

# Conservatorio di Musica Santa Cecilia

Dipartimento di Nuove Tecnologie e Linguaggi Musicali



Tesi di Laurea Biennale in Musica Elettronica

## Sistemi Complessi Adattivi per la performance musicale in Live Electronics

Relatore:

**Giuseppe Silvi**

Candidato:

**Luca Spanedda**

Correlatore:

**Agostino Di Scipio**

**Anno Accademico 2021/2022**



# Dichiarazione

Dichiaro che il sottoscritto nonché autore del documento è il responsabile del suo contenuto, e per le parti tratte da altri lavori, queste vengono espressamente dichiarate citando le fonti.

Luca Spanedda

# Ringraziamenti

Prima di entrare nel merito, voglio ringraziare qui le persone che hanno reso possibile e significativo questo percorso che ho intrapreso. La mia famiglia, che mi ha sempre supportato durante il mio percorso. Tutti i miei amici, che sono artisti, pensatori, e persone dal grande valore umano. I miei compagni di corso, che sono fantastici compositori dalle idee più stravaganti, e questi ultimi insieme ad i miei amici si sono rivelati esser stati per me importanti compagni di vita. Giuseppe Silvi, che mi ha accompagnato e guidato in questi ultimi anni sia da maestro che da amico, sempre amorevolmente nel mio percorso compositivo, ed insieme a lui, voglio ringraziare tutti i grandi Maestri e Professori del dipartimento di Musica Elettronica, a cui devo tanto del mio percorso, della mia crescita e del mio operato: Pasquale Citera, Nicola Bernardini, Marco Giordano, Luigi Pizzaleo, Federico Scalas. E il caro ex-Maestro Michelangelo Lupone, che ha formato il mio pensiero compositivo, e che mi ha sempre incoraggiato a fare del mio meglio e rinnovare il mio entusiasmo per la musica giorno per giorno. E infine ringrazio di cuore Dario Sanfilippo e Agostino Di Scipio, che sono per me grandi mentori, maestri, e persone straordinarie, e che mi hanno accompagnato in questo mio percorso compositivo aiutandomi a portare avanti le mie idee visionarie per la composizione elettroacustica, senza la loro preziosa guida e collaborazione, questo lavoro non sarebbe stato possibile. Sono grato a tutti voi, in vostra assenza non sarebbe stato possibile realizzare i miei sogni, e questa tesi ne è la prova (di un sogno realizzato). Sogni che son per me sempre un punto di partenza e mai uno di arrivo.

*It is not irritating to be where one is. It is only irritating to think one would like to be somewhere else.*

(John Cage - Lecture on Nothing - Incontri musicali. Quaderni internazionali di musica contemporanea, Agosto 1959.)

Grazie a tutti di cuore.



## **Abstract**

Il lavoro qui presentato è uno studio di analisi, implementazione e esecuzione di tre Sistemi Complessi Adattivi per la performance musicale in Live Electronics. La scelta di questi tre sistemi corrisponde a tre diversi casi di studio nell'implementazione di dinamiche non lineari sfruttate per la generazione dei comportamenti emergenti nei Sistemi Complessi. Una prima parte del lavoro tratterà dell'implementazione e l'analisi di due brani rispettivamente di Agostino Di Scipio e Dario Sanfilippo. Di Agostino di Scipio un sistema con non linearità provenienti dal mondo fisico, che sfrutta fenomeni generati dalla catena elettroacustica all'interno dell'ambiente e riportati poi all'interno del sistema digitale. Di Dario Sanfilippo invece un sistema che sfrutta delle non linearità appositamente programmate dal compositore nel mondo digitale, controllate tramite agenti di autoregolazione scritti nel software. Infine l'ultima parte del lavoro è dedicata alla composizione di un mio brano, che sfrutta elementi di logiche ibride apprese dai due casi di studio presentati qui, e che andrà a conclusione del lavoro di ricerca sviluppato durante il corso della tesi.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
1.1	La Cibernetica . . . . .	3
1.2	Le Cibernetiche nella musica . . . . .	5
1.3	Il Feedback . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Ecosistemi Udibili</b>	<b>16</b>
2.1	L'interazione Uomo-Macchina-Ambiente . . . . .	18
2.2	Il Meccanismo LAR . . . . .	19
2.3	Trasformazioni del suono . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Sistemi Autonomi</b>	<b>42</b>
3.1	Audio Information Processing . . . . .	44
<b>4</b>	<b>RITI: un sistema caotico ibrido</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>First appendix</b>	<b>51</b>
<b>B</b>	<b>Second appendix</b>	<b>83</b>

## List of Tables

## List of Figures



# 1 Introduzione

All'inizio del XX Secolo si manifestò una situazione globale di importanti cambiamenti in tutti gli ambiti.

Nel mondo dell'arte con la nascita delle avanguardie artistiche e in risposta alla problematica del dover trovare nuovi modi di fare che riflettano le tematiche della società attuale. Nelle scienze, con l'esigenza di dover introdurre nuovi paradigmi per far fronte alla grande crisi dei fondamenti e delle certezze. Durante il corso del secolo poi, questi cambiamenti hanno portato ad importanti punti di incontro non più occasionali fra questi due ambiti. La figura dell'artista inizia ad interessarsi alle nuove tecnologie e teorie scientifiche, e questo è stato un importante punto in comune a tutte le avanguardie dell'epoca, inclusa quella musicale.

Nel caso di questa tesi, l'attenzione che ripongo a questo scenario del XX Secolo è in particolare su un cambio di paradigma scientifico nascente durante la seconda guerra mondiale e consolidato al termine di questa, la nascita della cibernetica e la conseguente formulazione di scienze della complessità. La complessità, non è un ambito trattato da una sola scienza, ma più un nuovo modo di pensare e di osservare i fenomeni della realtà.

Se nella cosmologia greca, questa realtà veniva spiegata come caos per l'insieme disordinato e indeterminato degli elementi materiali, contrapposto al cosmos che rappresenta l'ordine, come si può osservare fra i miti delle varie Teogonie fra cui la più famosa quella scritta da Esiodo.<sup>1</sup> Oggi la parola caos ha invece un significato decisamente meno generale. Il caos, anzi il caos deterministico, è la scienza che studia i sistemi dinamici che esibiscono una sensibilità esponenziale rispetto alle condizioni iniziali. O, in termini più rigorosi, è la scienza che studia la dinamica dei sistemi non lineari. Questo cambio di paradigma ha avuto inizio verso la fine del XIX secolo, quando uno studioso nell'ambito della meccanica classica, Henri Poincaré, osservò e analizzò la possibilità di un comportamento fortemente irregolare di alcuni sistemi

---

<sup>1</sup>Sofia Ranzato. "L'origine del mondo divino Una lettura di Esiodo". ita. Thesis. Facoltà di Lettere e Filosofia C. d. L. S. in Scienze dell'Antichità, 2006/2007, p. 10.

dinamici studiando il problema dei tre corpi, che lo portò alla scoperta del caos matematico.<sup>2</sup> La scoperta di Poincaré segnerà un punto di svolta che verrà ripreso poi solamente negli anni '50 del secolo successivo dal meteorologo Edward Norton Lorenz, quando nel '63 Lorenz pubblicherà il suo articolo *Deterministic Nonperiodic Flow*<sup>3</sup>, nel quale tratta del comportamento caotico in un sistema semplice e deterministico, con la formazione di un attrattore strano, e aprendo di fatto ufficialmente la strada quella che diverrà poi la Teoria del Caos, mostrando come in realtà all'interno dell'ordine emergano forme di disordine, e all'interno del disordine siano presenti forme di ordine.

## 1.1 La Cibernetica

Tornando a questo complesso scenario del XX secolo, al termine della seconda guerra mondiale e qualche decennio prima della formulazione della Teoria del Caos, uno dei più importanti avanzamenti nelle scienze che contribuì alla formazione del primo paradigma della complessità, risiedette nell'introduzione della cibernetica.

La cibernetica è la scienza che studia i principi astratti di organizzazione nei sistemi complessi, ed ebbe inizio durante gli anni della seconda guerra mondiale, merito del fisico e matematico Norbert Wiener. Nel '40 Wiener insieme ad altre ad altre prominenti figure provenienti da diversi ambiti scientifici, come Ross Ashby, Margaret Mead, Gregory Bateson, Heinz von Foerster, partecipano ad una serie di conferenze multidisciplinari chiamate "The Macy Conferences", inizialmente intitolate come "Feedback Mechanism in Biology and the Social Sciences" con l'obiettivo comune di andare a definire gli ambiti di interesse della nuova scienza. A seguito nel '48, ispirato dalla meccanica ed i suoi risultati conseguiti durante la guerra e contemporaneamente dallo sviluppo della teoria della comunicazione (o informazione)

---

<sup>2</sup>June Barrow-Green. *L'Ottocento: astronomia. Il problema dei tre corpi e la stabilità del Sistema solare*. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/1-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare\\_%28Storia-della-Scienza%29/#:~:text=La%20formulazione%20del%20problema%20dei,il%20moto%20negli%20istanti%20successivi..](https://www.treccani.it/enciclopedia/1-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare_%28Storia-della-Scienza%29/#:~:text=La%20formulazione%20del%20problema%20dei,il%20moto%20negli%20istanti%20successivi..) (accessed: 03.11.2022).

<sup>3</sup>Edward Lorenz. "Deterministic Nonperiodic Flow". In: *Journal of Atmospheric Sciences* 20.2 (1963), pp. 130–148.

di Claude Shannon, con la volontà di sviluppare una teoria generalizzata dei principi di organizzazione e controllo nei sistemi emersi durante le conferenze, pubblicherà un libro: *La cibernetica, controllo e comunicazione nell'animale e nella macchina*; in cui definiva l'ambito di interesse e gli obiettivi della nuova disciplina inaugurando anche l'uso del nuovo termine da lui coniato. A seguito di questo libro che riscuoterà un importante successo, le conferenze presero il nome di "Cybernetics, Circular Causal, and Feedback Mechanism in Biological and Social Systems",<sup>4</sup> riconoscendo Wiener come la principale figura di spicco della nuova scienza.

In particolare come evidenziato fino ad ora dalla sua natura multidisciplinare, la cibernetica non si interessa di individuare in cosa consistano questi sistemi, ma più che altro comprenderne il loro funzionamento.

Le fortunate premesse iniziali della cibernetica risiedevano in una convinzione da parte di questi scienziati provenienti dai differenti ambiti disciplinari, che esistesse uno "schema processuale" comune ad organismi viventi e macchine, rintracciato attraverso una ricerca uniforme garantita dall'utilizzo di un metodo "sintetico" e "comportamentale". L'aspetto meta-disciplinare del pensiero cibernetico, esplicito nella sua fondazione, godrà però di una fama più popolare che consegnerà in importanti realizzazioni tra l'inizio degli anni '60 e la metà del '70, grazie al contributo degli scienziati Heinz von Foerster, Margaret Mead, Gregory Bateson, e altri; proprio in quel periodo si compieranno ulteriori passi fondamentali che porteranno il pensiero sistemico verso un consolidamento in una scienza più concreta, uno dei casi più rilevanti in questo senso è il passaggio da una "Cibernetica di primo ordine" a una "Cibernetica di secondo ordine", anche chiamata come "la cibernetica dei sistemi di osservazione", questa distinzione si deve a Heinz Von Foerster, che è stato uno scienziato e filosofo austriaco noto per i suoi contributi alla cibernetica e alla teoria della comunicazione.<sup>5</sup> La differenza fra cibernetica di primo e secondo ordine

---

<sup>4</sup>Luca Fabbris e Alberto Giustiniano. *CFP18 cibernetica, sistemi, teorie, modelli*. URL: <https://philosophykitchen.com/2022/03/cfp18-cibernetica-sistemi-teorie-modelli/>. (accessed: 03.11.2022).

