllo del sistema e può variare nell'intervallo $(0, 4)$. A seconda del valore assunto da quest'ultimo e del numero di iterazioni si generano diverse evoluzioni: dal punto fisso, alla sua instabilità, al ciclo limite che mano a mano tramite un processo di biforcazione oscilla progressivamente fra quattro valori, otto valori differenti, e così via fino al fenomeno del raddoppiamento del periodo in cascata che causa, infine, l'instaurarsi di evoluzioni caotiche. La mappa di biforcazione è un tipo di grafico che consente di rappresentare le modifiche che subisce il comportamento del sistema dinamico al variare di un suo parametro di controllo. In figura 4.7 è riportata la mappa di biforcazione relativa alla mappa logistica.

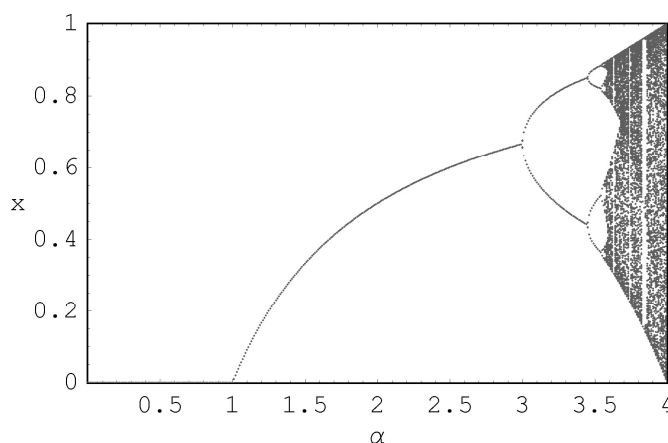


Fig. 4.7 Mappa di biforcazione relativa alla mappa logistica

E' possibile individuare nell'immagine le variazioni appena descritte relative all'evoluzione del sistema, in particolare, nella parte destra del grafico, sono visibili i cambiamenti di comportamento legati al fenomeno del raddoppiamento del periodo in cascata. Altro esempio semplice di sistemi a due dimensioni è la mappa di Hénon, un semplice ed efficiente modello di sistema dissipativo capace anch'esso di mostrare un'evoluzione caotica. Anche in questo caso il comportamento mostrato dall'iterazione della mappa dipende dai valori assunti dai due parametri di controllo. Il sistema evolve da una condizione stabile caratterizzata da punti fissi e cicli limite fino a una condizione caotica caratterizzata da differenti attrattori strani. Le mappe di

biforcazione che si ottengono per le coordinate x e y al variare dei parametri in determinati intervalli hanno un andamento molto simile a quello visto in precedenza (Fig. 4.8).

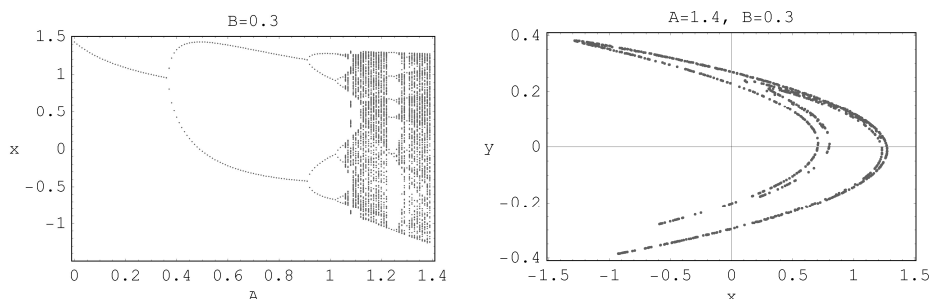


Fig. 4.8 Mappa di biforcazione relativa alla mappa di Hénon e attrattore strano

Anche in questo caso è possibile individuare il raddoppiamento del periodo in cascata. Infine i sistemi caotici a tre dimensioni sono generalmente continui e dunque rappresentabili tramite orbite costituite da curve continue nello spazio tridimensionale. Sono esempi di questo tipo il modello sviluppato da Lorenz per studiare in maniera semplificata il fenomeno della convezione atmosferica e il circuito elettronico di Chua.

4.4 Il circuito di Chua

Si è detto come lo studioso E. N. Lorenz arrivò, dopo numerosi studi e tentativi a formulare un modello matematico, un sistema di tre equazioni differenziali, in grado di simulare con efficacia l'evoluzione dei sistemi meteorologici. Questo accadeva, nel 1963. Vent'anni più tardi un altro studioso, L. Chua, inventava il più semplice modello tra i circuiti non lineari per lo studio di fenomeni non periodici. Attraverso il circuito di Chua le strutture geometriche caotiche, le biforcazioni e i fenomeni di oscillazione, periodica e non, sono stati analizzati sia da un punto di vista teorico, sia attraverso simulazioni al computer, sia attraverso esperimenti in laboratorio condotti sul circuito elettronico.

4.4.1 Introduzione all'oscillatore di Chua e sue generalizzazioni

La produzione di meccanismi caotici nei circuiti elettronici è legata alla presenza di alcune caratteristiche, infatti, il circuito formato da resistori condensatori e induttanze deve contenere almeno: un elemento non lineare, un resistore attivo e

tre elementi accumulatori di energia. Il circuito di Chua è il più semplice dispositivo mai inventato al mondo, la cui realizzazione è possibile al costo di pochi euro, che soddisfa queste caratteristiche. Il circuito, rappresentato schematicamente in Figura 4.9, è uno dei sistemi maggiormente studiati e utilizzati per analizzare e sfruttare le dinamiche non lineari. Esso è composto, da un induttore lineare L , da un resistore lineare R , da due capacitori lineari C_1 e C_2 e da un resistore non lineare N_R controllato in tensione, denominato diodo di Chua (Kennedy, 1992a).

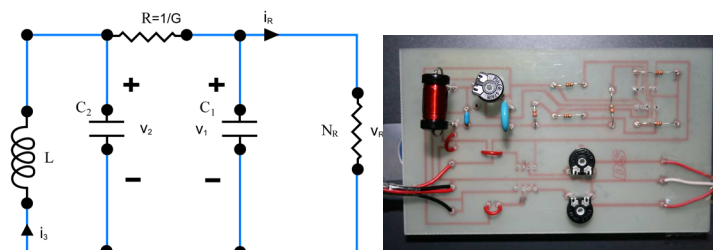


Fig. 4.9 Circuito di Chua, schematizzato e reale

Il circuito è il primo sistema fisico per il quale la presenza del caos, nel senso di Shilnikov (Silva, 1993), è stata verificata sperimentalmente, confermata numericamente e provata matematicamente e mostra una ricca varietà di biforcazioni e caos (Kennedy, 1992b). In particolare, questo sistema è il più in basso grado, ossia è un sistema dinamico del terzo ordine, che esibisce un repertorio di dinamiche non periodiche, solitamente rintracciabili nei sistemi di ordine più elevato. Il primo tentativo cui assistette Chua, nei primi anni '80, fu di riprodurre il caos attraverso un circuito analogico costruito sulla base delle equazioni di Lorenz. L'intuizione che egli ebbe fu che i circuiti lineari a tratti del terzo ordine, contenenti un resistore non lineare controllato in tensione potessero produrre il caos. Inoltre, i punti guida caratteristici del resistore non lineare controllato in tensione N_R devono essere scelti in modo tale da fornire almeno due punti di equilibrio instabile. La caratteristica tensione corrente del diodo di Chua è infatti rappresentata da un andamento del tipo in Fig. 4.10.

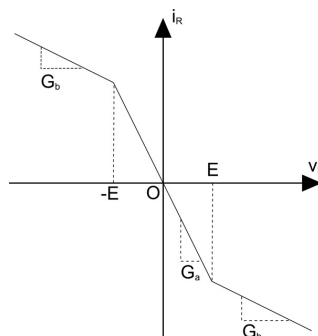


Fig. 4.10 Caratteristica tensione-corrente relativa al diodo di Chua

Le ricche dinamiche dei comportamenti del circuito di Chua furono confermate dalle simulazioni al computer (Matsumoto, 1984) e da esperimenti di laboratorio (Zhong & Ayrom, 1985). Fino a quel punto erano stati compiuti notevoli sforzi per comprendere tutti gli aspetti delle dinamiche del circuito, anche allo scopo di renderlo come modello per l'apprendimento, la comprensione e l'insegnamento delle dinamiche non lineari e del caos. La dimostrazione che il circuito è caratterizzato da un comportamento caotico nel senso di Shilnikov avvenne successivamente (Kennedy & Chua, 1991). Più recentemente, aggiungendo un resistore lineare in serie all'induttore, il circuito è stato generalizzato nella forma canonica dell'oscillatore di Chua (Chua, 1993c). Scegliendo appropriatamente i parametri, il circuito può mostrare le strade verso il caos caratteristiche dei sistemi dinamici non lineari.

4.4.2 Strade verso il caos e biforcazioni

Partendo da una condizione di stabilità, rappresentata da un punto fisso di equilibrio, il circuito di Chua manifesta, come tutti i sistemi caotici caratteristiche evoluzioni che lo conducono fino al caos. Queste condizioni possono essere verificate, sia numericamente, attraverso opportune modifiche dei parametri, sia sul circuito variando la resistenza del resistore lineare R . Al decrescere della resistenza, in particolare, i punti di equilibrio diventano instabili facendo emergere quelle che tecnicamente vengono definite biforcazione di Hopf. Le traiettorie sono attratte nell'origine e si muovono seguendo un'orbita circolare, questo è il cosiddetto ciclo limite che immediatamente dopo, sempre al variare di R è seguito rispettivamente dalla formazione di una spirale e in cascata da un raddoppio del ciclo limite attraverso una biforcazione detta di pitchfork. Quando il ciclo limite si chiude su se stesso dopo aver descritto un'orbita costituita da due anelli, si dice che il ciclo limite ha "periodo 2" poiché la traiettoria impiega approssimativamente due volte il tempo necessario per completare l'orbita completa, rispetto al ciclo limite a orbita singola. Al decrescere di R si producono ulteriori biforcazioni, di periodo 4, 8, 16 e così via, fino a quando si raggiunge un'orbita di periodicità infinita al di là della quale si manifesta il comportamento caotico. Emerge in questo caso un attrattore strano, definito spirale di Chua. Lo spazio dei parametri del circuito di Chua può variare in delle regioni caotiche, dove esistono degli intervalli del parametro di biforcazione R in cui si rileva un moto periodico. Queste regioni, dove si manifesta la periodicità, sono chiamate finestre di periodicità. Nel circuito di Chua ne sono state trovate di periodo 3 e 5. Questi cicli limite periodici raddoppiano la loro periodicità fino a raggiungere lo stato caotico, in funzione del valore decrescente di R . Si parla così di ciclo limite a triplo giro, poiché la traiettoria orbita tre volte attorno al punto di equilibrio, prima di ricongiungersi su se stessa oppure di ciclo limite con un'orbita a

sei giri, ciclo limite periodico a sei orbite, conseguenza di una biforcazione causata dalla variazione di R , su di un ciclo limite a triplo giro. Poiché il resistore non lineare ha caratteristica simmetrica, ogni attrattore che si trova in una regione ha un omologo nella regione simmetrica. Quindi, quando la resistenza di accoppiamento R decresce ulteriormente, l'attrattore di Chua a spirale collide con il suo simmetrico e la fusione dei due produce quello che viene chiamato un attrattore strano "double-scroll". La sequenza dell'evoluzione del segnale di tensione proveniente dal circuito di Chua al variare di R è rappresentata in Fig. 4.11.

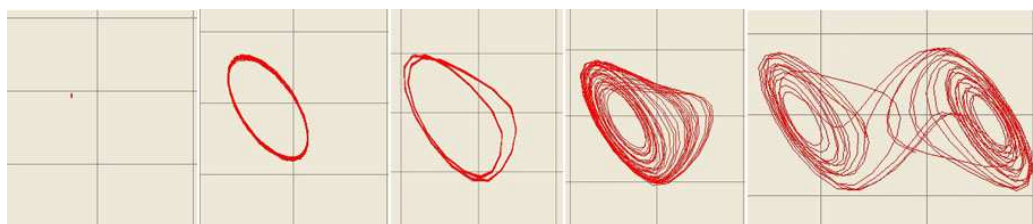


Fig. 4.11 Segnale di tensione proveniente dal circuito di Chua

Dopo un certo limite si evidenzia, infine la cosiddetta boundary crisis e le traiettorie diventano illimitate determinando il cosiddetto overflow.

4.4.3 Modellazione e Simulazione

A seconda che si considerino sistemi dinamici continui o discreti, l'evoluzione può essere calcolata mediante un processo d'iterazione del loro modello matematico. In tal modo si può ricavare una successione ordinata di punti dello spazio delle fasi che rappresentano la variazione nel tempo delle variabili di stato del sistema. Nel caso dei sistemi dinamici continui tale evoluzione può essere ottenuta risolvendo il sistema di equazioni differenziali che ne costituisce il modello matematico. La risoluzione analitica di un sistema di equazioni differenziali risulta essere, come già visto, molto complicato, se non del tutto impossibile, se si considerano i sistemi non lineari. Per questo motivo si ricorre spesso all'utilizzo di metodi che prevedono la risoluzione numerica, mediante calcolatore, del sistema di equazioni differenziali. Tali metodi consentono di simulare l'evoluzione del sistema dinamico tramite l'individuazione di una soluzione approssimata della traiettoria nello spazio delle fasi. Il processo, spesso indicato con il termine di integrazione numerica del sistema di equazioni differenziali, fornisce l'unico possibile modo di risoluzione del modello matematico di un sistema dinamico e rende possibile l'individuazione di una sequenza discreta di punti che approssimano la traiettoria continua, soluzione del sistema di equazioni differenziali. E' solo grazie al calcolatore che è possibile tracciare una soluzione numerica approssimata dell'evoluzione che subisce nel tempo un

qualsiasi sistema dinamico continuo. Nel caso dell'oscillatore di Chua si possono per di più verificare attraverso la simulazione e l'integrazione le osservazioni sperimentali e la descrizione qualitativa delle dinamiche globali del circuito. Questo passaggio è molto importante proprio per l'applicazione del metodo scientifico: gli esperimenti possono essere confermati dalle simulazioni al computer. Uno dei modelli di simulazione del circuito di Chua più utilizzati è dovuto a Kennedy che sviluppò, a corredo dei suoi articoli sul caos (Kennedy, 1993a, 1993b) il cosiddetto ABC, Adventures in Bifurcations and Chaos, un programma che utilizza una routine d'integrazione basata sul metodo di Runge Kutta del quarto ordine. Nel caso dell'oscillatore di Chua, il simulatore può calcolare e disegnare i punti di equilibrio e le traiettorie ed è in grado di fornire una proiezione bidimensionale della dinamica tridimensionale. L'utente può cambiare i parametri, le condizioni iniziali e il punto di vista da cui osservare gli attrattori. La possibilità di visualizzare l'attrattore a partire da diverse angolazioni, permette di definire anche intuitivamente la struttura geometrica delle dinamiche del sistema. Inoltre, il simulatore può essere fornito da un'ampia base di dati contenenti un insieme di condizioni iniziali e parametri che producono tutte le dinamiche e i comportamenti più tipici dell'oscillatore di Chua: punti di equilibrio, sequenze di biforcazione, orbite periodiche oltre che una vasta gamma di attrattori caotici. Si tratta in un certo senso di una libreria di soluzioni a regime messa a punto con tutti i tipi di attrattori mano a mano scoperti negli anni.

4.5 Applicazioni: il caos e l'arte

Gli studi sul caos hanno trovato risonanza anche nell'arte moderna e contemporanea. I sistemi caotici sono, infatti, in grado di generare una grande varietà di digital artworks, se si considerano le modellizzazioni e le simulazioni matematiche, ma sono in grado anche di essere fonte d'ispirazione per artisti di ogni epoca. Da sempre l'uomo ha cercato di dominare lo spazio tramite la sua ricostruzione e la sua rappresentazione e la matematica ha costituito e costituisce uno degli strumenti più efficaci in questo senso. Questa può essere considerata uno strumento essenziale infatti, tanto per le discipline scientifiche che per le discipline umanistiche. La matematica, o in generale la scienza, e l'arte hanno molti punti in comune, poiché cercano entrambe di decodificare e fornire un'interpretazione della realtà. Da ciò deriva l'attività di dimostrazione di leggi e principi che possano essere duraturi nel tempo e universali, proprio come l'arte che risulta una forma eterna per l'espressività umana. Anche il linguaggio astratto è comune, la matematica è infatti basata integralmente su un linguaggio simbolico, così come l'arte. Come la matematica abbia sin dai tempi antichi costituito il fondamento per qualsiasi opera d'arte lo testimonia più di ogni altra, l'arte greca, secondo i cui canoni le creazioni dovevano rispondere alla teoria delle proporzioni. Ma ritornando al caos e ai sistemi

caotici, si possono trovare espressioni matematiche, geometriche e fisiche in molti capolavori artistici, basti pensare, per esempio, Braque, Léger, Kandinsky, Gietl, nelle cui opere si riscontrano precisi richiami al caos, ai sistemi complessi, alle simmetrie matematiche, alle scomposizioni geometriche delle forme, insomma, quelli citati e molti altri artisti che si sono consegnati alla storia come matematici, o, se non altro, come rapiti dai segreti e dal fascino della matematica. Negli anni, grazie a numerose ricerche che si sono sviluppate in questo campo, i modelli matematici caotici sono stati applicati, lo si è ribadito più volte in moltissimi campi e settori scientifici: dalla medicina, alla biologia, alle neuroscienze, alla finanza, alla fisica, alla matematica, per indagare evoluzioni o comportamenti apparentemente inspiegabili e cercare di realizzare eventualmente anche un controllo sugli stessi. Come sia possibile generare oggetti digitali artistici attraverso i sistemi caotici è illustrato sinteticamente nelle prossime due sezioni.

4.5.1 La visualizzazione scientifica dello spazio dei parametri

Alcuni sistemi dinamici non lineari che esibiscono comportamenti caotici sono rappresentati matematicamente da sistemi di equazioni. Tra tutti citiamo il modello matematico di Lorenz, allo stesso modo potrebbe essere citato Rössler, e molti altri. Ciò che rende possibile la visualizzazione è il calcolo numerico che fa sì che tali espressioni matematiche, tramite, appunto, il computer diventino immagini. Il modello matematico di Chua rappresenta un'eccezione nel panorama conoscitivo delle ricerche sul caos, in quanto, è l'espressione matematica di un'invenzione fisica: il circuito. Partendo dalle equazioni di stato dell'oscillatore (4.1) e ricavandone un modello adimensionale (4.2),

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{C_1} [G(v_2 - v_1) - f(v_1)] \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{C_2} (G(v_1 - v_2) + i_3) \\ \frac{di_3}{dt} = -\frac{1}{L} (v_2 + R_0 i_3) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{d\tau} = \kappa\alpha[y - x - f(x)] \\ \frac{dy}{d\tau} = \kappa(x - y + z) \\ \frac{dz}{d\tau} = \kappa(-\beta y - \gamma z) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

in cui, cioè, non compaiano le varie grandezze fisiche dei componenti elettrici ed elettronici, ma solo sei parametri adimensionali. I modelli matematici, che si è detto, possono essere risolti solo numericamente, tramite l'integrazione producono delle serie numeriche che attraverso opportuni algoritmi possono essere visualizzate sullo schermo di un computer come immagini bidimensionali di modelli tridimensionali. Tali visualizzazioni possono essere manipolate graficamente introducendo le più fantasiose modifiche: lo spessore e la sezione della sequenza di punti che si generano, quindi lo spessore delle linee, le proprietà dei materiali con maggiori o minori riflessioni, i colori. Nelle immagini (Fig. 4.12) che seguono sono rappresentati

alcuni esempi di attrattori derivanti dal modello matematico adimensionale del circuito di Chua.

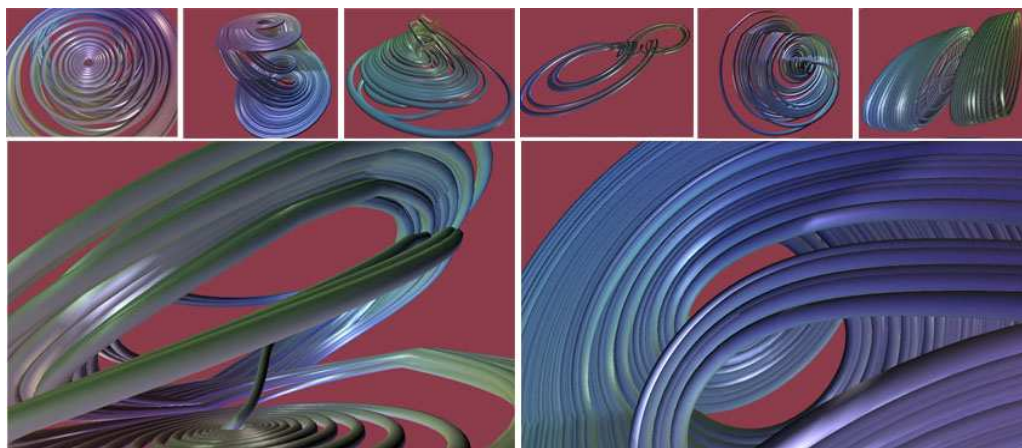


Fig. 4.12 Alcune visualizzazioni di attrattori derivati dal Chua

E' a questo punto che subentra la possibilità di manipolare graficamente l'immagine rendendo fantasiosa qualsiasi rappresentazione matematica, di seguito sono riportati alcuni esempi, Fig. 4.13.

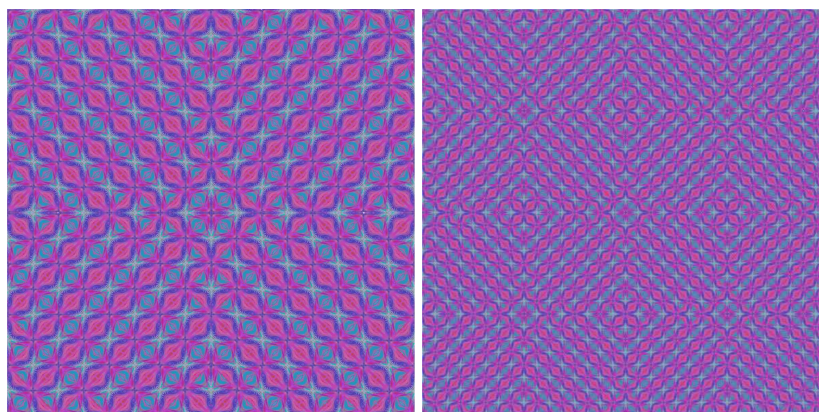


Fig. 4.13 Alcune manipolazioni digitali realizzate a partire dagli attrattori di Chua

Addentrarsi in discorsi relativi all'estetica artistica può risultare a questo punto molto difficile. A seconda di un'interpretazione estremamente soggettiva è possibile riscontrare l'assenza o la presenza di canoni estetici. Sicuramente però queste creazioni appaiono suggestive e capaci di trasmettere interessi e curiosità.

4.5.2 La sonorizzazione del modello matematico

L'uso dei sistemi dinamici non lineari, si è visto, è stato ed è tuttora molto diversificato. Tra le varie applicazioni, i sistemi caotici possono essere anche utilizzati per la ricerca su algoritmi di sintesi e processi di elaborazione numerica del suono. L'evoluzione del sistema dinamico produce delle serie temporali, queste, possono essere utilizzate in modi diversi: all'interno di algoritmi di sintesi del suono (Rizzuti, 2009a), oppure in un processo di sintesi controllando la variazione nel tempo dei parametri (Rizzuti, 2007), oppure ancora per esplorare attraverso algoritmi genetici lo spazio dei parametri di un sistema dinamico caotico, selezionando delle configurazioni di parametri capaci di generare delle sequenze melodiche (Rizzuti et al., 2009b). Naturalmente i sistemi che, partendo da sistemi dinamici non lineari, sono in grado di generare suoni possono avere diversi livelli di complessità. Nel caso dell'oscillatore di Chua (Rizzuti, 2009c), il più semplice sistema in grado di generare suoni si realizza quando le serie temporali prodotte dal sistema sono inviate direttamente alle uscite della scheda audio del calcolatore questo meccanismo equivale pressappoco al caso in cui si colleghino direttamente i terminali del circuito elettronico fisico agli altoparlanti, infatti ciò che si produce è assimilabile al rumore. In maniera più articolata si possono sfruttare i sistemi dinamici all'interno di algoritmi di sintesi del suono. In questo caso le serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua sono utilizzate come segnali che modulano la frequenza di un oscillatore sinusoidale. Non solo la sintesi del suono, ma anche i processi di elaborazione come la ring modulation o il delay possono utilizzare i sistemi dinamici caotici, in tal modo le serie temporali prodotte dall'oscillatore di Chua possono essere impiegate per creare effetti capaci di modificare il suono sintetizzato mediante il calcolatore e quello prodotto dagli strumenti musicali tradizionali. Infine, prendiamo in considerazione un sistema che, sempre a partire dal modello matematico dell'oscillatore di Chua, consente di generare musiche. Tutto parte sempre dalle serie temporali prodotte dal sistema dinamico dell'oscillatore di Chua, che in questo caso è il generatore, un sintetizzatore MIDI produce le note musicali in base alle informazioni prodotte dal sistema di codifica. Le serie temporali prodotte dal sistema dinamico possono essere codificate secondo approcci diversi: è possibile produrre tre differenti linee melodiche, una per ogni variabile del sistema, oppure si può codificare ogni serie temporale tramite uno dei vari parametri musicali di una stessa linea melodica. Inoltre è possibile utilizzare diversi tipi di codici che determinano rappresentazioni musicali molto differenti le une dalle altre. In conclusione si è evidenziato come sia possibile sfruttare l'oscillatore di Chua o altri sistemi dinamici non lineari per finalità artistiche, ciò si coniuga e completa quanto visto in precedenza in relazione alle rappresentazioni visuali e grafiche viste. Come tutti gli atti di creazione artistica, anche la produzione di musiche dai sistemi caotici prevede una rielaborazione del materiale cosiddetto grezzo. Le sequenze melodiche prodotte sono le basi per l'avvio

di un processo di organizzazione e di composizione finalizzato alla realizzazione di brani musicali che abbiano una struttura organica. L'atto compositivo risulta di fondamentale importanza poiché consente di imprimere una struttura e una organizzazione musicale su del materiale spesso molto suggestivo tanto quanto carente di coerenza e di senso musicale.

CAPITOLO 5. Percorsi Didattici e Attività di Laboratorio

"...tra le sicure maniere di conseguire la verità è l'anteporre l'esperienza a qualsivoglia discorso... non sendo possibile che una sensata esperienza sia contraria al vero."

Galileo Galilei (Lettera a Fortunio Liceti, 1640)

"Longum iter est per praecepta, breve et efficax per exempla."

Seneca

Negli ultimi anni, come già accennato, la comunità scientifica ha concentrato notevoli sforzi per investigare sul fenomeno del caos e sulla complessità. Molti sono stati i sistemi dinamici non lineari studiati fino a oggi e con essi i diversi tipi di comportamento caotico emergente. La complessità e il caos sono considerati degli argomenti scientifici particolarmente ostici, solitamente patrimonio di soli specialisti. I vincoli posti dal sentire comune sull'acquisizione di conoscenze complesse, sono reali, basati su effettivi limiti o, contrariamente, è possibile destrutturare e ristrutturare i concetti seguendo metodi propri di diverse teorie cognitive perché anche studenti siano in grado di costruire il circuito di Chua, simulare il caos, creare musica dal circuito? Obiettivo principale della ricerca è stato avvicinare i giovanissimi al mondo del sapere scientifico e ad argomenti di studio avanzati come la teoria del caos e della complessità. Il circuito di Chua è un dispositivo elettronico dinamico non lineare divenuto paradigma universale nella teoria del caos. A venticinque anni dalla sua invenzione, si può affermare, senza ombra di dubbio, che la straordinarietà di tale scoperta è la sua semplice riproducibilità, già Kennedy nel 1993 ne intravedeva il suo potenziale valore didattico. I sistemi fino ad allora conosciuti erano modelli matematici, il sistema di equazioni di Lorenz e quello di Rössler, ma nulla di fisico era mai stato costruito. Il circuito di Chua, inoltre, viene preferito a una serie di altri circuiti a comportamento caotico dal momento che la sua costituzione è semplice e altrettanto semplice è la sua riproducibilità. Ma, a fronte di tali semplificazioni oggettive, possono studenti molto giovani apprendere concetti complessi come quelli legati ai fenomeni caotici? In fondo si tratta di introdurre concetti a loro totalmente estranei. Spesso la pratica su componenti elettronici e circuitali non è familiare neanche a studenti di corsi tecnici universitari. Per investigare ciò è stato messo a punto un metodo di apprendimento, basato su quattro passi fondamentali che

presenta il caos sotto una veste innovativa, come creatore di immagini e musiche, proponendo la costruzione del circuito di Chua. I giovani studenti pur non avendo le conoscenze fisico-matematiche necessarie, hanno avuto ugualmente la possibilità di interagire con gli oggetti caratteristici del caos, gli attrattori strani, scoprendone il fascino e la bellezza, e realizzando infine l'esperienza dell'apprendimento attraverso la manipolazione. La sperimentazione, estendendo i suoi confini, ha anche offerto la possibilità di indagare, grazie alla presentazione di una serie di artefatti già realizzati, i forti legami tra scienza e arte. Dalla creazione dei modelli tridimensionali degli attrattori, si è giunti fino alla realizzazione di suoni e musiche. Punto fondamentale è quindi la sperimentazione di come sia possibile apprendere attraverso la manipolazione e il gioco e come si possa approcciare la scienza in maniera sperimentale, creativa e piacevole. Il presente capitolo descrive i metodi e i contesti derivati dall'esperienza didattica condotta durante il corso di Dottorato. E' una ricerca ampia che spazia dai materiali, al set, all'ampliamento e diversificazione degli approcci didattici che hanno visto coinvolte nella sperimentazione più di seicento persone, principalmente in età scolare dagli undici ai venti anni. Gli approcci didattici che saranno presentati nel capitolo sono due: uno si basa su tre esperienze progettate e realizzate nelle aule scolastiche di istituti d'istruzione primari e secondari, l'altro è quello più insolito di una mostra espositiva svolta nel 2008 nell'arco di sei giorni che ha visto protagonisti studenti di scuole primarie e secondarie. Il metodo è stato progettato attraverso una strutturazione cognitiva del problema di rendere divulgabili contenuti tanto originali, quanto, come già sottolineato, ostici. La difficoltà insita nello svolgimento dell'esperienza si presentava acuita proprio per i contenuti da veicolare. Sulla base di nozioni teoriche e strumentazioni che pure si avevano a disposizione, era difficoltoso concepire e realizzare materiali multimediali e fisici che avessero un effettivo utilizzo pratico. Avendo a disposizione una serie di informazioni teoriche, applicazioni software e strumenti il lavoro è stato concepito in maniera da scomporre concettualmente ogni singolo elemento a disposizione e ricomporlo in un formato nuovo e fruibile definendo un metodo che consentisse di percorrere la strada di un approccio esperienziale fondato sulla manipolazione e la creatività. Ciò che si è strutturato è stato un vero e proprio metodo ripetibile, esportabile, strutturato che ha consentito il suo riutilizzo in diverse pratiche didattiche, basato, quindi, sui principi fondanti del metodo scientifico. In questa sezione verranno analizzati gli aspetti più peculiari del metodo esponendo anche i risultati che da tale ricerca sono stati ottenuti e i materiali prodotti.

5.1 Fondamenti teorici

Molti fenomeni complessi del mondo non possono essere afferrati in termini conoscitivi, ciò sta alla base del concetto mitologico di caos fornito dagli antichi Greci. La scienza contemporanea ha cercato di capire i principi fondanti della teoria del caos e per far ciò, ha cercato di ricostruire la dinamica caotica attraverso modelli matematici, oggetti fisici e studi sperimentali. Tale sforzo ha cambiato il modo di percepire la scienza e le scoperte scientifiche nella società, dando spazio a visioni più ampie e complesse. In tale senso, l'invenzione del circuito di Chua (Chua, 1993; Chua *et al.*, 1993a, 1993b; Madan, 1993) e del suo caratteristico diodo non lineare ha aperto una nuova fase nella ricerca e nell'analisi dei fenomeni caotici. Il circuito di Chua è stato il primo circuito in grado di provare il caos numericamente e analiticamente, avendo anche la particolare caratteristica di essere facilmente riproducibile e prestandosi molto bene agli esperimenti in laboratorio. Non sorprende, dunque, che il circuito di Chua sia diventato uno dei più utilizzati strumenti nella ricerca scientifica sulla complessità, comprendendo più di mille lavori in letteratura a esso riferiti. A differenza dell'attrattore di Lorentz, capace di generare solo poche classi e pattern dinamici, il circuito di Chua e i sistemi basati su esso, producono una grande quantità di strutture caotiche con differenti forme e dimensioni (Chua, 1992a). Inoltre, una semplice modifica al circuito di Chua, cioè l'introduzione di un resistore lineare, ha portato all'invenzione dell'oscillatore di Chua che manifesta allo stesso modo una varietà elevata di comportamenti caotici (Chua *et al.*, 1993a, 1993b). Nel 1993 Madan definì il circuito di Chua sistema fondamentale nello studio del caos (Madan, 1993) attribuendo allo stesso una valenza paradigmatica. Notevole è stato il lavoro di analisi numerica e catalogazione dei comportamenti emergenti dal circuito e lo sforzo per rendere fruibili tali ricerche. Recentemente è stata completata una *Galleria degli Attrattori di Chua*, nella quale sono riportati i pattern e le immagini di attrattori, generati da apposite applicazioni, di straordinaria bellezza mai prodotti prima in letteratura, relativamente alla teoria del caos (Bilotta *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007e). Allo stesso modo sono stati pubblicati diversi lavori sulla traduzione di tali sistemi dinamici in musica generativa (Bilotta *et al.*, 2005, 2007f). Tale ricerca ha reso possibile anche la realizzazione di prodotti multimediali attraverso cui è possibile visualizzare e ascoltare le variazioni prodotte dall'oscillatore di Chua, in termini di modelli tridimensionali, musica e suoni. Dalla modifica dei parametri di controllo del sistema è possibile modificare in tempo reale gli attrattori tridimensionali, spesso anche di natura frattale (Bilotta *et al.*, 2007g). La diversità dei modelli, delle immagini e delle musiche prodotte, la possibilità di interazione e quindi di modifica delle varie configurazioni, la riproducibilità del circuito di Chua hanno costituito le fondamenta per la sperimentazione. Il contesto generale della sperimentazione è esplorare i benefici cognitivi dell'apprendere attraverso il fare, l'esperire (learning by doing). Il soggetto impara attraverso l'azione, sia essa fisica, esplorando il funzionamento di un

oggetto, o mentale, riflettendo sui risultati che si ottengono e sul loro significato. Questa visione dell'apprendimento si è rivelata fondamentale per stimolare un approccio educativo centrato sullo studente. Come afferma Bruner attraverso la manualità possono scoprirsi i contenuti del mondo, gli oggetti stimolano il pensiero dello studente a formulare ipotesi, verificare empiricamente gli aspetti del problema costruendo passo dopo passo l'artefatto che mostrerà un'evoluzione caotica. Sulla scia delle tecnologie sviluppate negli ultimi anni, che bene hanno messo in luce le problematiche e i metodi legati a questi aspetti dell'apprendimento, si pensi a esempio ai *Digital Manipulatives* (Resnick et al., 2000), è stato elaborato un metodo che propone un uso didattico delle tecnologie: quali il circuito elettronico di Chua, un software di simulazione e strumenti musicali digitali. In tale modo è stata offerta ai ragazzi la possibilità di investigare e conoscere i principi che sono alla base dei sistemi dinamici caotici. Attraverso la manipolazione di tali strumenti gli studenti possono esplorare concetti che normalmente sono considerati troppo avanzati o difficili da comprendere (Resnick et al., 1998), sperimentando un processo di scoperta e verifica diretta e favorendo così l'apprendimento. Costruire fisicamente il circuito di Chua e visualizzare il segnale caotico che produce, favorisce l'intelligenza pratica stimolando la dimensione produttiva e quella costruttiva. La dimensione produttiva dell'attività deriva dal fatto che i soggetti perseguono degli obiettivi per raggiungere dei risultati, la dimensione costruttiva implica la costruzione di strumenti che supportino l'attività concettuale. Nel quadro teorico delle scienze cognitive, tale ricerca sostiene l'idea che la conoscenza non si trasmette già organizzata, semplicemente enunciandola, ma va da ciascuno costruita sotto la guida e la mediazione esperta del docente interagendo in un ambiente che stimoli e sostenga l'apprendimento secondo il proprio stile (Cacciamani, 2002; von Glasersfeld, 1998). La conoscenza è, secondo questa visione, il risultato di un'organizzazione attiva della propria esperienza fondata sul ricorso a metodologie di insegnamento interattive, l'uso di strumenti e, in generale, di ambienti che facilitino l'apprendimento attivo e significativo dei concetti.