<sup>5</sup>Bernard Scott. "Second-order cybernetics: an historical introduction". In: *Kybernetes* 33.9.10 (2003), pp. 1365–1378. DOI: [doi:10.1108/03684920410556007](https://doi.org/10.1108/03684920410556007). URL: <https://sites.ufpe.br/moinhojuridico/wp-content/uploads/sites/49/2021/10/Ciber-2b-22-out.-second-order->

risiede principalmente nel fatto, che mentre nel primo periodo lo studioso di cibernetica (di primo ordine) studiava un sistema da un punto di vista passivo, da quello dell'osservatore dei comportamenti del un sistema, senza tener conto della propria influenza nei casi di studio. Il ciberneticista di secondo ordine invece, è consapevole della propria influenza all'interno del sistema, riconoscendo il sistema come un agente con cui interagire e riconoscendo esso stesso come agente nell'interazione col sistema, e di conseguenza proprio come spiega Heinz Von Foerster nei suoi scritti, di come la realtà per come la percepiamo possa esistere soltanto se si tiene conto del fatto che la sua rappresentazione è fortemente dipendente dall'esistenza di un ambiente che racchiude il sistema stesso.<sup>6</sup> In altre parole, l'ambiente non esiste in sé, ma viene creato dalla relazione tra l'osservatore e ciò che viene osservato. Questa teoria ha importanti implicazioni per la cibernetica, poiché sottolinea l'importanza dell'interazione tra il sistema e il suo ambiente nella comprensione del funzionamento del sistema stesso. Inoltre, sottolinea l'importanza di considerare la prospettiva dell'osservatore nell'analisi dei sistemi e dei processi. L'organizzazione ed eventuale disorganizzazione di alcun sistema può esistere se questo non viene studiato prendendo in considerazione l'ambiente che lo racchiude. A partire da queste importanti premesse, e dalle conseguenze che la cibernetica ha avuto in tutti gli ambiti delle scienze, è doveroso notare che questa ha avuto un ruolo centrale nello sviluppo di molti studi scientifici e la nascita di nuovi ambiti come: l'intelligenza artificiale, la teoria del caos, la teoria della catastrofe, la teoria dei controlli, la teoria generale dei sistemi, la robotica, la psicologia, le scienze sociali, e molto altro (perfettamente in accordo con la sua natura multidisciplinare).

## 1.2 Le Cibernetiche nella musica

All'inizio degli anni '60 in seno alla nascita delle scienze complesse, l'uso di sistemi di feedback e la rilevanza dei circuiti informativi chiusi nelle strutture organizzate

---

cybernetics.pdf.

<sup>6</sup>Heinz Von Foerster. *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*. en. Vol. 2. 1. 2005. DOI: 10.29173/cmplct8737. URL: <https://journals.library.ualberta.ca/complicity/index.php/complicity/article/view/8737> (visited on 11/22/2022).

ha goduto di uno slancio popolare anche nel mondo della musica e più in generale dell'arte.

Tuttavia come vedremo, a parte casi popolari di deliberate dichiarazioni formali da parte degli artisti, non bisogna pensare ai lavori che andremo a citare come atti pionieristici che sanciscono una volta per tutte la nascita della cibernetica in musica, ma è più corretto pensare alle questioni sistemiche come ad una sensibilità comune condivisa in un certo periodo da diversi autori provenienti da diverse parti del mondo, che sono stati influenzati e si sono influenzati a vicenda con le stesse idee per un interesse condiviso riguardo le teorie cibernetiche di Weiner e delle Macy Conferences.

In Europa nel '51, Herbert Eimert, Werner Meyer-Eppler e Robert Beyer di comune accordo con il direttore della NWDR, Hanns Hartmann, attrezzarono e crearono quello che divenne il primo studio per la Musica Elettronica.<sup>7</sup> Questo divenne lo studio più influente al mondo durante gli anni '50 e '60, con ospiti alcuni dei più importanti compositori contemporanei provenienti da tutta Europa, come Franco Evangelisti, Karlheinz Stockhausen, György Ligeti, Roland Kayn, Herbert Brün, Cornelius Cardew, e molti altri. In quel periodo il lavoro di ricerca condotto da Werner-Meyer Eppler, scienziato, musicista, fra gli ideatori e direttori dello studio di Colonia e direttore dell'istituto di fonetica all'università di Bonn, pone una certa attenzione in quelle che furono le prime teorizzazioni della teoria dell'informazione e della cibernetica, che porteranno l'autore alla scrittura di importanti testi di ricerca. Fra le altre cose Werner-Meyer Eppler nel '50 escogita un uso particolare del magnetofono, mediante retroazione (*Feedback*) fra le testine di riproduzione e registrazione escogita una forma di *Tape Delay*.<sup>8</sup> Dalle esperienze dello studio di Colonia ne usciranno molti compositori interessati alle teorie cibernetiche.

Un caso importante in questo scenario è quello del compositore Roland Kayn, Il

---

<sup>7</sup>Agostino Di Scipio. *Circuiti del Tempo Un percorso storico-critico nella creatività musicale elettroacustica e informatica*. it. N. 38. Lucca: Libreria Musicale Italiana, 2021. ISBN: 9788855430685.

<sup>8</sup>Di Scipio, *Circuiti del Tempo Un percorso storico-critico nella creatività musicale elettroacustica e informatica*.

progetto di musica cibernetica di Kayn ha ricevuto il suo impulso iniziale quando nel '53, ad allora giovane musicista e studente universitario, venne in contatto con il filosofo Max Bense professore all'Università Tecnica di Stoccarda. Subito dopo il suo primo incontro con Bense sempre nel '53, Kayn entrò in contatto con Herbert Eimert presso lo studio elettronico della Westdeutscher Rundfunk di Colonia. Roland Kayn era affascinato dal potenziale sonoro offerto dalle nuove tecnologie, ma trovava che l'estetica serialista dominante nello studio in quegli anni era per lui qualcosa di troppo restrittivo, esperienza che lo portò per i successivi dieci anni a concentrarsi principalmente sulla composizione strumentale e le applicazioni delle teorie cibernetiche in modo formale.<sup>9</sup> Sempre in quel periodo, sostanzialmente diverso e altrettanto importante è il caso di Franco Evangelisti, che dopo essersi avvicinato alla musica elettronica anche lui sotto la guida e su invito di Herbert Eimert allo studio elettronico della Westdeutscher Rundfunk di Colonia nel '56, iniziò le sue ricerche che dopo un anno e mezzo di intenso lavoro lo portarono al completamento della sua forse più importante composizione elettronica, *Incontri di fasce sonore*, trasmessa da Radio Colonia nel '57. Nel '59, Evangelisti è nuovamente in Italia, dove fu tra i promotori della Settimana Internazionale di Nuova Musica a Palermo. L'anno seguente, assieme ad altri musicisti fondò l'Associazione Nuova Consonanza, con lo scopo di diffondere "la musica contemporanea italiana e straniera con concerti convegni ed eventi di vario tipo. Dall'associazione nacque più tardi l'omonimo Gruppo di improvvisazione che allora veniva presentato come "il primo ed unico gruppo formato da compositori-esecutori" e che permise ad Evangelisti di mettere in pratica le proprie teorie sull'improvvisazione, riguardo queste citerà più volte deliberatamente in interviste, scritti, e altre documentazioni, il suo approccio sistemico/cibernetico in quelle che saranno le esperienze con il Gruppo.

Nel '60 si trasferisce a Roma Roland Kayn da vincitore del Prix de Rome, dove dal '64 assieme ad Aldo Clementi e Franco Evangelisti prende parte al Gruppo di im-

---

<sup>9</sup>Thomas W. Patteson. "The Time of Roland Kayn's Cybernetic Music". In: (), pp. 1–11. URL: <https://kayn.nl/wp-content/uploads/2016/12/The-Time-of-Roland-Kayns-Cybernetic-Music-Thomas-Patteson.pdf>.

provvisazione Nuova Consonanza del quale fece parte sino al '68, ed è in quel periodo che Kayn ispirato dalle teorie della cibernetica iniziò a sperimentare estensivamente con sistemi di autoregolazione basati su feedback loops, non più solo come modelli formali per composizioni strumentali ma anche come reti di generatori di segnale analogici.

Sempre negli anni '50 in Europa, uno dei primi artisti nella storia dell'arte ad evocare l'uso della cibernetica nei propri lavori è stato Nicolas Schoeffer con il suo ciclo di lavori "spazio-dinamici", in acronimo CYSP - Cybernetic Spatiodynamic. In particolare Schoeffer ha creato la prima installazione ad implementare meccanismi di auto-regolazione, il CYSP-1<sup>10</sup>, capace di essere sensibile all'ambiente esterno e a se stesso grazie ad una serie di tecnologie offerte dalla compagnia Philips (fotocellule e microfoni), questa prima scultura spazio-dinamica, è dotata di totale autonomia di movimento (viaggio in tutte le direzioni a due velocità) e di rotazione assiale ed eccentrica (messa in moto delle sue 16 lastre policrome pivotanti), ed era capace di reagire sonoramente a questi stimoli riproducendo una serie di registrazioni composte dal compositore francese Pierre Henry, collaboratore di Pierre Schaeffer ed insieme a lui figura centrale nella nascita della Musique concrète. Questa scultura è celebrata come una prima e prima opera di carattere cibernetico che è entrata nel mondo dell'arte.

cambiando continente e passando dall'Europa ad osservare cosa stava accadendo in America in quegli anni, troveremo tanti altri rilevanti atti pioneristici, come ad esempio quelli che sono stati i lavori di Louis e Bebe Barron. Louis e Bebe Barron furono due compositori e pianisti che si interessarono alla musica elettronica sin dal periodo della sua origine. Intorno al '50 i due si trasferirono al Greewitch Village a New York dove furono attivi in collettivi di musica sperimentale collaborando con persone come John Cage ed altri. I Barron trasformarono la loro casa in una specie di studio di musica Elettronica dove scrivevano soundtracks per film sperimentali.

---

<sup>10</sup>Dario Sanfilippo and Andrea Valle. "Feedback Systems: An Analytical Framework". In: *Computer Music Journal* 37.2 (2013), pp. 12–27. DOI: doi:10.1162/COMJa00176. URL: <https://direct.mit.edu/comj/article-abstract/37/2/12/94420/Feedback-Systems-An-Analytical-Framework?redirectedFrom=PDF>.

Per Louis e Bebe il grande passo arrivò nel '56, quando i due si ritrovarono a scrivere la soundtrack per il film: *Forbidden Planet*, questo sarà il primo film mainstream di Hollywood ad utilizzare una soundtrack composta solamente ed interamente da elettronica. L'elettronica di *Forbidden Planet* è stata costituita a partire da dei circuiti appositamente creati da Louis e Bebe, i due deliberatamente ispirati dalle teorie cibernetiche di Wiener dichiareranno:<sup>11</sup>

*What we did was pretty elementary: we would attach resistors and capacitors to activate these circuits... negative and positive feedback was involved - Wiener talks about all that. The same conditions that would produce breakdowns and malfunctions in machines, made for some wonderful music. The circuits would have a "nervous breakdown" and afterwards they would be very relaxed, and it all came through in the sounds they generated.*

I circuiti in retroazione erano destinati al corto circuito, e utilizzati appositamente come materiale per la generazione acustica di trame incise su nastro. Altri importanti compositori di quel periodo sono al lavoro su composizioni che sfruttano sistemi di Feedback, fra i più rilevanti: John Cage, David Tudor, Robert Ashley, Gordon Mumma e Steve Reich.<sup>12</sup>

Un secondo periodo costituito da un approccio sistemico più consapevole che inizia a tracciare la strada per un pensiero ecosistemico della composizione, in un certo senso si può affermare che inizi dal lavoro di Alvin Lucier, che nel '69 scriverà quello che sarà un brano emblematico per la cibernetica in musica *I'm sitting in a room*, è un altro brano importante per quelle che sono le logiche di interazione sistemiche fra uomo/macchina/ambiente che approfondiremo più avanti nel corso della tesi, e che proprio come nel passaggio da cibernetica di primo ordine a quella di secondo ordine di cui parla Heinz Von Foerster, viene sancita l'interazione sistemica dove

---

<sup>11</sup>Christina Dunbar-Hester. "Listening to Cybernetics: Music, Machines, and Nervous Systems, 1950-1980". en. In: *Science Technology e Human Values* 35.1 (2010), pp. 113-139. URL: <http://www.jstor.org/stable/27786196>.