5.2 Comunicare concetti di fisica avanzata nelle scuole

Il caos e più in generale la scienza viene a manifestarsi attraverso media inusuali: le forme tridimensionali degli attrattori, la musica, i suoni caotici, la manipolazione fisica e la sperimentazione del comportamento caotico del circuito di Chua. Gli elementi caratterizzanti l'impalcatura concettuale di una tale prassi esperienziale hanno radici nella convinzione che metodologie così strutturalmente concepite, in quanto "immersive" implicino dinamiche percettive e cognitive molto interessanti per la ricerca (Myron, 1992). La sperimentazione condotta scaturisce da una domanda fondamentale: è possibile insegnare la scienza a una platea non preparata e priva completamente delle infrastrutture e delle conoscenze fisico matematiche

che sarebbero necessarie per una profonda comprensione del fenomeno del caos? Tale interrogativo si inserisce nell'ambito della sperimentazione di metodologie per la comunicazione della scienza e dell'educazione ad argomenti scientifici al fine di favorire una migliore comprensione e valorizzazione del rapporto scienza e società. Ciò che si è inteso sviluppare è un modello di comunicazione della scienza che valuti qualitativamente e quantitativamente i fattori di attrazione e di distacco delle giovani generazioni nei confronti della scienza; valutando anche le attitudini dei ragazzi verso la scienza e i suoi valori attraverso l'analisi dei risultati del percorso didattico e delle attività di laboratorio svolte; cogliendo la percezione della scienza da parte di giovanissimi studenti; indagando valori, aspettative e il modello di comunicazione messo a punto. Si è voluto infine affrontare tale sperimentazione valorizzando elementi partecipativi e di socialità che hanno portato i ragazzi a un apprendimento collaborativo e condiviso. Partendo dall'idea che nel settore della comunicazione della scienza non esiste un metodo in grado di determinare in maniera lineare e deterministica la percezione e assegnare giudizi di valore (Greco, 2008), nell'immaginario giovanile la scienza ha una rappresentazione astratta di entità culturale a se stante difficilmente avvicinabile e conoscibile da parte della maggioranza dei giovani. La metafora della *vocazione* contribuisce ad alimentare l'immagine degli scienziati come di una cerchia di eletti, elevati quanto distanti, per far parte dei quali bisogna, quanto meno *essere portati*. Come nota Brandi (Brandi et al., 2005) il termine stesso normalmente utilizzato per indicare l'allontanamento dei giovani dalla scienza, la *crisi delle vocazioni scientifiche* risulta emblematico del problema sottostante: evoca una *chiamata divina* e in quanto tale esprime una distanza: il sacro è ciò che occupa un posto a parte, ciò che è separato, ciò che non può mescolarsi al profano senza cessare di essere se stesso (Alexander, 1988); il sacro è circondato da un'aura che "intimorisce e attrae, terrorizza e affascina" (Habermas, 1984). All'opposto, la direzione ancora poco presente nella comunicazione della scienza, è fare della scienza non qualcosa di sacro, ma di *profano*, e cioè *che sta innanzi al tempio*, e dunque fuori di esso, alla mercé del pubblico. Questo è quanto si è cercato di realizzare portando avanti il modello di sperimentazione partecipativa di comunicazione della teoria scientifica del caos, consentendo a numerosi studenti di vivere la scienza come qualcosa di meno distante dall'esperienza quotidiana. L'obiettivo è ambizioso e consiste nel condurre i ragazzi a un reale apprendimento e comprensione, attraverso un metodo innovativo: la scienza non diminuisce il suo livello di complessità, diventando comprensibile, ma spinge verso una forma estrema di semplificazione che avvicina il pubblico inesperto alla complessità.

5.3 Il circuito e le sue semplificazioni

Se da un punto di vista teorico cognitivo ci si è basati sui paradigmi dell'approccio costruttivista, dal punto di vista puramente tecnico scientifico si sono presi in considerazione i principi fondamentali della teoria dei circuiti elettrici e dell'elettronica dei sistemi non lineari. Il circuito di Chua è stato oggetto di una semplificazione strutturale che lo ha condotto nel corso di diversi anni ad assumere una forma semplificata rispetto a quella concepita in origine. Quella presa in considerazione è, in particolare, la configurazione introdotta da Kennedy nel 1992 (Kennedy, 1992a) che utilizza due amplificatori operazionali per realizzare il diodo di Chua, elemento elettronico che determina la non linearità nel circuito. Il punto di partenza è lo schema di costruzione del circuito fornito da Bilotta & Pantano (2008). I passi per comporlo sono ventuno, contando anche l'operazione finale di fornire una differenza di potenziale dal collegamento dei cavi ai poli di una batteria. Seguendo però le operazioni passo dopo passo la realizzazione pratica di un simile approccio è possibile solo se si utilizza una comune basetta millefori, ben nota a chi si occupa di elementi circuitali. Ma questo non è l'unico modo per approcciare la costruzione del sistema. Le basette millefori, infatti, pur consentendo una sequenza precisa nei collegamenti dei poli dei vari elementi non assicurano tuttavia la permanenza degli stessi. Essendo gli elementi molto sensibili alle minime variazioni nelle posizioni assunte da ciascun elemento, si è preferito utilizzare un approccio che assicurasse il minimo o alcun movimento dei capi di ciascun elemento elettrico/elettronico. La saldatura di alcuni elementi e il posizionamento di piedini, anch'essi saldati, è stata la condizione senza cui non si sarebbe potuto procedere alla costruzione accurata del circuito. Il funzionamento e di conseguenza la visualizzazione del segnale di tensione caratteristico, il cosiddetto double scroll, come già sottolineato, è molto dipendente dalle condizioni al contorno entro cui si sviluppano le manipolazioni degli elementi circuitali. Volendo proporre una semplificazione concettuale di ciò si può dire che il fenomeno caotico è in genere derivante e fortemente condizionato dalle condizioni iniziali dai parametri caratteristici del sistema come, il funzionamento del circuito di Chua, quindi la visibilità o meno dell'attrattore strano double scroll, è fortemente dipendente dalla precisione con cui vengono collocati sulla basetta gli elementi che lo compongono. Analizziamo la composizione del circuito e di seguito la strategia utilizzata per creare del materiale didatticamente fruibile per gli studenti. Il circuito è composto da quattro elementi lineari (due condensatori C1 and C2, un induttore L, un potenziometro R) e un elemento non lineare, definito diodo di Chua e composto da amplificatori operazionali. Perché potessero risultare bene visibili gli elementi circuitali si è pensato di realizzare ad hoc un'immagine direttamente costruita da un circuito già composto, evidenziando con degli ingrandimenti gli elementi, per permettere un semplice riconoscimento e focalizzazione degli stessi, Fig. 5.1. Questa

immagine ha costituito l'elemento trainante ed essenziale nella progettazione dell'intera sperimentazione.

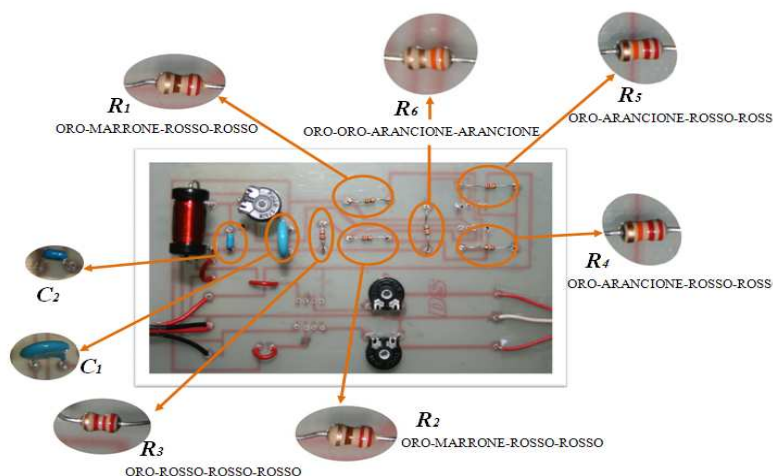


Fig. 5.1 Schema del circuito di Chua semplificato per la costruzione

La foto che segue mostra uno dei possibili usi che di tale immagine è stato fatto: uno studente controlla dopo avere costruito il circuito che tutti gli elementi siano stati posizionati in maniera corretta.

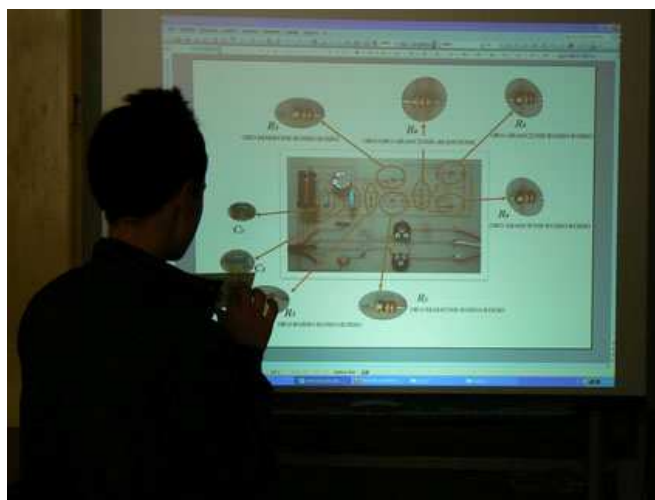


Fig. 5.2 Uno studente controlla il corretto posizionamento degli elementi circuitali

La semplificazione concettuale che ha consentito la realizzazione di un kit per la costruzione del circuito parte dall'idea di:

- utilizzare una basetta con lo schema circuitale prestampato;
- realizzare dei fori entro cui saldare i piedini di supporto per ciascuno elemento del circuito;

- saldare, con un saldatore a stagno, alcuni componenti altrimenti di difficile manipolazione da parte di inesperti, come per esempio: gli amplificatori operazionali, i potenziometri, i cavi per gli ingressi batterie e le uscite audio (Fig. 5.3);
- fornire agli sperimentatori gli elementi mancanti, richiedendo loro il riconoscimento degli stessi e l'esatta collocazione.



Fig. 5.3 Elementi base per il kit

Partendo da tale semplificazione è stato inventato, realizzato e proposto in ciascuna sperimentazione a ogni partecipante un kit così composto: la basetta circuitale con diversi componenti pre-saldati e i piedini per collocare gli elementi mancanti, componenti elettrici mancanti, lo schema per il riconoscimento degli elementi mancanti e per l'individuazione del loro posizionamento.

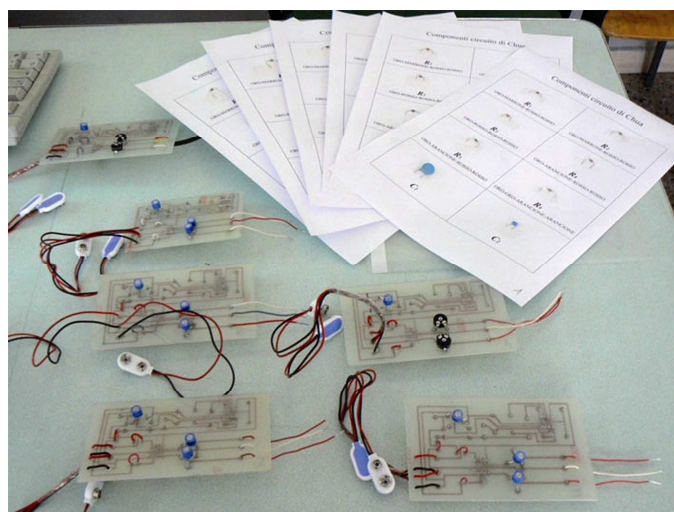


Fig. 5.4 Elementi del kit

L'impiego di un kit per la costruzione del circuito, il riconoscimento e la manipolazione dei componenti elettrici ha stimolato gli studenti perché ha fornito una combinazione fra analisi, risoluzione e verifica empirica di un problema, incrementando la comprensione dell'oggetto in studio, in questo caso il circuito, e la capacità di gestire compiti abbastanza complessi.

La configurazione circuitale utilizzata ha il seguente schema, Fig. 5.5 e i seguenti componenti, Tab. 5.1. Per ciascuno sono indicati quelli pre-saldati e quelli contenuti nel kit fornito agli studenti.

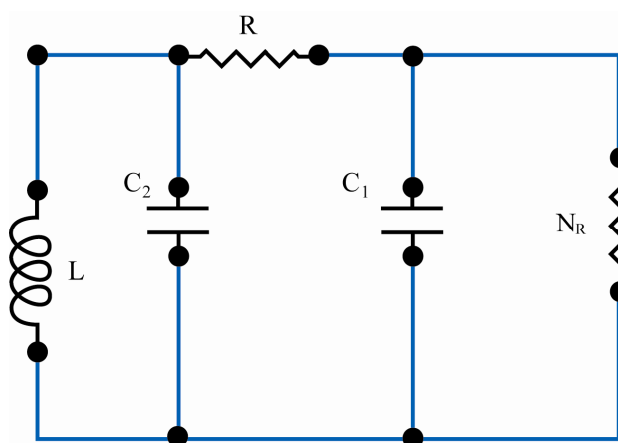


Fig. 5.5 Schema del circuito costruito

Componente, grandezza, simbolo	Quantità	Kit/Pre-saldato
Condensatore, 10 nF, C_1	1	Kit
Condensatore, 100 nF, C_2	1	Kit
Induttanza, 18 mH, L	1	Kit
Resistore, 220 Ω , R_1, R_2	2	Kit
Resistore, 2.2k Ω , R_3	1	Kit
Resistore, 22k Ω , R_4, R_5	2	Kit
Resistore, 3.3k Ω , R_6	1	Kit
Potentiometro, 2k	3	Pre-saldato
Batterie, 9 V	2	Kit
Op-Amp, TL082	2	Pre-saldato
Cavo connessione batterie	1	Pre-saldato
Spina uscita audio	1	Pre-saldato

Tab. 5.1 Elementi circuitali, distinta base

Tutti gli elementi del circuito possono comunque essere considerati con un'approssimazione in eccesso e/o in difetto pari al 5% del loro valore nominale.

5.4 Metodologia didattica nelle scuole

Gli elementi del circuito sono stati presentati in maniera da stimolare gli studenti a un approccio critico, cercando di contestualizzare le nuove conoscenze acquisite in situazioni quotidiane (Resnick, 1997) e incoraggiare curiosità e domande sull'utilità e la funzione di tali oggetti. La motivazione è stata in un certo senso stimolata attraverso l'uso di strumenti da manipolare e ambienti diversificati, ma connessi, da esplorare (Resnick, 2006). In entrambe le sperimentazioni infatti ci si è trovati di fronte a studenti che non possedevano alcuna impalcatura concettuale in merito, per i quali tali contenuti erano assolutamente fuori dai curricula scolastici. Pur trovandosi dinanzi a studenti con non elevati addestramenti in matematica si è cercato di impostare la sperimentazione come fosse una sorta di esplorazione di specifici concetti, cercando il loro coinvolgimento in attività entusiasmanti e accessibili. L'approccio adottato è un approccio costruttivista. Il contatto diretto con oggetti incoraggia gli studenti a pensare, formulare le loro ipotesi ed esaminarli attraverso l'esperimento. La letteratura costruttivista mostra come gli studenti che hanno usato tali metodi (Brown et al., 1989) sono capaci di ricordare meglio il materiale, provando un senso di profondo appagamento avendo raggiunto il successo nel completamento del compito e trovano, inoltre, più facile trasferire la loro esperienza e le conoscenze acquisite in altri contesti culturali. L'obiettivo del metodo consisteva proprio questo: far sì che gli studenti divenissero parte del processo culturale e non solo spettatori.

Per indagare la possibilità di insegnare la teoria del caos, è stato progettato un metodo di apprendimento basato su quattro passi. I ragazzi pur non possedendo le conoscenze fisico-matematiche hanno avuto la possibilità di sperimentare la costruzione del circuito di Chua e di interagire con gli oggetti caratteristici del caos, gli attrattori, scoprendone il fascino e la bellezza. Il programma della metodologia realizzata prevede i seguenti passi:

- Il primo, denominato "Contestualizzazione" è stato principalmente introduttivo ai concetti base sulla teoria del caos e sull'importanza che riveste il circuito di Chua, per tale fase ci si è avvalsi di prodotti multimediali, strutturati *ad hoc*.
- Il secondo, denominato "Costruzione" è stato orientato alla sperimentazione della costruzione del circuito di Chua.
- Il terzo, denominato "Simulazione" è stato orientato a far sì che i ragazzi simulassero la modifica e la creazione degli attrattori tridimensionali, utilizzando un pc e un apposito software.
- Il quarto passo "Musica" ha riguardato principalmente la produzione di suoni e musiche dal modello adimensionale del circuito di Chua, utilizzando un calcolatore e un apposito software.

La sperimentazione didattica si è svolta in percorsi formativi, inseriti all'interno di progetti PON, (Programma Operativo Nazionale) e un tutoraggio per potenziamento in scuole primarie e secondarie. Cronologicamente gli interventi sono così collocabili:

Aprile-Maggio 2008 svolgimento progetto PON 'Promuovere le eccellenze' svolto presso la Scuola Media Statale 'Amerigo Vespucci' in Vibo Marina, Gennaio 2009 intervento di tutoraggio per potenziamento svoltosi presso il Liceo Lucrezia della Valle in Cosenza, Aprile-Maggio 2009 svolgimento progetto PON 'Priorità alle eccellenze' svolto presso il Liceo Lucrezia della Valle in Cosenza. I primi due interventi hanno avuto la durata di 13 ore ciascuno, il terzo la durata di 30 ore. Il modello sperimentato due volte della durata di 13 ore, risulta standardizzabile e può essere schematizzato secondo tale rappresentazione della timeline delle attività educative Fig. 5.5.

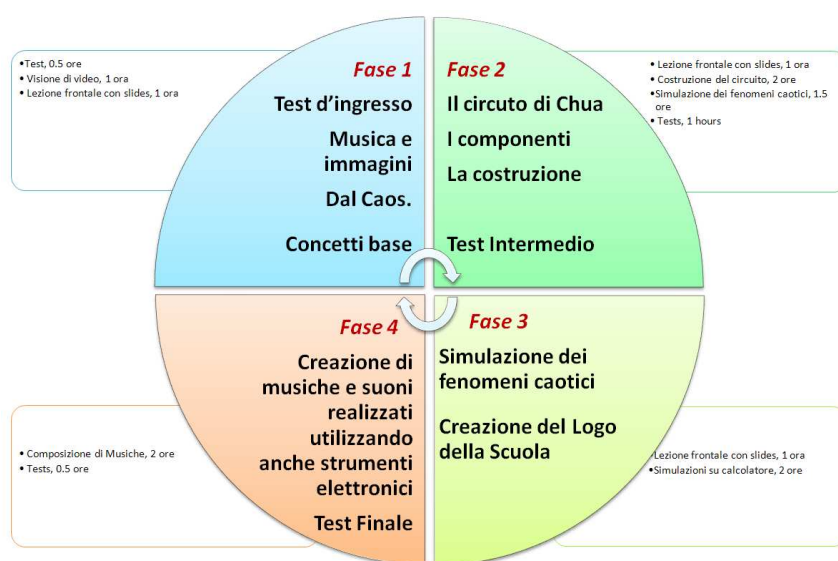


Fig. 5.5 Timeline delle attività educative

Le attività sono state scandite in maniera da alternare fasi di lezioni frontali, sempre supportate dall'uso di prodotti multimediali sotto forma di slide show, video e sessioni d'ascolto di musiche. La fase 2, 3 e 4 sono state strutturate in maniera da potere consentire una partecipazione attiva e creativa degli studenti, che in prima persona o in gruppo sono stati coinvolti nello svolgimento di attività di produzione di artefatti fisici o digitali. Nel seguito faremo riferimento alle esperienze didattiche analizzandole singolarmente in maniera anche da esporre e commentare i risultati ottenuti. Un percorso analogo sarà successivamente presentato in relazione alle attività di animazione scientifica realizzate durante le mostre 'Forme Caotiche' svoltasi a Vibo Valentia nel Gennaio 2008 e 'Dall'ordine al caos' svoltasi presso l'Università della Calabria a conclusione di un progetto europeo nell'Ottobre 2010. Improntate per grandi linee sulle stesse logiche, i laboratori organizzati in occasione delle mostre presentano differenze legate alle tipologie di attività proposte e ai materiali utilizzati.

Spiegare argomenti scientifici a studenti molto giovani può risultare più semplice che fare un'identica esperienza con gli adulti, i primi hanno la mente libera da nozioni preconcepite e non si imbarazzano nel porre domande. Questa riflessione proposta dallo scienziato britannico Stephen Hawking è stata presentata sotto forma di immagine nell'incipit della sperimentazione assieme alla frase dello studioso che più di ogni altro ha segnato profondi successi nei tentativi realizzati di divulgazione delle geometrie frattali: Benoit Mandelbrot, Fig. 5.6.



Fig. 5.6 *Caoticamente*, *La curiosità dei bambini*, S. Hawking; *La bellezza della matematica*, B. Mandelbrot

Diffondere attraverso le immagini i risultati delle sue ricerche rappresenta, a suo modo di vedere, una grande occasione: mostrare a tutti la bellezza della matematica. A diversi anni di distanza, su concetti fisico matematici differenti, con mezzi e tecnologie mutate, il tentativo è stato simile: mostrare le meraviglie che dal caos è possibile realizzare coinvolgendo gli studenti in un'esperienza che potesse mostrare loro la matematica o, più in generale, un ambito scientifico innovativo sotto una veste insolita che va dalla sperimentazione fisico-manipolatoria, alla creatività come potenziale musa per la realizzazione di oggetti artistici. A rendere molto innovativa e originale tale ricerca sono tanto il metodo quanto soprattutto i contenuti scientifici proposti. Antecedente in questo senso è stata la sperimentazione condotta da Gahndi (Gahndi et al., 2009) che introduce studenti di scuola superiore alla sperimentazione sul caos attraverso la costruzione del circuito di Chua. Nello studio si descrive la costruzione del circuito attraverso la basetta millefori e la simulazione con il software MultiSim. Nella presente sperimentazione è stato invece utilizzato Osqoop, un oscilloscopio per catturare il segnale di tensione e visualizzare le forme d'onda generate dal circuito.

5.4.1 Approfondimenti sul metodo

La sperimentazione è stata sviluppata utilizzando una metodologia di apprendimento/insegnamento in grado di stimolare i ragazzi attraverso la manipolazione del circuito e degli elementi che lo compongono, aiutandoli ad acquisire le conoscenze e i concetti base della teoria del caos, creando e manipolando gli oggetti tipici dei sistemi caotici: gli attrattori. Analizziamo passo dopo passo le principali fasi messe a punto durante la sperimentazione. Per presentare alla classe i principali argomenti e definire gli obiettivi di ciascuna fase, sono stati utilizzati i seguenti materiali: presentazioni multimediali PP, due video, un museo 3D virtuale che mostra attrattori caotici e mondi immaginari, un software per la simulazione tridimensionale delle traiettorie caotiche e la creazione di musica. I materiali didattici multimediali, in particolare le presentazioni e alcuni video, sono stati appositamente progettati e creati per la presente ricerca. La sperimentazione ha previsto per ciascuna fase dei test di verifica attraverso questionari e prove pratiche per valutare il livello di comprensione degli argomenti trattati e l'acquisizione delle strumentalità. I materiali di verifica utilizzati sono stati vari: questionari a risposta multipla, riconoscimento e posizionamento dei componenti elettrici sullo schema del circuito, disegno dello schema circuitale semplificato e riconoscimento della prima strada al caos attraverso stimoli sonori. Anche questo è materiale pensato e creato appositamente per tale ricerca e ciascuna parte costituisce una verifica puntuale di alcuni temi trattati durante le lezioni, per questo motivo anche i materiali dei test saranno in un paragrafo specifico oggetto di approfondimento. Durante il primo passo, quello denominato 'Contestualizzazione' è stato presentato il caos attraverso le immagini prodotte dal modello matematico adimensionale del circuito di Chua. Utilizzando l'oscillatore si possono generare una varietà di attrattori strani, interpretabili anche in maniera artistica attraverso l'aggiunta del colore, la disposizione delle luci in ambiente 3D e la variazione dello spessore delle linee. Le rappresentazioni matematiche, attraverso il computer, producono forme sorprendenti e straordinarie. Sono stati presentati gli attrattori strani attraverso le immagini e le musiche inserite in un video, con l'obiettivo di catturare in tal modo l'attenzione della classe e accrescere la voglia di creare autonomamente simili oggetti tridimensionali. Nuovi concetti ed esempi legati ai fenomeni caotici, alla complessità, alla geometria frattale sono stati introdotti attraverso una serie di esempi, ispirati principalmente dal libro divulgativo: Caos di J. Gleik. Alcune simulazioni matematiche che presentano delle animazioni volte a illustrare le immagini della scienza più suggestive e pertinenti a tali argomenti si sono rivelate estremamente efficaci: l'attrattore strano di Lorenz, la mappa logistica, i fiocchi di neve di Kock, le storiche immagini di frattali proposte da Mandelbrot quali per esempio la struttura di un cavolo. Sono stati quindi proposti alcuni concetti base della teoria del caos utilizzando esempi di comportamento non lineare presenti nei fenomeni naturali.

Durante tale fase, in merito alle nuove conoscenze divulgate, gli studenti sono stati incoraggiati:

- a) nella formulazione di domande che potessero fare emergere problemi sulla comprensione dei contenuti loro trasmessi
- b) a riflettere in gruppo sui dubbi e le perplessità
- c) a discutere assieme alla classe sui problemi esposti.

Durante il secondo passo denominato "Costruzione" è stata illustrata l'importanza del circuito di Chua, riproducibile in pochi passi, i componenti del circuito e i collegamenti necessari per costruirlo. Agli studenti sono stati forniti dei kit (Fig. 5.4) con tutti i componenti per la costruzione del circuito:

- Una basetta con lo schema circuitale stampato, sulla quale sono stati precedentemente saldati i potenziometri, gli amplificatori operazionali, i cavi audio e i cavi per le batterie;
- Un foglio con tutti i componenti identificati attraverso la loro specifica denominazione, e, per le resistenze, identificate anche attraverso la successione dei colori;
- Lo schema circuitale con le evidenze sui vari elementi da inserire.

La possibilità di manipolare componenti elettrici mai visti prima: condensatori, resistori, potenziometri, ha costituito per gli studenti un'enorme fonte di curiosità e stimolo. Così come costruire il circuito, verificarne il funzionamento, quindi la sua dinamica caotica attraverso l'uso di un oscilloscopio simulato su un calcolatore. Le fasi descritte sono state fondamentali in quanto ricche di livelli di astrazione molto intensi, come per esempio i concetti di sistema fisico, matematico, gli andamenti o le evoluzioni di un sistema, le traiettorie, lo spazio delle soluzioni di un sistema matematico. Nulla è stato lasciato al caso, perché gli studenti si sono dimostrati in tutte le esperienze realizzate vigili nell'intuire ma anche nel chiedere ciò che non era a loro conoscenza. Le fasi scandite in maniera sistematica e rigorosa si sono in realtà svolte attraversando momenti di solo dialogo, dibattito. Contemporaneamente, però, i livelli di astrazione sono stati, appunto come già spiegato, in un certo senso, mitigati dall'uso di molte immagini animate e video; giungendo così progressivamente a una fase fisica da intendersi come manipolazione pratica, perché realizzata appunto sulla presentazione del circuito e dei suoi componenti. Gli elementi elettrici, anche nel caso della sperimentazione svolta nella scuola primaria, sono stati introdotti sia attraverso le loro caratteristiche topologiche sia presentati nella propria valenza tecnica. Per esempio, le resistenze hanno la possibilità di essere distinte attraverso una serie di bande colorate tipiche del rivestimento esterno, ciò è stato sfruttato dagli studenti sia per l'identificazione dei vari componenti sia per l'individuazione del valore della resistenza, un simile discorso è stato condotto anche per i condensatori, l'induttanza, i potenziometri. In tale fase si è cercato di stimolare gli studenti su diversi concetti:

- a) manipolazione e sempre maggiore familiarità con i componenti circuitali

- b) collegare i componenti nella sequenza corretta
- c) riflettere sul ruolo che ciascuno dei componenti gioca per il corretto funzionamento del circuito.

Per il terzo passo di 'Simulazione' è stato fornito agli studenti il software descritto nel capitolo precedente grazie al quale è stato possibile visualizzare, creare e modificare forme tridimensionali di più di 150 attrattori. La applicazione è stata utilizzata anche per la produzione di suoni e musica. Installato sui calcolatori disponibili nei laboratori multimediali delle due scuole ha permesso agli studenti di simulare le variazioni del circuito di Chua. Non solo il concetto astratto di sistema simulato, ma anche l'affiancamento di aspetti matematici, come la variazione consapevole dei parametri di controllo introdotti teoricamente e attraverso esempi in una fase precedente, e ludici legati all'uso di un'interfaccia dal rendering accattivante con colori, luci e la possibilità di variazione dello spessore delle linee hanno calamitato l'attenzione degli studenti, attivi sin dalle prime fasi di approccio nel creare forme caotiche colorate con le rispettive musiche e suoni. I risultati ottenuti dalla manipolazione degli attrattori sono realmente sorprendenti e presentano differenze qualitative sostanziali a seconda che si valutino quelli prodotti dagli studenti di scuola primaria e secondaria. Molto importante in entrambi i casi è stato l'interpretare questi come possibili oggetti artistici con un uso specifico. Tale aspetto sarà valutato nei risultati ottenuti, ma per esempio si può anticipare come uno studente variando i parametri di controllo abbia creato un attrattore assunto e utilizzato in fase successiva come logo della sua scuola. L'obiettivo di tale fase è stato fare sperimentare come dal modello fisico del circuito, si possa dedurre il modello matematico e manipolare, attraverso un programma di computer, le serie di numeri prodotte. La matematica che sottende le strane geometrie è diventata così interessante, stravagante e attraente. In tale fase gli studenti sono stati stimolati nel:

- a) verificare attraverso l'uso del software le principali caratteristiche dei sistemi caotici (sensibilità alle condizioni iniziali, strutture frattali, biforcazioni, strade verso il caos),
- b) sperimentare sul circuito tali caratteristiche del circuito
- c) ascoltare i cambiamenti prodotti sui suoni al variare di tali condizioni.

Il quarto passo conclusivo della sperimentazione denominato 'Musica' ha condotto alla realizzazione di suoni e musica caotici, sempre con l'utilizzo dello stesso software precedentemente descritto. Le serie temporali, rappresentate da una serie di numeri possono essere convertite in una sequenza di note e produrre melodie MIDI. Gli studenti hanno inoltre sperimentato la creazione di musica dal caos anche utilizzando tastiere MIDI. Ciò ha dato loro la possibilità di percorrere a livello qualitativo la mappa di biforcazione e verificare come, per determinati valori del parametro α si possa percorrere la prima strada al caos. Le immagini di punto, ciclo limite, spirale e double scroll sono state analizzate anche attraverso gli stimoli sonori da questi prodotti. Gli studenti sono stati stimolati a:

- a) manipolare gli attrattori di Chua attraverso il software fornito e riflettere come alla variazione del valore dei parametri corrisponda una variazione nella forma visualizzata sullo schermo del computer;
- b) utilizzare il software per creare suoni attraverso gli attrattori precedentemente configurati;
- c) utilizzare altre applicazioni per realizzare composizioni musicali basate sugli attrattori;
- d) suonare tali composizioni con strumenti reali.

5.4.2 Materiali

Si dedica ora un breve spazio per elencare i materiali, già presentati nei paragrafi e capitoli precedenti, utilizzati nel corso delle sperimentazioni. Suddividendoli in materiali multimediali e attrezzature. Tra i supporti multimediali sono stati utilizzati:

- Video divulgativi sulla complessità, il caos, il circuito di Chua (vedi Cap. 6)
- Presentazioni Power Point
- Modelli 3D degli attrattori caotici
- Musiche
- Software per l'oscilloscopio digitale
- Software per la modifica e creazione di attrattori e musiche
- Software per il museo virtuale degli attrattori

Come già detto in precedenza sono stati utilizzati anche oggetti fisici, tra questi:

- Kit per la costruzione del circuito di Chua
- Calcolatori

Si è cercato di assicurare la fruizione singola da parte di tutti gli studenti per ciascuno dei materiali messi a disposizione, per tale motivo tutti i computer presenti nelle aule multimediali sono stati dotati dei software necessari. Inoltre, vista l'esigua disponibilità dei kit forniti si è proceduto, per tale fase alla costruzione del circuito, suddividendo per un primo passo la classe in gruppi di lavoro, in seguito permettendo la costruzione individuale di ciascuno studente del circuito di Chua.

5.4.3 Partecipanti

La sperimentazione, come già accennato, è stata ripetuta in tre differenti occasioni: una presso una scuola media, due presso un istituto superiore. Per semplificare indicheremo con Sperimentazione I, quello svolto presso la scuola media, Sperimentazione II, la prima sperimentazione svolta presso l'istituto superiore, Sperimentazione III la prima sperimentazione svolta presso l'istituto

superiore. I partecipanti al progetto sono stati ventisei ragazzi della Scuola Media di Vibo Valentia. Gli studenti che hanno volontariamente aderito all'iniziativa erano provenienti da tutte le classi dell'istituto. Ciò si è verificato nello svolgimento di tutti i tre progetti, pertanto i partecipanti erano appartenenti a differenti fasce d'età. Nella tabella seguente, Tab. 5.2, è presentato un quadro riassuntivo, con la scansione dei vari dati di rilievo.

Progetto	N° Studenti Tot.	N° Studenti - Età	N° Studenti – Età / Genere
I	26	9 – 11 anni	5 maschi – 4 femmine
		11 – 12 anni	7 maschi – 4 femmine
		3 – 13 anni	3 maschi – 3 femmine
II	15	2 – 16 anni	tutte femmine
		8 – 17 anni	tutte femmine
		4 – 18 anni	tutte femmine
		1 – 19 anni	tutte femmine
III	18	5 – 16 anni	tutte femmine
		3 – 17 anni	tutte femmine
		6 – 18 anni	2 maschi – 4 femmine
		4 – 19 anni	1 maschio – 3 femmine

Tab. 5.2 Partecipanti alle sperimentazioni

Tutti i partecipanti sono stati informati del fatto che l'iniziativa cui prendevano parte sarebbe stata sperimentale e i risultati prodotti oggetto di ulteriori approfondimenti e ricerche.

5.5 Setting sperimentale

La sperimentazione è stata sviluppata attraverso l'uso di supporti tecnologici: nell'aula multimediale ciascuno studente ha avuto infatti la possibilità di utilizzare un computer. Al termine di ciascuna fase sono stati effettuati i test di verifica. Lezioni e laboratori sono stati svolti durante sei incontri (Fig. 5.7) per un totale di 13.5 ore, così distribuite: 1,5 ore per la visualizzazione di video, 3 ore per lezioni frontali, 2 ore per i test, 2 ore per la costruzione del circuito, 3 ore per la simulazione su calcolatore, 2 ore per la composizione di musica. Ad eccezione del tempo impiegato per la visione dei video e l'esposizione di concetti base attraverso le presentazioni multimediali (4,5 h) le rimanenti ore di attività (9 h) hanno coinvolto direttamente e in vario modo i ragazzi.