<sup>12</sup>Sanfilippo and Valle, "Feedback Systems: An Analytical Framework".



il musicista l'ambiente e lo strumento divengono parti di un insieme complesso, il sistema stesso di *I'm sitting in a room* si osserva tramite l'ambiente nel corso della sua evoluzione, tracciando una storia di relazioni e interazioni con questo. Nel brano di Lucier, un performer recita in un microfono un testo che descrive il fenomeno che avverrà poco a poco, la voce recitante nel microfono viene registrata e poi riprodotta da altoparlanti posti nella stanza, il suono della registrazione riprodotta da questi altoparlanti viene poi registrato nuovamente durante la riproduzione da un secondo supporto, e l'operazione viene ripetuta in un in una casualità circolare di volta in volta fino alla fine dove rimarranno solo i contributi provenienti dalle frequenze di risonanza della stanza, dalla voce e dalla catena elettroacustica, dando vita nel loro insieme ad un processo molto lento di Feedback positivo dove la natura non lineare del processo e degli agenti porterà di volta in volta ad un risultato sempre differente. Lucier racconta di essere stato originariamente ispirato a creare *I Am Sitting in a Room* dopo aver partecipato a una conferenza al MIT, in cui Amar Bose, imprenditore, ingegnere elettrico e tecnico del suono, descrisse come testava le caratteristiche degli altoparlanti che stava sviluppando, ri-diffondendo l'audio prodotto nella stanza e poi riprendendolo tramite i microfoni, in quella che è la stessa casualità circolare ripresa ed utilizzata artisticamente da Lucier.<sup>13</sup> Dopo l'esperienza di Lucier, Nicolas Collins, formatosi nella tradizione compositiva sperimentale con Alvin Lucier, David Behrman e David Tudor, con i quali ha lavorato a stretto contatto, nel '74 compone il brano *Pea Soup* mentre è studente alla Wesleyan University. In *Pea Soup* una rete auto-stabilizzante di circuiti analogici (originariamente tre Countryman Phase Shifter) sposta il tono del feedback elettroacustico su una frequenza di risonanza diversa ogni volta che questo si inizia a costruire. Il suono familiare del fenomeno è sostituito da schemi instabili che danno vita ad un raga site-specific rispecchiando la personalità acustica della stanza.<sup>14</sup> Anche in questo lavoro appare chiaro come una certa sensibilità nei confronti del fenomeno di Feedback si stia avvicinando ad una

<sup>13</sup>Massachusetts Institute of Technology. *Alvin Lucier on "I am sitting in a room"*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=v9XJWBZBzq4>. (accessed: 04.11.2022).

<sup>14</sup>Nicolas Collins. "Pea Soup" – A History". In: (September, 2011), pp. 1–23. URL: <http://www.nicolascollins.com/texts/peasouphistoryOLD.pdf>.

logica più vicina a quella della cibernetica di secondo ordine. Per citare un'ultima esperienza americana rilevante, c'è infine il caso della Neural Synthesis di David Tudor. David Tudor nel '89 incontrò il progettista e designer Forrest Warthman dopo uno show a Berkeley, che lo introdusse all'idea di utilizzare reti neurali analogiche per combinare tutta la sua complessa attività live-electronics in un unico computer.<sup>15</sup> Uno dei risultati è apprezzabile nei CD's "Neural Synthesis", di cui in uno sono presenti delle importanti note di copertina di Warthman:

*This recording combines the art of music, the engineering of electronics, and the inspiration of biology. In it, David Tudor orchestrates electronic sound in ways analogous to our biological bodies' orchestration of consciousness... The neural-network chip forms the heart of the synthesizer. It consists of 64 non-linear amplifiers (the electronic neurons on the chip) with 10240 programmable connections. Any input signal can be connected to any neuron, the output of which can be fed back to any input via on-chip or off-chip paths, each with variable connection strength. The same floating-gate devices used in EEPROMs (electrically erasable, programmable, read-only memories) are used in an analog mode of operation to store the strengths of the connections. The synthesizer adds R-C (resistance-capacitance) tank circuits on feedback paths for 16 of the 64 neurons to control the frequencies of oscillation. The R-C circuits produce relaxation oscillations. Interconnecting many relaxation oscillators rapidly produces complex sounds. Global gain and bias signals on the chip control the relative amplitudes of neuron oscillations. Near the onset of oscillation the neurons are sensitive to inherent thermal noise produced by random motions of electron groups moving through the monolithic silicon lattice. This thermal noise adds unpredictability to the synthesizer's outputs, something David found especially appealing. The synthesizer's performance console controls the neural-network chip. R-C circuits, external feedback paths and output channels. The chip itself is not used to its full*

---

<sup>15</sup>Mathis Nitschke. *Analog Neural Synthesis*. URL: <https://mlure.art/analog-neural-synthesis/>. (accessed: 04.11.2022).

*potential in this first synthesizer. It generates sound and routes signals but the role of learner, pattern-recognizer and responder is played by David, himself a vastly more complex neural network than the chip* Neural Synthesis No.6-9 liner notes by

Forrest Warthman, Palo Alto 1995<sup>16</sup>

Ad oggi svariati compositori a partire dalle trame delineate dalle scienze complesse e dai lavori citati, operano nell'ambito della musica elettronica con un approccio sistemico, fra questi molti sono italiani.

Ci sono casi particolarmente rilevanti come quello di Agostino Di Scipio, uno dei maggiori compositori con più contributi all'attivo, da prima con i suoi studi sul caos e sui sistemi complessi in modo formale ad inizio anni '90<sup>17</sup>, e poi verso metà anni '90 con l'inizio del lavoro sulla composizione ecosistemica con il suo ciclo di lavori - ecosistemico udibile, che come vedremo a seguito riprende quelle che sono le tematiche della cibernetica di secondo ordine dove il sistema si osserva tramite l'ambiente circostante. O dell'(ex)allievo di Di Scipio, Dario Sanfilippo, compositore e ricercatore con all'attivo recenti importanti pubblicazioni e lavori nell'ambito dei sistemi autonomi DSP in musica, tematiche che rimandano alle proposte che vanno dai Barron fino alla Neural Synthesis di Tudor, seppure in forme più primordiali nel caso di questi ultimi, così come Di Scipio nella sua sensibilità ecosistemica sembra rimandarci ai lavori pionieristici di Lucier e Collins.

C'è poi il caso di Michelangelo Lupone, che a sua volta è stato maestro di Agostino Di Scipio, che con i suoi lavori di Feedback sulla materia è arrivato durante il corso degli anni '90 allo sviluppo pionieristico di strumenti aumentati in Feedback, quale ad esempio il Feed-Drum, innovativo strumento elettroacustico a percussione. E ci sono poi anche altri compositori internazionalmente riconosciuti con all'attivo composizioni e ricerche rilevanti in lavori con il Feedback e i sistemi autonomi, come: Andrea Valle, Giuseppe Silvi, Simone Pappalardo.

---

<sup>16</sup><http://www.lovely.com/albumnotes/notes1602.html>.

<sup>17</sup>Agostino Di Scipio. "Composition by exploration of non-linear dynamic systems". In: *ICMC Glasgow 1990 Proceedings*. C.S.C. University of Padova, 1990, pp. 324-327.

Parlando delle questioni italiane e tornando all'origine delle questioni romane, nonostante la natura frammentaria e sottile della musica elettronica romana, in effetti è comunque possibile individuare e tracciare una sorta di collegamento che ci porta sin dalle prime suggestioni sulla cibernetica avute da Evangelisti con gli altri membri di Nuova Consonanza, fino ad oggi. Michelangelo Lupone ad esempio che abbiamo citato per i suoi lavori e per esser stato maestro di Agostino Di Scipio, studia dal '70 al '79, sotto la guida di Domenico Guaccero per la Composizione e Giorgio Nottoli per la Musica elettronica. Domenico Guaccero è a sua volta fra i fondatori, insieme ad Evangelisti ed altri compositori quali Aldo Clementi, Daniele Paris, Francesco Pennisi, dell'Associazione di Nuova Consonanza. Walter Branchi, noto anche lui per aver preso parte al Gruppo di Improvvisazione Nuova Consonanza, durante gli anni '80 darà vita a degli incontri internazionali su Musica complessità, che radunavano compositori e scienziati di tutto il mondo. Di Scipio e Lupone in questo scenario, si sono interessati alle questioni sul Feedback in contemporanea portando avanti il discorso in maniera indipendente intorno alla fine degli anni '80, Di Scipio nel 1989, scrive gli appunti a base di semplici funzioni iterate da cui nacque poi il suo brano *Fractus*, per viola e supporto digitale. Lupone dal 1988, fonda ed inizia con il Centro Ricerche Musicali il suo lavoro con team multidisciplinari di ricerca, con la collaborazione di persone come Lorenzo Seno direttore scientifico del CRM. Tutto questo mette in luce come le problematiche relative alla cibernetica e i sistemi complessi siano stato un argomento molto sentito e vivo nella prassi della composizione elettroacustica in tutto il mondo.

### 1.3 Il Feedback

Il Feedback, nella sua espressione inglese, unisce le due parole *Feed* che significa 'alimentare', e *Back* 'all'indietro'. Il primo a introdurre il concetto di Feedback nella letteratura scientifica è stato lo scienziato inglese James Clerk Maxwell, il quale nel 1868 pubblicò uno studio<sup>18</sup>. sui sistemi automatici in cui metteva in evidenza come

---

<sup>18</sup>Mr. J. C. Maxwell. "on Governors". In: (1868).

essi fossero in grado di correggersi in maniera automatica proprio grazie al *ritorno di informazione*. Maxwell anticipò quel concetto che arriverà a maturazione solo molti anni dopo con la nascita della Cibernetica con Norbert Wiener, che diede il nome di Cibernetica al campo dei suoi studi proprio in onore del lavoro di Maxwell - dal greco *kybernetiké téchne* sta per ‘arte del governare’, a cui si collega il termine inglese *governor* dell’articolo di Maxwell. In italiano il significato del termine può essere tradotto come ‘retro-alimentazione’ o ‘retro-iniezione’ che ne preservano in qualche modo il significato originale della lingua inglese, tuttavia in molti preferiscono conservare la parola inglese Feedback.

Nella teoria cibernetica, e in genere in tutte le discipline scientifiche che usano approcci di tipo sistemico, quando il Feedback ha un effetto risultante dall’azione di un sistema (meccanismo, circuito, organismo ecc.) che si riflette sul sistema stesso per variarne e correggerne opportunamente il funzionamento, questo si può chiamare Retroazione.

Esistono sostanzialmente due tipi di retroazione nel Feedback: *positiva* e *negativa*. Il Feedback è generalmente detto negativo quando agisce in modo che il sistema funzioni sempre allo stesso modo, entro margini controllati di tolleranza e convergendo verso un comportamento, viene invece detto positivo quando tende a mantenere il sistema in uno stato di continuo cambiamento. Tuttavia queste definizioni possono variare da caso a caso, e nel corso della tesi ritorneremo su questi temi riguardo le possibili proprietà del Feedback, affrontando queste di volta in volta nei casi specifici. Per anticipare da ora alcuni esempi: ci basti pensare che nel controllo di un sistema complesso come può essere quello del Feedback elettroacustico, in un modello dove si possono introdurre delle linearità tramite retroazione all’interno del ciclo di feedback, potrebbe voler dire costringere la complessità a dei comportamenti più prevedibili, puntando uno stato di convergenza verso l’equilibrio.

Un esempio conosciuto è quello dell’intonazione del fenomeno Larsen, che da un comportamento complesso della sorgente e del ricettore, crescendo verso la saturazione per autoscillazione giunge infine ad uno stato stazionario, di stabilità. Mentre in-

trodurre delle non linearità nel sistema tramite la retroazione, al contrario, può voler dire portare il sistema verso comportamenti non più prevedibili, in divergenza dall'equilibrio dello stato stazionario, e in alcuni casi verso quella che viene chiamata la soglia del caos. Questi due tipi di comportamento possono essere ottenuti per l'appunto sia velocizzando che rallentando questi processi in maniera fortemente dipendente dal caso specifico. Un secondo esempio esemplare, è invece quello dei filtri digitali audio, pensati come un valido strumento di contrasto o avallamento rispetto a questo tipo di comportamenti, dove se si allineano le fasi si creano dei poli, mentre se si disallineano si punta generalmente alla complessità del sistema. Riguardo i filtri digitali basti pensare anche agli algoritmi di Modellazione Fisica degli strumenti, come ad esempio quello famoso di Karplus-Strong. Di fatto più in generale, la storia delle tecnologie elettroacustiche ha da sempre incorporato il principio del Feedback sin dalle sue origini e da prima della nascita della Cibernetica. Possiamo pensare a tecnologie come il triodo, chiamato inizialmente valvola audion di Lee De Forest, o i circuiti di feedback negativo - negative feedback amplifier - di Harold Black<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup>H.S. Black. "Stabilized Feed-Back Amplifiers". In: *ALEE. committee on communication* (1933).

## 2 Ecosistemi Udibili

Uno degli esiti musicali più importanti che ha portato con sé il paradigma della complessità, riguarda essenzialmente l'aver smesso di scrivere musica per strumenti interattivi con cui farla (e viceversa), ed esser passati invece al comporre le interazioni tramite gli strumenti.

Da un punto di vista più generalizzato, Heinz Von Foerster in tal senso sviluppò una teoria dell'informazione secondo cui l'informazione è un costrutto relazionale, e non solo un singolo oggetto o un solo segnale, e che di conseguenza la quantità di informazione in un sistema è determinata quindi dalla sua capacità di generare varietà. Le implicazioni e le conseguenze di questo pensiero applicato alla musica sono enormi. Nella nostra tradizione musicale occidentale, nell'insieme delle parole: Sistema Tonale, che sta a significare "quell'insieme delle regole di organizzazione ed uso dei suoni maggiormente utilizzati per produrre musica" (sempre rimanendo nel contesto della tradizione musicale Occidentale), è frequente che passi in secondo piano la parola sistema, che assume invece un significato centrale nel contesto di questa tesi; se si pensa che di conseguenza passa in secondo piano l'insieme di quelle relazioni che compongono nella sua interezza un sistema, di cui parla Von Foerster, si riduce la pratica musicale ai minimi termini. Non è un caso che molti compositori nel corso del XX Secolo, siano passati non solo al comporre i sistemi stessi con cui fare la propria musica, ma al comporre anche le interazioni. Si pensi ai sistemi formalizzati come partiture da Iannis Xenakis, John Cage, o Roland Kayn, arrivando fino alle partiture comportamentali come quelle di Domenico Guaccero e in generale del contesto della Roma del dopoguerra, per concludere con lavori di Karlheinz Stockhausen come *Plus-Minus*, dove i processi sono udibili. Tornando al tema principale, come accennato nell'abstract, le interazioni che ho ritenuto importante affrontare all'interno dei sistemi creati dai compositori cibernetici sono di due tipi: di sistemi che interagiscono con l'ambiente circostante appartenente al mondo fisico, e di sistemi che interagiscono con il proprio ambiente nel mondo digitale. Prima di entrare nel merito del primo caso qui, è doveroso spendere ancora qualche

parola su cosa si intenda per ambiente.

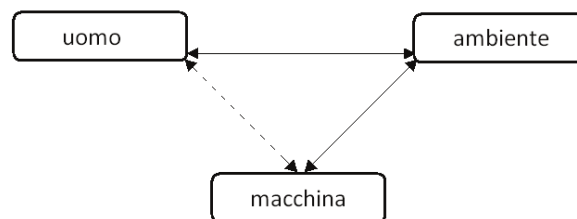
Nessun sistema è separabile e isolabile dall'ambiente circostante, a prescindere dal fatto che il suo spazio vitale, sia nel mondo fisico o digitale. Proprio come ha mostrato Heinz Von Foerster non si può parlare di auto-organizzazione se non ci si riferisce essenzialmente a un ambiente che racchiuda il sistema al suo interno. E nella pratica musicale, la sensibilità nel comporre le interazioni è spesso lontana dall'idea del voler interagire con una consapevolezza effettiva del puntare ai cambiamenti di stato all'interno di un sistema con cui si interagisce, e a maggior ragione viene trascurata la possibilità di interagire con sistemi che abbiano la capacità di auto-osservarsi non dipendendo più direttamente dal controllo dell'esecutore secondo delle modalità prettamente lineari, ma dall'ambiente, con la capacità di guardare al proprio stato interno per creare autonomamente le interazioni. In particolare, nei sistemi auto-osservanti quello che si manifesta quando un sistema entra in interazioni non distruttive con il proprio ambiente circostante, che coincide nella sostanza anche nel suo spazio vitale, è un Ecosistema.

In tal senso, i lavori del ciclo Ecosistemico Udibile di Agostino di Scipio, trovano fondamento a partire da fenomeni e relazioni che possono esistere e manifestarsi solamente nell'ambiente circostante da cui prende vita il sistema, che nel suo caso diventa proprio lo spazio acustico reale. Lavori come lo studio sul Feedback, lo studio sul rumore di fondo, lo studio sulle risposte all'impulso, o lo studio sul silenzio, sono nella loro essenza dei sistemi che hanno come principio nella loro morfogenesi, un determinato comportamento appartenente allo spazio acustico reale, delimitato in questi studi da una stanza che ne racchiude al suo interno tutti gli agenti e le relazioni possibili, per costruirne una storia di relazioni dove il sistema si osserva attraverso lo spazio fisico, (ambiente) e si manifesta e vive solo attraverso di esso. In questo senso l'interprete, lo spazio, e gli ascoltatori, divengono essi stessi parte integrante del sistema, dove l'ascolto, diviene anche esso parte dell'insieme delle cose e delle relazioni che lo costituisce.



## 2.1 L'interazione Uomo-Macchina-Ambiente

Qual'è dunque l'esigenza alla base del comporre le interazioni invece che limitarsi al comporre musica per strumenti interattivi? Superare la classica relazione uomo-macchina dominante nella tradizione musicale, iniziando a pensare invece allo sconfinato universo delle nuove possibilità della complessità. Secondo Agostino Di Scipio, questo avviene in primo luogo grazie alla possibilità che la macchina possa rappresentarsi senza mediazione umana, e attraverso l'ambiente circostante,<sup>20</sup> e dunque poi alla possibilità di stabilire un flusso di relazioni macchina-ambiente. Consentendo in secondo luogo al musicista e performer la possibilità di potersi aprire ad un flusso di relazioni complesso fra uomo-macchina-ambiente dove le tre sono fortemente connesse e interdipendenti l'una dall'altra.



Interazione Uomo-Macchina-Ambiente

*la mossa decisiva è: passare da un lavoro che mira a usare mezzi interattivi per creare forme sonore desiderate ad un lavoro che mira a creare le interazioni desiderate e ad ascoltarne le tracce udibili. Nel secondo caso, si tratta di progettare, implementare, e rendere operativo un reticolo di componenti interconnesse il cui comportamento sonoro emergente si può chiamare musica.*<sup>21</sup>

La modalità con cui andrò a discutere in questo capitolo la composizione di interazioni ecosistemiche, è ponendo il focus su un lavoro di Agostino Di Scipio,

<sup>20</sup>Agostino Di Scipio. “Polveri Sonore - Una prospettiva ecosistemica della composizione”. it. In: *La Camera Verde* (2014). Publisher: La Camera Verde, 17–42 Pages. (Visited on 11/22/2022).

<sup>21</sup>Di Scipio, “Polveri Sonore - Una prospettiva ecosistemica della composizione”.

l'Ecosistemico Udibile n.2, studio sul Feedback. Partendo dalla partitura e dai suoi scritti, ed implementando e analizzando il ruolo ed il compito dei singoli agenti all'interno del sistema che compongono nella loro totalità l'intero ecosistema del brano.

## 2.2 Il Meccanismo LAR

Il Feedback elettroacustico, che abbiamo già detto esser stata una delle risorse fondamentali dei primi compositori cibernetici, è la condizione di partenza su cui Agostino Di Scipio opera per la costruzione dei suoi Ecosistemi Udibili. Addentrandoci ora verso una spiegazione più tecnica del Feedback elettroacustico, possiamo citare una definizione che Di Scipio ha esposto in un suo articolo pubblicato presso la rivista Online: ECHO dell' Orpheus Institute, in Ghent.<sup>22</sup>

*A condenser microphone (M1) and a dynamic loudspeaker (L1) stand in the performance place (S), few or several meters apart, maybe not too far from walls (or curtains, or other larger surfaces). They are connected (through one or more amplification stages) to realize a very basic electroacoustic chain:  $M1 \rightarrow L1 \rightarrow S$ .*

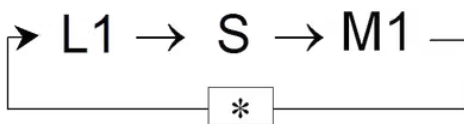
*There's no sound M1 should capture, though, no sound source save the minimal, barely audible turbulence of the background noise, in a situation of 'silence'. This 'sound-of-nothing' is amplified and heard through L1, whence it comes back in S.*

*If amplification suffices, the L1 sound feeds back into M1 and the chain design closes onto itself, making a 'reinjection' circuit – a Feedback loop. The amplitude level, the transductive technical features of M1 and L1, their relative distance, the distance from walls, etc. – all of that (and much more) sets the actual Feedback loop gain. With not-too-high gain levels, what is engendered is an audible nuisance, a kind of 'halo': the sound reinjection decays more or less rapidly, in a kind of badly sounding, spectrally uneven reverb effect. With higher gain levels, the loop*

---

<sup>22</sup>Agostino Di Scipio. *A Relational Ontology of Feedback*. en. Jan. 2022. DOI: 10.47041/TKUL7223. URL: <https://echo.orpheusinstituut.be/article/a-relational-ontology-of-feedback> (visited on 11/22/2022).

*eventually enters a self-oscillatory regime, it may ‘ring’ or ‘howl’, as is often said. Because of the iterated reinjection, the barely audible but spectrally wide background noise accumulates in the loop and finally (quickly) yields an increasingly louder sustained sound of narrower spectrum – this is often heard as a peaking tone of definite pitch, or a tone cluster. That’s the Larsen effect: a self-sustaining Feedback resonance occasioned by a positive Feedback loop (FB+) (‘positive’ here means greater than unit gain).*



Schema  $M1 \rightarrow L1 \rightarrow S$

L’effetto Larsen: (dal nome del fisico Søren Absalon Larsen che per primo ne scoprì il principio), detto anche Feedback elettroacustico, come abbiamo appena letto è un fenomeno di retroiniezione che tende idealmente ad un’accumulazione infinita, che viene poi limitata in realtà dalla saturazione dei sistemi che la generano (relativi alla potenza massima, all’amplificazione, nonché alla sensibilità dei trasduttori e all’elasticità delle membrane). Che può anche essere oltre al microfono, un pick-up di uno strumento musicale elettrico, come una chitarra o un basso, o un trasduttore di altra natura... Esistono anche principi di Feedback acustico oltre che elettroacustico, come la risonanza acustica o la risonanza per simpatia, che sono i principi su cui si basa il funzionamento di quasi tutti gli strumenti musicali. Tornando quindi all’articolo di Agostino Di Scipio:

*In common sound engineering practice, audible Feedback phenomena are a nuisance, a problem one should get rid of or substantially minimize. When direct level manipulation is not enough, one resorts to hard-limiting circuits, ‘Feedback killers’ and alike devices... In a different attitude, one may instead consider*

*Feedback as a resource, a deliberately designed sound-making mechanism one can play with.*<sup>23</sup>

per utilizzare il Feedback come una risorsa, ora appare chiara la necessità di un intervento sulla sua retroiniezione a guadagno infinito che porta alla saturazione dei sistemi coinvolti, in tal senso una delle possibili soluzioni è quella di poter far calcolare al computer in tempo reale tramite diverse tecniche di *amplitude following* la stima dell'ampiezza del segnale in ingresso, ed utilizzare conseguentemente la *feature extraction* come segnale di controllo in retroazione negativa al sistema di Feedback elettroacustico.

Questo tipo di meccanismi, provenienti dalla tradizione della Computer Music, appartiene all'ambito del *Music Information Retrieval* (MIR). Il MIR è un campo di ricerca multidisciplinare, che nell'area dell'informatica musicale si occupa di studiare i metodi e gli strumenti per l'estrazione dell'informazione musicale per mezzo di un computer.

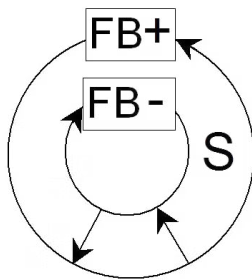
Oltre alle analisi in tempo differito, che sono tipicamente trattate dal MIR per le sue applicazioni di ricerca dove viene presa in considerazione l'intera lunghezza del segnale su cui si effettua un'analisi, oggi grazie ad alcuni linguaggi di programmazione adatti alle implementazioni per il tempo reale e utili alle performance in Live Electronics, è possibile operare anche alcune di queste analisi in tempo reale, fra cui per l'appunto la stima dell'ampiezza di un segnale in ingresso. L'applicazione in tempo reale di una *feature extraction* Nel contesto di una performance di Live Electronics, viene chiamata col nome di *Audio Information Processing*; tanto più un sistema è in grado di raccogliere informazioni riguardo il suo stato e il suo rapporto con l'ambiente, tanto più sarà in grado di processare "congitivamente" tramite l'informazione il suo prodotto.