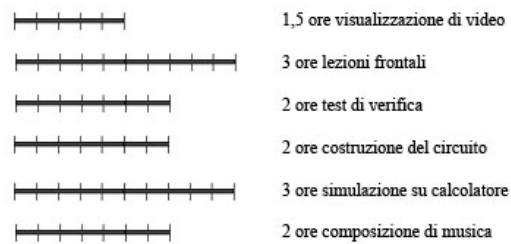


Fig. 5.7 Suddivisione cronologica delle attività di sperimentazione

Il primo passo, principalmente costituito da una presentazione orale dei concetti introduttivi alla teoria del caos, ha riguardato la presentazione di immagini e suoni generati a partire da sistemi caotici, i test di verifica sono consistiti in una serie di dieci domande a risposta multipla. Durante il secondo passo, la costruzione del circuito è stata realizzata in gruppi, essendo stati forniti sei kit per la costruzione del circuito. Dieci studenti hanno eseguito un'ulteriore costruzione del circuito per permettere la realizzazione di un video. I test di verifica relativi a questa fase sono stati articolati in modo da comprendere la verifica del raggiungimento di ciascun target. Ogni gruppo alla conclusione della costruzione del circuito ha raggiunto una postazione di computer collocata al centro dell'aula e ha verificato in autonomia il funzionamento dello stesso. I test di verifica veri e propri invece sono stati sviluppati in tre momenti successivi. Nel primo è stato richiesto agli studenti di rispondere ad un questionario a risposta multipla. Il secondo fornito loro subito dopo è consistito nell'inserimento dei componenti elettrici (induttanza, potenziometro e condensatori) sullo schema del circuito di Chua, infine, è stato chiesto loro di disegnare lo schema del circuito essendo già stata fornita la rappresentazione semplificata del diodo. La terza parte svolta direttamente su calcolatori ha portato alla creazione da parte dei ragazzi di nuovi e colorati attrattori, ciascuno studente ha dimostrato l'acquisizione delle abilità necessarie per la manipolazione degli attrattori tridimensionali, il cambio di colore, il salvataggio dei nuovi file. Durante tale test di verifica è stato possibile realizzare un archivio su ciascun calcolatore degli attrattori creati dagli studenti. Il quarto passo è stato sviluppato allo stesso modo del terzo attraverso l'utilizzo del computer. Ai ragazzi è stato richiesto in fase di test: di rispondere ad un questionario, comprensivo anche della verifica sulla comprensione della prima strada al caos riconosciuta attraverso gli stimoli sonori, e la creazione delle melodie MIDI dagli attrattori.

Gli argomenti principali trattati durante le lezioni hanno spaziato dai concetti fondamentali della fisica, al metodo galileiano. Fondamentale nella contestualizzazione dei fenomeni caotici è stato introdurre i concetti di modello fisico e modello matematico, il metodo riduzionista e il suo superamento, la storia dello studio dei sistemi dinamici, il paradosso di Lorenz e il concetto di struttura frattale e attrattore strano. Infine, si è condotto il ragionamento su tutti gli aspetti

fondamentali legati alla teoria dei sistemi complessi: le proprietà, le strade verso il caos, il concetto di mappa logistica fino a giungere all'introduzione del circuito elettronico di Chua e alla sua costruzione attraverso dei passi ben definiti. Successivamente è stato presentato il significato di simulazione attraverso il software, contestualizzando i concetti di modello fisico e modello matematico. L'idea di potere ottenere una grande varietà di pattern dai sistemi dinamici è legata logicamente al concetto di potere integrare sul un calcolatore il modello matematico che rappresenta il circuito di Chua. Infine, è stato mostrato come sia possibile realizzare la produzione diretta di suoni dagli attrattori; la generazione di musica attraverso la modulazione di frequenza, la traccia delle scale musicali e infine la generazione di ritmo utilizzando i valori di massimo e minimo dalle serie temporali.

5.6 Procedura

La procedura è presentata di seguito attraverso una serie di immagini che mostrano le fasi svolte durante la sperimentazione. Le presentazioni multimediali per l'introduzione dei concetti base sulla teoria del caos e del circuito di Chua (Fig. 5.8, Fig. 5.9) sono state propedeutiche alla costruzione fisica del circuito da parte degli studenti (Fig. 5.10). Ricevuti i kits e i materiali di supporto, sotto un'opportuna guida, i ragazzi sono stati in grado di realizzare il circuito eseguendo 10 operazioni (Fig. 5.11). Successivamente hanno controllato il funzionamento del circuito collegandolo a un computer e verificando la visualizzazione del double scroll (Fig. 5.12). I circuiti realizzati dai ragazzi (Fig. 5.13) sono risultati funzionanti in fase di verifica, da ciascuno è stato possibile visualizzare la prima strada al caos.



Fig. 5.8 Alcune immagini dalla prima fase: lezioni in aula



Fig. 5.9 Presentazione del circuito



Fig. 5.10 Costruzione del circuito di Chua

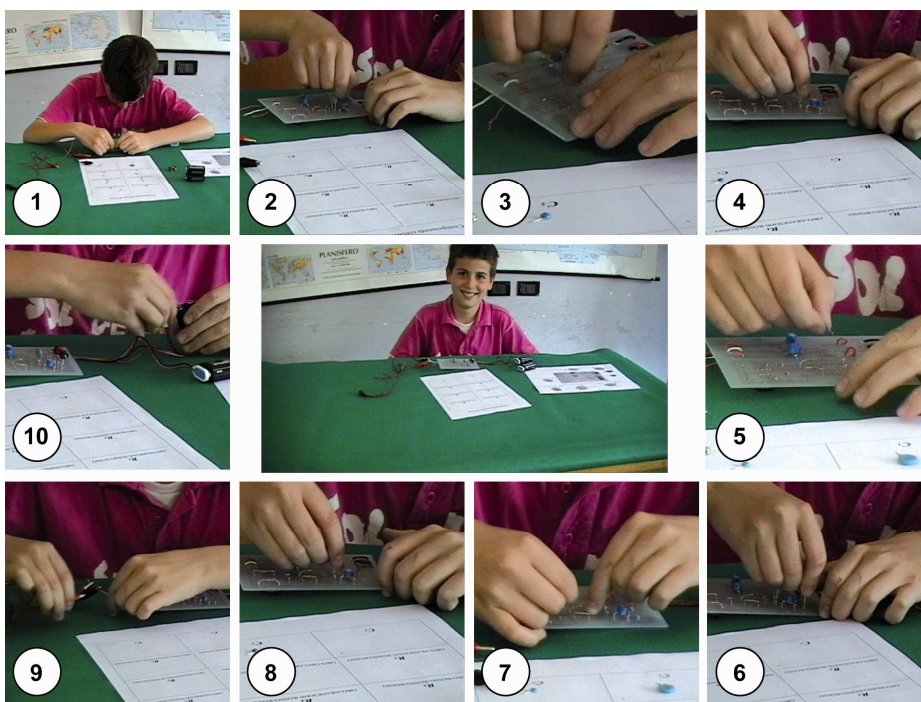


Fig. 5.11 Costruzione del circuito di Chua in 10 passi



Fig. 5.12 Gli studenti verificano la corretta costruzione del circuito e il suo funzionamento

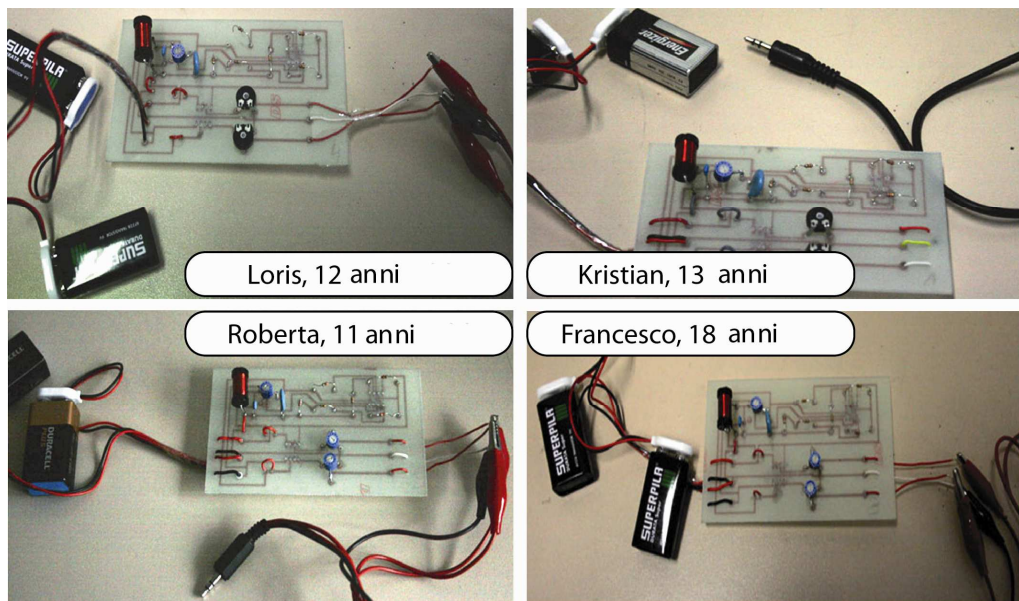


Fig. 5.13 Alcuni circuiti costruiti dai ragazzi

La simulazione è stata realizzata grazie all'utilizzo di un software: 'Chaos Explorer', software scaricabile dal sito <http://galileo.cincom.unical.it/Chua/download>. La rappresentazione visiva degli attrattori fornisce oggetti tridimensionali che possono essere facilmente modificati attraverso la manipolazione dei parametri di controllo (Fig. 5.14). Tale software fornisce delle rappresentazioni uditive dell'evoluzione del sistema dinamico: i suoni e le musiche degli attrattori. L'idea realizzata è stata di percorrere qualitativamente l'evoluzione della mappa di biforcazione attraverso un'analisi uditiva della prima strada al caos (Fig. 5.15).



Fig. 5.14 Alcune immagini della terza fase: simulazione del circuito di Chua ai calcolatori

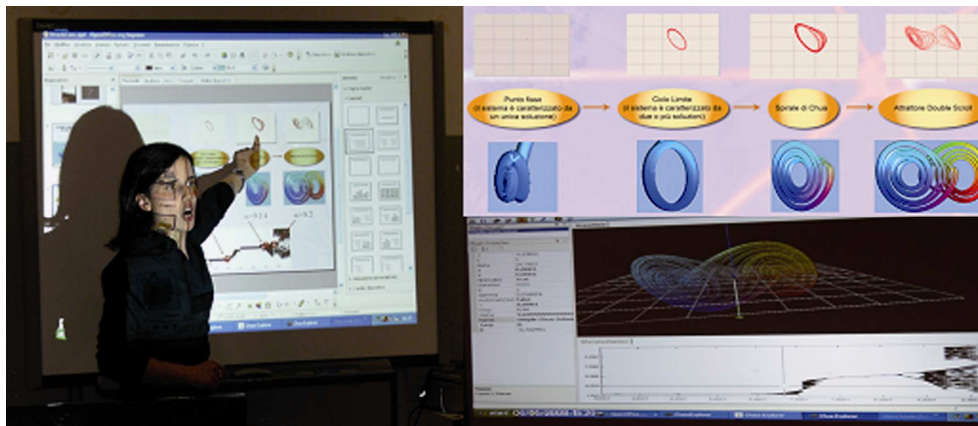


Fig. 5.15 Introduzione delle mappe di biforcazione e dell'andamento qualitativo dell'evoluzione degli attrattori di Chua, prima strada al caos

L'ascolto è stato possibile anche attraverso l'uso di architetture che trasformano l'evoluzione dei sistemi dinamici in suoni e musica (Fig. 5.16, Fig. 5.17) (Bilotta & Pantano, 2008). Gli studenti hanno sperimentato anche l'uso di strumenti musicali digitali (Rizzuti, 2009c) basati sul circuito di Chua attraverso l'impiego di tastiere MIDI.



Fig. 5.16 Evoluzione degli attrattori di Chua attraverso i suoni e le musiche



Fig. 5.17 Produzione di musica dal caos utilizzando tastiere MIDI

Gli studenti hanno verificato, in questo modo, la possibilità di generare melodie e musiche dal caos. I brani prodotti sono stati, inoltre, raccolti e archiviati, a testimonianza del fatto che imparare la fisica e la matematica non vuol dire solo e sempre utilizzare formule e applicare rigorosi teoremi, ma può voler dire anche divertirsi ed esprimere la propria creatività.

5.7 Prove di verifica

Un approfondimento va sicuramente dedicato alle prove di verifica redatte ad hoc in base ai contenuti delle lezioni condotte. Sono proposti negli allegati e qui di seguito corredati da sintetiche considerazioni circa l'opportunità e le finalità di una tale proposta. Le finalità del test d'ingresso (Allegato 1) erano: la valutazione di conoscenze precedentemente acquisite sul caos e i sistemi complessi, sul significato di alcuni termini circuito elettrico, resistenza, fenomeno fisico. Una delle domande che principalmente ha fornito maggiori indicazioni sul grado di consapevolezza su tali argomenti è stata quella relativa al significato del termine caos. Come era facile prevedere, per l'assoluta assenza nei curricula degli studenti di nozioni di questo tipo e per l'uso che si fa nel gergo comune di tale parola, vedremo in seguito più specificamente, il termine caos viene assimilato al disordine. Molte delle domande rivolte avevano lo scopo di verificare le capacità d'intuito e di orientamento dei ragazzi. Era il caso, ad esempio, della decima domanda in cui veniva chiesto quali condizioni tra una serie potrebbero essere definite complesse. Il test ha anche avuto un valore di introduzione e puntualizzazione su termini ampiamente trattati e approfonditi nel prosieguo della sperimentazione, quali per esempio, proprio complessità e caos.

L'analisi del secondo test (Allegato 2) di verifica necessita un breve richiamo sulla timetable della sperimentazione. Tale test è stato proposto a valle della sperimentazione con il circuito di Chua, al termine dunque della Fase I e Fase II (Fig. 5.7). Sono stati proposti più di un test perché potessero verificarsi i vari contenuti: i concetti base sulla teoria del caos, l'astrazione concettuale legata allo schema che rappresenta il circuito, il riconoscimento e l'esatta collocazione degli elementi del circuito. Come si può facilmente considerare, per la valutazione dell'acquisita conoscenza e l'eventuale correzione dell'approccio metodologico, molte domande del primo test sono state riproposte agli studenti. Ciò per verificare l'efficacia dell'intervento formativo, è il caso per esempio sempre del significato della parola caos o sugli elementi che costituiscono il circuito. La verifica di tali contenuti è stata cruciale per il prosieguo della sperimentazione, come già accennato è stato fondamentale per la correzione del metodo in corso d'opera. Questa centralità deriva

dal fatto che molti dei contenuti oggetto di verifica sono stati poi di seguito a loro volta oggetto di approfondimento e sperimentazione. La prima strada verso il caos, le biforcazioni, le caratteristiche dei sistemi caotici sono state in seguito oggetto di ulteriori approfondimenti e applicazioni, è stata necessaria dunque la verifica sull'acquisizione di tali contenuti per la realizzazione delle successive fasi della sperimentazione.

Le parti II e III del test di verifica intermedio sono state pensate per valutare l'avvenuta acquisizione di abilità legate alla manipolazione del circuito e dei suoi componenti. Si è voluto in tale modo verificarne anche l'efficacia: quanto la manipolazione e la costruzione del circuito potesse influire sull'effettivo riconoscimento dei componenti circuitali e la riproduzione della loro rappresentazione simbolica.

Il terzo test, quello conclusivo, (Allegato 3) è stato strutturato in maniera da riepilogare tutto il contenuto del corso. Parte del test si concentra infatti nuovamente sul circuito: il riconoscimento di un componente, il completamento dello schema circuitale, l'individuazione di un componente mancante. Il resto del test è finalizzato alla verifica dell'apprendimento sulla parte relativa alla simulazione: cosa significhi simulare un sistema matematico, quale sia l'uso di alcune funzioni del software, come si procede per fare una specifica operazione. Altre due domande hanno riguardato la verifica sulla comprensione di cosa significhi variare il parametro α , in particolare come sia possibile percorrere attraverso la variazione di questo la prima strada verso il caos. Infine, le ultime domande hanno interessato la realizzazione di musica: particolarmente interessante è stato il test sul riconoscimento degli stimoli sonori, generati durante l'evoluzione sulla prima strada verso il caos.

5.7.1 Criteri di valutazione

Per quanto riguarda i criteri di valutazione si è scelto di attribuire un punteggio di 1 per ciascuna risposta esatta, essendo nella maggior parte i test strutturati sulla base di 10 domande si è poi proceduto alla sommatoria dei punteggi. Per il test intermedio invece si è ricavato un risultato complessivo seguendo un criterio leggermente differente. In particolare, le parti II e III del test sono state valutate in base all'esattezza, alla completezza e alla chiarezza con un punteggio oscillante tra 0 e 10, queste due valutazioni sono state computate come valutazioni complessive a fronte del calcolo della media aritmetica fra i tre risultati, rispettivamente, la parte I, la parte II e la parte III. Gli archivi di attrattori e musiche realizzati attraverso i software dagli studenti non hanno costituito alcuna ulteriore tassello valutativo, considerata la difficoltà di valutare la qualità di una simile realizzazione. Nonostante ciò è stato osservato come dopo poco tempo,

quantificabile in circa 10 minuti, tutti gli studenti siano stati in grado di utilizzare proficuamente il software e rispondere ai compiti che venivano loro richiesti.

5.8 Risultati

La sperimentazione condotta ha mostrato come sia possibile l'avvicinamento di ragazzi molto giovani ad argomenti e temi di ricerca avanzati. La visualizzazione di forme tridimensionali artistiche create da modelli matematici ha stimolato dibattiti, curiosità e immediata voglia di realizzare personalmente simili oggetti. Il risultato più sorprendente lo si è avuto nella costruzione del circuito. Preceduta lezioni introduttive ai temi del caos e della complessità, la fase di costruzione del circuito è stata attesa con grande curiosità dai ragazzi. La manipolazione di elementi mai visti prima, quelli elettrici del circuito, e il riconoscimento degli stessi è stato percepito come un gioco. Allo stesso modo gli studenti hanno intuito l'importanza che il circuito riveste in ambito scientifico. Contestualizzare attraverso esempi dalla natura i fenomeni caotici ha permesso loro di intuire come il caos sia un argomento scientifico di notevole importanza perché fondamentale nello studio della natura e di ciò che ci circonda. I test condotti, spaziando dalla manipolazione al mentale-concettuale, hanno permesso la raccolta di una serie di dati sulla cognizione.

5.8.1 Analisi dei risultati, sperimentazione I

Il test iniziale d'ingresso (Fig. 5.18), dieci domande a risposta multipla, è stato necessario per capire il livello di conoscenza e d'intuito dei ragazzi (All. 1).



Fig. 5.18 Studenti impegnati nello svolgimento dei test

Dai risultati (Fig. 5.19), presentati secondo una scala che va da 0 a 10, si può notare come solo il 3% abbia raggiunto il risultato massimo. Il motivo è legato al fatto

che nell'87% dei casi la risposta sul senso comune attribuita alla parola caos è di 'disordine' e non di 'complessità'.

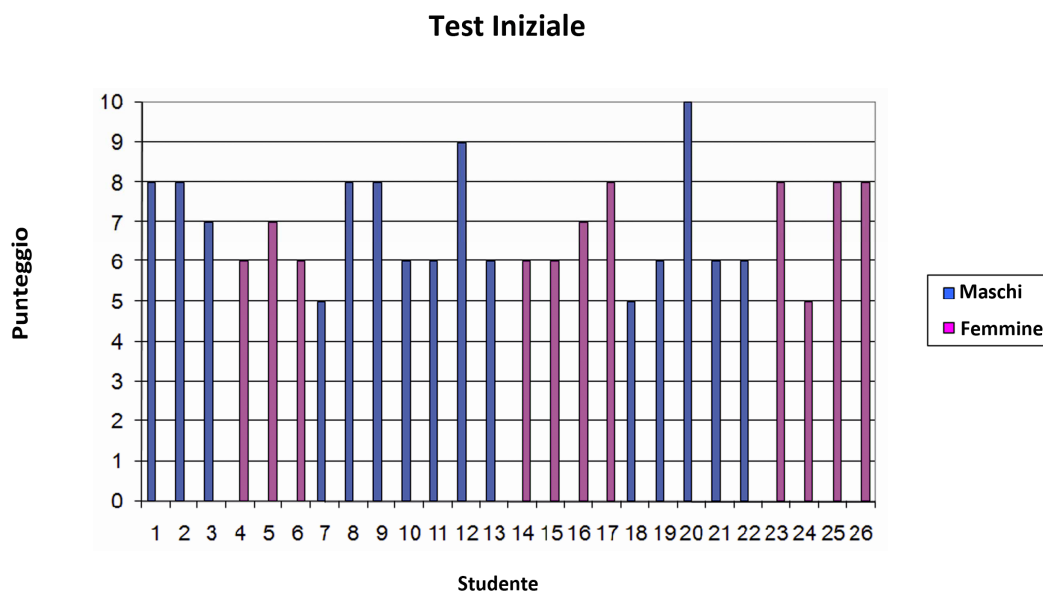


Fig. 5.19 Risultati test d'ingresso

I risultati del secondo test (Fig. 5.20), articolato in tre fasi (All. 2): domande a risposta multipla, riconoscimento e collocazione dei componenti elettrici, disegno dello schema circuitale, sono presentati in modo globale. Agli studenti sono stati sottoposti tre fogli in momenti distinti e successivi. I risultati mostrano un evidente incremento delle performance positive dei ragazzi.

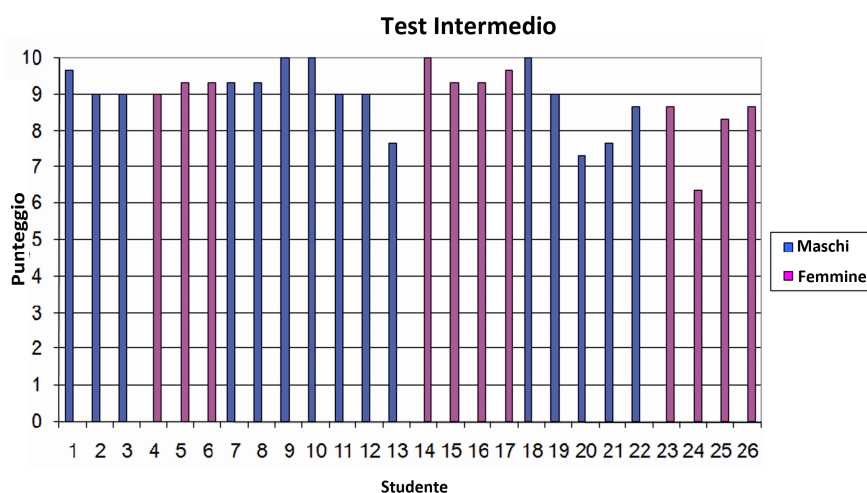


Fig. 5.20 Risultati test intermedio

Il disegno dello schema del circuito di Chua e l'inserimento dei componenti sulla sua rappresentazione semplificata (Fig. 5.21) sono stati realizzati con successo dagli studenti, che hanno ottenuto la massima valutazione rispettivamente in una percentuale pari al 85% (Parte II) e al 98% (Parte III).

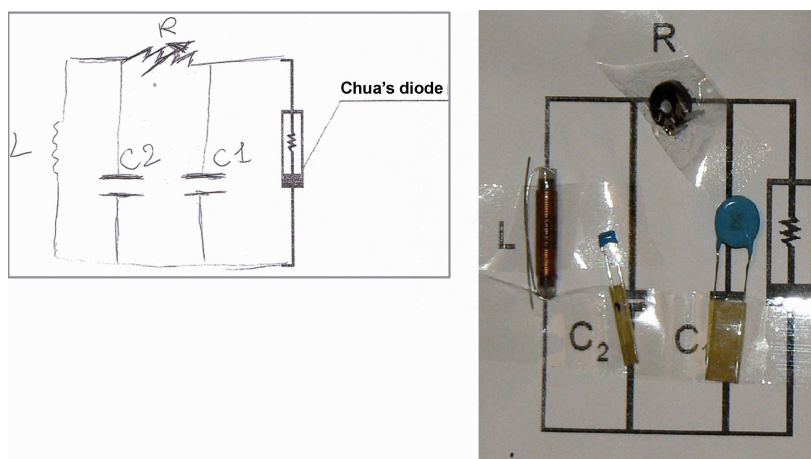


Fig. 5.21 Due esempi dal test intermedio Parte II, Parte III

Le fasi della simulazione e della creazione di musiche dal caos hanno previsto anche attività di laboratorio durante le quali gli studenti hanno creato un repository, memorizzando i nuovi attrattori e le musiche da loro realizzate (Fig. 5.22).

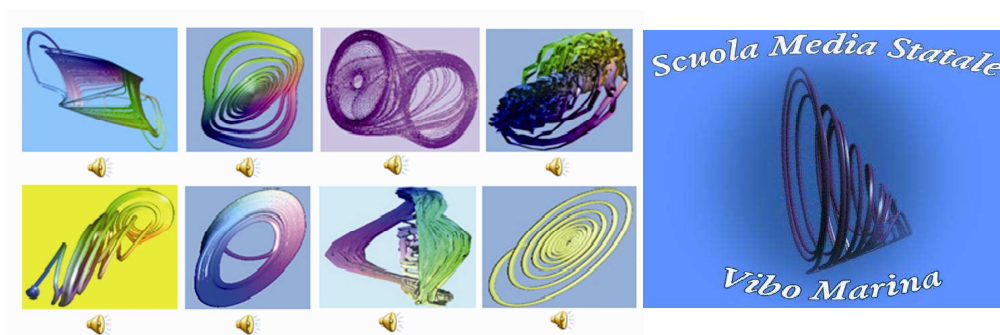


Fig. 5.22 Alcuni patterns, musiche e il logo della scuola creati dagli studenti

Nella fase di simulazione è stato anche creato da loro stessi il logo della propria scuola, intitolata ad 'Amerigo Vespucci': un attrattore a forma di vela, Fig. 5.23.

I risultati del test finale (All. 3) evidenziano il successo della sperimentazione con il 50% degli studenti che ha totalizzato il punteggio massimo (Fig. 5.24).

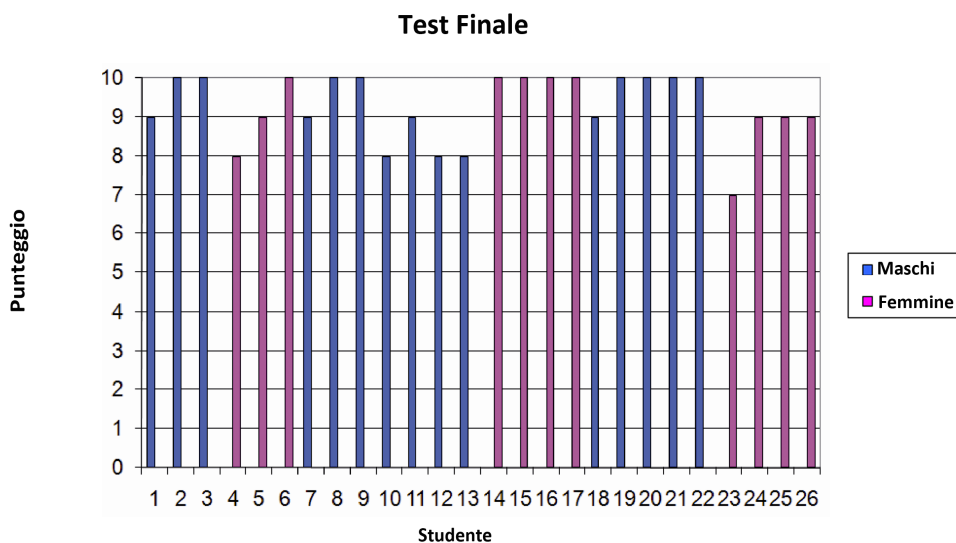


Fig. 5.24 Risultati test finale

Comparando i risultati dei test relativi alle varie fasi iniziale intermedia e finale, Fig. 5.25, si può considerare come nei giovani studenti, l'obiettivo della ricerca e sperimentazione sia stato pienamente raggiunto. I risultati mostrano un incremento quindi una crescente risposta positiva, ciò a dimostrazione di come la consapevolezza e la comprensione abbia avuto un trend positivo, man mano il suo svolgimento procedeva.

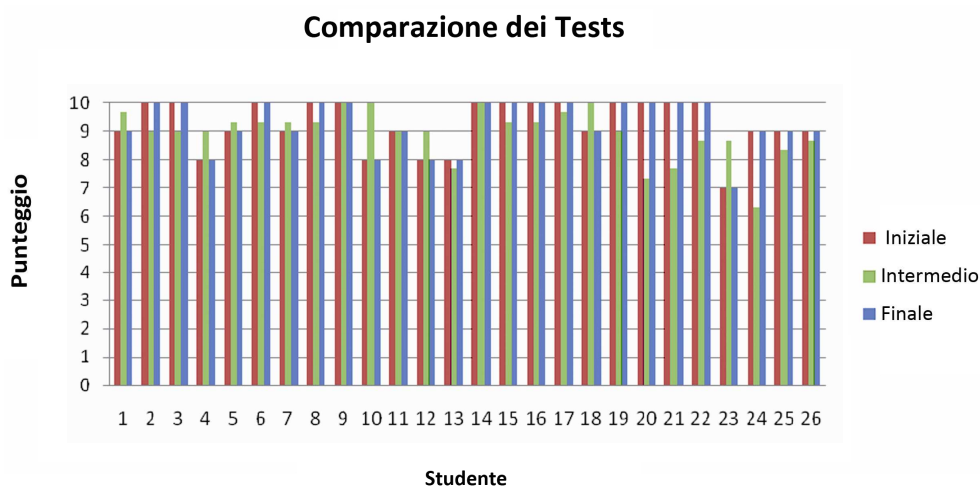


Fig. 5.25 Risultati dei test iniziale, intermedio e finale a confronto

Tale studio dimostra come un argomento di tale complessità attraverso la somministrazione di questo metodo possa essere non solo accessibile, ma avere

anche successo. Si deve annotare, inoltre, come i partecipanti alla sperimentazione abbiano mostrato molto entusiasmo e un alto livello di interesse e curiosità. Particolare interesse è stato evidenziato durante la fase di costruzione del circuito. Da riportare, perché ampiamente significativa è l'esclamazione "ecco il caos!" di uno studente alla vista del double scroll prodotto del circuito. Un altro studente ha invece chiesto di potere avere la lista dei componenti necessari, per poterlo costruire a casa durante le vacanze estive. Molto interesse ha suscitato anche la fase di simulazione, che ha evidenziato come il software utilizzato fosse semplice da utilizzare ed efficace. Dopo pochi minuti di manipolazione tutti gli studenti sono stati in grado di creare e modificare le forme caotiche, generando un archivio di immagini riportato solo in parte, dati i non esigui numeri di forme prodotte. Si è realizzato inoltre l'obiettivo di rendere consapevoli gli studenti di quanto quotidianamente in natura sia presente il fenomeno caotico, precise domande dei test riportati in appendice mostrano come alcune domande somministrate mirino proprio alla verifica di tale concetto. Si è realizzato inoltre l'obiettivo, interpretato in chiave costruttivista, di acquisizione della conoscenza attraverso la manipolazione degli oggetti fisici e la sperimentazione del loro funzionamento. Ciò a consentito, le prove di verifica sostenute ne sono una testimonianza l'acquisizione da parte dei partecipanti di una vasta gamma di competenze che hanno favorito l'arricchimento conoscitivo e le capacità manipolatorie, consentendo la collezione di una serie di dati sull'attività formativa.

5.8.2 Analisi dei risultati, sperimentazione II

La sperimentazione, presso la scuola superiore, ha seguito le stesse fasi della prima. Nelle seguenti immagini sono rappresentate alcune delle tappe principali dello studio (Fig. 5.26-5.30). Le figure 5.26-5.28 mostrano gli studenti attenti durante le lezioni, nella fase che ha preceduto la costruzione fisica del circuito. L'immagine in Figura 5.29 mostra alcuni dei migliori circuiti costruiti dai partecipanti. Come nel primo esperimento, tutti i circuiti costruiti hanno funzionato correttamente, consentendo la visualizzazione della prima strada verso il caos. Nella fig. 5.30, vediamo gli studenti che utilizzano il software di simulazione per manipolare i parametri per attrattori Chua. Le figure 5.31-5.33 mostrano i risultati delle prove iniziali, intermedie e finali dei test somministrati agli studenti. L'analisi dei risultati mostra che l'attività di costruzione del circuito ha raggiunto un altissimo livello di comprensione. Il test iniziale incentrato su conoscenze preesistenti degli studenti sul caos, chiedeva ad esempio il significato di tale termine nella sua accezione scientifica e concetti base di matematica e scienze. La maggioranza ha dichiarato che pur avendo sentito tale termine non ne conoscevano in profondità il significato. I risultati dei test finali sono stati eccellenti. Il 50% della classe ha risposto correttamente a tutte le domande.

Confrontando i risultati delle prove iniziale, intermedio e finale (Fig. 5.34), si può notare un costante miglioramento nella comprensione dei contenuti e una maggiore capacità nell'utilizzo degli strumenti forniti.



Fig. 5.26 Presentazioni del circuito Chua.



Fig. 5.27 Costruzione del circuito/1.

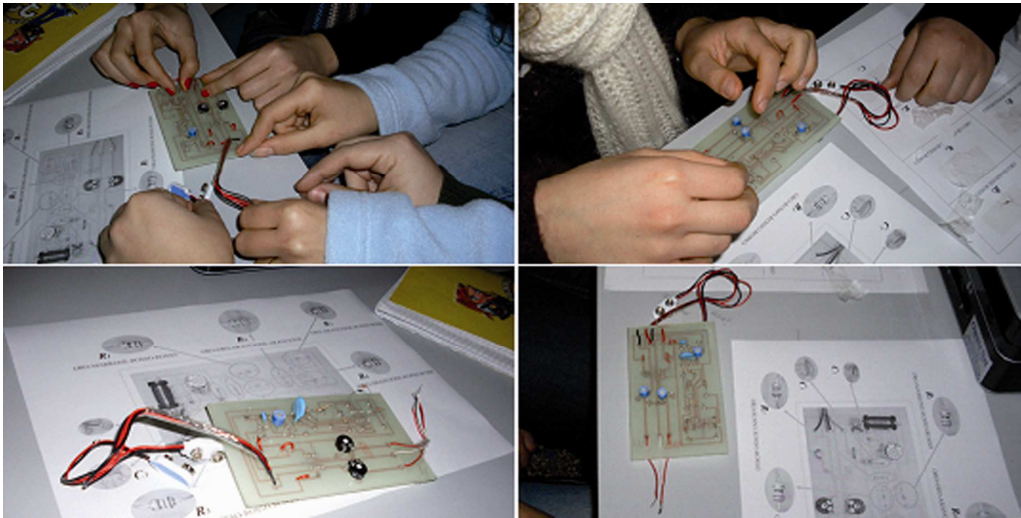


Fig. 5.28 Costruzione del circuito/2.