Rimandando al prossimo capitolo approfondimenti più dettagliati riguardo il tema dell'*Audio Information Processing*, mi fermerò per il momento a discutere nel dettaglio alcuni fondamentali meccanismi presi da questo brano che sono paradigmatici,

---

<sup>23</sup>Di Scipio, *A Relational Ontology of Feedback*.

come il singolo meccanismo di controbilanciamento del guadagno del fenomeno di Feedback elettroacustico, che viene chiamato da Agostino Di Scipio col nome di LAR: *Audio Feedback with Self-regulated Gain*, e che può essere implementato in DSP in diverse modalità e configurazioni, ognuna con le sue diverse caratteristiche e che porta a differenti esiti.



Schema del meccanismo LAR

Ci sono in effetti diversi modi per ottenere una *feature extraction* in tempo reale capace di realizzare un algoritmo di controbilanciamento del Feedback in tempo reale. Alcuni di questi metodi possono riguardare controbilanciamenti applicati nel dominio della frequenza, con tecniche di filtraggio automatizzate (adattive) che hanno il compito di eliminare dallo spettro la presenza dell'autoscillazione prodotta dal Larsen *Larsen Suppressors*, o come nel nostro caso d'interesse possono riguardare controbilanciamenti in ampiezza automatizzati, che non permettano al Feedback di avere un guadagno troppo troppo elevato e giungere conseguentemente allo stato di saturazione del sistema. Algoritmi di *amplitude-following* possono essere implementati con la media *RMS*, con finestre variabili o fisse, filtri *Peakholder* che mantengano il valore di picco, o di altra natura.

Tratterò ora una parte più operativa, discutendo l'implementazione di alcune di queste tecniche nel linguaggio di programmazione FAUST (Grame), che è uno dei linguaggi di programmazione che consente di fare *Audio Information Processing* in tempo reale. Faust è l'ambiente in cui ho scritto i codici di tutti i lavori trattati in questa tesi e le relative compilazioni, diagrammi e softwares.

2425

Il modo più semplice per mantenere l'effetto Larsen in uno stato stazionario, è attraverso un valore costante ricavato dalla crescita del segnale in ingresso che controbilanci l'ampiezza del circuito di Feedback, come in figura del meccanismo LAR; la stima di questa costante avviene tramite un algoritmo di analisi. Il modo più semplice per implementare un algoritmo di analisi di questo tipo è attraverso un *Peakholder* che nella sua forma basilare consiste in una finestra di campioni idealmente infinita IIR *Infinite Impulse Response*, che ha il compito di confrontare il valore assoluto del campione in ingresso con il suo precedente, il maggiore fra i due nella comparazione viene mandato sia in uscita che in ingresso in retroiniezione alla funzione stessa di comparazione, in questo modo si sfrutta un principio di Feedback per l'accumulazione del valore massimo, in un'analisi campione per campione.

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// Peak Max with IIR filter and max comparison
peakmax = loop
  with{
    loop(x) = \(y).(y , abs(x)) : max) ~ _ ;
  };

process = _ : peakmax;
```

Listing 1: Algoritmo del *Peakholder* ad 1 campione di ritardo

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");
```

<sup>24</sup>FAUST (Grame) (Functional Audio Stream), è un linguaggio di programmazione specifico per il Digital Signal Processing sviluppato da Yann Orlarey, Dominique Fober, e Stephane Letz nel 2002. Nello specifico, FAUST è un linguaggio di programmazione ad alto livello scritto in C++, che permette di tradurre delle istruzioni date e create appositamente per il digital signal processing (DSP), in un largo raggio di linguaggi di programmazione non specifici per il dominio dell'Audio Digitale.

<sup>25</sup><https://faust.grame.fr/>.

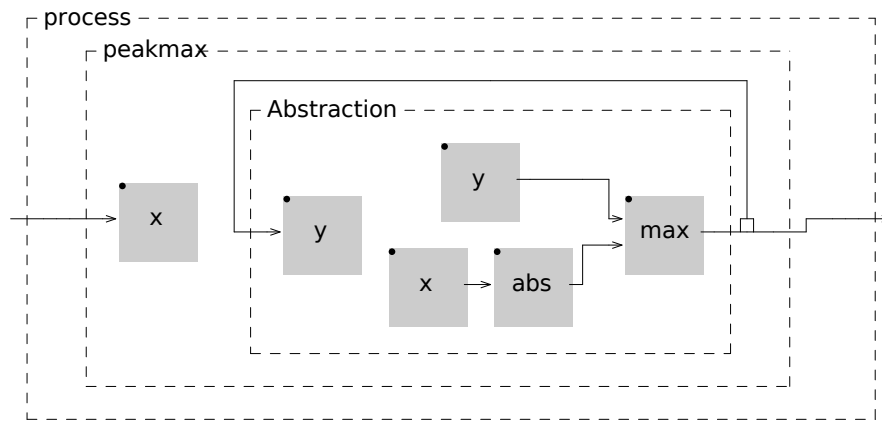
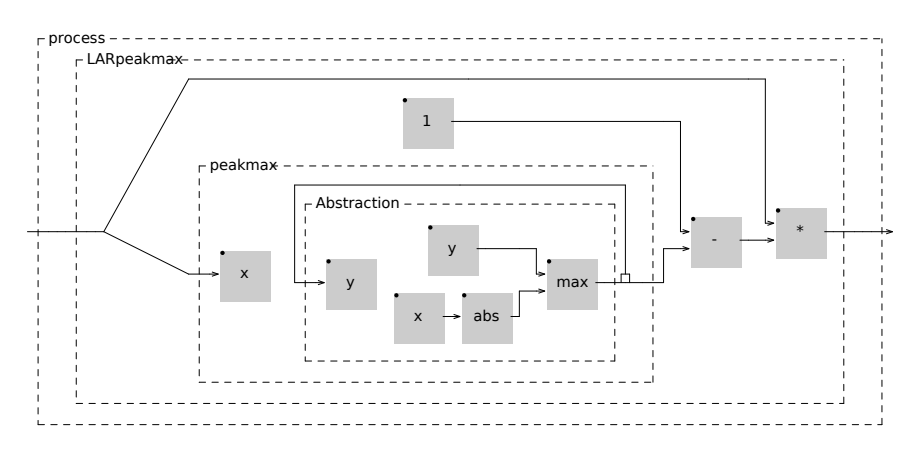
```

// LAR with Peak Max - IIR filter and max comparison
peakmax = loop
with{
    loop(x) = \ (y).((y , abs(x)) : max)~_ ;
};

LARpeakmax = _ <: (_ * (1 - (_ : peakmax)));

process = _ : LARpeakmax;

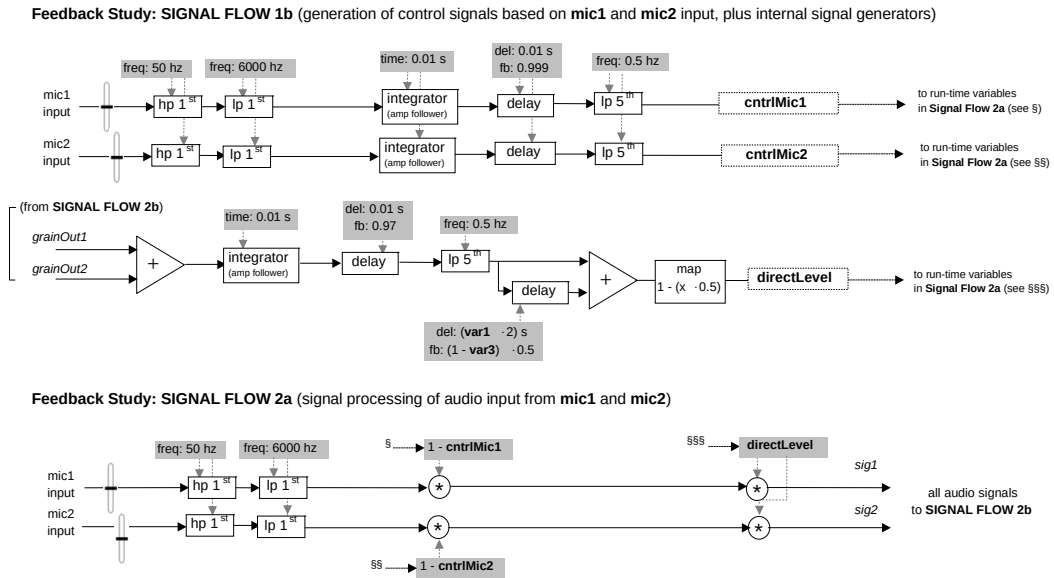
```

Listing 2: Algoritmo del LAR con *Peakholder* ad 1 campione di ritardoTopologia del *Peakholder* ad 1 campione di ritardoTopologia del LAR con *Peakholder* ad 1 campione di ritardo

Questo tipo di algoritmo presenta comunque alcuni problemi: non avendo una funzione di smoothing del segnale, si verificano problemi di segnali di differenza a

banda molto larga che possono generare aliasing e contributi spuri che tendono a permanere nel segnale complessivo. Oltre a questo, variazioni del comportamento del Feedback sono dipendenti dalla grandezza della finestra di osservazione, da eventuali coefficienti di Feedback inseriti nella retroazione del *Peakholder* e da altri tipi di implementazioni di tecniche *amplitude-following*. Per questi motivi si sceglie più frequentemente di utilizzare algoritmi adattivi, proprio come nel contesto del meccanismo LAR implementato nel Feedback Study, dove il comportamento adattivo dell'*amplitude-follower* è cruciale per la dinamica adattiva ed auto-regolatoria del sistema.

Il meccanismo LAR è essenzialmente nel cuore della live performance del Feedback Study, senza di questo non sarebbe possibile creare una condizione favorevole per procedere alle conseguenti trasformazioni del suono, ed ad una condizione favorevole affinché il sistema possa osservarsi tramite l'ambiente circostante. In tal senso vale la pena procedere osservando da vicino come viene richiesto in partitura di implementare questo meccanismo.



Estratto dalla partitura di *Audible Ecosystemics n.2/ Feedback Study (2003)*

revisione del 2017 - Agostino Di Scipio

Come scritto in partitura, è da notare in prima istanza come il microfono serva sia da sorgente per l'alimentazione del Larsen che da canale che riceve l'informazione



necessaria per il meccanismo auto-regolatorio, fin qui è tutto uguale rispetto allo Schema del meccanismo LAR. La sostanziale differenza consiste invece nell'aggiunta di un secondo microfono, quando viene introdotta questa condizione di disaccoppiamento si permette al meccanismo di essere più responsivo ai piccoli cambiamenti nell'ambiente e di rispondere diversamente agli stessi stimoli da diversi punti di osservazione del sistema. Nel SIGNAL FLOW 1b, due microfoni in ingresso (mic1 e mic2) vengono limitati in banda da un filtro Highpass ed un filtro Lowpass, rispettivamente fra 50 e 6000 Hz; dei due microfoni che escono dal cntrlMic1 e cntrlMic2 ne viene ricavato l'involuppo d'ampiezza tramite l'oggetto *integrator*, poi la curva di questo involuppo viene amplificata da un delay con Feedback, e ne viene estratta solamente la componente energetica presente fra i 0 e i 0.5Hz, limitandone il comportamento dell'oscillazione in quel range. Più in basso, nel SIGNAL FLOW 2a, i stessi microfoni (mic1 e mic2) sempre limitati in banda fra 50 e 6000 Hz, vengono attenuati in ampiezza dal segnale proveniente dal cntrlMic1 e cntrlMic2, realizzando nella sostanza una versione più sofisticata del controbilanciamento del meccanismo LAR. La parte restante: ovvero, la generazione del segnale directLevel e la conseguente attenuazione dei segnali audio in uscita (sig1 e sig2), consiste in un secondo controbilanciamento ricavato da un processo di granulazione attivo alla fine del sistema, finché il granulatore non produce segnale in output l'ampiezza dei segnali audio diretti in uscita dal sistema rimane inalterata.

L'involuppo d'ampiezza ricavato tramite l'oggetto *integrator*, in partitura viene richiesto come segue:

*integrator = returns the average absolute value over a specific time frame (one may use RMS measures, instead, or other amplitude-following methods); output range is*

$$[0, 1]$$

dove sostanzialmente, viene calcolato il valore assoluto di una specifica finestra temporale. A seguito una implementazione di questo tipo di algoritmo, dove *fi.pole*

è un semplice onepole filter nella forma:  $y(n) = x(n) + py(n - 1)$  e  $ma.SR$  una costante che rappresenta la frequenza di campionamento.