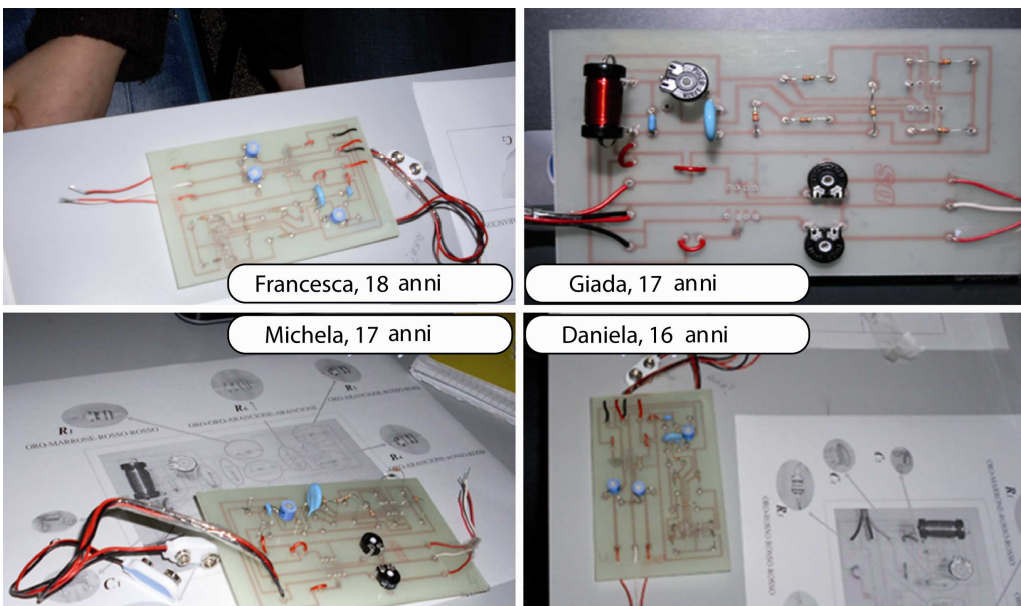


Fig. 5.29 Alcuni circuiti realizzati dagli studenti.



Fig. 5.30 Studenti nel laboratorio multimediale della scuola sperimentano la variazione dei parametri negli attrattori di Chua.

Test Iniziale

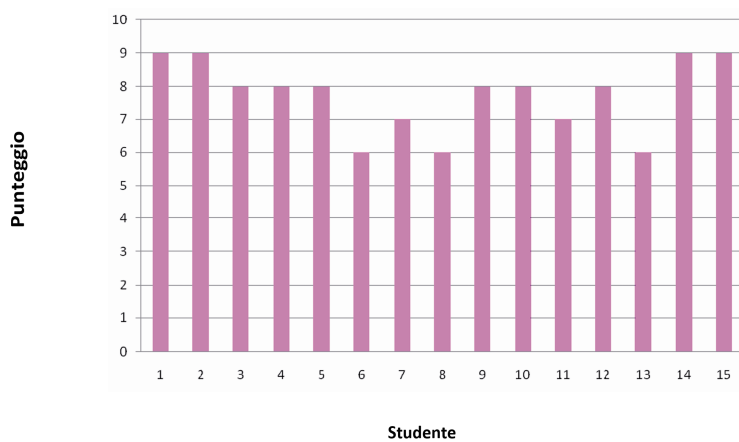


Fig. 5.31 Risultati del test iniziale.

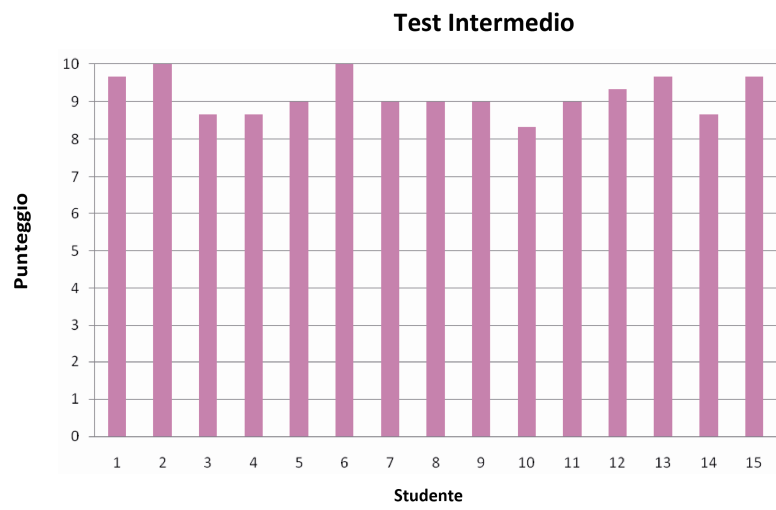


Fig. 5.32 Risultati del test intermedio.

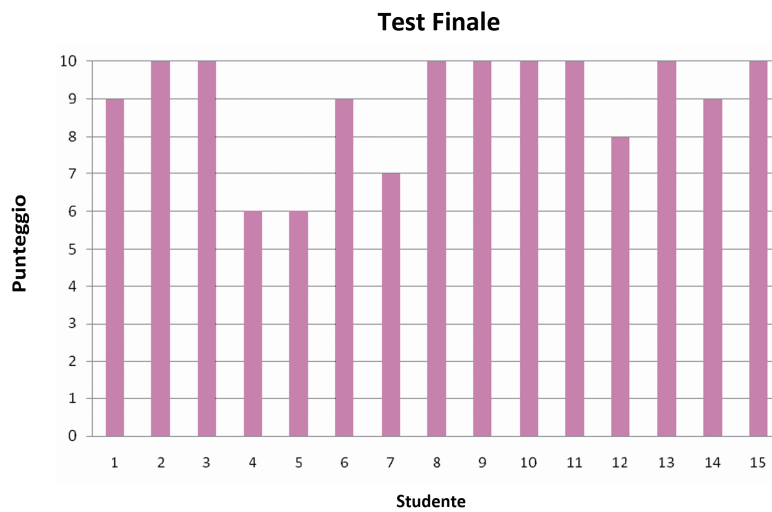


Fig. 5.33 Risultati del test finale.

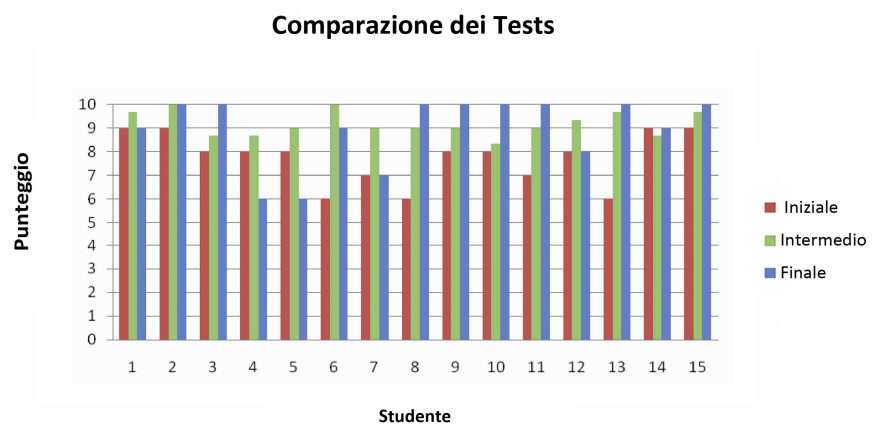


Fig. 5.34 Risultati dei test iniziale, intermedio e finale a confronto.



Fig. 5.35 Alcuni patterns creati dagli studenti.

5.8.3 Analisi dei risultati, sperimentazione III

Durante le prime due sperimentazioni fino a ora presentate è stato descritto uno stesso modulo organizzativo. Per la terza sperimentazione, si è pensato di ampliare la trattazione, soprattutto incoraggiati dagli studenti che hanno mostrato molto interesse a entrare in modo più approfondito su argomenti riguardanti i settori scientifici introdotti durante il corso. Tale sperimentazione ha visto quindi la realizzazione di due moduli, un primo organizzato esattamente come i precedenti, un secondo modulo, di approfondimento, dedicato ad alcuni altri nuovi contenuti. Molti partecipanti hanno avuto la possibilità di utilizzare i materiali da loro elaborati durante l'esame orale nella prova finale di diploma. Sono stati quindi introdotti nuovi contenuti di insegnamento: una rivisitazione in chiave teatrale sull'invenzione del Chua circuito, la scoperta dei memristors (Strukov et al. 2008), a 37 anni dalla prima ipotesi circa la loro esistenza avanzata da Chua (Chua, 1971), esperimenti in cui gli studenti hanno interagito con gli attrattori in ambienti virtuali, l'uso di sistemi caotici per comporre musica e creare strumenti musicali virtuali, l'uso del circuito per la produzione di oggetti di design rappresentati attraverso la grafica 2-D, concetti di base sugli automi cellulari e le reti neurali (Chua & Roska, 1993). Ciascuno, a valle del primo modulo di sperimentazione e prima del test finale ha avuto la possibilità di elaborare il report di una ricerca o approfondimento su un tema scelto a piacere tra quelli proposti. La valutazione degli elaborati presentati dagli studenti è stata qualitativa e ha evidenziato come, in opposizione ai luoghi comuni su una minore attitudine verso la scienza del sesso femminile, si possa di fatto rafforzare l'esigenza verso un sempre maggiore coinvolgimento delle donne nella ricerca, stimolando

curiosità e approfondimenti. Tale necessità è stata oggetto di studi in diversi paesi con programmi appositi dedicati a tali approfondimenti. Gli studenti hanno creato un archivio con elaborazioni personale e originali sotto forma di video, presentazioni multimediali, immagini, modelli tridimensionali, suoni e musiche.



Fig. 5.36 Alcuni prodotti multimediali creati dagli studenti.

Comparazione dei Tests

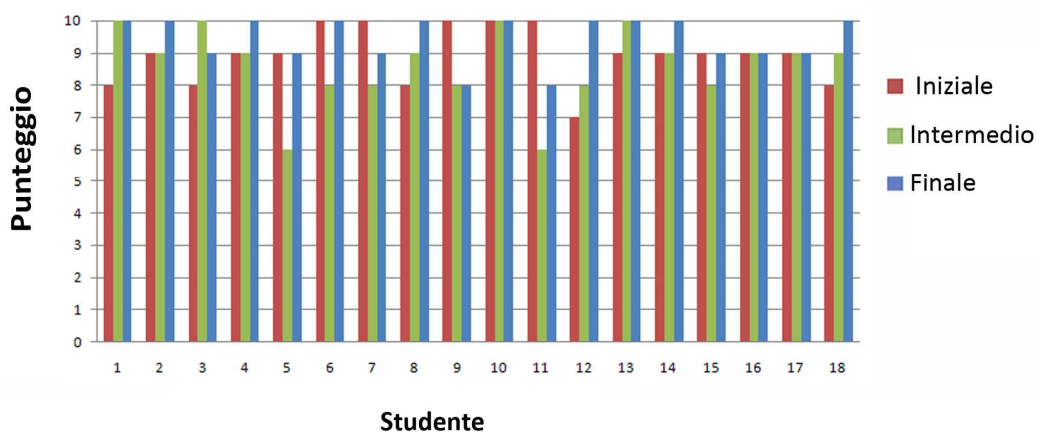


Fig. 5.37 Risultati dei test iniziale, intermedio e finale a confronto.

La classe di studenti che ha preso parte alla terza sperimentazione è stata considerata, ai fini della valutazione dei risultati, come gruppo di controllo. Se si considera la Sperimentazione II, infatti, l'omogeneità della classe per numero di partecipanti e composizione, rende confrontabili le due esperienze. La differenziazione consiste proprio nella quantità e nella tempistica dei contenuti somministrati agli studenti, contenuti, in buona parte, di tipo multimediale. L'analisi dei risultati conferma un sostanziale successo, Fig. 5.37, della sperimentazione, ma sottolinea introducendo, delle novità qualitative interessanti, come la classe sottoposta sia alla metodologia standardizzata che alla integrazione con nuovi contenuti e approfondimenti indichi nella prova finale un'accresciuta evidente capacità cognitiva. La richiesta di un'elaborazione personale su temi del caos e della complessità che maggiormente avevano interessato durante la sperimentazione, ha permesso agli studenti di esprimere al meglio creatività, interesse, motivazione.

5.9 Estensione della sperimentazione

Quella che si espone di seguito è la realizzazione su ampia scala delle sperimentazioni scolastiche. Le occasioni sono state due mostre espositive svoltesi, rispettivamente, durante sei giorni l'una e due giorni l'altra che hanno condotto alla produzione di una serie di poster con contenuti divulgativi (Che cos'è il caos e Le strade verso il caos), all'attività d'animazione scientifica di un percorso didattico introduttivo e un'attività di tutoring all'interno di laboratori rivolti a classi di studenti provenienti da scuole di ogni ordine e grado. Il percorso ha previsto in entrambi i casi l'illustrazione di una serie di poster e l'allestimento di una postazione per le verifiche estemporanee che ciascuno studente ha potuto realizzare sia sul circuito fisico di Chua sia sulla sua simulazione attraverso software. Altri sviluppi sono stati realizzati all'interno delle attività relative al progetto Europeo Scienar e hanno visto protagonisti un gruppo di artisti, coinvolti in esperienze di approccio e conoscenza dei temi relativi al caos e i possibili stimoli artistici che da questi è possibile trarre.

5.9.1 A un vasto pubblico: mostre espositive

Lo scopo che ha animato entrambe le iniziative descritte è stato sicuramente divulgativo, in senso più ampio, e di veicolare curiosità e interesse, in senso più ristretto e pratico. Le mostre si sono svolte rispettivamente, in Vibo Valentia nel 2008 l'una e l'altra presso all'Università della Calabria nel 2010, all'interno del progetto europeo Scienar. L'impostazione, seppur con alcune differenze è stata simile, e ha coinvolto circa cinquecento persone nella prima occasione e duecento nella seconda. Il percorso, come già accennato è stato strutturato nel seguente modo:

- Brevi cenni introduttivi alla teoria del caos, agli studi e alle scoperte in questo ambito scientifico, anche attraverso esempi
- Introduzione al circuito di Chua, alla sua invenzione e alla costruzione
- Breve introduzione alla simulazione
- Dimostrazioni pratiche sul funzionamento del circuito di Chua e sulla simulazione
- Coinvolgimento del pubblico per prove e verifiche personali sui meccanismi di funzionamento del circuito e del software di simulazione.

Il percorso ha avuto in entrambi i casi una durata complessiva di circa venti minuti. In entrambe le occasioni, si sono registrati solo feedback di natura qualitativa, il flusso dei visitatori, non ha consentito di strutturare alcuna verifica puntuale. D'altronde si sarebbe venuti, in un certo senso, meno allo spirito stesso che ha animato l'iniziativa: quello cioè di incuriosire il pubblico e di divulgare, con tutti i significati, si è già considerato sono implicati in queste azioni. Nelle immagini sottostanti, Fig. 5.38 e Fig. 5.39, sono rappresentati alcuni momenti salienti della mostra.



Fig. 5.38 Alcuni momenti della mostra di Vibo Valentia, 2008.



Fig. 5.39 Alcuni momenti della mostra dell'Università della Calabria, Progetto SCIENAR-EU, 2010.

Come si può notare ciascuna immagine si riferisce a uno specifico momento; inoltre, la differenza fra i due eventi è stato l'allestimento di quattro postazioni singole anziché un'unica postazione, ciascuna dotata di computer e circuiti. Ciò ha consentito agli studenti di sostare a gruppi di quattro per verificare personalmente il funzionamento sia del circuito che del software di simulazione. I risultati registrati, seppur a livello qualitativo sono stati: forte curiosità, interesse rimarcato anche dalle numerose domande di chiarimento o approfondimento rivolte, stimolo a volere ampliare la conoscenza su questi temi, sottolineata dalla richiesta di materiali, software e siti internet su cui reperire ulteriori informazioni.

5.9.2 Ad artisti

Il seminario di studio dedicato agli artisti ha visto la partecipazione di un pubblico di pittori e musicisti. In questo caso, sono stati rimarcati solo alcuni aspetti salienti riguardanti i sistemi dinamici e, in particolare, il circuito di Chua: le creazioni artistiche visuali e musicali che sono realizzabili tramite tali strumenti. Nelle immagini, Fig. 5.40, sono riportati alcuni momenti del breve training e d'introduzione alle tematiche citate che ha caratterizzato l'incontro.

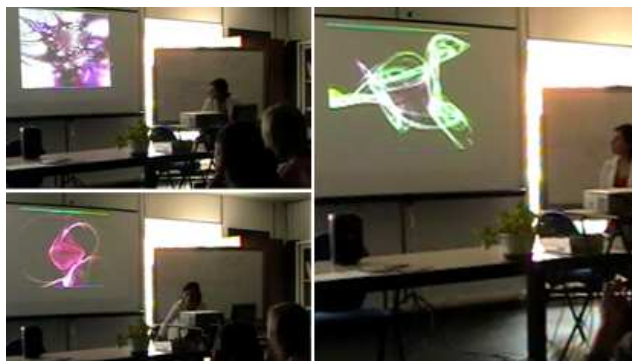


Fig. 5.40 Intercultural Exchange, Università della Calabria, Progetto SCIENAR-EU, 2010.

Nonostante, siano realizzate negli anni, come già accennato, numerose altre produzioni artistiche ispirate dalla teoria del caos e della complessità, a oggi non si posseggono riscontri, invece, sui risultati della giornata di seminario, riscontri che, secondo le aspettative, si sarebbero dovute avere in relazione alla creazione di prodotti artistici ispirati al caos.

5.10 Conclusioni e sviluppi futuri

Sono stati presentati in questo capitolo i risultati delle sperimentazioni condotte nelle scuole e su una più vasta scala, attraverso mostre ed eventi divulgativi. Le esperienze sono state basate sullo sviluppo di una metodologia di apprendimento-insegnamento rivolta a giovanissimi studenti, ma anche a un ampio pubblico. L'obiettivo delle sperimentazioni condotte è stato principalmente di avvicinare gli studenti verso un argomento scientifico non proprio pertinente ai loro curricula: il caos, sperimentandolo attraverso la costruzione del circuito elettronico di Chua e la composizione di modelli tridimensionali, suoni e musiche. I risultati ottenuti evidenziano il successo delle sperimentazioni: i ragazzi hanno acquisito consapevolezza sul significato scientifico della parola 'caos' e hanno percorso, attraverso la manipolazione, un processo di acquisizione dei concetti fondamentali legati a questa materia. La capacità creativa è stata da loro pienamente espressa attraverso la realizzazione dei modelli tridimensionali degli attrattori, dei suoni e delle musiche e materiali multimediali di notevole interesse. Gli studenti hanno mostrato grande coinvolgimento durante lo svolgimento di tutte le fasi della sperimentazione. Dall'analisi dei risultati ottenuti si rileva che il metodo d'insegnamento messo a punto, basato su quattro passi fondamentali, risulta efficiente ed efficace. L'attenzione dei ragazzi è stata dapprima catturata attraverso la visione di immagini e l'ascolto di musiche, ciò ha fatto nascere curiosità e stimolo a realizzare personalmente simili oggetti. Successivamente, attraverso la fase di costruzione del circuito gli studenti sono stati collegati direttamente allo strumento scientifico, il circuito di Chua, in grado di mostrare il comportamento caotico. Ciò ha permesso la riduzione dell'astrazione degli argomenti trattati. L'approccio alla scienza è diventato in questo modo rilassato, creativo e stimolante. Infine, la simulazione ha permesso ai ragazzi di sperimentare la scienza attraverso un mezzo familiare: il computer. L'apprendimento è stato veloce, intuitivo, piacevole e facilitato da strumenti fisici e tecnologici. Tutto ciò ha permesso la realizzazione di un reale percorso di conoscenza del fenomeno scientifico del caos. I lavori futuri possono essere diretti verso un consolidamento delle tecniche di insegnamento con il coinvolgimento di studenti appartenenti a fasce d'età più giovane e meno giovane.

CAPITOLO 6. ALTRE ESPERIENZE DI DIVULGAZIONE E MEDIA GIÀ REALIZZATI

*"La matematica è
creatrice di bellezza"*

M. Emmer

In questo capitolo sono presentate alcune altre esperienze di divulgazione e dei media realizzati durante il corso di dottorato. Si tratta di una raccolta di materiali pubblicati o in via di pubblicazione frutto di una ricerca cooperativa e creativa.

6.1 Video Documentario: Il circuito di Chua un viaggio tra arte e scienza

Come già sottolineato, perché possa realizzarsi la comunicazione sono due i principali aspetti che devono essere curati: il contenuto e il media attraverso cui tale contenuto si veicola. Di seguito si analizzeranno diversi media utilizzati per divulgare un contenuto sicuramente originale e di non facile comunicazione: la teoria del caos e della complessità. Saranno presentati alcuni lavori realizzati: un documentario scientifico (Bertacchini et al., 2011a), un sito internet (Bertacchini et al., 2010), la drammatizzazione di una pièce teatrale (Bertacchini et al., 2011b) proposta per mezzo di differenti modi rappresentativi: la recitazione teatrale, il teatro virtuale con maschere parlanti e, infine, l'animazione tridimensionale.

6.1.1 Scelta del linguaggio: il documentario per la comunicazione della scienza

Il documentario è considerato il più diffuso ed efficace media per la comunicazione di argomenti scientifici. Per favorire la comprensione il film documentario è solitamente strutturato in modo semplice: sono trasmesse immagini o animazioni di breve durata sugli argomenti approfonditi e una voce narrante, usando un linguaggio semplificato, spiega i vari concetti. In questo tipo di format la voce narrante espone idee e concetti e nel frattempo le immagini arricchiscono il discorso in modo da stimolare l'immaginazione degli spettatori. L'ascolto risulta quindi aiutato in un processo di feedback tra voce narrante e immagini, ciò crea un contesto che è al tempo stesso educativo e di intrattenimento. Nell'ambito delle tecnologie educative il documentario scientifico rappresenta una struttura chiara e semplice attraverso cui esporre argomenti anche complessi. Altro motivo che ha

favorito la scelta del documentario risiede nel fatto che nella comunicazione della scienza questo è uno dei più confermati e provati media; infatti, la facilitazione data dall'ascolto e, in generale, dalla comprensione della lingua parlata ne amplifica l'efficacia educativa. Il trasferimento della conoscenza sulle ricerche scientifiche, ma non solo, è stato massicciamente modificato dal sempre più crescente utilizzo di nuovi media. Tra questi, sicuramente di rilievo è il ruolo rivestito, ormai da decenni, dai documentari scientifici, che sembrano essersi consolidati tra i mezzi privilegiati per la divulgazione della scienza. La realizzazione di un film ha un duplice obiettivo: quello di migliorare la qualità nell'intervento educativo delle scienze e quello di trasmettere informazioni e spunti creativi nella maniera più efficace e diretta possibile assicurando l'estensione dell'azione formativa a un ampio pubblico, non necessariamente specialista. Un altro aspetto da considerare, nel caso del video sul Caos e la Complessità, è legato ai contenuti divulgati, per i quali si contano in precedenza ben poche esperienze analoghe. Tali argomenti scientifici, pur essendo stati esposti attraverso video divulgativi non sono mai prima d'ora stati rappresentati con metafore artistiche e produzioni creative. In questo caso viene privilegiato un approccio interdisciplinare che presenta, attraverso un viaggio ideale, tali temi scientifici ricercando le correlazioni degli stessi con la pittura, la musica, l'architettura o, più in generale, con l'arte, nell'ottica dell'integrazione dei saperi. Realizzare tale documentario è stata un'esperienza divertente e appassionante. Questo lavoro, pur essendo concepito nell'era dell'apprendimento per immagini e ambienti virtuali, non ha la pretesa di trattare in modo esaustivo l'argomento scientifico ma, piuttosto, ambisce a sollecitare l'intelligenza e la curiosità dei giovani che vogliono avvicinare, anche attraverso aspetti più propri delle scienze umane, un nascente interesse verso l'immaginario mondo del caos, delle sue forme, strutture e, più in generale, verso la scienza. Molto spesso la missione di scienziati, fisici, matematici è quella aprire nuove frontiere e/o formulare teorie rivoluzionare teorie superando quelle ormai ritenute acquisite, altre volte invece il loro ruolo consiste nel completare o ampliare determinati aspetti contribuendo alla crescita culturale globale dell'umanità, infine realizzare opere volte a compiere la divulgazione delle conoscenze, anche più specialistiche. Il mondo matematico e fisico dei sistemi complessi, pur essendo estremamente razionale, viene presentato sotto una veste affascinante e persino magica, cercando di coniugare le intime ragioni della ricerca scientifica: il pensare e l'esperire, l'elaborazione mentale e la verifica teorica e/o sperimentale delle intuizioni. Esempi nell'ambito della comunicazione della scienza attraverso documentari se ne contano in gran numero. Tra questi, un rilievo particolare va sicuramente dato a Cosmos (1980), un documentario scientifico in tredici puntate a opera di Carl Sagan trasmesse dal network statunitense PBS. La serie, che copre un vasto campo di argomenti scientifici, dall'origine della vita alle ricerche sull'universo, vinse un Emmy e un Peabody Award, fu trasmessa in più di 60 paesi e fu vista da oltre 500 milioni di persone. Altri video di divulgazione scientifica da annotare sono: "The

Mechanical Universe and Beyond" (1988), una serie di cinquantadue lezioni di fisica elementare in cui il professore David Goodstein del California Institute of Technology ripercorre la storia delle leggi della meccanica, dalle intuizioni di Galileo alla teoria della relatività. Nel campo della teoria dei frattali e la complessità va sicuramente ricordato il video intervista a due tra i più autorevoli scienziati del XX secolo E.N. Lorentz e B. Mandelbrot (H. O. Peitgen et al., 1990). Di seguito è presentato il documentario scientifico sulla teoria del caos e della complessità, elaborato sia in versione italiana che inglese, dal titolo 'Chua's Circuit. A journey between art and science'. Il film è dedicato alla presentazione degli attrattori caotici, derivati delle equazioni che rappresentano il circuito di Chua, e degli automi cellulari. Il documentario ha finalità educative e, focalizzando gran parte della trattazione sul circuito di Chua, i suoi elementi e le creazioni artistiche derivanti da questo, cerca di realizzare, attraverso un percorso interdisciplinare, un'idea concreta di edutainment. Sono offerti anche numerosi spunti di riflessione sulla estetica della matematica e sulle corrispondenze tra modelli artistici e modelli matematici, in una lettura anche storica di come l'uno sia fonte d'ispirazione per l'altro e viceversa. L'idea del viaggio è una metafora semplice e suggestiva che apre la mente all'immaginazione e alla creatività: sfruttando una struttura narrativa semplice si realizza una trama concettuale complessa. Il documentario scientifico che si sta presentando contiene in sé una doppia valenza pedagogica: l'una è rappresentata dal tipo di media scelto, che garantisce, come vedremo in seguito, una provata efficacia formativa; l'altra è rappresentata dal soggetto stesso del documentario: l'arte.

6.1.2 Alcuni aspetti tecnici: la visualizzazione scientifica, la computer grafica e il caos

La visualizzazione scientifica è un metodo attraverso cui possono essere create delle rappresentazioni visive di una serie di dati numerici derivanti dalla realtà fisica (scientific visualization) (Card S., et al., 1999) o visualizzazione di informazioni (information visualization). Tali metodi sono utilizzati per ampliare le capacità cognitive e guidare la costruzione di modelli cognitivi per la comprensione (Johnson et al., 2004). Le immagini, spesso, fanno sì che l'invisibile diventi visibile e i modelli o le informazioni conquistino un significato concreto. In molti casi le forme visualizzate sono manipolabili e anche un utente non esperto può interagire con loro. In tal modo la visione e la conoscenza risultano intrinsecamente collegati. La prima prova di visualizzazione scientifica si effettuò intorno all'anno mille attraverso la realizzazione di un diagramma che rappresentava le variazioni delle posizioni dei pianeti. La definizione della visualizzazione scientifica come disciplina autonoma risale a una ricerca in cui si evidenziava come gli investimenti in supercalcolatori dovessero essere seguiti da uno sviluppo altrettanto sostanziale delle tecniche di visualizzazione

(McCormick, 1987). La visualizzazione scientifica non fornisce solo tecniche e metodi computazionali per creare rappresentazioni visive ed interattive dei dati, in altri termini non è solo un dispositivo per il post trattamento dei dati, per la presentazione dei risultati e/o le conclusioni di un lavoro di ricerca, ma è anche uno strumento per l'analisi e un mezzo che può consentire la realizzazione di nuove scoperte, oppure ancora, uno strumento per meglio comprendere i fenomeni studiati. Da un lato, dunque, la visualizzazione è necessaria per la comprensione e l'analisi dei processi, dall'altro, grazie all'intervento della computer grafica, comunica contenuti, incanta e stupisce, a volte, l'utente finale. Molti anni di ricerche e sviluppi hanno consentito la messa a punto di un sistema computazionale per la visualizzazione delle serie numeriche derivanti dal circuito di Chua (Bilotta et al., 2006a). Le transizioni verso il caos sono caratterizzate dall'emergenza di molti attrattori strani. Questi sono evoluzioni caotiche che occupano uno specifico volume e presentano spesso una struttura frattale, caratterizzata per definizione da una dimensione non intera. Dalle ricerche condotte, si può affermare che nella letteratura scientifica esistono lavori focalizzati sullo studio dei patterns generati dagli attrattori strani, al variare dei parametri di controllo, e tool che consentono, attraverso la Computer Graphics, la visualizzazione di tali forme frattali (Bilotta et al., 2004a, 2005, 2006b). I sistemi dinamici non lineari presentano solitamente dimensione superiore a quattro o anche dimensione frazionaria e hanno diverse configurazioni: le dimensioni, le forme, la granularità di questi oggetti fanno sì che possano essere rappresentati da elementi diversi ossia composti nella loro visualizzazione da sfere, cubi, cilindri, inoltre la dimensione, il colore e l'illuminazione di questi sub-componenti, e ancora la presenza di metriche frattali e il cambiamento di alcune caratteristiche quantitative e qualitative dei patterns, sono fattori molto importanti per la visualizzazione finale degli attrattori. Al fine di esaminare la serie di dati provenienti dal sistema caotico un metodo efficace consiste nell'eseguire la simulazione per un numero molto elevato di iterazioni. Per realizzare ciò, nelle ricerche sopracitate, si legge che è stata necessaria più volte la modifica e il riassetto del sistema di calcolo in modo da rendere possibile la visualizzazione degli attrattori derivanti dal circuito di Chua. I modelli di attrattori presentati nel documentario sono stati ricavati utilizzando software di visualizzazione già esistenti e i programmi d'integrazione messi a punto ad hoc. Per ciò che riguarda la computer grafica, il vantaggio che si ha nella visualizzazione dei dati complessi, risiede nel fatto che è possibile raffigurare una grande quantità di forme, che seguono le variazioni dei parametri del sistema. Queste configurazioni possono essere sfruttate, ad esempio, nel design. Spesso la nostra percezione non riesce a riconoscere le forme degli attrattori, se viene cambiato il loro orientamento nello spazio 3D. Le configurazioni degli attrattori caotici quindi, a livello percettivo, non mantengono una costanza e una riconoscibilità, capace di consentire a un essere umano di riconoscere tali oggetti così come si fa normalmente con quelli comunemente contenuti nell'ambiente

circostante. Le configurazioni cambiano anche a seconda dell'uso che si fa dei diversi sub-componenti nella visualizzazione dei dati. Gli elementi visualizzati, come risultato finale dall'integrazione del sistema matematico, sono chiamati attrattori e rappresentano comportamenti tipici di un sistema dinamico. La formazione spontanea di strutture ben organizzate, modelli o comportamenti, da condizioni iniziali random evidenzia comportamenti emergenti, ordini, caos, hyperchaos, i sistemi di n-scroll e così via. Questi comportamenti emergenti sono stati chiamati complessi. Per divulgare tali temi scientifici sono state utilizzate entrambe le tecniche, la visualizzazione scientifica e la computer graphic, oltre alla comunicazione cinematografica. Questo linguaggio è caratterizzato da una partecipazione del pubblico particolarmente intensa perché il messaggio filmico, qualunque sia il valore intellettuale ed estetico, riesce a raggiungere facilmente ogni tipo di spettatore, coinvolgendolo (Lumbelli L., 1974). Il documentario ha prospettive educative e cerca di limitare la passività dello spettatore di fronte allo schermo. Egli è coinvolto da immagini e suoni e da una voce narrante che è come una guida nella comprensione dei contenuti. Gli argomenti scientifici sono meglio comunicati attraverso lo strumento audio-visivo rispetto ad altre forme di trasmissione di informazioni, poiché sono privilegiate forme di dialogo autentico. Il circuito di Chua è considerato uno strumento canonico nello studio del caos sia per ciò che riguarda il dominio ingegneristico, sia più specificamente quello fisico matematico, tanto da essere stato definito un paradigma negli studi sui sistemi dinamici non lineari (Madan, 1992). La ricerca qui presentata è ispirata dall'idea che anche un tema complesso come il caos potrebbe essere diffuso a un vasto pubblico. Per confermare questa ipotesi e dare un supporto sperimentale alla ricerca, la visione del documentario scientifico è stata proposta sia nel corso delle tre diverse esperienze scolastiche (Bilotta et al., 2010), sia durante la più recente mostra espositiva, entrambe illustrate nel capitolo quinto. La varietà delle forme, le metafore e i prodotti artistici derivanti da un sistema caotico sono in grado di mostrare la matematica in un modo nuovo e accattivante come fonte per produzioni artistiche. La pittura, la musica, la natura, l'arte, le forme, l'architettura, l'immaginazione, lo spazio sono solo alcuni esempi utilizzati per presentare il caos sotto vesti inusuali e originali. Quello proposto è un racconto che conduce l'ascoltatore alla ricerca di alcuni fili di Arianna per tentare di rendere visibile il legame, spesso nascosto, tra matematica, arte e cultura. Non si vuole qui affermare che tutto è matematica, che senza matematica non si può parlare di arte, ma neppure sostenere che la matematica è una parte separata della conoscenza umana, riservata a pochi eletti che hanno il dono di poterla comprendere. Ha scritto Max Bill: "Si sostiene che l'arte non ha niente a che fare con la matematica, che quest'ultima costituisce una materia arida, non artistica, un campo puramente intellettuale e di conseguenza estraneo all'arte. Nessuna di queste due argomentazioni è accettabile perché l'arte ha bisogno del sentimento e del pensiero... Il pensiero permette di ordinare i valori emozionali perché da essi possa

uscire l'opera d'arte". In maniera simililare, entrambe sono una ricerca dei segni: realizzati attraverso la matematica ed espressi attraverso l'arte e, come ricorda Matisse: "L'importanza di un artista consiste nella quantità di nuovi segni che ha introdotto nell'arte". Dunque, si tratta di un viaggio alla ricerca dei segni e dei numeri: dei segni lasciati da artisti, scrittori, registi, matematici e dei numeri come mistero, racconto o simbolo, come composizione musicale e pittura. Numeri e segni, simboli e leggi, strutture e immagini, lo spazio, le forme, le logiche: tutto diventa possibile, inventabile, realizzabile; la scienza tenta, in questo modo, di aprire nuove strade alla creatività. In questi ultimi anni, la letteratura sulle dinamiche caotiche, i fenomeni di biforcazione, gli studi sugli attrattori strani emergenti dai sistemi non lineari deterministici è aumentata notevolmente, sia in termini di modelli matematici che di modelli fisici. Tra i diversi sistemi non lineari esistenti, l'oscillatore Chua, come già detto, svolge un ruolo molto importante, poiché è stato oggetto di una grande quantità di ricerche scientifiche, contando più di 1000 articoli a esso correlati, dal 1984 (Matsumoto, 1984) ad oggi. Un altro sistema dinamico discreto in grado di visualizzare modelli interessanti a scopi divulgativi è quello relativo agli automi cellulari generati attraverso processi di auto-riproduzione. Nel documentario sono presentati collezioni di modelli derivanti da automi cellulari e loro evoluzioni. Tali sistemi sono in grado di rilevare fenomeni sorprendenti in gran parte sconosciuti nel dominio del caos. I sistemi dinamici fisici sono spesso rappresentati attraverso la visualizzazione scientifica, resi affascinanti e proposti al grande pubblico grazie agli effetti della grafica. Anche Lorenz nel 1972, attirò l'attenzione della comunità scientifica proponendo una famosa metafora sotto forma di una domanda paradossale 'Predictability; does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?'. Lo scienziato del MIT si rese conto della necessità di semplificazione del concetto matematico e utilizzò una rappresentazione visiva per presentare un problema complesso, fornendo un contributo eccellente su un nuovo metodo di approccio alle scoperte della scienza. In seguito, molti altri matematici e fisici hanno calcato il suo esempio divulgando le loro invenzioni attraverso l'uso di rappresentazioni visive. Un esempio celebre viene da B. Mandelbrot, meglio conosciuto come il padre della geometria frattale (Mandelbrot, 1982). La sua invenzione, l'insieme di Mandelbrot, gli ha permesso di diffondere i risultati delle ricerche matematiche attraverso oggetti coinvolgenti e accattivanti. Più volte Mandelbrot stesso afferma, infatti, che gli scienziati attraverso i nuovi media e gli strumenti tecnologici hanno ora la possibilità di mostrare a tutti quanto la matematica possa essere anche 'bellezza' e questa possibilità deve essere sfruttata al meglio.

6.1.3 I contenuti

Sin dalla cultura della Grecia antica forme geometriche e matematiche sono state utilizzate nelle rappresentazioni artistiche. Le corrispondenze matematiche e numeriche sono state usate per fornire un'immagine del mondo in pittura, in scultura e in architettura: questo è il punto di partenza del video documentario presentato di seguito: 'Il Circuito di Chua. Un viaggio tra scienza e arte'. Lo scopo principale del film è di indagare sui legami tra scienza e arte; la teoria del caos ha una rilevanza particolare in questo contesto. Un attrattore è l'evoluzione nello spazio di un insieme di parametri che rappresenta un sistema dinamico non lineare. La variazione numerica di questi, determina l'emergere di una moltitudine di modelli tridimensionali che presentano forme singolari. Tali sistemi dinamici evolvono in varie forme e modelli distintivi che possono essere utilizzati per divulgare la Teoria del Caos attraverso la visualizzazione dei modelli degli attrattori animati attraverso dei software di grafica 3D. La complessità delle forme è sorprendente, suggestiva e accattivante tanto da rendere tale campo di speculazione e ricerca scientifica soggetto perfetto per una rappresentazione artistica. L'idea di proporre un documentario scientifico sulla complessità e il caos nasce dalla ricorrenza del 30° anniversario della invenzione del circuito di Chua (Chua, 1992a), un'eccezionale scoperta che ha cambiato la storia del pensiero scientifico. I contenuti del film sono strutturati in sei parti. La prima parte introduce il concetto di Caos collegandolo sia alla cultura tradizionale greca, sia alla comune accezione che tale termine porta con se. Questa parte si conclude presentando il concetto di caos nella corrente accezione scientifica, attraverso anche esempi tratti dalla natura. La seconda parte presenta alcuni esempi dell'uso della matematica nelle rappresentazioni artistiche. I richiami a tali collegamenti sono anche in questo caso storici. L'arte greca è ricca di reperti in cui le forme geometriche sono utilizzate come particolari ornamentali: dai vasi ai capitelli. Uguali sinergie si ritrovano in Picasso e in Escher, il video documentario suggerisce attraverso modelli tridimensionali animati, effetti speciali, distorsioni e accostamenti suggestivi tra la matematica e le rappresentazioni artistiche. La terza parte del video è dedicata all'arte generativa come espressione d'incontro tra tecnologia e arte sia visiva che musicale. I sistemi caotici riescono infatti a soddisfare lo scopo dell'estetica generativa come produzione artificiale di probabilità, di innovazione o di deviazione dalla norma (Bense, 1974). La quarta parte presenta il circuito elettronico di Chua come possibile generatore di modelli, immagini, musiche. Molto ampie sono infatti i tipi di famiglie che, attraverso l'integrazione numerica, esso è in grado di generare. Legate alle rappresentazioni visive e musicali emergenti dal caos vengono presentate, in questa parte, anche numerose iniziative già realizzate per la divulgazione scientifica: immagini da registrazioni video di mostre, installazioni, eventi teatrali, creazioni di ambienti virtuali sono presentate per incuriosire il pubblico e infondere la convinzione che la scienza, attraverso l'arte,

possa parlare di se e farsi conoscere anche presso un ampio pubblico, utilizzando appunto nuove forme di linguaggio e di comunicazione. La quinta parte tratta un altro settore dei sistemi complessi: gli automi cellulari. Questi sono sistemi dinamici discreti che, attraverso la computazione, sono in grado di generare, nell'evoluzione dinamica delle loro strutture, immagini visive e auditive di natura artistica. La sesta e ultima parte presenta, infine, alcune idee di utilizzo delle strutture caotiche per realizzazioni immaginarie e concrete sia in campo artistico creativo che dell'industria culturale. Tale sezione si conclude con la presentazione di alcune metafore e accostamenti che vedono il fenomeno caotico come fonte d'ispirazione per molte opere di architettura contemporanea.

6.1.4 La sceneggiatura

Il film documentario descritto nella presente sezione è una buona introduzione ai concetti fondamentali sulla Teoria del Caos e della Complessità, e utilizza come soggetti protagonisti: il circuito di Chua e una numerosa varietà di immagini e di musiche derivanti da questo. Nel seguito verrà presentata la sceneggiatura ideata e scritta per la realizzazione del documentario. Una delle particolari difficoltà presentate nella divulgazione di argomenti di questo genere, infatti, è tradurre in immagini i concetti. In un certo senso, una ricerca di questo tipo porta in se la complessità legata sia ai contenuti da trasmettere sia alla necessità di rendere visibile l'invisibile semplificando concetti fisico matematici molto complessi. I contenuti, come già visto nella sezione precedente, si possono inserire in differenti aree che hanno però un unico filo comune: le connessioni tra scienza e arte che sono sempre state profonde. Il documentario inizia presentando alcuni concetti alla base dell'armonia e delle proporzioni, fondamentali nell'arte dagli antichi greci, al rinascimento, fino ai giorni nostri. Il concetto trasmesso nella parte iniziale del film è la distinzione, risalente all'antica Graecia tra ordine, cosmos e caos, disordine, inteso anche come incapacità umana di cogliere appieno gli aspetti complessi della natura. La scena inizia con un movimento ascendente dal basamento fino alla testa e rotatorio attorno alla ricostruzione tridimensionale delle famose statue dei Bronzi di Riace, la ricostruzione tridimensionale di un tempio in un sito archeologico della Magna Graecia e la sezione aurea ricostruita sulla pianta dello stesso tempio. Quest'ultima è una figura fortemente evocativa, l'arte antica basa il proprio canone di bellezza sulla teoria delle proporzioni e sulla perfezione rappresentata dalla sezione aurea, Fig. 6.1.

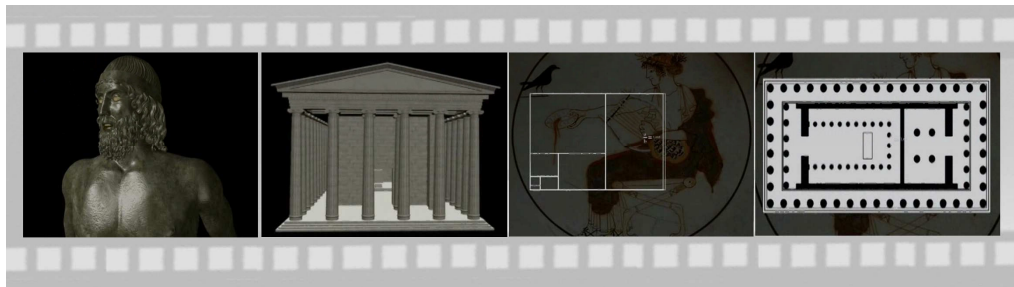


Fig. 6. 1 Il cosmos, l'ordine e i canoni estetici dell'antica Graecia

Al contrario l'arte moderna subisce il fascino delle simmetrie, delle scomposizioni e delle rotture di tali simmetrie, perché è attraverso esse che si realizza l'esplorazione di nuovi linguaggi. Il cosmos è contrapposto al caos, con questo termine viene comunemente sintetizzato o classificato tutto ciò che in natura non ha regole certe e spiegabili. Nella scena sono presentate in contrapposizione alle immagini rappresentative dei canoni classici le icone del caos: nell'accezione comune di disordine, sono mostrate immagini di traffico, in senso scientifico, sono presentate le immagini di un attrattore che si forma attraverso un'animazione e le complesse venature di una foglia che si trasformano in una mappa di biforcazione Fig. 6.2.

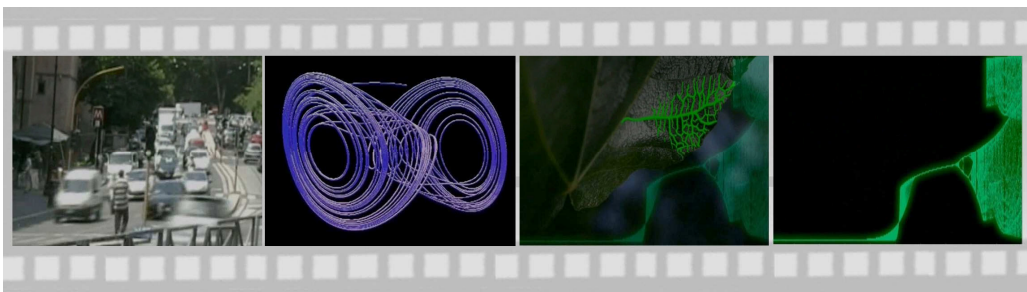


Fig. 6.2 Il caos e la complessità della natura

Più comunemente applicata allo studio dei sistemi dinamici, si è visto come la mappa di biforcazione presenta i punti di stabilità del sistema caotico al variare del parametro caratteristico preso in considerazione. In particolare, una biforcazione si verifica quando una piccola modifica dei valori dei parametri del sistema provocano un brusco cambiamento qualitativo o topologico nel suo comportamento. Nella metafora rappresentata viene comparata la complessità della natura con la complessità dei sistemi caotici. C'è ora nel testo un richiamo a come le strutture ordinate contengano in se un eccesso d'informazione, mentre quelle caotiche costituiscano esse stesse nella loro evoluzione l'informazione. Nella scena compaiono dei solidi regolari in rotazione, come richiamo evocativo ai solidi platonici, e

successivamente la prima strada verso il caos percorsa su una mappa di biforcazione relativa al parametro α , Fig. 6.3, in cui è visibile il passaggio nei vari punti di equilibrio: il punto, il ciclo limite, la spirale, il double scroll (Chua et al., 1993a).

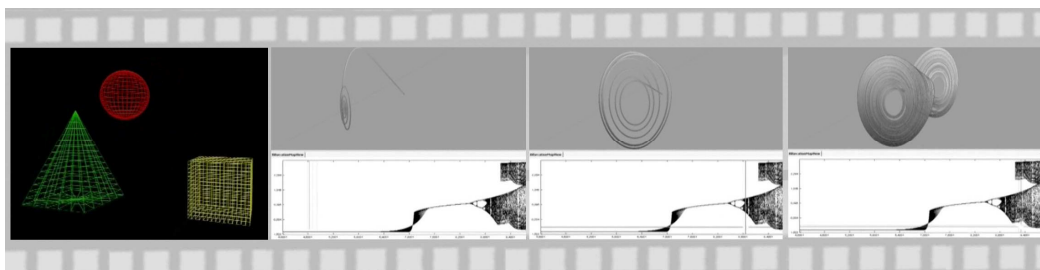


Fig. 6.3 Eccesso ed emergenza dell'informazione

Nelle forme caotiche emergenti coesistono tuttavia ordini, ricorrenze, simmetrie, strutture frattali ed è proprio il richiamo a tali caratteristiche relative agli attrattori strani (Chua et al., 1993b) che si combina un efficace accostamento della scienza all'arte. La strutturazione o la destrutturazione costituiscono un elemento fondante dell'opera artistica, in un certo senso, il sistema caotico rappresenta una struttura che si offre all'artista per supportare le sue creazioni, sia visive che musicali. L'applicazione delle conoscenze e dei principi matematici all'arte ha origine sin dalla Grecia antica, in cui molte forme matematiche dalle greche, alle volute sono composte per essere ornamenti in capitelli, timpani, vasi, piatti, e così via. Mano a mano, l'uso delle forme matematiche nell'arte è diventata cultura e ancora oggi costituisce il fondamento dell'espressione artistica occidentale, Fig. 6.4.



Fig. 6.4 La matematica nell'arte greca e nell'arte occidentale

Sempre in questo contesto, si vedono esempi di strutture, scomposizioni, suggestioni, illusioni, simmetrie nell'arte di Escher o Picasso, per esempio, per rimarcare le analogie tra le creazioni artistiche e la geometria, la matematica, la scienza Fig. 6.5.

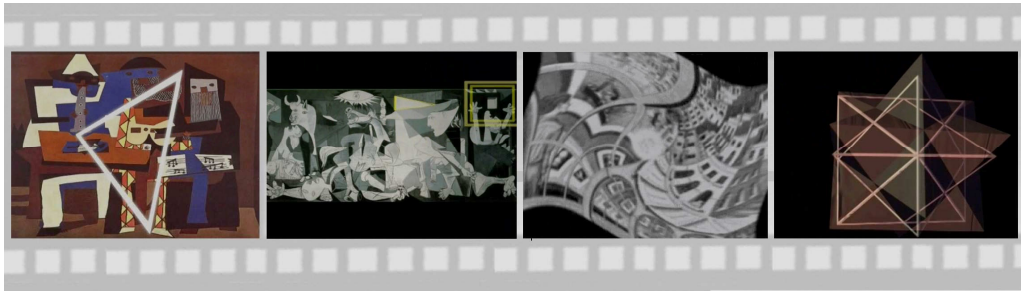


Fig. 6.5 La matematica nell'arte di Picasso, Escher

La scena propone come esempi le pitture di Picasso ed Escher con la comparsa e dissolvenza di figure geometriche luminose, triangoli, quadrati, che mettono in evidenza le scomposizioni delle forme, realizzate da Picasso e le suggestioni simmetriche, l'uso di strutture matematiche come poliedri, disordini geometrici, di Escher. A questo punto il documentario dedica un lieve accento all'arte generativa, molto più conosciuta oltreoceano con il termine Generative Art. Un intuitivo riferimento a questa espressione consente di spiegare come ci si riferisca a opere artistiche composte, generate o costruite tramite algoritmi utilizzando software o processi matematici computazionali. Spesse volte alla base di questi sistemi soggiacciono teorie matematiche o fisiche, un esempio è dato proprio dall'uso della Teoria del Caos e della Complessità, Fig. 6.6.

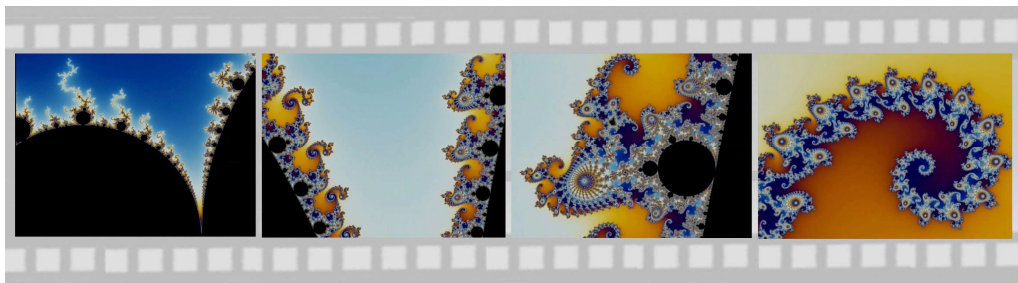


Fig. 6.6 Processi di visualizzazione, l'insieme di Mandelbrot

Viene spiegato il meccanismo cui si è già accennato in precedenza: il processo d'integrazione numerica dell'equazioni differenziali che rappresentano l'oscillatore di Chua, espresso attraverso un algoritmo producono serie numeriche che vengono, attraverso la visualizzazione scientifica, trasformate in immagini. Nelle sequenze successive viene posto l'accento su come si possano ottenere forme e strutture, interpretabili in maniera artistica anche partendo dal circuito di Chua e dalle sue generalizzazioni. Sono raffigurate immagini di alcune tecniche computazionali

dedicate alla visualizzazione degli attrattori. Una serie di algoritmi che scorrono sono sovrapposte e sfumate su modelli di attrattori tridimensionali in movimento Fig. 6.7.

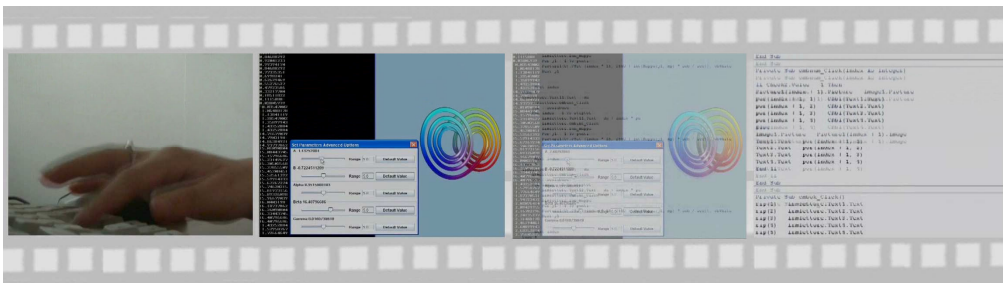


Fig. 6.7 Gli algoritmi e la visualizzazione degli attrattori caotici

La scena prosegue con l'immagine di un attrattore sotto l'occhio di bue che evoca sia la centralità della scienza, ma anche la possibilità di percepire le forme matematiche degli attrattori come fossero sculture, quindi, oggetti d'arte. La scelta di giocare con le luci e i materiali che riflettono gli intrecci che compongono la traiettoria rendono la visualizzazione dell'attrattore surreale. Nei fotogrammi successivi gli attrattori vengono proposti uno dopo l'altro, come fosse una sfilata, Fig. 6.8.

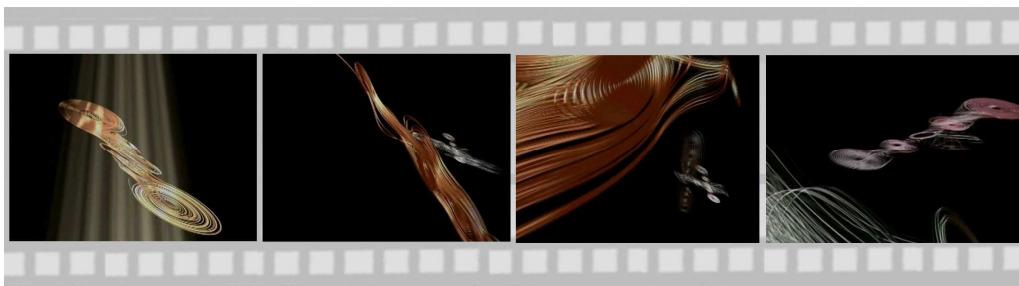


Fig. 6.8 Gli attrattori caotici interpretati in chiave artistica

I fotogrammi si susseguono in un continuo di immagini mutanti dall'oscillatore si passa alle sequenze di numeri, per poi proporre un attrattore nella particolare visualizzazione delle sue trame, per poi ritornare sull'oscillatore. Le emergenze hanno forme e dimensioni tra loro molto diverse: le trame sono molto fitte, le strutture sono spesso frattali; il video presenta un continuo susseguirsi di modelli tridimensionali in movimento, Fig. 6.9.

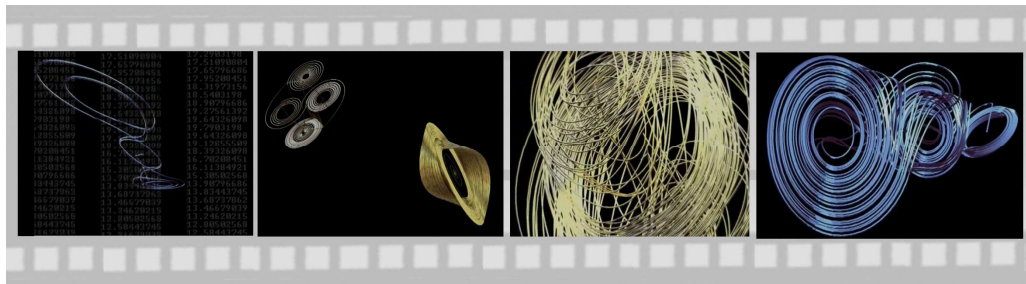


Fig. 6.9 L'arte e il caos

L'oscillatore è presentato sotto una veste insolita: generatore di forme, immagini e oggetti 3D. La tridimensionalità delle forme offre la possibilità di osservare i modelli da diversi punti di vista, gli oggetti ruotati mostrano così nuovi particolari, Fig 6.10.

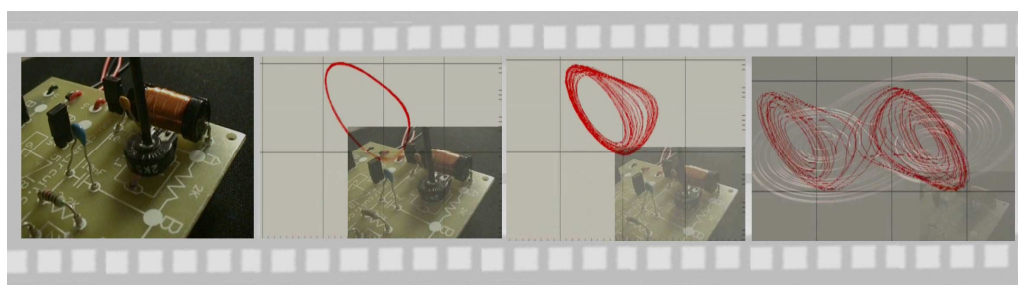


Fig. 6.10 Dal fisico al 3D

I richiami alla possibilità di creare oggetti artistici dal caos continuano nella sezione successiva dedicata alla musica. Applicazioni ampie dei modelli matematici caotici si sono infatti avute nella creazione di musiche, anche attraverso l'uso di algoritmi genetici (Rizzuti et al., 2009), e di veri e propri strumenti musicali sintetici basati sull'uso delle equazioni del sistema di Chua. La scena relativa alla spiegazione di come sia possibile la creazione di musiche dal caos, presenta un modello di attrattore tridimensionale, molto somigliante a una tromba. In un'animazione, fortemente evocativa, tale attrattore va a comporsi esattamente come fosse una tromba. I pistoni si muovono in uno spostamento lento e dalla svasatura a campana della tromba fuoriescono, in un movimento circolare, una serie di numeri che, viaggiando sullo schermo verso un pentagramma e superando una chiave di violino, si trasformano in note musicali Fig. 6.11.

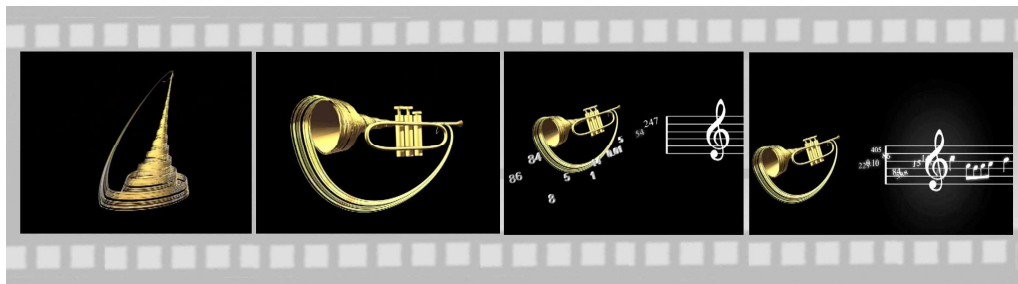


Fig. 6.11 La creazione musicale e il caos

Gli approcci per la creazione di immagini e musiche sono analoghi, la scena viene scomposta in quattro quadranti ciascuno contenente l'immagine significativa: gli algoritmi, le serie di numeri, il modello tridimensionale di un attrattore caotico, le partiture musicali, Fig. 6.12.

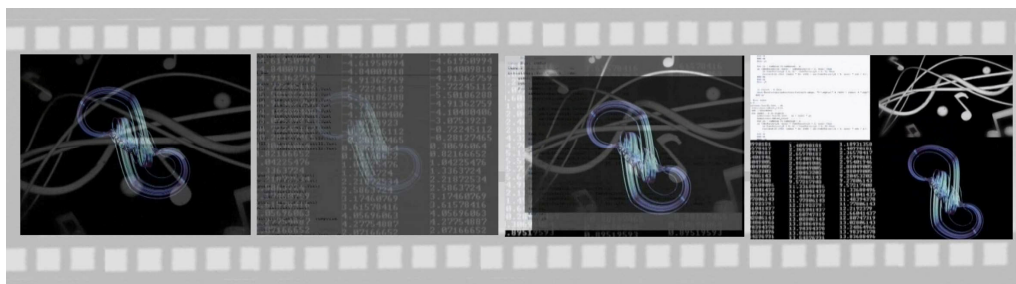


Fig. 6.12 Creazioni artistiche dal caos, visuali e musicali, a confronto

Lo schema di riferimento che s'impiega nella generazione di suoni e musica a partire da sistemi dinamici è il così detto "triangolo di musicificazione" (Bilotta et al., 2002). Il video mostra la relazione schematica che è possibile instaurare tramite il sistema di codifica fra una serie di dati e la sua rappresentazione uditiva. Questa figura è stata derivata e adattata al caso delle rappresentazioni uditive a partire dal "triangolo semantico" che è spesso impiegato negli studi sul linguaggio e la comunicazione come paradigma per lo studio dei processi semiotici. Adottando come metafora un triangolo di musicificazione che connette le strutture matematiche prodotte all'interno di qualche modello formale o teoria empirica e differenti meccanismi di musicificazione o sonificazione, si possono creare innumerevoli rappresentazioni o artefatti musicali. In particolare, il documentario propone la connessione tra il generatore, che genericamente può essere un sistema caotico, frattale, ecc. rappresentato simbolicamente dall'evoluzione di nuvole, il sistema di codifica che trasforma i dati provenienti dal generatore, rappresentato da una sequenza di algoritmi, e le rappresentazioni sonore, simboleggiate da un automa cellulare a forma di farfalla, Fig. 6.13.

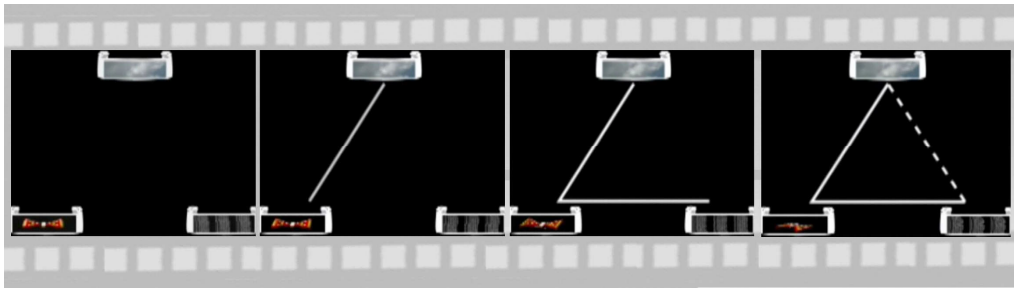


Fig. 6.13 Il triangolo semantico, connessioni tra il generatore, il sistema di codifica e le rappresentazioni uditive

Le sequenze successive approfondiscono il rapporto tra computer e creazione musicale, sono presentati una serie di algoritmi e software che di fatto aiutano l'artista a esprimere estro e creatività. Anche nella produzione musicale il computer sembra essere diventato insostituibile media a supporto dell'estro creativo. Utilizzando la sintesi sonora è possibile creare dei veri e propri strumenti musicali sintetici, basati sul sistema caotico di Chua, Fig. 6.14.

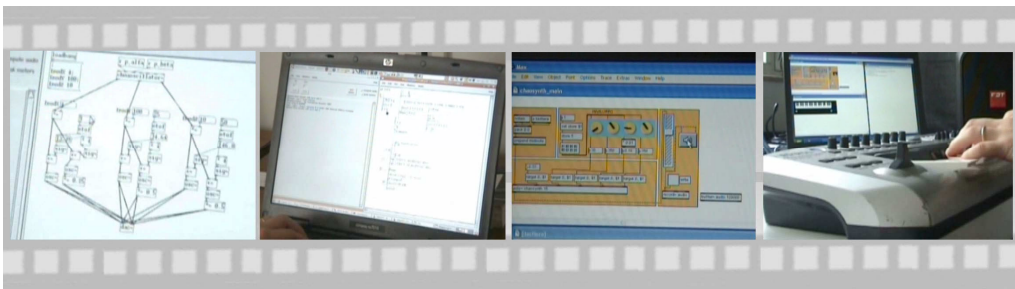


Fig. 6.14 L'artista e l'espressione innovativa della sua creatività

I fotogrammi successivi mettono quindi in evidenza i vantaggi insiti nell'uso di sistemi computazionali per la produzione musicale, gli strumenti tradizionali, evocati da un flauto, una batteria, un violino, consentono variazioni timbriche limitate, molto più vasto è invece il caso in cui si considerino i vari utilizzi del calcolatore, Fig. 6.15.



Fig. 6.15 Richiamo all'uso degli strumenti classici

Anche i sistemi dinamici discreti sono in grado di generare una vasta serie di dati che possono essere, attraverso opportune trasformazioni, rappresentati sia in termini visivi che uditivi, in maniera simile a quanto accade per i sistemi dinamici continui come l'oscillatore di Chua. Nei fotogrammi che seguono si mostrano fotografie di von Neumann che all'inizio degli anni '50 inventò gli automi cellulari per investigare la 'logica della vita'. Sono mostrati quindi brevi filmati realizzati proprio a partire dalle sonorità e dalle visualizzazioni relative agli automi cellulari, che mostrano mondi immaginari e i meccanismi elementari propri di questi sistemi: l'auto-riproduzione e la morfogenesi, Fig. 6.16.

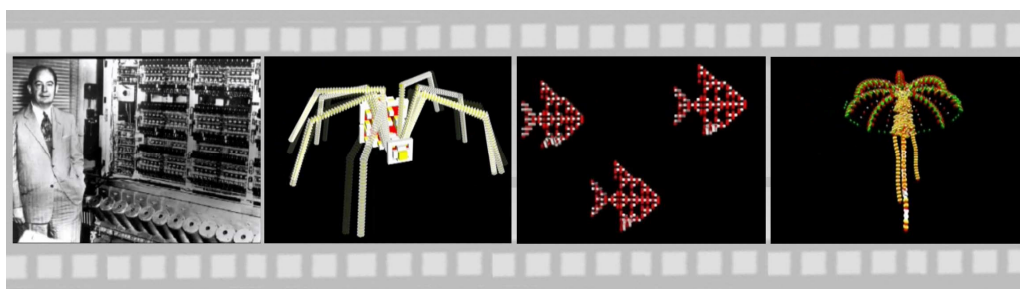


Fig. 6.16 Gli automi cellulari: il loro inventore, le evoluzioni e creazioni

Gli automi cellulari, infatti, sono sistemi dinamici discreti capaci di acquisire informazioni e cambiamenti durante le loro evoluzioni, realizzando processi che è possibile ritrovare nella struttura del DNA, come la conservazione, il trasporto, la manipolazione e il recupero dell'informazione. Tali sistemi sono in grado di rappresentare la logica della vita (Langton, 1984) essendo capaci di mostrare una computazione universale (Wolfram, 1984) ed essendo in stretta relazione con l'idea che la vita è basata su processi informativi (Bilotta et. Al., 2004b). In particolare, una speciale classe di automi cellulari, cosiddetti auto-riproduttori, rivelano una logica algoritmica nella riproduzione, che è in grado di procedere a ritmi differenti, adottando varie organizzazioni spaziali dei patterns (Bilotta et al., 2005b). L'informazione duplicata, incrementa la quantità totale informativa del sistema a livello microscopico, creando cambiamenti a livello globale, che a loro volta modificano la qualità del sistema. Anche in questo caso, come d'altronde nel caso degli attrattori caotici, i sistemi matematici trovano nelle loro visualizzazioni una maniera preferenziale per essere divulgati. Nel caso degli automi cellulari ci si trova di fronte a strutture che richiamano forme naturali. Il richiamo a tali tipi di sistemi è legato anche alle analogie nelle emergenze e nelle evoluzioni di tali sistemi. Processi di auto-riproduzione e morfogenesi sono presenti in entrambi i sistemi dinamici continui o discreti che siano. Il documentario, dopo questa breve parentesi riguardante i sistemi dinamici discreti degli automi cellulari, riprende a considerare i sistemi caotici cercando di descrivere alcune forme e immagini che è possibile ricavare da questi. I cosiddetti, fiori di Chua, ossia particolari attrattori che attraverso

semplici tecniche di foto ritocco possono essere interpretati come creazioni floreali. Altri attrattori manifestano simmetrie, cosiddette alla Escher, e anche sorprendentemente la rottura di tali simmetrie e la creazione di altre tipologie di forme. Nella sequenze mostrate per presentare questi accostamenti creativi, Fig. 6.17, sono molto veloci come per conferire, con il movimento, l'idea dell'emergere naturale di tali forme, quasi fossero già nel contenuto informativo delle stesse.

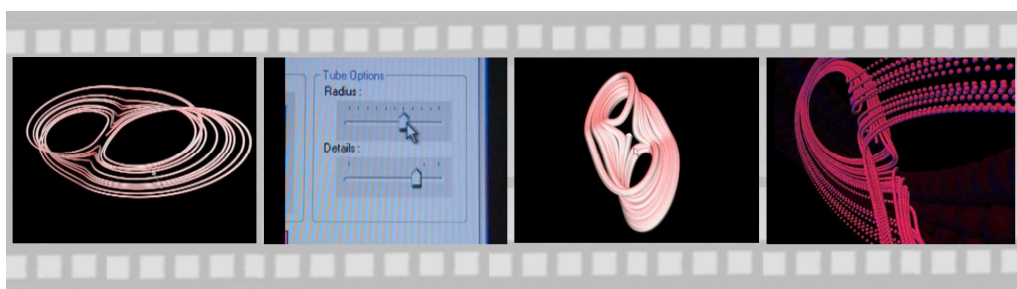


Fig. 6.17 Manipolazioni grafiche 2D e simmetrie

Le tecniche di visualizzazione grafica consentono un'agevole modifica anche del modello tridimensionale, l'attrattore può, non solo essere ruotato, ma può essere variata la sezione dei punti che si rincorrono a comporre la sua orbita. Si vedono a tal proposito una serie di esempi di manipolazione grafica delle linee, delle sezioni, alcuni attrattori vengono rappresentati anche attraverso sfere, Fig 6.18.

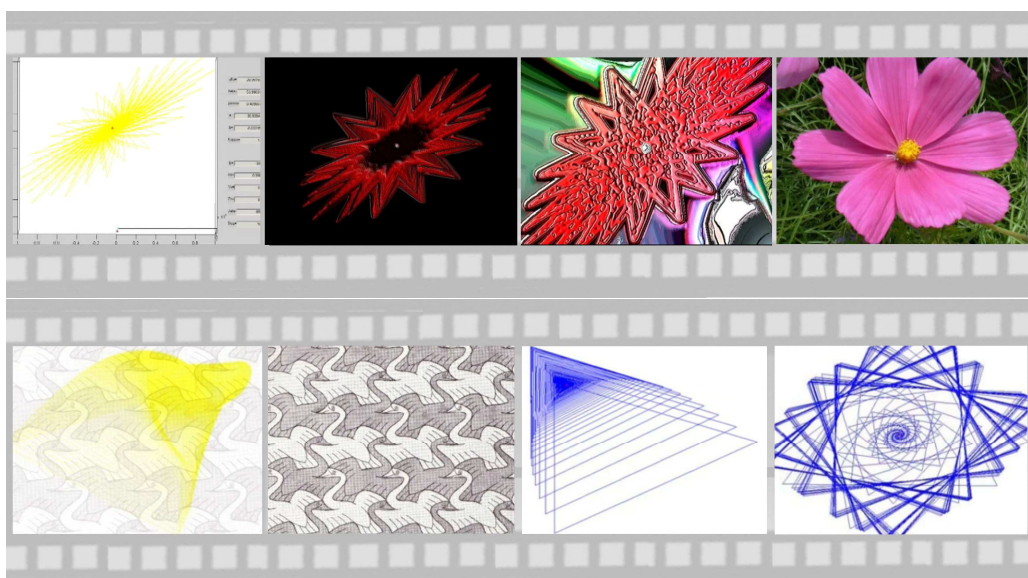


Fig. 6.18 Manipolazioni grafiche 3D sui modelli

Utilizzando linee particolarmente spesse, per esempio, si possono osservare le forme emergenti da punti di vista molto suggestivi come a esempio quelle "dentro" gli

attrattori. I fotogrammi, Fig. 6.19, a partire dalla visualizzazione di un attrattore 3D, realizzano un avvicinamento graduale al centro degli stessi, lì dove il groviglio di linee è particolarmente contorto. Ne derivano macchie di colore che evocano i quadri di J. Pollock realizzati grazie alla cosiddetta action painting, una tecnica che inventata dal famoso pittore statunitense prevede lo sgocciolamento del colore dai pennelli o direttamente dal barattolo.