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

movingAverage(seconds, x) = x - (x @ N) : fi.pole(1.0) / N
  with {
    N = seconds * ma.SR;
  };

movingAverageRMS(seconds, x) = sqrt(max(0, movingAverage(seconds, x * x)));

process = movingAverageRMS(1);
```

Listing 3: Algoritmo d'integrazione a media mobile

In partitura viene indicato all'esecutore di poter utilizzare diversi metodi per poter calcolare il valore desiderato, come ad esempio l'RMS, tuttavia da analisi dirette secondo l'implementazione del compositore del sistema sul sistema hardware-software KYMA con il suo linguaggio di programmazione dedicato, i filtri utilizzati risultano essere di tipo IIR, così da avere nella sostanza una risposta più lenta rispetto ad altre implementazioni come ad esempio quella del calcolo a media mobile. La risposta del filtro nell'implementazione originale è di tipo *tau* e l'involuppo è assoluto.

Se si desidera utilizzare questo tipo d'implementazione, nella libreria di Faust è possibile trovarla nell'oggetto `an.abs_envelope_tau`. Nella loro interezza i meccanismi di `cntrlMic1` e `cntrlMic2`, e la conseguente attenuazione del segnale diretto proveniente da `mic1` e `mic2` possono essere quindi implementati in Faust come segue:

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");
```

```

LARmechanismAE2(mic1, mic2) = sig1, sig2
with{
    Mic_1B_1 = hgroup("Mixer", hgroup("Signal Flow 1B",
        gainMic_1B_1(mic1)));
    Mic_1B_2 = hgroup("Mixer", hgroup("Signal Flow 1B",
        gainMic_1B_2(mic2)));

    // cntrlMic - original version
    cntrlMic(x) = x : HP1(50) : LP1(6000) :
        integrator(.01) : delayfb(.01, .995) : LP5(.5);
    cntrlMic1 = Mic_1B_1 : cntrlMic;
    cntrlMic2 = Mic_1B_2 : cntrlMic;

    // from Signal Flow 2a
    Mic_2A_1 = hgroup("Mixer", hgroup("Signal Flow 2A",
        gainMic_2A_1(mic1)));
    Mic_2A_2 = hgroup("Mixer", hgroup("Signal Flow 2A",
        gainMic_2A_2(mic2)));
    micIN1 = Mic_2A_1 : HP1(50) : LP1(6000) *
        (1 - cntrlMic1);
    micIN2 = Mic_2A_2 : HP1(50) : LP1(6000) *
        (1 - cntrlMic2);
    // in the full system this this is a secondary counterbalance
    directLevel = 1;
    sig1 = micIN1 * directLevel;
    sig2 = micIN2 * directLevel;
};

process = LARmechanismAE2;

//-----
//-- LIBRARY -----
//-----
// selected objects from "aelibrary.lib"

```

```

//----- UTILITIES --
// limit function for library and system
limit(maxl,minl,x) = x : max(minl, min(maxl));

//----- FILTERS --
onePoleTPT(cf, x) = loop ~ _ : ! , si.bus(3)
with {
    g = tan(cf * ma.PI * (1/ma.SR));
    G = g / (1.0 + g);
    loop(s) = u , lp , hp , ap
    with {
        v = (x - s) * G;
        u = v + lp;
        lp = v + s;
        hp = x - lp;
        ap = lp - hp;
    };
};

LPTPT(cf, x) = onePoleTPT(limit(20000,ma.EPSILON,cf), x) : (_, !, !);
HPTPT(cf, x) = onePoleTPT(limit(20000,ma.EPSILON,cf), x) : (!, _, !);

// Order Aproximations filters - Outs
LP1(CF, x) = x :LPTPT(CF);
HP1(CF, x) = x :HPTPT(CF);
LP2(CF, x) = x :LPTPT(CF) :LPTPT(CF);
HP2(CF, x) = x :HPTPT(CF) :HPTPT(CF);
LP3(CF, x) = x :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF);
HP3(CF, x) = x :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF);
LP4(CF, x) = x :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF);
HP4(CF, x) = x :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF);
LP5(CF, x) = x :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF) :LPTPT(CF);
HP5(CF, x) = x :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF) :HPTPT(CF);

```

```

//----- INTEGRATOR -----
integrator(sec, x) = an.abs_envelope_tau(limit(1000,.001, sec), x);

//----- DELAYS -----
delayfb(delSec,fb,x) = loop ~ _ : mem
with{
    loop(z) = ( z * fb + x ) @(ba.sec2samp(delSec)-1) );
};

//----- INPUTS/OUTPUTS MIXER -----
gainMic_1B_1(x) = x *
    si.smoo( ba.db2linear(
        vslider("SF_1B_1 [unit:db]", 0, -80, 80, .001) ) ) <:
        attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
            vbargraph("VM1B1 [unit:dB]", -80, 80));
gainMic_1B_2(x) = x *
    si.smoo( ba.db2linear(
        vslider("SF_1B_2 [unit:db]", 0, -80, 80, .001) ) ) <:
        attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
            vbargraph("VM1B2 [unit:dB]", -80, 80));
gainMic_2A_1(x) = x *
    si.smoo( ba.db2linear(
        vslider("SF_2A_1 [unit:db]", 0, -80, 80, .001) ) ) <:
        attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
            vbargraph("VM2A1 [unit:dB]", -80, 80));
gainMic_2A_2(x) = x *
    si.smoo( ba.db2linear(
        vslider("SF_2A_2 [unit:db]", 0, -80, 80, .001) ) ) <:
        attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
            vbargraph("VM2A2 [unit:dB]", -80, 80));

VHmetersEnvelope = abs : max ~ -(1.0/ma.SR) :
    max(ba.db2linear(-70)) : ba.linear2db;

```

Listing 4: Algoritmo LAR nel Feedback Study

Gli algoritmi degli oggetti richiamati in questa implementazione sono provenienti dalla libreria scritta per questo brano. (sono stati riportati qui solo alcuni oggetti della libreria, per rendere eseguibile il codice appena scritto) Questo codice, che rappresenta il cuore del sistema, permette grazie al meccanismo adattivo una condizione favorevole per mantenere il Larsen in uno stato stazionario senza che giunga a saturazione, e consentendo al sistema di fatto una serie di nuove possibilità di elaborazione e trasformazione del suono.

## 2.3 Trasformazioni del suono

l'Ecosistemico Udibile n.2, studio sul Feedback, è costituito da due principali meccanismi di Feedback, uno nello spazio acustico reale, e uno interno al sistema.

Il suono proveniente dal meccanismo LAR appena discusso nella precedente sezione, passa per una serie di elaborazioni numeriche del segnale prima di essere restituito e diffuso dagli altoparlanti nello spazio acustico reale. Queste elaborazioni che vengono poi nuovamente intercettate dal microfono e riportate nel Sistema, consentono una continua ed incessante trasformazione del suono, che permette di cambiarne la morfologia ad ogni istante di tempo e in modo continuo, permettendo al sistema di avere "vita propria" ascoltandosi tramite l'ambiente anche senza il contributo apportato da un esecutore.

Le elaborazioni del suono interne al sistema sono a loro volta di due tipologie, *sample read* e *granular sampling*.

L'implementazione di questi due oggetti viene richiesta in partitura come segue:

*sample write = write samples into a memory buffer, in cyclical fashion*

*(wrap-around)*

*sample read = read samples off the memory buffer, with controls over frequency*

*shift ratios and actual buffer segment being read*

*granular sampling = read sample sequences off subsequent buffer memory chunks,*

*and envelopes the signal chunk with a pseudo-Gaussian envelope curve; the*

*particular implementation should allow for time-stretching (slower memory pointer increments at grain level), as well as for "grain density" controls and slight random deviations ("jitter") on grain parameters; no frequency shift necessary*

dove *sample write* rappresenta una tabella (buffer o dispositivo di memoria) che viene riscritta in modo continuo da un puntatore alla memoria; ciclicamente, e in tutta la sua interezza. La grandezza di questa tabella è data da una delle quattro variabili definite in partitura utilizzate per inizializzare il sistema, *var1* che definito in questo contesto sta ad indicare la grandezza della tabella in secondi. Le 4 variabili definite per inizializzare il sistema ad ogni performance sono le seguenti:

*var1 = distance (in meters) between the two farthest removed loudspeakers on the left-right axis.*

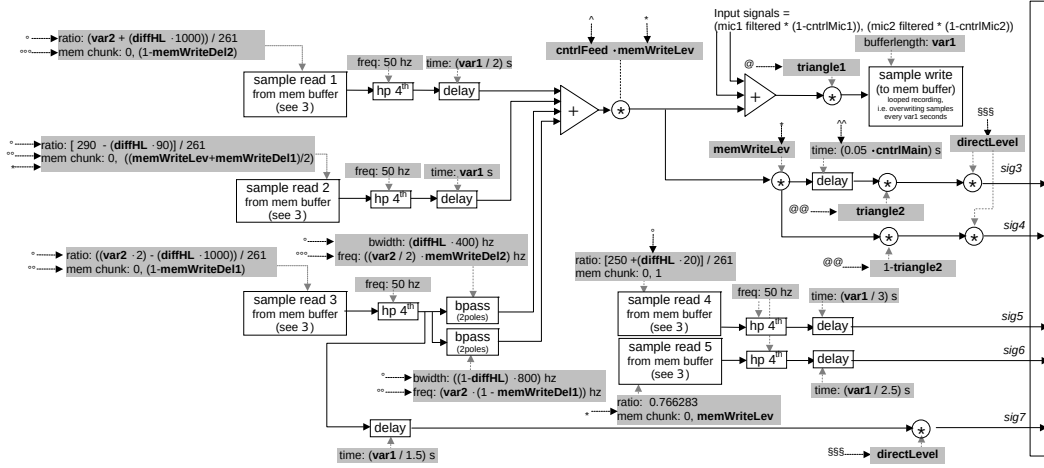
*var2 = rough estimate of the center frequency in the spectrum of the room's background noise (spectral centroid): to evaluate at rehearsal time, in a situation of "silence".*

*var3 = subjective estimate of how the room reverberance, valued between 0 ("no reverb") and 1 ("very long reverb").*

*var4 = distance (in meters) between the two farthest removed loudspeakers on the front-rear axis.*

queste 4 variabili hanno un ruolo molto importante, poiché non solo vanno a determinare la velocità del comportamento del sistema, ma ne vanno a determinare la sua sensibilità rispetto all'ambiente in cui viene eseguito, come ad esempio nel caso del *sample read* la velocità di lettura dalla tabella *sample write* e la porzione di tabella che ne viene letta.

I *sample read* sono 5 indicati in partitura nella configurazione che segue.



Estratto dalla partitura di *Audible Ecosystemics n.2/ Feedback Study (2003)*

revisione del 2017 - Agostino Di Scipio

Il suono del Larsen proveniente da due microfoni e stabilizzato con il meccanismo LAR come illustrato in precedenza, viene a sommarsi per poi venire moltiplicato per un oscillatore a bassa frequenza che ne modifica l'involuppo d'ampiezza. Il risultato di questa operazione viene scritto in memoria nella tabella *sample write* e viene letto dai 5 campionatori distribuiti In questa sezione del sistema.