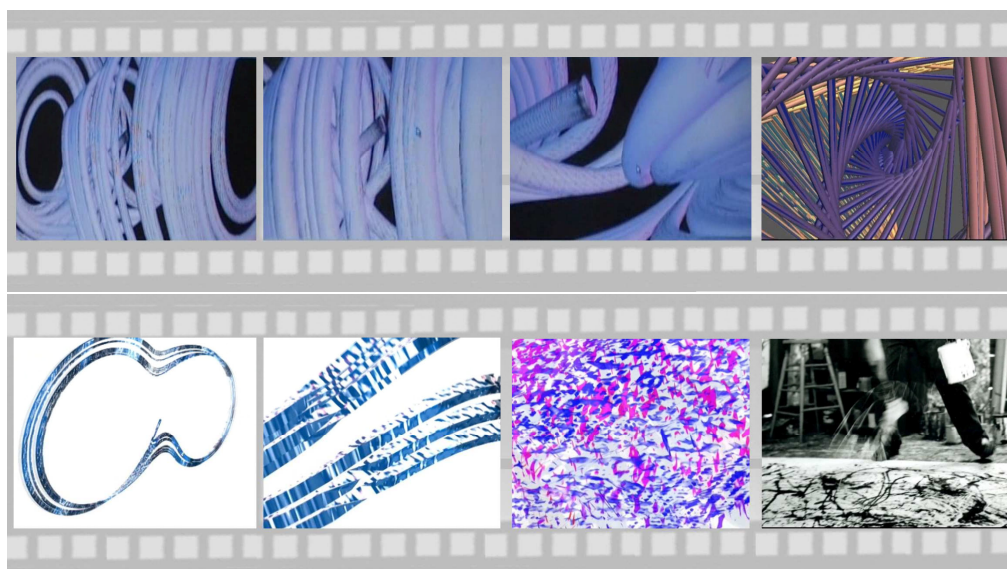


Fig. 6.19 Suggestioni di colori e luci, dentro gli attrattori e le realizzazioni di J. Pollock

La sceneggiatura prosegue presentando alcune immagini relative a mostre ed eventi realizzati per il grande pubblico, Fig. 6.20: la mostra realizzata in Vibo Valentia, descritta nel precedente capitolo e la rappresentazione teatrale de 'L'attrattore strano' (Adamo et al., 2005).



Fig. 6.20 Mostre ed eventi ispirati alla teoria del caos

Attraverso i nuovi media è possibile comunicare la scienza in maniera innovativa e, poiché la scienza e l'arte nascono dall'esigenza d'interpretare la natura e arrivare alla sua conoscenza, i modelli matematici e le rappresentazioni artistiche presentano

un'immagine riflessa di quella stessa natura. Nelle immagini che si susseguono è rappresentato un mondo futuristico retto da queste forme matematiche: il museo virtuale del caos (Bertacchini et al., 2009), prima e la città dell'immaginazione poi, Fig. 6.21.

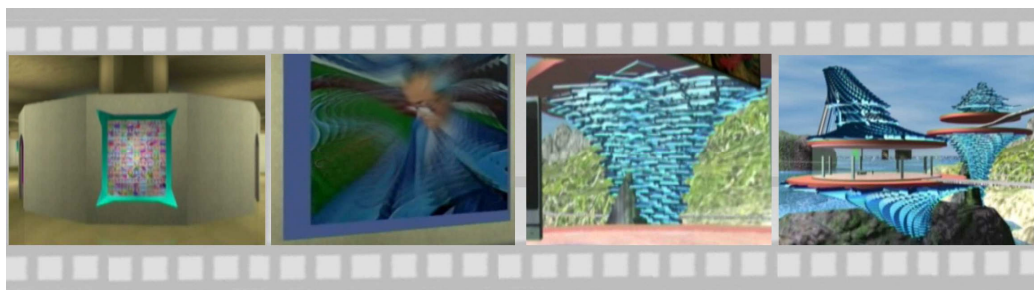


Fig. 6.21 Suggestioni da mondi virtuali dal caos

Le forme degli attrattori costituiscono sicuramente una fonte d'ispirazione per le interpretazioni artistiche a partire dalla famosa farfalla di Lorenz, 1963, fino ad arrivare al double scroll di Chua, 1983. Proprio sugli scroll diventati simbolo dei sistemi caotici, si basano molte opere dell'arte contemporanea, sono visualizzati a questo proposito in sequenza molti quadri di G. Klimt, Fig. 6.22, nell'opera l'Albero della vita è, infine, creata una distorsione dell'immagine che simula proprio l'andamento di uno scroll.



Fig. 6.22 Sequenze di scroll

Una considerazione di indubbia importanza nella divulgazione della teoria del caos risiede nei concetti di modello fisico e modello matematico dal momento che un modello puramente matematico e, quindi computazionale, può vivere anche se non ha una corrispondenza con la fisica. E' il caso di ciò che accade nelle cosiddette "Macchine di Chua" (Bilotta&Pantano, 2010b). Presentate in una sequenza di "zoom in zoom out" queste forme sono caratterizzate da ricorrenze, processi di morfogenesi, strutture frattali, manifestazioni di famiglia di modelli computazionali dal comportamento del tutto inedito, Fig. 6.23.

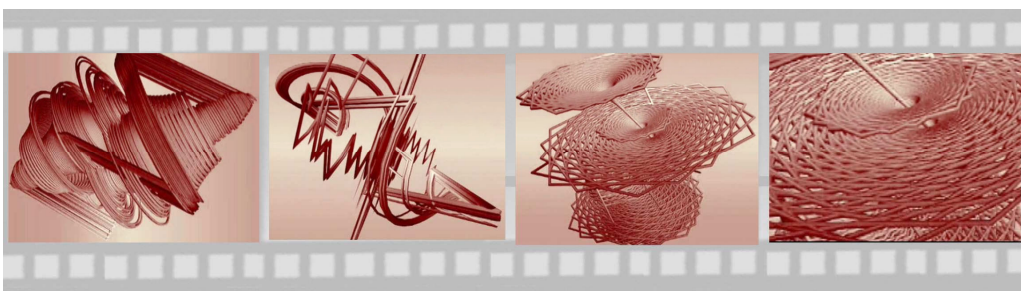


Fig. 6.23 Sequenze dedicate alle Macchine di Chua

Le ricerche fino a questo punto condotte possono trovare anche interessanti spunti applicativi. Scopo della parte conclusiva del documentario è lanciare delle idee su come poter trasferire le ricerche sui sistemi caotici nell'industria del design. Gli attrattori possono essere utilizzati per creare un nuovo alfabeto, loghi molto suggestivi, straordinari gioielli. Relativamente a questi, la sceneggiatura, Fig. 6.24, ha proposto una sequenza particolarmente esplicativa: partendo da una forma di un attrattore, si vede la sua modifica attraverso una curvatura fino alla comparsa dell'immagine reale di un bracciale creato a partire proprio da un attrattore.



Fig. 6.24 Sequenze dedicate alla creazione di un bracciale a partire da un attrattore

I fotogrammi che seguono mostrano come gli attrattori possano risultare interessanti strutture anche dal punto di vista architettonico. Da una ricerca condotta, per poter rendere in immagini questo concetto, alcuni attrattori sono risultati essere straordinariamente molto somiglianti rispetto ad alcune famose strutture di architettura moderna.

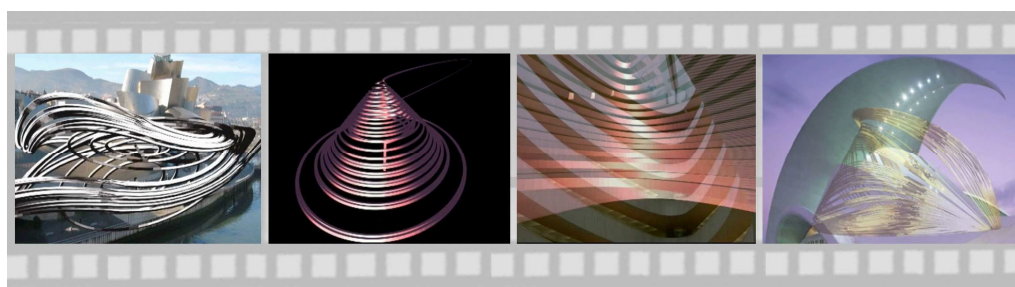


Fig. 6.25 Le forme caotiche e le architetture contemporanee

In una sequenza di accostamenti, Fig. 6.25, dissolvenze e sovrapposizioni, sono proposte alcune forme caotiche simili agli edifici del Guggenheim Museum di Bilbao di Frank Gehry e della Law School presso l'Università di Zurigo e del Tenerife Opera House, entrambi questi ultimi realizzati da Santiago Calatrava. Quanto la struttura architettonica sia effettivamente riconducibile alle forme caotiche è difficile dirlo. Certo è che questi offrono una particolare straordinaria originalità nelle forme tanto da poter azzardare quanto meno un'ispirazione, seppur non consapevole, a tali strutture matematiche.

6.1.5 Conclusioni e sviluppi futuri

In questa sezione è stato presentato uno dei media realizzati durante il corso di dottorato, si tratta di un video documentario che presenta alcune possibili interpretazioni dei sistemi caotici e delle sue generazioni. Realizzato a scopo di divulgazione scientifica, ha come protagonisti principali: il caos e le creazioni matematico-artistiche derivanti dal circuito elettronico di Chua. Il documentario fornisce uno spunto sui possibili usi dei sistemi caotici in campo educativo, artistico e nell'industria culturale. L'obiettivo è stato proporre uno strumento per realizzare la didattica della scienza attraverso la multimedialità e le nuove tecnologie. Esso presenta infatti una buona base per la trattazione di argomenti scientifici di interesse e complessità notevoli. Il video si è rivelato adatto a essere inserito in percorsi formativi didattici, infatti, è stato utilizzato nelle sperimentazioni condotte in scuole primarie e secondarie con circa sessanta studenti. La proiezione del video ha riscosso notevole successo presso i giovani studenti di scuola superiore che hanno partecipato alla mostra, già citata nel capitolo precedente, evento conclusivo di un progetto europeo. Particolarmente interessante potrebbe essere lo sviluppo di una versione stereoscopica di tale video. I modelli degli attrattori animati, le loro evoluzioni, assieme alle musiche, costituiscono infatti un'ottima base da cui partire per sperimentare una versione 3D di tale prodotto multimediale. Solidale a questo possibile sviluppo tecnico è anche l'idea che si vuole diffondere a un ampio pubblico e che costituisce, in un certo senso anche lo scopo di tale lavoro: l'idea cioè che la scienza possa coinvolgere, avvolgere, meravigliare, incuriosire chiunque, invogliando così anche approfondimenti e studi.

6.2 Un sito internet dedicato al caos

Molti studi sottolineano come le tecnologie dell'informazione e della comunicazione si possano considerare, sotto particolari condizioni, amplificatori cognitivi e diventare mezzi attraverso cui sostenere nuovi approcci ai processi

educativi. In questa sezione viene presentato un lavoro dedicato alla comunicazione di contenuti scientifici attraverso un sito web. Materiali a contenuto educativo sono veicolati attraverso tecnologie multimediali, ambienti virtuali, immagini, video, suoni e musica (Bertacchini *et al.*, 2010). Di seguito è riportata sinteticamente la descrizione dei contenuti del sito e alcuni risultati qualitativi della sperimentazione svolta con gli studenti delle scuole superiori.

6.2.1 Edutainment web site

Oggi il web è una parte molto importante della nostra vita, del nostro tempo libero e della nostra cultura nel suo complesso. Mentre in passato molte attività piacevoli erano organizzate, per esempio, con giochi all'aperto, attualmente Internet, videogiochi e, in generale, tutti gli strumenti d'informazione svolgono un ruolo cruciale nell'educazione. I media supportati dalle più moderne tecnologie sono in grado di raggiungere un numero elevato di persone con modi e tempi di comunicazione totalmente differenti da quelli attuati poco tempo fa. Proprio in seguito ai nuovi sviluppi tecnologici, la comunicazione ha infatti mutato radicalmente la sua stessa natura, i tempi e i luoghi. Le nuove generazioni, in particolare, vengono a essere investite più di chiunque altro di questo profondo mutamento. Così, se per esempio non molti anni fa la maggior parte degli studenti svolgeva ricerche e approfondimenti sui temi più diversi attraverso i tomi enciclopedici, attualmente è costume diffuso che le ricerche vengano effettuate online, dal momento che le stesse enciclopedie è possibile facilmente reperirle sul web, in formato digitale. Internet sembra proprio essere diventato il migliore amico dei giovani (Gross, 2004). Attualmente, i vari mezzi di comunicazione sono utilizzati non solo per il tempo libero, ma anche per studiare. Bambini e adolescenti hanno integrato la cultura digitale nella loro vita e un numero sempre maggiore di utenti dedica un tempo considerevole all'uso di Internet per le motivazioni più varie: social network, videogiochi, download di musica e applicativi per cellulari, visione delle web tv, motivi di studio. I media stanno cambiando la natura dell'infanzia e dell'adolescenza e per un adolescente l'uso dei mezzi elettronici risulta semplice come azionare un tostapane, un forno o accendere la TV. Montgomery descrive lo scenario definendo quella odierna come la generazione digitale, che viene interpretata spesso in modi contraddittori descrivendo i giovani come: pionieri, vittime innocenti, creatori attivi di cultura digitale o obiettivi passivi del marketing (Montgomery, 2009). Il web, creato per la condivisione della ricerca internazionale, per facilitare la movimentazione in tempo reale di dati, informazioni, scoperte che gli studiosi di tutto il mondo possono condividere, vive un ciclo incessante di sviluppo ed evoluzione. Nell'enorme mercato che gravita intorno internet, numerosi sono i tentativi di creazione di prodotti culturali che siano in grado di perseguire obiettivi

educativi e favorire la creatività umana. Da qui è nata l'idea di utilizzare internet per veicolare contenuti scientifici, realizzando un ponte di collegamento tra la scienza, l'educazione e le nuove tecnologie. Questo potente media può essere proficuamente utilizzato per supportare i processi educativi. In particolare, la ricerca condotta tenta d'indagare come sia possibile sviluppare metodi innovativi di apprendimento sul web e coniugare efficacemente scopi educativi e intrattenimento. Su questa idea si è assistito, soprattutto negli ultimi anni, alla proliferazione di siti dedicati all'e-learning, basati sull'apprendimento collaborativo, e così via; in nessun caso, però, l'offerta formativa sembra riguardare settori scientifici specialistici. Una ricerca focalizzata su argomenti scientifici, come la teoria del caos e della complessità, risulta singolare e innovativa nello scenario attuale di offerta. Pochi sono infatti gli esempi in questo ambito reperibili online: quello del Hungary National Academy of Sciences di Budapest e del Nonlinear Electronics lab dell'Università della California di Berkeley. La strutturazione dei contenuti del sito web e la loro organizzazione sono state realizzate in tre fasi (Wimmer *et. al.*, 2006). Il primo passo è stato quello di analizzare la natura del sistema di comunicazione. La seconda fase è consistita nello sviluppo della piattaforma. In questa fase, sono state considerate le informazioni sui potenziali utenti e i compiti che avrebbero potuto realizzare attraverso la fruizione di essa. La terza fase ha riguardato lo sviluppo di sistemi d'indagine per comprendere le reazioni psicologiche prodotte, sono state sviluppate, infatti, serie di domande che potessero indagare su quanto tempo veniva trascorso dagli utenti sul sito; cosa gli utenti si aspettano di sentire o vedere; eventuali effetti negativi nell'utilizzo del media; come potesse essere combinato con altri media per aumentare il suo potenziale. Lo scopo principale era di rendere fruibili concetti scientifici molto avanzati, attraverso lo sviluppo di un ambiente capace di guidare l'utente in un percorso conoscitivo. La verifica della efficacia formativa è stata invece affidata allo sviluppo di una sezione creativa, di scambio e condivisione di contenuti basata su tecnologia wiki. Argomenti come quelli scelti sembrano essere molto adatti per essere presentati in maniera del tutto innovativa sul piano didattico. In questo modo si vuole che l'apprendimento diventi piacevole e divertente e susciti nei giovani motivazione a intraprendere studi scientifici. Il sito è composto da sette sezioni che saranno brevemente presentate nei paragrafi seguenti.

6.2.2 Alcuni aspetti tecnici: interfaccia e tecnologie impiegate

La creazione delle pagine del sito è stata preceduta dalla redazione dei contenuti da inserire e realizzata tecnicamente da tre studenti stagisti, due dei quali provenienti dal Indian Institute of Technology di New Delhi. I passi compiuti per organizzare e realizzare il sito web sono stati i seguenti:

- individuazione dei materiali divulgativi e multimediali da introdurre

- creazione di un archivio
- suddivisione degli stessi in moduli
- bozze delle varie pagine del sito attraverso schizzi
- scelta delle soluzioni tecnologiche per realizzarle
- realizzazione tecnica delle varie pagine

Per quanto riguarda i primi due punti si è realizzato un archivio di file immagini, video, modelli tridimensionali, musiche e testi. Gli schizzi realizzati a mano hanno consentito lo sviluppo e l'ottimizzazione del layout attraverso cui organizzare i contenuti, naturalmente per lo sviluppo delle interfacce ci si è riferiti ai principi fondamentali relativi alle interfacce multimodali e agli aspetti psicologici fondamentali nell'interazione uomo-computer (Bilotta, 1996).

6.2.3 Sezioni e contenuti

In questa sezione sono presentati sinteticamente il sito e le varie pagine che lo compongono. La pagina introduttiva mostra diversi attrattori animati prima attraverso una composizione, successivamente attraverso un'animazione video di: un modello tridimensionale di attrattore, la prima strada al caos, e, infine, le suggestioni artistiche di traiettorie caotiche che diventano fiori, o strutture di un mondo immaginario, Fig. 6.26. Le animazioni di tali sequenze sono state ideate in maniera tale che l'utente si trovi di fronte a immagini diverse per ogni scelta effettuata.



Fig. 6.26 Pagine introduttive al sito

La home page presenta un menu in cui sono collegate tutte le sezioni del sito presentate attraverso icone contenute all'interno di un cerchio. L'utente cliccando sulle varie aree, ottiene un ingrandimento dell'immagine l'apertura di una finestra che esplicita i contenuti del sito. L'interfaccia intuitiva e accattivante, per la grafica e le animazioni, è stata realizzata utilizzando le funzionalità di trasformazione e di animazione di Adobe Flash Player, Fig. 6.27.



Fig. 6.27 Home page

Lo scopo del sito non è solo quello di creare una collezione di informazioni sulla teoria del caos, ma anche illustrare le attività educative che attraverso l'uso di varie tecnologie è possibile realizzare. Quindi l'idea di base non è solo la costituzione di un archivio d'informazioni sul circuito di Chua, quanto piuttosto la condivisione di un argomento interessante come la teoria del caos e spunti per l'innovazione didattica delle scienze. I contenuti del sito sono stati concettualmente suddivisi in due macro sezioni: la prima sezione composta da tre sotto sezioni, è dedicata alla didattica e presenta i concetti fondamentali sulla Teoria del Caos e la costruzione del circuito caotico di Chua, attività descritte nel capitolo quinto della presente trattazione (Bilotta et al., 2010); la seconda sezione, che comprende quattro sotto sezioni, è dedicata alle creazioni derivanti dai sistemi caotici: immagini, modelli tridimensionali di attrattori, ambienti multimediali, creazioni musicali. Di seguito sono presentati i contenuti e le funzionalità di tutte le interfacce di tutte le sette diverse sezioni del sito. La prima sezione presenta, da un punto di vista teorico, i concetti di Caos e il circuito di Chua, Fig. 6.28.

Chaos Theory and Chua's Circuit

In Chaos Theory, we consider non-linear dynamical systems that evolve in a seemingly random fashion from initial conditions, even though their behavior is deterministic and well structured. Unlike random series, these systems always evolve in the same way for a given set of initial conditions and parameters values. This is, of course, impossible to witness in real world settings because we cannot have full knowledge of the system state, but it is theoretically possible in digital simulations. Thus, chaotic systems can be simulated repeatedly to obtain the same complex data series, leading well to use as control patterns. Chaotic systems exhibit both a complex behavior and stable structure in a well defined region of space known as an attractor. The complexity of the behavior is an opposition with the stability of the system. Geometrically, this can be a point, a circular orbit such as a limit cycle, or even a fractal-structured shape called a strange attractor.

Chua's oscillator is a canonical system for research in chaos, since it can be realized in a reduced setting as a simple electronic circuit. The system has three degrees of freedom, and is essential to show state equations whose resolution corresponds to the resolution of algebraic lines. However, we use a dimensionless model to simulate it, with six parameters. Every set of parameters in the dimensionless model corresponds to some other set of parameters for the physical model. Changing the set of the control parameters, the system can either converge to a fixed point, show a limit cycle, or result in a strange attractor. Some sets of control parameters are, however, physically impossible, as the system is unstable and the numeric simulation diverges to infinity. As the control parameters and the initial values change, the dimensionless equations produce a large variety of strange attractors of different shapes and size. The figure shows a graphical rendering of the double scroll attractor.

Building Chua's Circuit: Components

- 1 x breadboard
- 1 x potentiometer (R)
- 1 x 10k resistor (10k, Mark. 10000) (R)
- 1 x 150 resistor (150, Mark. 15000) (R)
- 1 x 1H inductor (L)
- 1 x 0.01 capacitor (0.01, Mark. 10000) (C)
- 1 x 100nF capacitor (C)

Chua's circuit is a non linear dynamic circuit that has assumed a paradigmatic role in mathematical, physical and experimental demonstrations of chaos. Even today, complexity and chaos are seen as challenging topics reserved for specialists. Is it possible for young people in junior and senior high school to acquire concepts as difficult as chaos? To investigate this issue, we developed a four step teaching or learning method in which two groups of students (one from junior and one from senior high school) manually built Chua's circuit and use it as a source of extraordinary images and music.

Movie 'Chaos at School'
Students of a primary school built
Chua's Circuit.
April-May 2008
Vibo Valentia, Italy

Fig. 6.28 Pagina dedicata alla costruzione del circuito di Chua

La breve introduzione teorica ai fenomeni caotici è seguita da una pagina dedicata alla didattica denominata "Costruire il Circuito di Chua". In questa parte è presentato un metodo che consente la costruzione "passo a passo" del circuito (Bilotta&Pantano, 2008). L'interfaccia, Fig. 6.28, contiene sulla sinistra le tavole per la costruzione del circuito sotto forma di slide show: l'utente può qui visualizzare i componenti e i passi necessari alla costruzione. Sulla destra dello schermo vi è un breve video che mostra diversi studenti impegnati nella costruzione del circuito di Chua, tale video fa riferimento all'esperimento realizzato presso la scuola media, trattato nel capitolo quinto e ripreso nel settimo.

I contenuti del sito in questa sezione rimarkano come la costruzione fisica del circuito possa favorire la crescita di un'intelligenza pratica e stimolare la dimensione produttiva. Da questo punto di vista, come già considerato, la conoscenza è il risultato di un'organizzazione attiva di varie metodologie di apprendimento che comprendono anche quelle multimediali. In particolare, gli ambienti informatici potrebbero facilitare un processo d'apprendimento attivo e significativo dei concetti, ecco perché si è pensato di utilizzare un sito internet per la divulgazione di tali argomenti scientifici. La seconda sezione mostra la "Galleria degli attrattori Chua" che presenta immagini 2D e modelli 3D di una vasta gamma di attrattori derivanti dalla visualizzazione scientifica, Fig. 6.29. L'interfaccia relativa ai modelli bidimensionali, mostra le immagini animate da un movimento rotatorio, ciascuna è relativa a una specifica categoria di attrattori: quelli del circuito fisico, delle equazioni adimensionali, iperboliche, ecc. Grazie all'uso del visualizzatore 3D, Cortona3D Viewer, gli utenti possono manipolare gli attrattori, presenti in archivio come file .vrml, e, ruotandoli o realizzando ingrandimenti e altro, osservare le forme da diversi punti di vista.

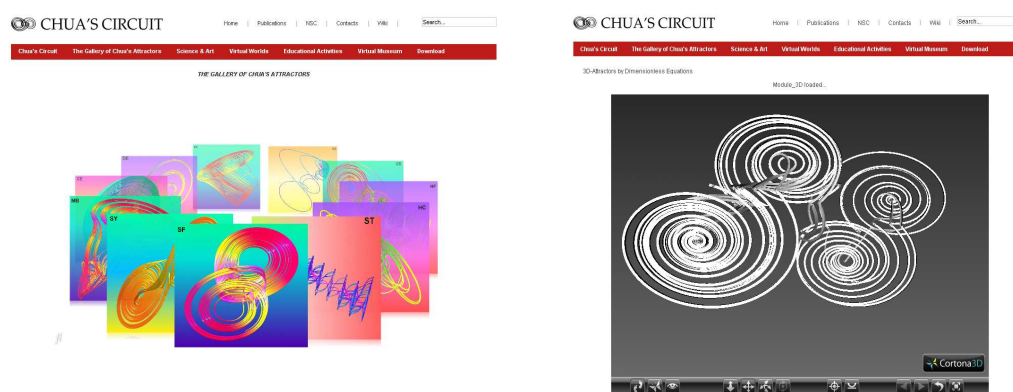


Fig. 6.29 Pagine dedicate alla Galleria degli Attrattori di Chua

La terza e la quarta sezione del sito presentano una serie di impieghi artistici dei modelli degli attrattori di Chua, ciascuna creazione è accompagnata da un breve filmato, in particolare, la quarta sezione denominata "Virtual Worlds" contiene video

sui mondi artificiali creati dal caos. La quinta sezione è dedicata alla musica prodotta a partire dai sistemi caotici. L'interfaccia propone un breve filmato tratto dal video descritto nei paragrafi precedenti. Una vasta gamma di musiche sono inserite per l'ascolto, inoltre è mostrato l'uso degli strumenti MIDI e le architetture create in Pure Data, per consentire agli utenti di produrre autonomamente suoni e musiche dal caos. La sesta sezione presenta le attività didattiche realizzate nelle scuole, i contenuti delle pagine saranno approfonditi di seguito. In questa sezione è contenuta anche una pagina dedicata ad "Arte e Scienza", Fig. 6.30.

La settima e ultima sezione presenta il "Museo Virtuale sul caos", che introduce l'applicazione 3D navigabile, liberamente scaricabile dal sito, sotto forma di video e foto, che mostrano gli utenti impegnati nell'esplorazione dell'ampio museo in cui sono contenuti più di mille attrattori, una sintetica didascalia introduce il visitatore nei contenuti della pagina.

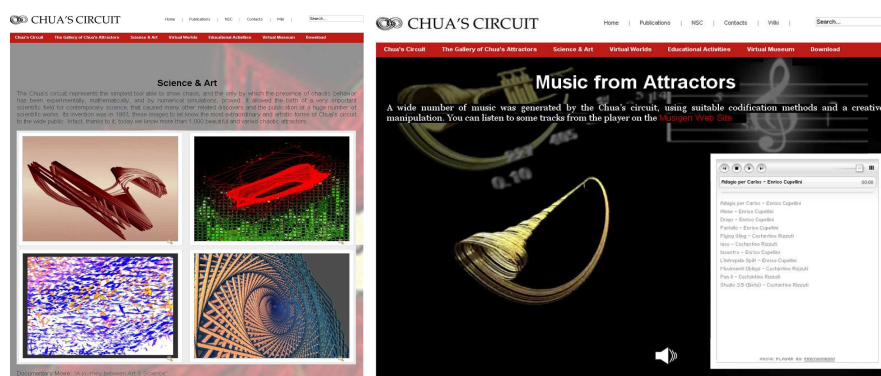


Fig. 6.30 Pagine dedicate alle creazioni artistiche dal caos

Sono state, infine, predisposte due funzioni per consentire il download di applicazioni, di software, di documenti, di musiche e un'altra che utilizza un sistema wiki per lo scambio e la condivisione tra gli utenti delle produzioni artistiche che dal caos possono prendere vita.

6.2.4 Attività educative

Nella sezione dedicata alle attività educative viene presentata la metodologia didattica utilizzata durante le sperimentazioni già realizzate in scuole primarie e secondarie. E' descritta l'organizzazione in quattro passi del metodo, attraverso l'illustrazione dei materiali didattici e dei test. Sono mostrati inoltre i percorsi didattici dei laboratori allestiti durante le mostre espositive, Fig. 6.31. Infine, per consolidare il tentativo di coniugare sul web sia contenuti educativi che

d'intrattenimento alle pagine dedicate alle attività educative sono collegate quelle contenenti ambienti virtuali ispirati al caos, fruibili attraverso video.

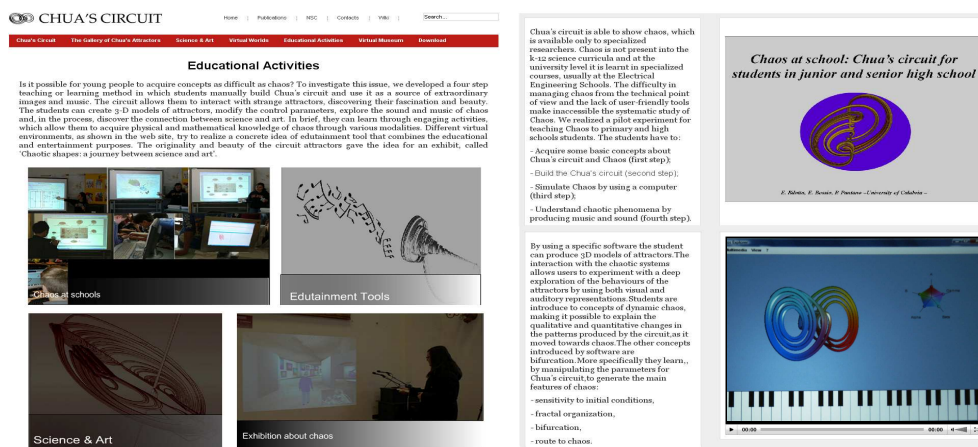


Fig. 6.31 Pagine dedicate alle attività educative

Le molte realizzazioni artistiche generate a partire dagli attrattori caotici sono presentate nella pagina "Arte e Scienza". In queste pagine sono presentate le serie di immagini, quadri e altri artefatti digitali realizzati a partire dal circuito di Chua; un link introduce infine alla possibilità di visualizzare il video, presentato in precedenza, divulgativo sulla teoria del caos e il circuito di Chua. Un'ulteriore pagina è inoltre dedicata a un breve addestramento sull'uso dell'applicazione java "Chaos Explorer" che è possibile acquisire liberamente dallo stesso sito e che consente la manipolazione e modifica degli attrattori caotici e la creazione di molti altri corredati anche delle rispettive melodie che ciascun modello è in grado di generare.

6.2.5 Conclusioni e sviluppi futuri

In questi paragrafi sono stati brevemente illustrati i contenuti di un sito web realizzato per l'apprendimento dei concetti fondamentali sulla teoria del caos e rivolto a un vasto pubblico. La comunicazione di argomenti scientifici attraverso il web può consolidare un modello alternativo dei processi di apprendimento. Ciascuno può essere in ogni luogo e in qualsiasi momento coinvolto emotivamente, interessato per i contenuti, incuriosito per la rarità degli argomenti trattati. Inoltre, l'utente può sviluppare la loro conoscenza e creatività e, attraverso gli strumenti messi a disposizione in maniera libera, creare egli stesso gli strumenti per verificare, giocare, creare, intrattenersi con il caos. Le pagine illustrano, attraverso interfacce accattivanti che sfruttano le tecnologie più recenti, attività coinvolgenti e contenuti esplicativi, inoltre, permettono di acquisire conoscenze basilari sulla fisica e la matematica dei sistemi dinamici. Un'altra consistente parte del sito permette

l'esplorazione e la manipolazione degli attrattori di Chua, e la trasformazione di questi in suoni e musica. Le attività hands-on sono in grado di fornire un approccio nuovo, creativo e divertente all'apprendimento della scienza. Le arti visive, la musica sono potenti strumenti per comunicare concetti scientifici, uniti a questi, vi è una parte sperimentale che favorisce l'esplorazione del caos attraverso la costruzione, la visualizzazione del comportamento caotico. Questo può incoraggiare gli studenti a pensare in maniera critica, a formulare ipotesi e fare nascere il desiderio di verificare personalmente, attraverso la costruzione del circuito il comportamento caotico. I molti contenuti multimediali sono presentati attraverso filmati, musiche, immagini il tutto è proposto in un ambiente educativo non convenzionale in cui arte e scienza s'incontrano per promuovere un efficace strumento di edutainment.

6.3 Teatro e Scienza

Un numero sempre maggiore di studi psicologici, educativi e scientifici è focalizzato sulla realizzazione di forme innovative per la comunicazione della scienza. Alcune metodologie, si è già accennato, combinano con successo l'uso di nuove tecnologie nei processi di apprendimento. Dal momento che il processo di apprendimento ha una struttura dinamica, che non segue un percorso lineare e sequenziale, si può pensare di applicare in modo efficace un approccio multidisciplinare. Considerare quindi un uso diversificato di mezzi di comunicazione tradizionali e non può essere interessante, stimolante e facilitare il processo di apprendimento delle scoperte scientifiche. In particolare, con questa ricerca (Bertacchini et al., 2011b) si è voluto testare l'utilizzo di strumenti classici, come la drammatizzazione teatrale, e multimediali per unire intrattenimento e contenuti scientifici. La divulgazione riguarda sempre i temi relativi alla teoria del caos, e in particolare la genesi del circuito di Chua. Partendo da un copione redatto in precedenza, che presenta, in un rincorrersi di storia e incontri fantastici, alcuni dei pionieri sugli studi sul Caos da Georg Cantor, a Henri Poincaré, a Edward Lorenz e, a Gaston Julia, insieme a Leon Chua e i suoi collaboratori, si è voluta testare l'efficacia di vari media. Scienza e teatro sono due attività umane con storia e caratteristiche diverse, nonostante ciò, soprattutto recentemente, hanno evidenziato la possibilità di una collaborazione sinergica e di molte possibilità d'interazione. Gli ambienti virtuali consentono la rappresentazione di scene in modo fedele e alcuni elementi reali possono rendere affascinanti i vari argomenti, favorendo una fruizione attiva da parte dell'utente. In generale, gli elementi visivi rappresentano in maniera profonda le speculazioni scientifiche. A livello storico, questo concetto ha radici profonde e antiche, per esempio, nel Sidereus Nuncius di Galileo Galilei nel 1610, le montagne e i crateri Lunari o i satelliti di Giove diventano quasi visibili attraverso le sole descrizioni. Ma non c'è dubbio su come l'uso della tecnologia abbia portato in questo

senso una vera e propria rivoluzione non solo sul flusso di informazioni ma anche e soprattutto nei modi di comunicare le ricerche scientifiche. Le tecniche di visualizzazione unite alla grafica 3D possono diventare molto efficaci nella comunicazione di principi e concetti della fisica, dell'astronomia, ecc. Senza contare le possibilità di combinare anche le varie tecniche, utilizzandole in maniera opportuna: simulazioni, effetti speciali, animazioni. La trasmissione delle conoscenze scientifiche e la formazione può avvenire in tal modo curando sia gli aspetti pedagogici che psicologici. Il teatro rappresenta uno strumento didattico di straordinaria efficacia che unisce educazione e intrattenimento. Un esempio di teatro come punto d'incontro tra letteratura e scienza è dato da B. Brecht, in *Vita di Galileo* (Brecht, 2005). E ancora, alcune tra le dispute scientifiche più interessanti: quelle di Galileo sul moto della terra, la deriva dei continenti di Wegener, il dibattito sull'origine del calcolo tra Newton e Leibniz, possono essere considerati veri e propri copioni teatrali (Hellman, 1999). Il teatro si è dimostrato essere un luogo in cui è possibile pensare alle scoperte della scienza, un mezzo attraverso cui trasmettere le visioni del mondo, gli sforzi della ricerca con successi e fallimenti, scoperte e invenzioni fondamentali. Tra scienza e teatro, vi è quindi un'elevata affinità e vari sono stati i tentativi di porre la scienza al centro delle rappresentazioni teatrali perché potesse mostrarsi divertente e comprensibile. Di seguito si prenderanno in considerazione tre esperienze legate alle differenti forme comunicative e si presenteranno i punti di forza o debolezza per ciascun approccio.

6.3.1 L'esperienza di una rappresentazione teatrale

Il teatro ha da sempre rappresentato una forma di comunicazione privilegiata per la possibilità d'instaurare un rapporto diretto e immediato fra ciò che è in scena e gli spettatori. Il rapporto che si instaura tra attori e spettatori ha carattere quasi intimo, la reazione e i sentimenti sono infatti immediatamente tangibili. In particolare, l'uso della narrazione nella comunicazione scientifica, offre la possibilità semplificare argomenti e concetti anche complessi. Così la prospettiva di comprendere la scienza in modo divertente e semplice, in un'esperienza che sostiene l'innovazione nella comunicazione scientifica sembra essere un interessante terreno di ricerca. Per realizzare questa esperienza ci si è avvicinati gradualmente all'interpretazione delle tematiche scientifiche proposte: innanzi tutto, introducendo agli attori le scoperte scientifiche oggetto della pièce teatrale, analizzando il copione e permettendo che ciascuno comprendesse il senso di ciò che si accingeva a fare. Il fatto che si sia recitato in lingua inglese ha costituito un'articolazione ulteriore di prove, tentativi e sforzi per migliorare l'interpretazione. Inoltre, si sono realizzate le riprese anche di più personaggi contemporaneamente sulla scena e ciò ha comportato un lavoro di sincronizzazione e armonizzazione delle interpretazioni. Si è allestito un ambiente

idoneo per le riprese, creando uno sfondo neutro attraverso un telo verde, e si è proceduto a realizzare più inquadrature della scena, realizzando, in conclusione, il montaggio video, Fig. 6.32.



Fig. 6.32 Alcune fasi delle riprese

Si è realizzato, infine, il tentativo di manipolare le immagini delle riprese attraverso la tecnica del chroma-key, per poterle facilmente mescolate con elementi virtuali. La valutazione di quanto realizzato, seppur a livello qualitativo non ha favorito l'ulteriore sviluppo della sperimentazione. Questo per duplici motivi: l'impossibilità di mantenere standard qualitativi alti nelle riprese e l'impossibilità di integrare concetti e trattazioni scientifiche con supporti multimediali.

6.3.2 Maschere parlanti

In questa trattazione, è presentato sinteticamente un ulteriore tentativo di rappresentare la scena teatrale attraverso le maschere parlanti del teatro virtuale, anche questa esperienza è stata realizzata in occasione di un tutoraggio relativo a un lavoro di tesi. Il programma Virtual Theatre consente la modellazione di volti tridimensionali e l'attribuzione di un parlato, di un'espressione facciale e, infine, l'inserimento di più personaggi in una stessa scena. I volti possono essere modificati, attraverso la manipolazione della griglia di poligoni che soggiace al modello, nelle espressioni e seguire le gestualità esatte per una pronuncia più verosimile possibile, l'attribuzione delle texture consentono, inoltre, un ulteriore perfezionamento del modello. La texture è stata ricavata da foto reali opportunamente modificate in modo da far combaciare i vertici della maschera e i punti delle foto. I modelli creati in Face3DEditor sono stati introdotti in Face3DRecorder al fine di sincronizzare le espressioni facciali con un file audio precedentemente registrato, in tal modo si è proceduto nella creazione delle facce virtuali parlanti. Attraverso il menù Gestione d'espressione si sono abbinati l'audio e le espressioni facciali, Fig. 6.33.

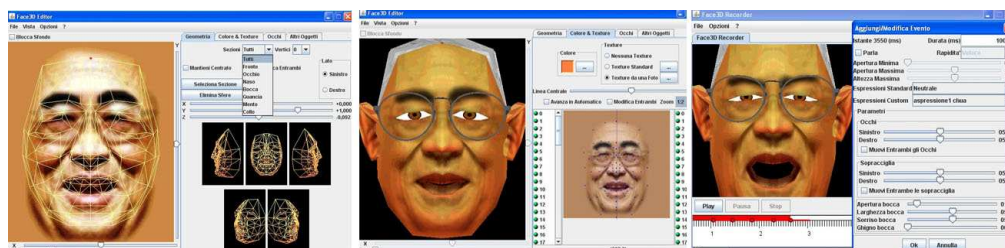


Fig. 6.33 Steps per la realizzazione del teatro virtuale

Ulteriore passo è stato l'utilizzo dell'applicativo Face3DRecorder che consente la registrazione video e audio della maschera parlante; per ciascuna battuta si è proceduto appunto nella relativa registrazione. L'esperimento è stato condotto solo sulla ottava scena del copione e ha avuto la sua conclusione con l'inserimento dei tre personaggi, il prof. Chua e due suoi collaboratori, nel software "Virtual Theatre", con cui è stata realizzata la scena virtuale dell'incontro fra i tre personaggi. Anche in questo caso si è proceduto a un'analisi qualitativa dell'efficacia di tale metodo. Purtroppo i risultati ottenuti non hanno incoraggiato l'esperimento poiché troppi sono i punti a sfavore e pochi quelli positivi: fra tutti, la monotonia che tutta la rappresentazione avrebbe con effetti non stimolanti sul pubblico.

6.3.3 Sceneggiatura in ambienti 3D

Un ulteriore media, per mettere in scena sempre lo stesso copione, è stato realizzato attraverso la creazione di un video completamente tridimensionale, di cui si è curata, in particolare, la sceneggiatura. L'idea principale è quella di coniugare la divulgazione di argomenti scientifici, con tecniche di modellazione 3D, e forme di comunicazione come quella della narrazione teatrale, la simulazione e l'animazione virtuale. La tecnologia 3D può innalzare l'interesse dell'utente e la comprensione dei contenuti risultarne facilitata. Le ambientazioni sono state ricostruite in maniera fedele e, con l'ausilio delle più avanzate tecniche di computer grafica, presentate in maniera molto realistica. La sceneggiatura è stata dettagliata specificando la tipologia e la durata delle inquadrature dei vari personaggi, i movimenti, le viste d'insieme. Dopo vari tentativi per visualizzare il caos attraverso un circuito elettronico, il Prof. Chua si reca presso l'Università di Waseda, a Tokyo. È il 1983 e nel laboratorio del Prof. Matsumoto sta per verificarsi un evento unico nella storia delle ricerche sui sistemi complessi. L'ambientazione ha due sedi principali: Tokyo, come già detto, dove Chua è ospite del collega Prof. Matsumoto, e l'Università di Berkeley. L'intuizione di Chua è seguita da un'ampia serie di prove realizzate dal Prof. Matsumoto mediante simulazione numerica e da prove sperimentali, realizzate a Berkeley, dai ricercatori Ayrom e Zhong. Uno dei vantaggi di utilizzare tecniche 3D

per la ricostruzione delle scene consiste nel simulare e rendere visibili gli oggetti matematici di cui si tratta mano a mano: per esempio l'attrattore a farfalla di Lorenz, l'insieme di Mandelbrot, e così via. Questa cosa sarebbe molto difficile da realizzare su un palcoscenico vero e proprio, la scena virtuale consente invece il tempo reale delle simulazioni, la visualizzazione o la modifica di oggetti matematici, ecc.. In una delle scene iniziali è inserita una breve dissertazione sul caos e i sistemi complessi, i fotogrammi iniziali presentano una delle principali scoperte sul tema: l'insieme di Mandelbrot. Da questo oggetto geometrico è stato ricavato un modello tridimensionale, con un'operazione simile a una estrusione del perimetro, ne è risultata la realizzazione di un modello tridimensionale che viene esplorato, nel video, attraverso una veduta aerea, in cui sono visibili tutti i particolari della geometria frattale, quasi si trattasse di una catena montuosa, Fig. 6.34.

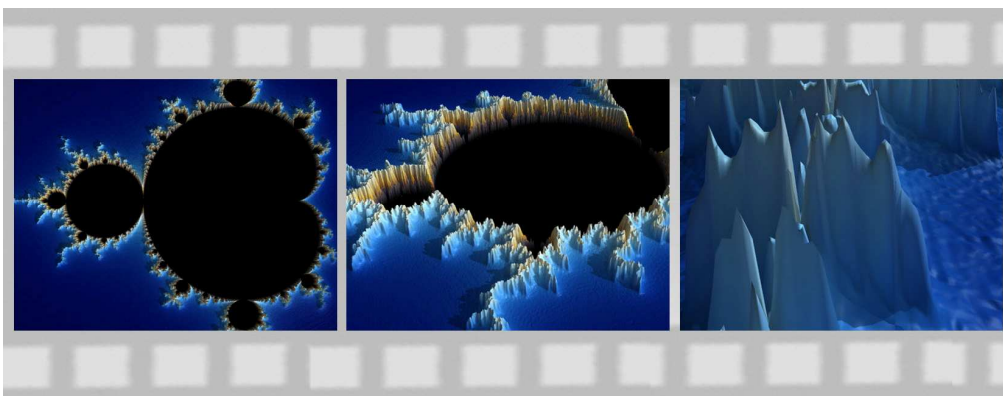


Fig. 6.34 L'insieme di Mandelbrot tridimensionale

I personaggi storici che si alternano sulla scena, fungono da "deus ex machina", rappresentando uno spaccato molto realistico del fare ricerca: la sana competizione fra colleghi, l'incoraggiamento e il plauso per le intuizioni, la collaborazione e gli spunti risolutivi, il fallimento o il successo degli esperimenti. Ciascuno è accompagnato, come su indicazione del copione, da un oggetto caratteristico ed evocativo: Lorenz da un ombrello, con la sua continua fissazione sullo scatenarsi di un uragano, Poincaré ha in mano un gioco che evoca il moto dei tre corpi, Julia circondato dai suoi inseparabili "coniglietti di Daudy", rappresentazione del famoso set da lui inventato, Cantor circondato da una nube polverosa che rappresenta, simbolicamente appunto la polvere di Cantor, Fig. 6.35.



Fig. 6.35 I protagonisti e gli oggetti evocativi

La sceneggiatura è stata progettata in maniera da sottolineare la forte differenza tra gli episodi di ricostruzione storica, che circondano la genesi del circuito di Chua, e gli scienziati pionieri negli studi sul caos che interagiscono nella scena, ricordando le loro invenzioni, fornendo suggerimenti, incoraggiando i protagonisti. La loro presenza è sottolineata sempre da contesti surreali, è il caso, per esempio, dei fotogrammi relativi al riepilogo di quanto realizzato dal Prof. Chua, ripreso di spalle, egli scrive alla lavagna, sta tentando di riassumere tutte le prove e i tentativi realizzati, penseroso si ferma a guardare fuori dalla finestra, mentre, sulla sua scrivania i personaggi di Lorenz, Cantor, Poincarè, Julia, come fossero folletti, lo incoraggiano e ragionano con lui, suggerendo, senza che lui possa ascoltarli, alcune soluzioni possibili, Fig. 6.36.



Fig. 6.36 Il Prof. Chua nel suo studio, incoraggiato dagli scienziati suoi predecessori

L'ambiente esterno è stato concepito in maniera da renderlo quanto più realistico possibile: dal ricco giardino alberato dell'università di Waseda, ai laboratori, alla città di Berkeley, Fig. 6.37.



Fig. 6.37 Dettagli di interni ed esterni della scena

Inoltre si sono voluti curare con attenzione alcuni dettagli nella sceneggiatura: dalle piccole increspature sull'acqua del laghetto dovute al cadere delle foglie, al paesaggio dell'Università di Berkeley, ai laboratori di Waseda. La rappresentazione è un raffinato mix di elementi teatrali, scientifici, storici e filosofici che si inseriscono in un contesto virtuale tridimensionale. Dal momento che il video è sia una ricostruzione di eventi storici, ma anche una finestra sui contenuti scientifici, può rilevarsi un mezzo attraente e facile per condurre gli studenti verso la conoscenza di tale argomento scientifico. La modellazione, la definizione dei materiali, l'attribuzione di texture, dell'illuminazione e, infine, la realizzazione delle animazioni è stata curata da un professionista specializzato in questo settore. Ciò che si è cercato di realizzare è un media sicuramente inedito che potesse aiutare e stimolare, soprattutto in ambienti scolastici, i giovani all'approfondimento delle tematiche scientifiche sul caos e il circuito di Chua.

6.3.4 Conclusioni e sviluppi futuri

Questa sintetica trattazione descrive alcune esperienze, supportate dall'uso di tre differenti media, per rappresentare, a partire da un copione già redatto in precedenza, uno degli eventi più importanti negli studi sui sistemi caotici: la genesi del circuito di Chua. Il media più efficace è risultato essere, da analisi qualitative, un ambiente interamente virtuale che ha consentito la messa in scena di contenuti scientifici relativi agli studi, le invenzioni e le scoperte sulla teoria del caos e della complessità. Realizzare un'opera teatrale per la comunicazione di temi scientifici coniuga bene, alla luce di decenni di applicazioni in questa direzione, sia l'aspetto educativo sia quello di puro intrattenimento. Tuttavia da un'analisi epistemologica emerge come sia più efficace divulgare la scienza attraverso l'uso delle sue stesse immagini, grazie alle quali la percezione dell'utente dei processi scientifici, la comprensione dei concetti e delle informazioni storiche assumono un'efficacia maggiore. Per tale motivo la realizzazione di una scena virtuale tridimensionale in cui siano visualizzati non solo i protagonisti della sceneggiatura, ma anche immagini caratteristiche divenute icone nella comunicazione di determinati argomenti scientifici come, a esempio, gli attrattori strani, accompagnate da opportune sintetiche spiegazioni, sembra essere la scelta da privilegiare sia rispetto alla rappresentazione tradizionale sia rispetto all'uso delle maschere parlanti. L'opera presentata si concentra sulla spiegazione di concetti e teorie e cerca di far riflettere il pubblico sull'impatto dell'invenzione tecnologica del circuito. Inoltre, fornisce l'immagine del fare scienza come un'attività interamente umana, non impersonale e indipendente dal contesto storico, fatta di sfide, contrasti, insuccessi, gratificazioni. Le nuove tecnologie della modellazione e della computer grafica, unite a contenuti scientifici di notevole impatto, sono state utilizzate per realizzare un media espressivo e adatto a un'applicazione educativa. L'approfondimento della scienza viene proposto attraverso mezzi nuovi, vicini alla cultura dei giovani, lo scopo non è di un approfondimento immediato dei temi scientifici, ma piuttosto quello di suscitare curiosità, discussione e voglia di ricerca. Un'estensione di tale lavoro può essere quella di sperimentare tale prodotto nelle scuole collocandolo all'interno di un contenitore più ampio in grado di restituire ai giovani l'immagine accattivante e sorprendente della scienza, in un approccio che coniuga educazione e divertimento.

CAPITOLO 7. PRODOTTI CULTURALI TRA DIDATTICA E STRATEGIE DI MARKETING

*"Nessuna cosa giunge alla mente
senza prima essere stata nei sensi."*

George Berkeley

Per costruire una comunicazione di successo oltre a stabilire il contenuto da trasmettere occorre avere intuizioni creative su come veicolarlo. La creazione di modelli comunicativi didattici, pur rispondendo a precisi canoni tradizionali, può, soprattutto alla luce delle nuove tecnologie di cui si dispone oggi, seguire le stesse linee guida di un qualsiasi processo creativo di produzione di idee. La raccolta e l'elaborazione delle informazioni sono seguite da un periodo di riflessione e, successivamente, di creazione. I prodotti culturali potrebbero essere così sviluppati adattando e seguendo le necessità pratiche degli obiettivi che si vuole raggiungere. La progettazione di un prodotto multimediale culturale, che includa sia voci, che musiche e immagini si realizza grazie alla cooperazione creativa tra la componente testuale e quella visiva. La cultura e, in particolare, la comunicazione della scienza può essere concepita come un sistema che, attraverso l'elaborazione di prodotti multimediali, è in grado di sintetizzare: testi, effetti visivi e grafici, modellazioni, simulazioni, ecc. La creazione dei testi richiede l'adesione a precisi requisiti, a seconda che si tratti, come si è visto, di documentari piuttosto che di pubblicità o altro. Anche la creazione di immagini segue delle fasi fondamentali: quella di ideazione e progettazione, quella di strumentazione e produzione e, infine, quella di fruizione e monitoraggio. La prima, tramite la trasposizione dalla rappresentazione mentale degli oggetti alle loro raffigurazioni, ha l'obiettivo di esprimere specifiche intenzioni comunicative. La seconda fase riguarda la scelta delle tecniche specifiche e dei mezzi più appropriati per realizzare il prodotto sulla base del progetto. Nella terza fase, l'ideatore cerca di verificare se l'immagine creata risponde ai vincoli percettivi che orientano il processo di decodifica, ma, in ogni caso, il fruitore ha la possibilità di interpretare l'immagine. Lo scambio tra intenzione comunicativa e interpretazione è continuo, quindi anche il destinatario finale del prodotto multimediale partecipa attivamente all'interpretazione dell'artefatto. Quindi, non conta solo la complessità e l'articolazione dell'immagine, ma anche l'intenzione esplorativa e le caratteristiche personali di chi la osserva: le capacità percettive nel campo visivo e quelle cognitive l'interpretazione dei contenuti veicolati. L'obiettivo è la facilitazione della comprensione, però non sempre ciò si verifica e la decodifica o la comprensione non avvengono nella direzione prevista o pianificata dall'ideatore del media. Si è detto che un ruolo importante è rivestito non solo dalla comunicazione per immagini, ma anche da quella testuale. La comunicazione ha, infatti, come principale funzione

quella di elaborare, organizzare e trasmettere conoscenze. La struttura del testo, quindi, l'ordine con cui si susseguono le parole, l'uso della punteggiatura, di figure retoriche, l'espressione del testo, l'uso dei caratteri, concorrono a costruire il significato di una frase. La creazione di un efficace artefatto multimediale implica la valutazione di tutti questi fattori perché si possa realizzare la comprensione della scena globale. Per esempio, in un messaggio pubblicitario la diversa posizione assunta da parole e immagini influisce sulle modalità di lettura e interpretazione finale. Queste non dipendono quindi solo dai contenuti, ma anche dalla struttura che attribuisce loro un ordine. E', quindi, la struttura a determinare la lettura finale; molto spesso, infatti, pur seguendo strutture uguali, con testi e immagini differenti, si possono avere notevoli variazioni del messaggio. Sia i registri iconici che testuali sono costituiti da segni che vanno a comporre il senso complessivo del messaggio che si veicola. A volte l'immagine è più eloquente del testo che, ridotto a poche parole, commenta l'immagine efficacemente canalizzando l'interpretazione. In un certo senso, si può viaggiare da un estremo a un altro, affidando il messaggio totalmente o prevalentemente all'immagine, oppure, nel caso opposto, utilizzando principalmente la parola fino ai casi estremi, in cui l'immagine non compare affatto. Nel primo caso a essere coinvolti sono soprattutto i sensi, nel secondo si richiamano le capacità interpretative. Anche in ambito culturale possono applicarsi principi e concetti più propriamente legati al marketing. Questo può accadere perché anche un insegnante può cogliere nella propria classe un'esigenza, una curiosità, un bisogno di approfondimento e, proprio come accade nel marketing per i creativi, costruire, inventare, creare ambienti e spazi che possano esprimere contenuti e appagare gli stimoli degli studenti. Bloom (2004) sostiene che esistono due modi di considerare le creazioni umane, comprese quelle artistiche: in termini di corpi fisici oppure di desideri e intenzioni, ciò corrisponde in sostanza al duplice modo in cui si vede il mondo. Per poter percepire la creazione, dunque, è necessario cogliere anche le intenzioni di chi crea. A loro volta, le intenzioni rimandano agli articolati processi mentali che coinvolgono, nel caso della strutturazione di ambienti multimediali per l'apprendimento, anche gli aspetti motivazionali che è possibile suscitare nei fruitori. La creatività va orientata al raggiungimento di un risultato specifico e deve rispettare delle precise intenzioni comunicative che soprattutto consentano agli utenti di partecipare attivamente al processo di costruzione delle conoscenze.

L'espressione industria culturale, coniata da Adorno e Horkheimer, nella "Dialettica dell'Illuminismo" del 1942, fa riferimento a quanto visto fin ora: produrre materiale d'intrattenimento che abbia un contenuto culturale per un vasto pubblico. L'industria culturale, nel XX secolo, è stata profondamente influenzata soprattutto da due fattori: le nuove possibilità espressive legate allo sviluppo delle tecnologie della comunicazione e dell'informazione e l'enorme aumento della domanda di beni culturali: opere d'arte, di design e di spettacolo. La nascita e lo sviluppo dell'industria culturale è, secondo Morin (1963), principalmente legata a due invenzioni tecniche: il

cinematografo, macchina capace di registrare e riprodurre il movimento, e il telegrafo senza fili, da cui deriva la nascita delle trasmissioni radiofoniche. Sempre secondo Morin, grazie a queste invenzioni si è verificata una seconda industrializzazione, definita "industrializzazione dello spirito" che è stata accompagnata inoltre dalla "seconda colonizzazione, che concerne ormai l'anima". La produzione multimediale appare tuttavia oggi legata imprescindibilmente a una problematica molto sentita e attuale che è quella della sua semplice riproducibilità. Anche ciò che sembrava potesse essere unico e irripetibile, l'opera artistica, deve esser pensato oggi come replicabile. A tal proposito Benjamin (2000) individua nella riproducibilità tecnica dell'opera d'arte un cambiamento di prospettiva nel rapporto fra masse e arte, nonché nella stessa natura dell'oggetto artistico divenuto bene di consumo non più da esporre, ma da fruire.

7.1 Matematica e cultura

La rapidissima crescita dell'industria culturale è legata indubbiamente ai rapidi sviluppi tecnologici. Le nuove tecnologie hanno di fatto creato ambiti culturali e nuovi settori in cui si propone cultura attraverso mezzi espressivi rivoluzionari, come per esempio, tra i più significativi per rilevanza sociale ed economica: cinema, televisione, videogiochi, design, editoria libraria, fotografia. Ma la crescita sempre più rapida delle tecnologie digitali, negli ultimi anni, non solo ha fortemente influenzato lo sviluppo dell'Industria culturale quanto ha promosso forme innovative di promozione culturale. La crescita sia di domanda che di offerta è stata così rapida da affermare questo come un settore strategico per il marketing e come motore trainante dell'economia mondiale contemporanea. La crescita esponenziale delle reti telematiche, delle tecnologie digitali, assieme al rapido aumento del numero di utenti hanno, inoltre, modificato in modo rilevante le fasi di produzione dei prodotti culturali e comunicativi e i processi di distribuzione e di fruizione. In questo contesto, soprattutto negli ultimi anni, si è potuto registrare un crescente interesse allo sviluppo di applicazioni basate su conoscenze fisico matematiche. Esempi di un crescente dialogo tra la matematica, in particolare le tecniche computazionali, e l'industria culturale possono essere riscontrati sia nel campo della Computer grafica (Computer graphics), sia nel campo dell'Edutainment. Numerose ricerche esplorano le possibilità offerte dall'uso di modelli matematici per la simulazione di fenomeni naturali o per la generazione di media educativi. Le relazioni la Matematica e l'Industria Culturale hanno delineato lo sviluppo di diversi filoni, tra i quali in particolare, si possono individuare:

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

Si è visto nella trattazione precedente come un ulteriore collegamento possa essere realizzato tra questi settori allo scopo di divulgare in maniera creativa argomenti scientifici. La comunicazione della scienza può in maniera del tutto originale collegare vari ambiti culturali, generalmente percepiti come distanti e separati.

Nel seguito si presenteranno una serie di media realizzati a scopo divulgativo anche con l'intenzione di mostrare diverse strade applicative e sperimentali da percorrere nella direzione dell'integrazione e collaborazione tra i saperi.

7.2 Cultura e marketing

E' l'economista italiano Pallavicini a fornire, nel lontano 1959 una definizione di marketing, tra le più opportune e calzanti a questa dissertazione. Il marketing viene definito come quel processo sociale e manageriale diretto a soddisfare bisogni ed esigenze attraverso la creazione e lo scambio di prodotti e valori, ossia l'arte e la scienza di individuare, creare e fornire valore per soddisfare le esigenze di un mercato di riferimento, realizzando un profitto. Il marketing, per informare, motivare e servire il mercato, deve essere supportato dall'analisi, la programmazione, la realizzazione e il controllo di progetti volti all'attuazione di scambi, adeguando l'offerta di prodotti o servizi ai bisogni e alle esigenze dei mercati e all'uso efficace delle tecniche della comunicazione e della distribuzione. Riallacciandosi a quanto detto nel secondo capitolo, è possibile osservare come la maggiore spinta verso l'approfondimento delle conoscenze in ambito scientifico, possa essere indirizzata anche verso uno sviluppo di marketing per prodotti culturali. Molte proposte attualmente commercializzate sono infatti frutto ed espressione di ricerche scientifiche; così come molti prodotti, anche noti, sono portatori di contenuti scientifici e tecnologici. Uno fra tutti è l'esempio fornito dalla Lego Mindstorm, ma se ne potrebbero citare altri, indirizzati anch'essi all'innalzamento della qualità formativa e al sostegno di nuovi sviluppi tecnologici per l'educazione. L'esigenza di creare prodotti culturali multimediali, basati sulle più attuali tecnologie educative, nasce anche dall'idea di colmare alcuni vuoti di offerte legati al troppo tecnicismo delle conoscenze veicolate. Secondo una comune visione, infatti, alcuni argomenti della scienza possono essere capiti solo da un pubblico specializzato. La realizzazione dei media e delle sperimentazioni presentate mostra come ciò non risponda esattamente al vero e come l'integrazione tra metodologie didattiche innovative e ambienti virtuali per l'apprendimento possano rilevarsi molto proficue.

7.3 Prodotti realizzati

Di seguito sono presentati alcuni prodotti multimediali realizzati a partire dalle sperimentazioni descritte nei capitoli precedenti. Si tratta di veri e propri prodotti di marketing che, in alcuni casi, possono essere adatti anche alla commercializzazione.

7.3.1 Video

Le sperimentazioni didattiche sono state caratterizzate dalla raccolta di numerosi documenti sotto forma di foto, video e altro materiale multimediale. Ciò ha reso possibile la realizzazione di un video in cui sono presentati alcuni studenti impegnati nella costruzione del circuito di Chua (Bilotta et al., 2010). Questo video è stato presentato in occasione della 10th Experimental Chaos Conference, che ha avuto luogo a Catania nel Giugno 2008. Lo scopo del video è principalmente quello di documentare le sperimentazioni realizzate negli istituti scolastici, ma vuole anche avere valenza di stimolo per quanti abbiano occasione di fruirne. Vedere giovani studenti intenti nella costruzione del circuito elettronico può anche essere incentivante per quanti, con un po' di ritrosia, si accostano allo studio di temi scientifici ritenuti troppo impegnativi e complessi. Nell'immagine che segue sono riportati alcuni fotogrammi del video, Fig. 7.1.



Fig. 7.1 Studenti di Scuola Media costruiscono il circuito di Chua

Il video divulgativo, presentato nel capitolo sesto, che ha come temi il caos e il circuito di Chua, realizzato sia in lingua italiana che inglese, è un altro esempio di un prodotto multimediale per il quale è stato realizzato un lavoro di regia, sceneggiatura e montaggio, Fig. 7.2.

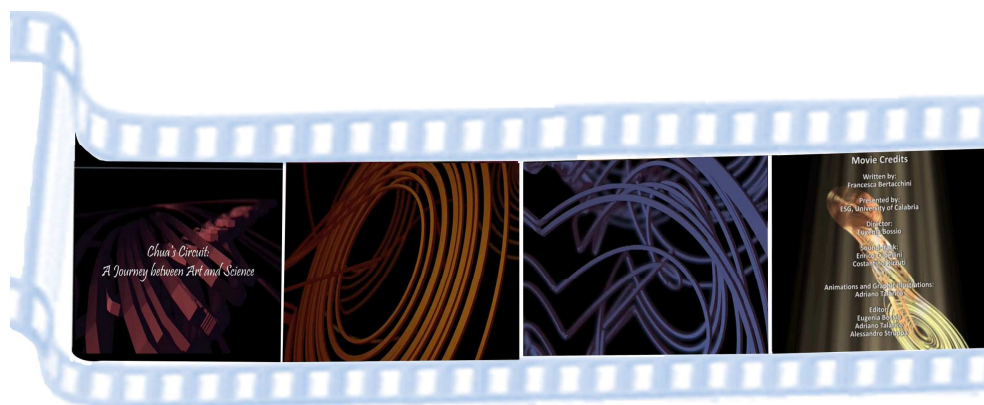


Fig. 7.2 Video divulgativo sul caos

Tale video, per la novità dei contenuti trattati e il modo con cui gli stessi vengono presentati, si presta a una possibile commercializzazione.

7.3.2 Copertine

Una delle immediate applicazioni della raccolta di materiali multimediali che documentano le sperimentazioni sono state delle copertine apparse su alcune riviste scientifiche internazionali, Fig. 7.3.

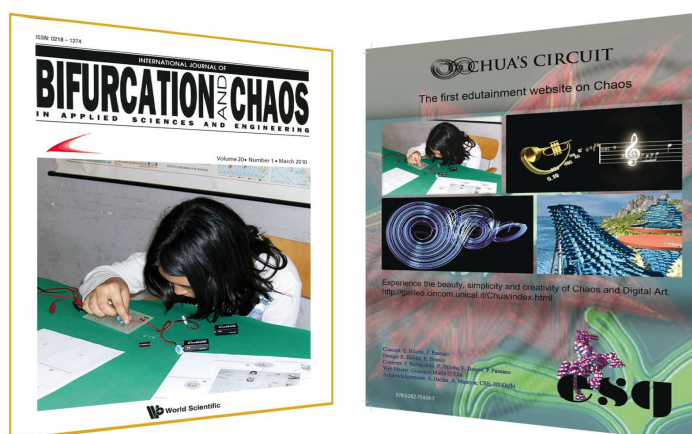


Fig. 7.3 Copertine da riviste scientifiche

Una copertina, quella riportata sulla sinistra, ritrae una studentessa impegnata nella costruzione del circuito di Chua, pubblicata sull'International Journal of Bifurcation and Chaos. L'immagine di copertina è stata tratta dal video sopra citato ed è riferita all'esperienza realizzata presso la Scuola Media A. Vespucci di Vibo Valentia nel 2008. Altra copertina realizzata, posta sulla destra della Fig. 7.3, è stata quella promozionale per il sito internet, presentato sempre nel capitolo sesto. L'immagine, pubblicata come retro di copertina nella rivista Leonardo Journal, ritrae alcuni contenuti del sito, tra questi: il video divulgativo sul caos e la documentazione delle attività sperimentali condotte nelle scuole.

7.3.3 Pubblicità

La pubblicità apparsa sul sito della rivista Leonardo Journal, MIT press, è anche ispirata anche alle attività educative condotte nelle scuole, Fig. 7.4.



Fig. 7.4 Pubblicità apparsa sul sito di Leonardo Journal

La pubblicità contiene un fotogramma tratto dal video in cui gli studenti costruiscono il circuito, l'immagine di un circuito realizzato proprio da uno degli studenti che ha partecipato alla sperimentazione, infine, l'immagine del caratteristico attrattore double scroll prodotto dal circuito di Chua.

CAPITOLO 8. CONCLUSIONI

*"La difficoltà non sta tanto nell'aver idee nuove,
quanto nel liberarsi di quelle vecchie che ramificano...
in ogni angolo della nostra mente."*

John Maynard Keynes

La presente tesi illustra il lavoro svolto nel corso del triennio di Dottorato di Ricerca volto alla strutturazione di una metodologia per la comunicazione di un argomento che da decenni interessa fortemente la comunità scientifica internazionale: il fenomeno fisico del caos. La teoria del caos e della complessità è stata utilizzata come base per proporre a studenti molto giovani, in scuole medie e superiori, un processo originale di costruzione della conoscenza in ambito scientifico. Per realizzare ciò sono stati ideati, progettati e realizzati una serie di materiali idonei per questo scopo. L'esigenza è nata principalmente dall'idea di sperimentare nuovi percorsi curriculari scolastici nell'ottica dell'integrazione fra tecnologie educative tradizionali e innovative. Stando alle più recenti statistiche, si evidenzia una crisi senza precedenti nell'attrattiva delle carriere scientifiche e, più in generale, nella scarsa diffusione della cultura scientifica tra i più giovani. La ricerca psicopedagogica internazionale si è fortemente concentrata negli ultimi decenni sull'insegnamento delle scienze. La presente ricerca espone la progettazione e la sperimentazione di una metodologia che, muovendo dal caos, uno dei più affascinanti temi di ricerca del secolo appena trascorso, arrivi, attraverso l'integrazione multidisciplinare, a rendere accessibile alla comprensione un argomento che può rivelarsi assai ostico per i non specialisti. Con la sperimentazione di tale metodologia, si è voluto intervenire, in un certo senso, sul rapporto tra i giovani e la scienza, nell'ottica di una concreta interazione dei saperi e impiegare sperimentalmente, per fini educativi, nuove tecnologie per la didattica, focalizzate in un ben preciso settore scientifico. La metodologia, inizialmente proposta nell'ambito della scuola media è stata successivamente ampliata alla scuola superiore e ha coinvolto, con vari ruoli, più di seicento studenti, comprendendo anche attività laboratoriali in due mostre espositive. Affrontare temi scientifici può apparire, nel contesto storico in cui si vive, qualcosa di molto complesso; cercare di proporli in modo originale, meno difficile o distante, è sicuramente molto articolato. Si è cercato di costruire e sperimentare un metodo che presentasse proprio ai giovani una scienza ricca di esempi applicativi e confronti multidisciplinari, ciò anche con l'ausilio di una serie di materiali e applicazioni multimediali precedentemente sviluppati nell'ambito delle ricerche sul caos e i sistemi complessi. Gli obiettivi principali che hanno guidato tutta l'attività di ricerca sono stati: portare nelle scuole la ricchezza e l'articolazione della ricerca scientifica,

assieme anche all'inevitabile componente di incertezza, base e alimento del metodo scientifico; proporre un percorso di studio, di partecipazione e di confronto, che si è arricchito mano a mano come un mosaico di esperienze preziosissime, che hanno portato all'integrazione e anche alla modifica in corso d'opera dei materiali didattici realizzati ad hoc. Nella convinzione che tale argomento, il caos, potesse essere un giusto contesto per affrontare la definizione di un'articolata metodologia didattica, si è cercato di offrire impieghi diversificati delle rappresentazioni di tale argomento scientifico: quello della visualizzazione scientifica, passando per la sonorizzazione e la creazione di musica, e, infine, la sperimentazione tramite la costruzione fisica del circuito elettronico e la verifica del suo comportamento. Le attività di ricerca hanno interessato anche la realizzazione di percorsi divulgativi all'interno di due mostre espositive sui temi scientifici relativi al caos e la realizzazione di media per la comunicazione della scienza. In particolare, è stato realizzato un video divulgativo sulla teoria del caos dal titolo: "Il circuito di Chua: un viaggio tra arte e scienza", disponibile sia in versione italiana che inglese. Per tale video è stato realizzato il lavoro di regia, ne sono state curate la sceneggiatura e il montaggio. Sempre nell'ambito della creazione di media per la divulgazione scientifica, è stata realizzata la sceneggiatura del video di animazione 3D sulla genesi del circuito di Chua. I materiali relativi alle attività didattiche sperimentali realizzate nelle scuole, la mostra espositiva e i media sviluppati sono stati infine inseriti in un sito internet per il quale sono stati redatti parte dei contenuti e svolta l'attività di web design.