I parametri esterni e tempo varianti che utilizza il campionatore sono: *ratio* e *mem chunk*, che corrispondono rispettivamente alla velocità di lettura e al frammento di buffer che viene letto dalla tabella *sample write*. A seguito di una conversazione con il compositore è risultato essere fondamentale che il campionatore aggiorni i valori di *ratio* ad ogni campione, permettendo modulazioni di frequenza derivate dal cambiamento delle velocità di lettura, che si riflettono in cambiamenti di frequenza del Larsen registrato nel *sample write*. i *ratio* vengono indicati in partitura con delle espressioni diverse per ognuno dei 5 *sample read*, ad esempio: *ratio: (var2 + (diffHL \* 1000)) / 261*, dove

*ratio value sets the sample-read rate as a function of var2 and the control signal diffHL: ratio = 1 causes no rate change, hence no frequency shift of the sampled signal; values major of 1 determine shifts to higher frequencies; values between 0 and 1 determine shifts to lower frequencies*



e dove *diffHL* è un segnale di controllo variabile in un range fra 0 e 1, che a run time a microfoni chiusi parte da una costante di 0.5. La lettura del *ratio* è sensibile rispetto all'ambiente, poiché il valore di *diffHL* che ne determina le modulazioni di frequenza, viene ricavato da una stima della centroide spettrale nei segnali di controllo tramite una differenza fra filtri Highpass e Lowpass a cui viene passata come frequenza di taglio la variabile *var2*. Altrettanto sostanziale nel contribuire alle trasformazioni del Larsen è il comportamento del *mem chunk*, che deve permettere una lettura di frammenti di memoria che può andare dal silenzio: *mem chunk: 0, 0* all'intera lunghezza del buffer *mem chunk: 0, 1*. Anche in questo caso la maggiorparte dei campionatori implementa un *mem chunk* determinato dai segnali di controllo variabili in un range fra 0 e 1, segnali di controllo che a run time e a microfoni chiusi partono da costanti distribuite di 0 e 1. Per questo motivo è molto importante che il comportamento del *mem chunk* possa tollerare soglie ai due estremi. In partitura altre importanti indicazioni sul campionatore che riguardano lettura e scrittura sono le seguenti:

*all sample-read processes should include short fade-in and fade-out ramps when  
sampling pointers wrap around the buffer, to avoid discontinuities  
more discontinuities may occur because the buffer is being written as it is also  
being read: these can be avoided by various means of one's own design*

In Faust non è possibile separare la scrittura e la lettura da un buffer, difatti esistono solo 2 tipi di oggetti per questo scopo: la primitiva *rdtable*, che può essere utilizzata per leggere da una tabella di sola lettura (predefinita prima del tempo di compilazione), e la primitiva *rwtable*, che può essere utilizzata per implementare una tabella di lettura/scrittura. Quest'ultima prende in input un segnale che può essere scritto nella tabella utilizzando un indice di scrittura e letto utilizzando un secondo indice destinato alla lettura. Per implementare in Faust l'architettura del *sample write* richiesta in partitura, si possono sincronizzare gli indici di scrittura di tutte le tabelle con un unico segnale (rampa) destinato a questo scopo e utilizzato dai *sample*

*read* e dai *granular sampling* impostando una grandezza comune, che risulta essere in questo caso una costante espressa in *var1* in secondi, condivisa da tutti i buffer in questione. In Faust la grandezza della tabella deve essere espressa in campioni, per ottenere quindi una grandezza espressa in secondi, bisogna dunque moltiplicare il numero dei secondi desiderati per la frequenza di campionamento, definite entrambi come una costante (predefinita prima del tempo di compilazione). Infine per completare le operazioni come richiesto nella partitura, si può sostituire l'oggetto *rwtable* con una mandata (send) del segnale destinato ad entrare in Feedback ai *sample read* ed in feedforward al *granular sampling*. A seguito una implementazione del campionatore come richiesto in partitura.

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// hard-coded: change this to match your samplerate
SampleRate = 44100;

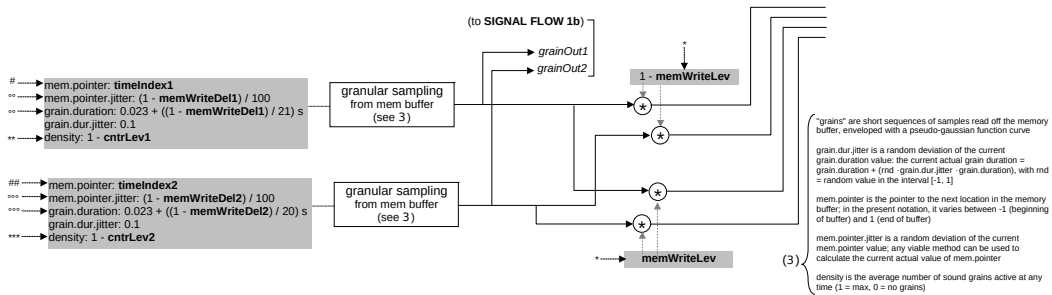
sampler(lengthSec, memChunk, ratio, x) =
it.frwtable(3, bufferLen, .0, writePtr, x, readPtr) * window
with {
    memChunkLimited = max(0.100, min(1, memChunk));
    bufferLen = lengthSec * SampleRate;
    writePtr = ba.period(bufferLen);
    grainLen = max(1, ba.if(writePtr > memChunkLimited * bufferLen,
        memChunkLimited * bufferLen, 1));
    readPtr = y
    letrec {
        'y = (ratio + y) % grainLen;
    };
    window = min(1, abs(((readPtr + grainLen / 2) % grainLen) -
        grainLen / 2) / 200);
};
```

```
process = sampler(4, hslider("memChunkLimited", 0.100, 0, 1, .001),
  hslider("ratio", 5, .1, 10, .001), os.osc(100)) <: _, _;
```

Listing 5: Algoritmo del *sample write/read* per il Feedback Study

In questo campionatore, il *ratio* è continuamente variabile, rendendo possibili le modulazioni di frequenza desiderate. Mentre il *mem chunk* ricomincia la sua lettura del buffer dall'inizio ogni volta che la rampa di lettura incontra il valore del modulo determinato dalla sua variabile. Per risolvere le discontinuità come richiesto in partitura, è necessario utilizzare un design personalizzato, e nel design di questo campionatore, per evitare clicks ricorrenti ogni volta che la lettura del campionatore incrocia la sua scrittura, (visto che la lettura del *mem chunk* parte sempre da inizio buffer) la lettura parte solo quando la scrittura è di dimensioni maggiori rispetto al frammento *mem chunk* che dovrebbe essere letto. Infine, per evitare discontinuità ogni volta che la lettura ricomincia a leggere il buffer da 0, è stata utilizzata una finestratura trapezoidale con un fade-in e fade-out per un valore di campioni costante.

Mentre alcuni campionatori fanno parte di un circuito di Feedback interno al sistema, sia i granulatori che tutti i campionatori utilizzano lo spazio acustico reale per il Feedback, i granulatori in particolare sono l'ultima trasformazione del suono del sistema, prima di andare a due sommatori con il resto delle uscite e all'output. In partitura vengono indicati come a seguito.



Estratto dalla partitura di *Audible Ecosystemics n.2/ Feedback Study (2003)*

revisione del 2017 - Agostino Di Scipio

Anche in questo caso, oltre alle indicazioni dei segnali di controllo che vengono

ricevuti dai due *granular sampling*, in partitura sono presenti delle richieste specifiche riguardo l'implementazione dell'oggetto che ne determinano il risultato dei timbri che produce:

*"grains" are short sequences of samples read off the memory buffer, enveloped with*

*a pseudo-gaussian function curve*

*grain.dur.jitter is a random deviation of the current grain.duration value: the*

*current actual grain duration is:  $\text{grain.duration} + (\text{rnd} * \text{grain.dur.jitter} * \text{grain.duration})$ , with rnd is: random value in the interval (- 1, 1)*

*mem.pointer is the pointer to the next location in the memory buffer; in the*

*present notation, it varies between - 1 (beginning of buffer) and 1 (end of buffer)*

*mem.pointer.jitter is a random deviation of the current mem.pointer value; any*

*viable method can be used to calculate the current actual value of mem.pointer*

*density is the average number of sound grains active at any time (1 is: max, 0 is: no grains)*

I due granulatori leggono dunque dalla tabella *sample write* dove vengono scritti al contempo i Larsen diretti e i campionatori in Feedback. Questa lettura avviene con due puntatori alla memoria (*mem.pointer*) determinati dai segnali di controllo *timeIndex1* e *timeIndex2*, la grandezza dei grani (*grain.duration*) viene invece determinata dai segnali di controllo *memWriteDel1* e *memWriteDel2*, infine il parametro *.jitter* presente sia nei puntatori alla memoria che nelle durate (e calcolato in modo differente per ognuna delle due), ha il compito di decorrelare le fasi dei grani, accedendo alla memoria in punti differenti, e le durate di questi, dando vita in questo modo a delle tessiture timbriche "*clouds*" più interessanti. Anche in questo caso, a seguito di una conversazione con il compositore è emerso che le voci di polifonia (istanze) risultano essere 10 per ogni *granular sampling*. Un problema che sorge nell'implementazione di un granulatore polifonico in un linguaggio di programmazione come Faust (che non contempla segnali di controllo ma lavora in DSP sul singolo campione), è che in necessità di creare delle "*clouds*", è necessario che

i puntatori di lettura siano decorrelati in qualche modo, così da non non avere la stessa fase e sovrapporsi sistematicamente. Nella tradizione della computer music, esistono diverse implementazioni tecniche e design di algoritmi di granulazione per risolvere questo tipo di problema: alcune tipologie di granulatori sono dette "asincrone" poiché sono particolari design dove ogni istanza ha un personale *trigger* di partenza che ne avvia la lettura del grano, decorrelato rispetto alle altre istanze, invece e altre tipologie chiamate "quasi sincrone" e "sincrone" si concentrano sul mantenere una coerenza di fase del segnale e una certa continuità. In questo caso per il design di questo oggetto in Faust, si è optato per un tipo di granulazione PSOLA (acronimo di Pitch-Synchronous Overlap and Add, sovrapposizione e aggiunta a toni sincroni), poiché come abbiamo visto precedentemente in partitura, seppur sono presenti funzioni di *jittering* del segnale per ottenere certe tessiture timbriche, viene esplicitamente richiesto che il *timestretching* del suono sia possibile. A seguito una implementazione del granulatore come richiesto in partitura.

```
// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// hard-coded: change this to match your samplerate
SampleRate = 44100;

//----- GRANULAR SAMPLING -----
grain(L, position, duration, x, trigger) = hann(phase) *
    buffer(readPtr, x)
with {
    maxLength = L * SampleRate;
    length = L * SampleRate;
    hann(ph) = sin(ma.PI * ph) ^ 2.0;
    lineSegment = loop ~ si.bus(2) : _ , ! , _
    with {
        loop(yState, incrementState) = y , increment , ready
        with {
            ready = ((yState == 0.0) | (yState == 1.0)) & trigger;
```

```

        y = ba.if(ready, increment, min(1.0, yState + increment));
        increment = ba.if(ready, ma.T / max(ma.T, duration),
            incrementState);
    };
};
phase = lineSegment : _ , !;
unlocking = lineSegment : ! , _;
lock(param) = ba.sAndH(unlocking, param);
grainPosition = lock(position);
grainDuration = lock(duration);
readPtr = grainPosition * length + phase * grainDuration * ma.SR;
buffer(readPtr, x) =
    it.frwtable(3, maxLength, .0, writePtr, x, readPtrWrapped)
with {
    writePtr = ba.period(length);
    readPtrWrapped = ma.modulo(readPtr, length);
};
};

// works for N >= 2
triggerArray(N, rate) = loop ~ si.bus(3) : (! , ! , _) <:
    par(i, N, == (i)) : par(i, N, \ (x).(x > x'))
with {
    loop(incrState, phState, counterState) = incr , ph , counter
    with {
        init = 1 - 1';
        trigger = (phState < phState') + init;
        incr = ba.if(trigger, rate * ma.T, incrState);
        ph = ma.frac(incr + phState);
        counter = (trigger + counterState) % N;
    };
};

grainN(voices, L, position, rate, duration, x) =
    triggerArray(voices, rate) :

```

```

    par(i, voices, grain(L, position, duration, x));

process = os.osc(200) * .5 <: grainN(10, 4,
    hslider("Grain Position", -1, -1, 1, .001),
    hslider("Grain Rate", 1, 1, 100, .001),
    hslider("Grain Duration", 0.100, 0, 1, .001)) :> _;