I laboratori sperimentali allestiti hanno compreso sia spazi adeguatamente attrezzati con le strumentazioni necessarie, sia percorsi didattici basati su applicativi virtuali in grado di favorire un apprendimento attivo e rinnovare la didattica e l'applicazione di modelli psicopedagogici di matrice costruttivista. Infine, le sperimentazioni realizzate hanno verificato l'efficacia di tale metodologia che potrebbe essere assunta come riferimento sia per ciò che concerne l'evoluzione dei ruoli nella complessità psicopedagogica, sia per un reale rinnovamento metodologico nella didattica delle scienze. In conclusione si può affermare che attraverso le sperimentazioni si sono condotti molti giovani studenti in un processo originale di costruzione della conoscenza in ambito scientifico.

Allegato 1

Test d'ingresso

- 1) Nel linguaggio scientifico, il termine "materia" indica
 - Ciò che compone i corpi
 - Ciò che studiamo a scuola
 - Una sostanza ben precisa
 - Diverse sostanze
- 2) Nel linguaggio scientifico, il termine "fenomeno" indica:
 - Qualcosa di eccezionale
 - Qualunque avvenimento che si verifichi in natura
 - Qualcosa che accade ogni tanto
 - Una persona particolarmente dotata
- 3) A quale dei seguenti termini assoceresti la parola "caos"
 - Complessità
 - Regolarità
 - Chiarezza
 - Confusione
- 4) Fra i seguenti, qual è l'oggetto che puoi trovare in un circuito elettrico
 - Gomma
 - Carta
 - resistenza
 - molla
- 5) Secondo te, qual è il modo migliore per rappresentare scientificamente un fenomeno naturale
 - fiabe e racconti
 - leggi fisiche e matematiche
 - spettacoli teatrali
 - danza
- 6) A quale dei seguenti oggetti sapresti associare una forma geometrica ben definita
 - i rami di un albero
 - libro
 - nuvola
 - la fiamma di un fuoco
- 7) Secondo te, quale evento si può prevedere un anno prima
 - il giorno della settimana in cui cadrà il Natale
 - se poverà il giorno di Natale
 - di quanti centimetri sarai più alto
 - se il prossimo inverno prenderai l'influenza

- 8) Quale fra i percorsi sotto indicati, rappresenteresti più facilmente con una linea tracciata a matita
- L'andamento del fumo che esce dal comignolo
 - La strada che conduce da Vibo Marina a Vibo Città
 - L'andirivieni di un pesce nell'acquario
 - Il percorso di una formica
- 9) Con quale tipo di linea rappresenteresti un circuito (ricorda il Gran Premio di Formula 1!)
- Una linea retta
 - Una linea curva e aperta
 - Una linea curva chiusa
 - Una linea spezzata aperta
- 10) Quali delle seguenti condizioni definiresti semplice, piuttosto che complessa
- il movimento di un pallone in seguito ad un calcio
 - l'organizzazione delle api nell'alveare
 - l'andamento delle condizioni del tempo
 - l'andamento del battito del cuore

Allegato 2

Test intermedio. Parte I

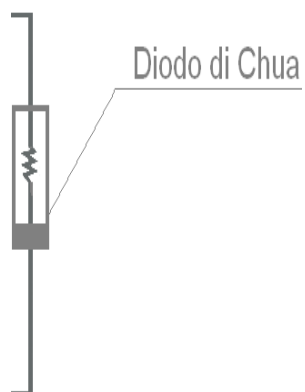
1. Nel caso del moto di un proiettile, fai un esempio di modello fisico e modello matematico
 - il modello fisico è un oggetto che si muove di moto parabolico, il modello matematico è l'equazione di una parabola
 - il modello fisico è l'equazione di una parabola, il modello matematico è un oggetto che si muove di moto parabolico
 - il modello fisico è una parabola, il modello matematico è un oggetto che si muove di moto parabolico
 - il modello fisico l'equazione di una parabola, il modello matematico è una parabola
2. Nella terminologia scientifica, caos è sinonimo di
 - confusione
 - sistema complesso
 - disordine
 - certezza
3. Cosa caratterizza il comportamento dei sistemi caotici?
 - solo le condizioni iniziali
 - solo la variazione dei parametri
 - le condizioni iniziali e la variazione dei parametri
 - niente
4. Possiamo definire esempio reale di fenomeno caotico
 - il moto di un treno
 - i fenomeni meteorologici
 - il moto della terra
 - il salto di un canguro
5. Abbiamo visualizzato le strade verso il caos, quale di queste sequenze può rappresentarne una?
 - punto di equilibrio, ciclo limite, biforcazione, double scroll
 - double scroll, saturazione
 - biforcazione
 - punto di equilibrio, ciclo limite
6. il fenomeno della biforcazione si verifica quando
 - il sistema caotico dimezza le soluzioni possibili
 - il sistema caotico ha un numero costante di soluzioni possibili
 - il sistema caotico raddoppia il numero delle soluzioni possibili

- il sistema caotico annulla le soluzioni possibili
7. L' espressione paradossale "effetto farfalla" utilizzata dal meteorologo E. Lorenz, nel 1972, indica
- che le farfalle volano in modo caotico
 - che le condizioni del tempo dipendono dalla salute delle farfalle
 - che piove se ci sono farfalle
 - che piccole variazioni alle condizioni iniziali di un sistema non lineare possono provocare, a lungo termine, effetti grandissimi
8. Perché è importante il circuito di Chua
- è semplice
 - è un semplice circuito elettronico che mostra il caos
 - è piccolo
 - è difficile
9. Solo una sequenza contiene tutti i componenti del circuito di Chua, indica quale
- potenziometri, amplificatori operazionali
 - induttanza, resistenze, amplificatori operazionali
 - induttanza, condensatori, resistenze, potenziometri, amplificatori operazionali
 - potenziometri, amplificatori operazionali
10. Gli amplificatori operazionali, nel cosiddetto diodo di Chua, sono importanti perché
- causano linearità
 - inducono stabilità
 - determinano la costanza dei valori
 - causano il comportamento caotico del circuito

Test intermedio. Parte II

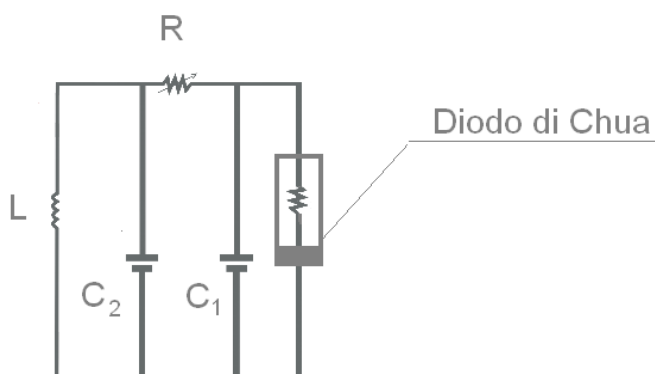
Disegna lo schema che rappresenta il circuito di Chua, scrivendo accanto ad ogni componente il suo nome simbolico (ad esempio, **L** accanto al simbolo dell'induttanza).

Utilizza lo schema già inserito per rappresentare il diodo di Chua.



Test intermedio. Parte III

Inserisci, in modo coerente alla rappresentazione schematica, i componenti del circuito di Chua.

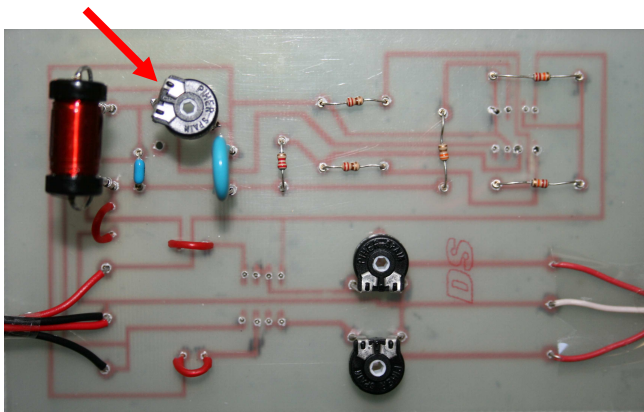


Allegato 3

Test finale

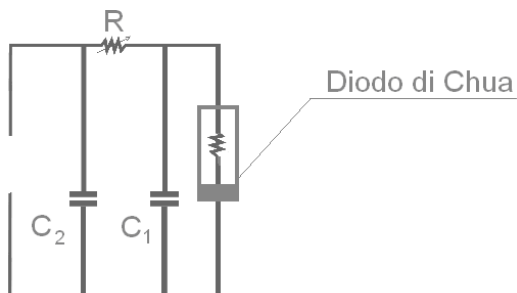
Contrassegna con una **X** la risposta esatta, rispondi alle domande, completa con le informazioni mancanti:

- 1) Qual è il nome del componente indicato dalla freccia, sul circuito di Chua e a cosa serve?

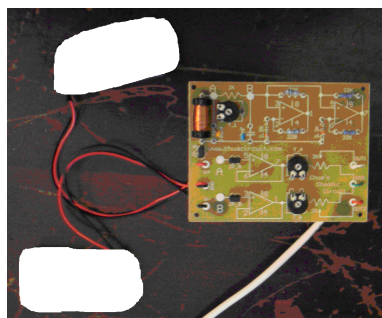


- Potenziometro, serve a variare il valore della resistenza
- Induttanza, serve ad opporsi alla variazione di corrente
- Condensatore, serve ad accumulare carica elettrica
- Batteria, serve ad alimentare il circuito

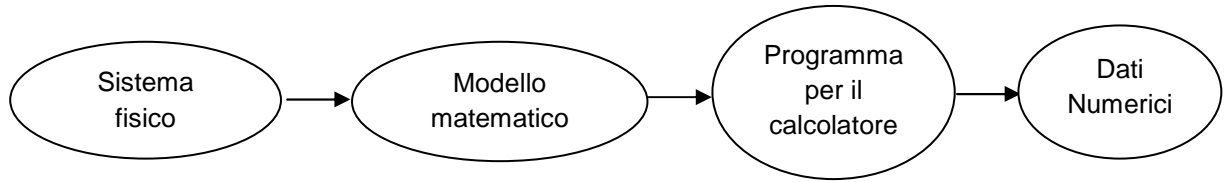
- 2) Completa lo schema del circuito di Chua, disegnando il componente mancante



- 3) Nella foto sottostante del circuito di Chua sono stati cancellati dei componenti, quali?

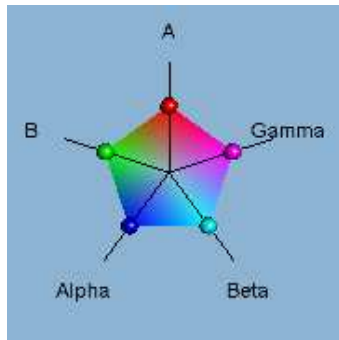


4) Secondo te il percorso sottostante rappresenta i passi caratteristici di quale tra le seguenti risposte?



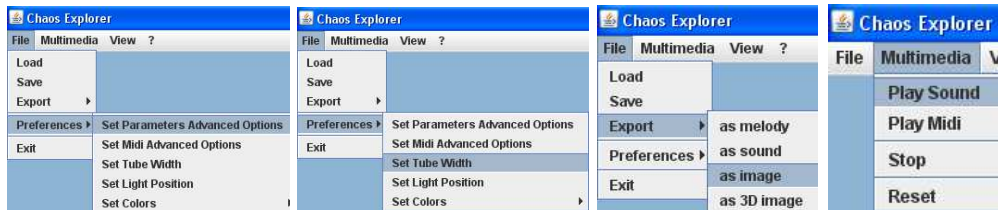
- Della simulazione
- Delle strade verso il caos
- Della matematica
- Della fisica

5) Nell'interfaccia del programma utilizzato per creare gli attrattori ed esplorare il caos, per cosa è utilizzata la stella sotto riportata?



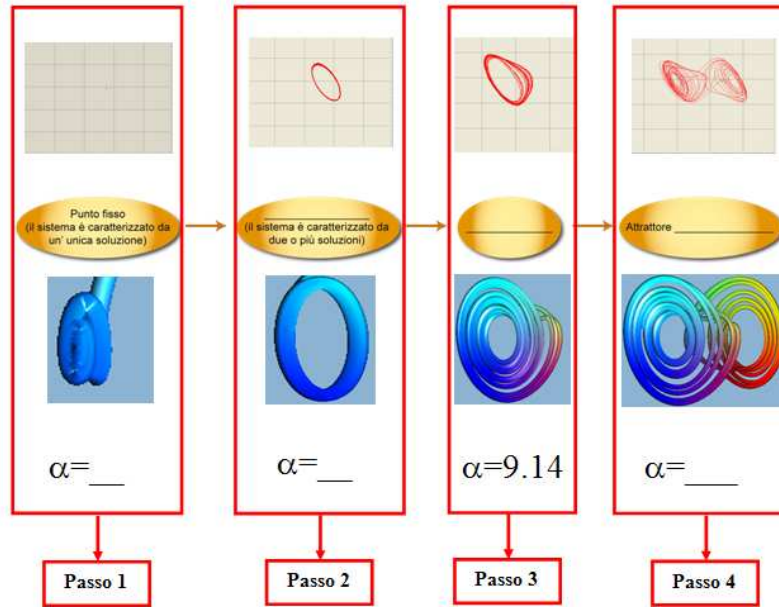
- Per variare lo spessore delle linee
- Per variare il colore
- Per variare i parametri di controllo
- Per produrre suoni

6) Quale sequenza di click realizzo per variare i parametri dell'attrattore?

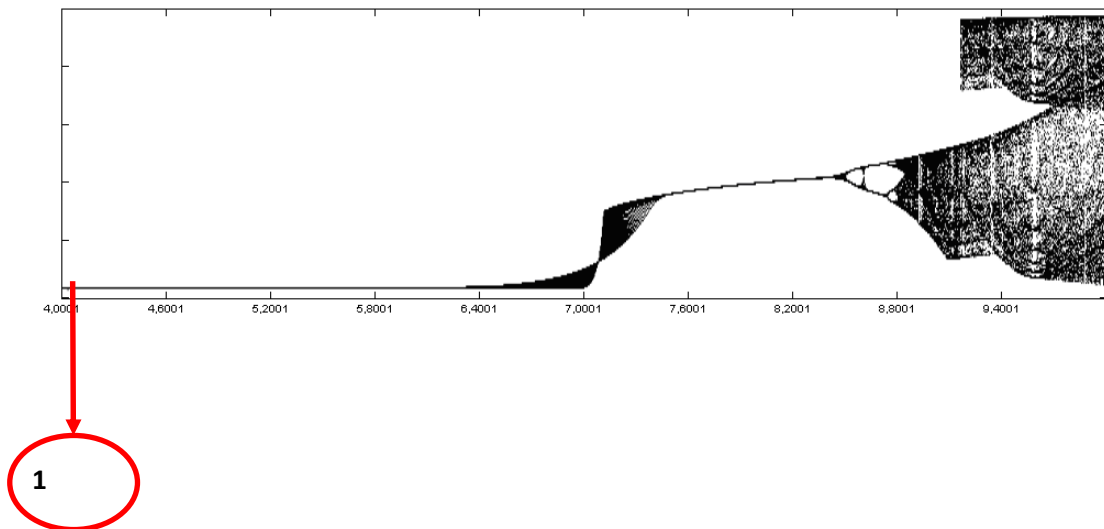


-
-
-
-

7) Sotto è rappresentata una strada verso il caos, inserisci al posto giusto le informazioni mancanti



8) Indica con una freccia, sulla mappa di biforcazione, i passi della strada al caos in relazione ai valori di α prendi esempio da quello già indicato, passo 1 (punto fisso) per $\alpha \approx 4$



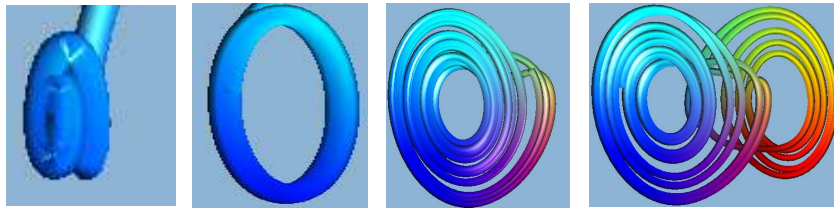
9) Come si genera musica da un sistema caotico?

- Inserendo i numeri in uno strumento musicale
- Schiacciando i tasti su una tastiera
- Generando sequenze di numeri con il computer e trasformandoli in sequenze di note
- Attraverso il ragionamento

10) Ascolta i suoni A, B, C, D .

A quale comportamento dell'attrattore 1 corrisponde ciascun suono?

Scrivi accanto all' immagine, la lettera corrispondente al suo suono caratteristico.



Bibliografia

- Adamo A., Tavernise A., "L'AttrATTORE strano". Contributo a XXVII Conference of the Cognitive Science Society, Stresa, 2005.
- Aldrich C., "Learning by Doing: A Comprehensive Guide to Simulations, Computer Games, and Pedagogy", *e-Learning and Other Educational Experiences*. Pfeiffer, San Francisco, 2005.
- Alexander, J. C., *Durkheimian sociology: cultural studies*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- Barnier G., *Théories de l'apprentissage et pratiques d'enseignement*, 2009.
- Barrow John D., *Le immagini della scienza*, Mondadori Milano, 2009.
- Bednar A.K., Cunningham D., Duffy T.M., and Perry J.D., Theory into practice: How do we link? In T.M. Duffy and D.H. Jonassen (Eds.), *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, pp. 17-34, 1995.
- Benjamin W., *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica* Piccola Biblioteca Einaudi, Torino, 2000.
- Bense M. *Estetica* ed.it. a cura di Anceschi G. Milano, Bompiani, 1974; *Aesthetica: Einführung in die neue Aesthetik*, Baden-Baden, Ägis-Verlag, 1965.
- Bertacchini, F., Bilotta, E. & Pantano, P. "Educational virtual scenario for learning chaos and complex theories," *Int. J. Virt. Real.* 7, 19–26, 2008.
- Bertacchini, F., Bilotta, E., Bossio, E., Vena, S. & Pantano, P., "Learning chaos in an interactive Virtual Museum," *Int. Conf. Web-based Learning (ICWL 2009)*, August 19–21, Aachen, Germany, pp. 1–6, 2009.
- Bertacchini F. , Bilotta E. , Bossio E. L. , Pantano P. S. , "Making scientific topics simpler: a website for learning chaos". Atti del convegno "*International Technology, Education and Development Conference (INTED)*", Valencia, Spain., Edited by L. Gómez Chova, D. Martí Belenguer, I. Candel Torres, pp. 5845-5853, 2010.
- Bertacchini F., Bossio E., Documentary film about Chaos Theory, a metaphorical journey between art and science, in preparazione per *Leonardo Journal*, 2011a.
- Bertacchini F., Bossio E., Laria G., 3D graphics, animation and simulation to support science dissemination, in preparazione, 2011b.
- Bilotta E., *Interfacce multi-modali e aspetti psicologici dell'interazione uomo-computer*, Editoriale Bios, Cosenza, 1996.
- Bilotta E., *I nuovi saperi*, BCM, Roma, 1999.

- Bilotta E, Pantano P., Talarico V., "Synthetic harmonies: An approach to musical semiosis by means of cellular automata, " In *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference*. A cura di M. A. Bedau, J.S. Mc Caskill, Packard N. H., e Rasmussen S., pp. 537–546, MIT Press Cambridge, MA, 2002.
- Bilotta E., Campolo R., Pantano P., Stranges F., Sound Synthesis and chaotic behaviour in Chua's oscillator, *SCEE-Scientific Computing in Electrical Engineering 2004*, Lectures Notes in Industrial Mathematics, Springer-Verlag, 289–294, 2004a.
- Bilotta E., Lafusa A., Pantano P.: Life-like self reproducers. *Complexity* 9, 1 38–55, 2004b.
- Bilotta E., Gervasi S., Pantano P. Reading complexity in Chua's circuit by music—Part I: a new way of understanding chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*;15(2):253–382, 2005a.
- Bilotta E., Pantano P.: Emergent patterning phenomena in 2d cellular automata. *Artificial Life Journal* 11, 3 339–362, 2005b.
- Bilotta E. , Pantano P. S. , Stranges F. , "Computer Graphics meets Chaos and Hyperchaos. Some key problems," *Computer & Graphics*, Vol. 30, n. 3, pp. 359-367, 2006a.
- Bilotta E. and Pantano P., The Language of Chaos, *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, 16(3): 523–557, 2006b.
- Bilotta, E., Pantano, P. & Stranges, S. "A gallery of Chua attractors. Part I," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 1–60, 2007a.
- Bilotta, E., Pantano, P. & Stranges, S. "A gallery of Chua attractors. Part II," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 293–380, 2007b.
- Bilotta, E., Di Blasi, G., Stranges, S. & Pantano, P. "A gallery of Chua attractors. Part VI," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 1801–1910, 2007c.
- Bilotta, E., Cupellini, E., Pantano, P. & Rizzuti, C. "Evolutionary methods for melodic sequences generation from non-linear dynamic systems," *Proc. EvoMusArt 2007*, LNCS (Springer-Verlag, Heidelberg), pp. 585–592, 2007d.
- Bilotta, E., Pantano, P., Bertacchini, F., Gabriele, L., Mazzeo, V., Rizzuti, C. & Vena, S. "ImaginationTOOLSTM: Made to play music," *Proc. Edutainment 2007*, LNCS (Springer-Verlag, Heidelberg), pp. 369–380, 2007e.
- Bilotta, E., Stranges, S. & Pantano, P. "A gallery of Chua attractors. Part III," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 657–734, 2007f.
- Bilotta, E., Di Blasi, G., Stranges, S. & Pantano, P. "A gallery of Chua attractors. Part IV," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 1017–1077, 2007g.
- Bilotta, E., Di Blasi, G., Stranges, S. & Pantano, P. "A gallery of Chua attractors. Part V," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 17, 1383–1511, 2007h.
- Bilotta, E. & Pantano, P. *A Gallery of Chua Attractors* (World Scientific, Singapore), 2008.

- Bilotta E., Bossio E., Pantano P., "Chaos at school: Chua's circuit for students in junior and senior high school," *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 20(1), 1-28, 2010.
- Bilotta E. & Pantano P., "Discrete Chaotic Dynamics from Chua's Oscillator: Chua Machines," *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 19(1), pp.1-115, 2010b.
- Bloom P., *Il bambino di Cartesio: la psicologia evolutiva spiega che cosa ci rende umani*. 2004. Trad. it. Dissoni A., Il Saggiatore, Milano, 2004.
- Bodmer, W., *The public understanding of science*. London, Royal Society, 1985.
- Brandi M. C., Cerbara L., Misiti M., Valente A., Youth and Science in Italy: between enthusiasm and indifference, *Journal of Science Communication*, 4 (2), pp. 1-14, 2005.
- Brecht B., *Vita di Galileo*, Einaudi, Torino, 2005.
- Brown J. S., Collins A., Duguid P., Situated Cognition and the Culture of Learning, *Education Researcher*, vol.18, n. 1, pp. 32-42, 1989.
- Brown, J. S., Collins, A. & Duguid, P., "Situated cognition and the culture of learning," *Educat. Res.* 18, 32–41, 1989.
- Bruner J., (1990), *Acts of Meaning*, Harvard University Press, Harvard (trad. it. *La ricerca del significato*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992).
- Bucchi M., *Scienza e società*, il Mulino, Bologna, 2002.
- Bucchi M., *Of deficits, deviations and dialogues: theories of public communication of science*, in Bucchi M., Trench B. (eds), *Handbook of public Communication of Science and Technology*, London, Routledge, 2008.
- Buzzati Traverso A., La scienza proibita. In *L'Espresso*, 1962.
- Calvani A., "Costruttivismo, progettazione didattica e Tecnologia" in Bramanti D. (a cura di), *Progettazione formativa e valutazione*, Carocci, Roma, 1998.
- Calvani A. *Elementi di didattica: problemi e strategie*, Carocci, Roma, 2000.
- Canestrari R., Godino A., *Manuale di Psicologia*, Vol. 1, CLUEB, Bologna, 1994.
- Card S. K., Mackinlay J., Shneiderman B.: *Readings in Information Visualization – Using Vision to Think*. Morgan Kaufman Publishers, 1999.
- Careri F., *Constant. New Babylon, una città nomade*, Testo&Immagine Editore, Roma, 2001.
- Castelfranchi Y., Pitrelli N., *Come si comunica la scienza*, Laterza ed., Roma-Bari, 2007.
- Chua, L. O., "Memristor-the missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Th.* 18, 507–519, 1971.
- Chua L.O., Kennedy M. P., "Van der Pool and Chaos", *IEEE Trans. Circuits syst.*, vol. 33, no. 10, pp 974-980, 1986.
- Chua, L. O., "The genesis of Chua's circuit," *Archiv fur Elektronik und Uebertragungstechnik*, 46, 250–257, 1992a.

- Chua, L. O. "A zoo of strange attractors from the canonical Chua circuits," *Proc. 35th Midwest Symp. Circuits and Systems*, pp. 916–926, 1992b.
- Chua, L. O. & Roska, T., "The CNN paradigm," *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fund. Th. Appl.* 40, 147–156, 1993.
- Chua, L. O., Wu, C. W., Huang, A. & Zhong, G. Q. "A universal circuit for studying and generating chaos- Part I: Routes to chaos," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 40, 732–744, 1993a.
- Chua, L. O., Wu, C. W., Huang, A. & Zhong, G. Q. "A universal circuit for studying and generating chaos. II. Strange attractors," *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fund. Th. Appl.*, 40, 745–761, 1993b.
- Chua L. O., "Global unfolding of Chua's circuit", *IEICE Trans. Fundamentals* (Special issue on Chaos, Neural Networks and Numerics), vol. E76A, n.5, pag. 704-734, 1993c.
- Clements D.H, Nastasi B.K., *Electronic media and early childhood education*, in B. Spodek (Ed.) *Handbook of research on the education of young children*, Mcmillian, New York, 1992.
- Crawford C., *The Art of Computer Game Design*, McGraw-Hill, Osborne Media, 1984.
- Cupellini, E., Rizzuti, C., Bilotta, E., Pantano, P., Wozniowsky, M. & Cooperstock, J. "Exploring musical mappings and generating accompaniment with chaotic systems," *Proc. Int. Comput. Music Conf.*, Belfast, pp. 467–474, 2008.
- Dewey J., *Arte come esperienza*, 1934, Ed. Cur. Matteucci G., Aesthetica, 2010.
- Doré, S., Basque, J. Le concept d'environnement d'apprentissage informatisé, *Revue de l'éducation à distance*, 13(1), 40-56, 1998.
- Eisenberg N., *Altruistic emotion, cognition, and Behaviour*, Hillisdale, N. J, Elbaum, 1986.
- Fortin Marie-Fabienne, *Le processus de la recherche : de la conception à la réalisation*, Décarie Ville Mont-Royal, Québec, 1996.
- Funtowicz S., Ravetz J., Post-Normal Science – an insight now maturing, *Futures*, 31, 7, 1999.
- Gandhi, G., Cserey, G., Zbrozek, J. & Roska, T. "Anyone can build Chua's circuit: Hands-on experience with chaos theory for high school students," *Int. J. Bifurcation and Chaos* 19, 2009.
- Gleick J., *Caos*, Rizzoli, Milano, 1989.
- Gross Elisheva F. Adolescent Internet use: What we expect, what teens report, *Applied Developmental Psychology* 25, 633–649, 2004.
- Guspini M., La personalizzazione degli apprendimenti, in *Apprendere con...*, a. 2, n. 1, pp. 5-10, 2005.

- Habermas, J., *The Theory of Communicative Action, Volume 1, Reason and the Rationalization of Society*. Beacon Press, Boston, 1984.
- Harasim L., Calvert T., Groeneboer C., Virtual-U™: a web-based environment customized to support collaborative learning and knowledge building in post secondary courses, *Proceedings of the 1996 International Conference on Learning sciences*, pp. 120 – 127, 1996.
- Huizinga J., *Homo ludens*, 1939, Trad. It. Van Schendel C., Einaudi, 2002.
- Johnson C. R. and Hansen C. D. eds., *The Visualization Handbook*, Academic Press, New York, 2004.
- Jonassen D.H., Thinking technology, toward a coconstructivistic design model, in *Educational technology*, pp.34-37, 1994.
- Jonassen, D. H., Objectivism versus constructivism: do we need a new philosophical paradigm?, *Educational Technology Research and Development*, 39 (3), 5-14, 1991.
- Kaye Anthony, Apprendimento collaborativo basato sul computer, da *Tecnologie Didattiche* N.4, pag. 9-21, 1994.
- Kennedy M. P., Chua L. O., “Hysteresis in electronic circuits: a circuit theorist’s perspective”. *Int. J. Circuit theory applications*, vol. 19, n. 5, pp. 471-515, 1991.
- Kennedy, Michael P., Robust Op-amp Realization of Chua’s Circuit, *Frequenz*. 46(3), pp. 66 – 80, 1992a.
- Kennedy M. P., “Experimental chaos via Chua’s circuit”, in Proc. first experimental Chaos conf., pp.340-351, 1992b.
- Kennedy M. P., “Three steps to Chaos-Part I”, *IEEE trans. Circuits and systems*, 40(10), pag. 640-656, 1993a.
- Kennedy M. P., Three Steps to Chaos-Part II: A Chua’s Circuit Primer, *IEEE Transactions circuits and systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 40(10), pp. 657-674, 1993b.
- Krueger Myron, *Artificial Reality*, Addison Wesley, 1992.
- Langton C.: Self-reproduction in cellular automata. *Physica D.*, 10, 135–144, 1984.
- Latour B., *La scienza in azione*, Edizioni di Comunità, Torino, 1998 (trad. *Science in action*, 1987).
- Legendre R., *Dictionnaire actuel de l’éducation*, Guérin, Montréal, 1993.
- Lepper M.R., Malone T.W., “Intrinsic motivation and instructional effectiveness in computer-based education”, in: RE Snow and MC Farr, Editors, *Aptitude, learning and instruction: III Cognitive and affective process analyses*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, pp. 255–286, 1987.
- Lumbelli L., *La comunicazione filmica. Ricerche psicopedagogiche*, La Nuova Italia, Firenze, 1974.

- Madan R. N. *Chua's circuit – A paradigm for chaos*. Singapore, World Scientific, Singapore, 1992.
- Mandelbrot B., *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Co., New York, 1982.
- Maragliano R., *Nuovo manuale di didattica multimediale*, Laterza, 2007.
- Matsumoto T. A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 12, pag 1055-1058, 1984.
- McCormick B.H., De Fanti T.A., Brown M.D.: *Visualization in Scientific Computing* Computer Graphics, ACM SIGGRAPH, 21(6), 1987.
- McLuhan Marshall, *Understanding Media: The Extensions of Man*, New York, New American Library 1964 (trad. it. di E. Capriolo, *Gli strumenti del comunicare*, Milano, Il Saggiatore, 1999).
- Mitchell A., Savill-Smith C., *The Use of Computer and Videogames for Learning: A Review of the Literature*, Learning and Skills Development Agency, Trowbridge, Wiltshire, 2004.
- Montgomery Kathryn C., *Generation Digital*, The MIT Press, 2009.
- E. Morin. *L'industria culturale*. Il Mulino, Bologna, 1963.
- Nosengo N., *L'estinzione dei tecnosauri*, Sironi, 2003.
- Oecd, *PISA 2006: Science Competencies for Tomorrow's World – Volume 1: Analysis*, Oecd, Paris, 2007.
- Odifreddi P., Lo zoo dei matematici, In *La Repubblica*, 2000.
- Greco P., Cultural determinants in the perception of science, *Journal of Science Communication*, 07(02), 2008.
- Peitgen H. O., Jürgens H., Saupe D., Zahlten C., Video film, *Fractals, An Animated Discussion*, W. H. Freeman and Company, New York, 1990. Ed. Italiana I frattali. Illustrati da E. Lorenz e B. B. Mandelbrot; in un film di H. O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe, C. Zahlten; Le scienze, Mondadori video, Milano, 1991.
- Prellezo J. M., Lanfranchi R., *Educazione e pedagogia nei solchi della storia*, SEI, 2, Torino, 1995.
- Greenfield S., *Gente di domani. Come la tecnologia del ventunesimo secolo sta cambiando il nostro modo di pensare e di sentire*, Trad. M. Bianchi Oddera, Newton Compton, 2005.
- Resnick, M. *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds (Complex Adaptive Systems)*, The MIT Press, Cambridge MA, 1997.
- Resnick, M. "Computer as paintbrush: Technology, play, and the creative society," in *Play = Learning: How Play Motivates and Enhances Children's Cognitive and Social-Emotional Growth*, eds. Singer, D., Golikoff, R. & Hirsh-Pasek, K., Oxford University Press, Oxford, 2006.

- Rizzuti C., Mapping chaotic dynamical systems into timbre evolution. In *Proc. of Sound and Music Computing Conference (SMC07)*, Lefkada, pp. 22–29, 2007.
- Rizzuti C. , "Generazione di suoni e musiche mediante sistemi caotici". Atti del convegno "XVII Colloquio di Informatica Musicale", Venezia, pp. 131-137, 2009a.
- Rizzuti, C., Bilotta, E. & Pantano, P. *A GA-Based Control Strategy to Create Music with a Chaotic System*, Atti del convegno "EvoWorkshops", a cura di Giacobini M., E A., Springer-Verlag, Heidelberg, LNCS, pp. 585–590, 2009b.
- Rizzuti, C., *Complessità e Musica*, Tesi di Dottorato, Università della Calabria, pp. 196, 2009c.
- Rössler O E An equation for continuous chaos *Phys. Lett.* 57A 397–8, 1976.
- Rota G. in *La matematica del Novecento*, a cura di Piergiorgio Odifreddi, *La matematica del Novecento - Dagli insiemi alla complessità*, collana Piccola Biblioteca Einaudi, Einaudi, 2000.
- Ruelle, *Caso e caos*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992.
- Rubbia C., Galileo e la divulgazione della scienza, *Galileo Journal, Giornale di scienza e problemi globali*, Anno I, n. 1 - Maggio, 1996 (www.galileonet.it).
- Silva C. P., "Shilnikov's theorem – A tutorial", *IEEE Trans. On Circuits and systems*, vol. 40, n.10, pp. 675-682, 1993.
- Silva M., Breuleux A., The Use of Participatory Design in the Implementation of Internet-based Collaborative Learning Activities in K-12 Classrooms, *Interpersonal Computing and Technology: An Electronic Journal for the 21st Century*, 2(3), pp. 99-128, 1994.
- Stefànsson K.K. (2006), *I just don't think it's me*, <http://www.duo.uio.no/publ/realvag/2006/42448/Stefanssonx2006.pdf>.
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R. & Williams, R. S., "The missing memristor found," *Nature* 453, 80–83, 2008.
- Turner S., *School science and its controversies; or, whatever happened to scientific literacy?*, in "Public Understanding of Science", 17, 55, 2008.
- Van der Pol B., Van der Mark J., "Frequency demultiplication", *Nature*, 120(3019), pp 363-364, 1927.
- Varisco B. M., *Costruttivismo socio-culturale: genesi filosofiche, sviluppo psico-pedagogici, applicazioni didattiche*, Carocci, Roma, 2007.
- Watson John B., Psychology as the behaviourist views it, *Psychological Review*, 20(2), 158-177, 1913.
- Wimmer, R.D. & Dominick, J. R., *Mass Media Research: an Introduction*, Wadsworth Publishing Company, United States, 2006.
- Wolfram S., Universality and complexity in cellular automata, *Physica D*, 10, 1–35, 1984.

- Zhong G. Q., Ayrom F., "Experimental confirmation of chaos from Chua's circuit", *Int. J. Circuit theory appl.*, 13(11), 93-98, 1985.