// in the full system this this is the granular sampling function
granular_sampling(var1, timeIndex, memWriteDel, cntrlLev, divDur, x) =
    grainN(10, var1, position, rate, duration, x) :> _
with {
    rnd = no.noise;
    memPointerJitter = rnd * (1.0 - memWriteDel) * .01;
    position = timeIndex * (1.0 - ((1.0 - memWriteDel) * .01)) +
        memPointerJitter;
    density = 1.0 - cntrlLev;
    rate = 50 ^ (density * 2.0 - 1.0);
    grainDuration = .023 + (1.0 - memWriteDel) / divDur;
    duration = grainDuration + grainDuration * .1 * rnd;
};

```

Listing 6: Algoritmo del *granular sampling* per il Feedback Study

In conclusione, abbiamo avuto modo di approfondire alcuni dei principali meccanismi utilizzati da Agostino Di Scipio per uno dei più importanti lavori del suo ciclo Ecosistemico Udibile, prendendo questo lavoro come caso di studio, con il fine di illustrare praticamente alcune modalità e relazioni possibili di un sistema con l'ambiente circostante e lo spazio acustico. I meccanismi contenuti all'interno del brano ovviamente non si limitano a questi, e ci sono altre modalità d'interazione con l'ambiente circostante prodotte da altri meccanismi di elaborazione digitale del suono; così come ne esistono delle altre tipologie in altri lavori del ciclo, tanto quanto nell'operato di altri compositori, ma si è cercato qui di illustrare i passaggi essenziali così da poter lasciar spazio ad ulteriori approfondimenti di altri sistemi di altro tipo, lasciando comunque aperta la possibilità di poter approfondire il brano a par-

tire dai testi citati in bibliografia e dal codice del porting dell'intero sistema in Faust riportato nell'appendice.



### 3 Sistemi Autonomi

Nel capitolo precedente, attraverso la composizione e gli studi di Agostino Di Scipio, abbiamo potuto osservare che cosa si intende, e come viene organizzato, un sistema con non linearità provenienti dal mondo fisico; aperto al suo ambiente esterno che diviene in questo caso lo spazio stesso della performance. Sempre in riferimento alla cibernetica di secondo ordine, abbiamo già parlato del fatto che nessun sistema è separabile e isolabile da un suo ambiente circostante, ma abbiamo osservato anche come il concetto di spazio di un sistema sia qualcosa di molto complesso, poiché il concetto stesso di "complessità" sta a significare in un sistema che questo sia composto da una rete d'interazioni dinamiche, ma che il comportamento dell'insieme potrebbe non essere prevedibile in base al comportamento dei diversi componenti tipicamente in relazione fra loro. Mentre, nel caso di Agostino Di Scipio, lo spazio del sistema che ne contiene le sue relazioni è costituito principalmente dal mondo fisico, in questo capitolo osserveremo come, per lo spazio di un sistema, si possa intendere anche uno spazio latente, che traccia le sue relazioni tra le parti in uno spazio virtuale interamente programmato nel software. In questo caso, l'ambiente digitale che racchiude il sistema all'interno e le sue relazioni tra gli agenti è interamente costituito solo dal DSP, inclusi i metodi per la generazione delle relative non linearità. Ho voluto approfondire questo metodo attraverso il lavoro compositivo e gli studi di Dario Sanfilippo, specialista di sistemi di feedback, esecutore e compositore. I suoi lavori riguardano principi di autopoiesi, evolvibilità e costruttivismo radicale nella progettazione di reti di feedback audio complesse.

La modalità con cui andrò a discutere in questo capitolo la composizione di questi sistemi autonomi, appartenenti anche questi alla più vasta categoria dei CASes (Complex Adaptive Systems), è ponendo un focus su un particolare lavoro di Dario Sanfilippo, *Order From Noise (Homage to Heinz Von Foerster)*.

*Order From Noise* è un progetto che implementa uno dei primi prototipi di Dario Sanfilippo basati sull'idea dell'*adattattività dinamica*. Questo lavoro del compositore si basa sull'idea che i sistemi adattivi complessi, che sono emergenti per definizione,

siano essenziali per raggiungere innovazioni formali, performative e tecniche, nel contesto della performance in Live Electronics e nella composizione musicale in generale.<sup>26</sup> I CASes si dicono adattivi quando sono composti da una rete dinamica di interazioni dove i singoli agenti interconnessi fra loro, interagendo individualmente o collettivamente, possono cambiare il loro stato in risposta a variazioni nell'ambiente o degli altri agenti connessi. Questo tipo di relazioni nel sistema è comune sia nell'opera di Agostino Di Scipio, in cui abbiamo visto precedentemente come lo stato dei singoli agenti nel sistema cambi al variare delle condizioni nell'ambiente circostante portando a cambiamenti di stato globali del sistema, che nel lavoro di Dario Sanfilippo. Altro importante aspetto in comune qui con l'opera di Agostino Di Scipio, è il tipo di rapporto che ha l'uomo con la macchina, che viene respinto nella visione in cui è il primo ad essere totalmente a controllo del secondo, per essere sostituito da un concetto d'interazione Uomo-Macchina-Ambiente, chiamato da Dario Sanfilippo Ibridazione: una condizione in cui umano e macchina cooperano per far emergere la performance. Nel caso delle opere di Dario Sanfilippo, tuttavia, l'estetica dei suoi lavori è interamente subordinata al disegno del sistema stesso, che di volta in volta, emerge da fenomeni musicali che sono il risultato del tipo d'interazione che viene a crearsi fra il performer e il disegno del sistema che si era reso necessario in partenza.

In alcuni casi, questa idea viene portata alle sue estreme conseguenze con opere in cui la macchina è l'unica ente che esegue, come accade per il brano presentato qui.

*Order from noise (2017) is based on a time-variant feedback delay network containing a set of entangled nonlinear processing algorithms for audio and information signals. The work is an example of autonomous self-performing system and it is realised by feeding the network with one millisecond of background noise from the performance environment. The initial recirculating noise impulse is*

---

<sup>26</sup>Dario Sanfilippo. "Time-variant infrastructures and dynamical adaptivity for higher degrees of complexity in autonomous music feedback systems: the Order from noise (2017) project". en. In: *Musica/Tecnologia* (Aug. 2018). Artwork Size: 119-129 Pages Publisher: Musica/Tecnologia, 119-129 Pages. DOI: 10.13128/MUSIC-TEC-23804. URL: <https://oajournals.fupress.net/index.php/mt/article/view/7482> (visited on 11/22/2022).

*what entirely determines the formal evolutions of the system which have substantially different long-term developments for each different noise impulse. An approach to present the work live is that of reinitialising the system a number of times for a period of about three-five minutes to show its sensitivity to initial conditions and the long-term divergence between the formal structures.*<sup>27</sup>

Rispetto al sistema discusso nel capitolo precedente, come già accennato c'è una sostanziale differenza nel concetto di spazio o ambiente del sistema. Come appena detto, Order From Noise è basato su una *feedback delay network* tempo-variante, vale a dire che ci ritroviamo di fronte ad un sistema il cui funzionamento stesso cambia nel tempo, a differenza dei sistemi tempo-invarianti dove seppur l'output del sistema può cambiare nel tempo, il loro funzionamento e l'ambiente che contiene il sistema rimane inalterato. In parole semplici: lo spazio del sistema in Order From Noise può variare nel tempo rendendo imprevedibile il suo funzionamento a partire da una determinata condizione iniziale. Per questo motivo il performer non avrà un grande margine di prevedibilità nel comportamento del sistema a differenza dei sistemi tempo-varianti, ma saprà che per le stesse condizioni iniziali, il sistema qui totalmente deterministico, riporterà sempre le stesse evoluzioni formali. Proprio come nei Sistemi Caotici emersi dalla Teoria del Caos introdotti all'inizio di questa tesi, che seppur governati da leggi deterministiche, sono in grado di esibire un'empirica casualità nell'evoluzione delle variabili dinamiche.

### 3.1 Audio Information Processing

Come già accennato nello scorso capitolo, l'*Audio Information Processing*; ovvero la capacità di un sistema di elaborare le informazioni tramite la *feature extraction*, è un dato fondamentale nella creazione di un CAS, che ne determina le sue capacità "cognitive" e di auto-osservazione rispetto all'ambiente. L'uso creativo dei

---

<sup>27</sup>Sanfilippo, "Time-variant infrastructures and dynamical adaptivity for higher degrees of complexity in autonomous music feedback systems".

CASes in Musica, e la loro stretta connessione con l'informazione, ha favorito lo sviluppo di tecniche algoritmiche per l'*Audio Information Processing* e l'analisi di comportamenti, sia ad alto e basso livello.

*The low-level algorithms provide a continuous measure of the features and can operate with short analysis frames. The high-level algorithms, on the other hand, are original designs informed both perceptually and by complexity theory for the analysis of musically meaningful information, both in short sounds or articulated streams with long-term nontrivial variations.*<sup>28</sup>

Alcuni primi esempi storici, sono ad esempio le performance in Live Electronics di Gordon Mumma, come "Diastasis, as in Beer" (1966), e "Hornpipe" (1967), dove vengono implementate tecniche di amplitude following utilizzate poi per pilotare parametri nelle unità di generazione del suono.<sup>29</sup> Arrivando fino ai sistemi di Agostino Di Scipio, che nello studio del suo Feedback Study ci ha dato modo di approfondire e scoprire tutti quei meccanismi e tutte quelle particolari funzioni che hanno la responsabilità di generare segnali di controllo nei suoi sistemi.

Dario Sanfilippo ha discusso in più articoli l'utilizzo dell'*Information Processing* nei CASes, sia in senso generale<sup>30</sup>, parlando di implementazioni più tipiche come: centroide spettrale, rumorosità, diffusione spettrale a basso livello, eterogeneità e complessità per l'alto livello. Che come in questo caso nell'utilizzo specifico di queste tecniche in un suo sistema:

*These signals, often based on their perceptual characteristics and their relationship with the domains of the variables in the processing units, are mapped to certain*

---

<sup>28</sup>Dario Sanfilippo. "Time-Domain Adaptive Algorithms for Low- and High-Level Audio Information Processing". en. In: *Computer Music Journal* 45.1 (Mar. 2021), pp. 24–38. ISSN: 0148-9267, 1531-5169. DOI: 10.1162/comj-a-00592. URL: <https://direct.mit.edu/comj/article/45/1/24/110389/Time-Domain-Adaptive-Algorithms-for-Low-and-High> (visited on 11/22/2022).

<sup>29</sup>Sanfilippo, "Time-Domain Adaptive Algorithms for Low- and High-Level Audio Information Processing".

<sup>30</sup>Sanfilippo, "Time-Domain Adaptive Algorithms for Low- and High-Level Audio Information Processing".

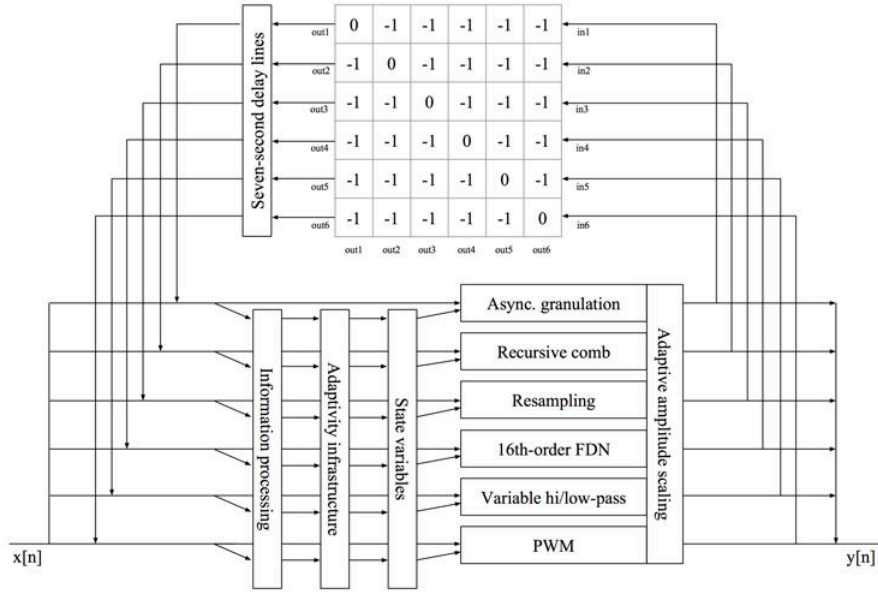
*ranges and then used to control the state of the components in a large network. (See Di Scipio (2003) for a detailed discussion on this method). Using infrasonic signals to pilot these variables is highly desirable if not necessary, for high-rate, sudden changes in the DSP parameters would produce an output with a continuously large and homogeneous spectral band, so it would not be possible to perceive the state variations in the long-term. The information and audio processing algorithms implemented, the specific connections between the control signals and the variables, the linear and nonlinear mapping strategies used as well as the network topologies, all these elements determine the infrastructure of a system. In a large network, these elements can already provide a high number of configurations and an even larger number of possible states that a system can reach. That, theoretically, could be considered as something that guarantees a good variety and complexity in the long-term behaviour of a system, albeit the practical case tends to be much different from the ideal scenario.<sup>31</sup>*

Nel suo articolo su Order From Noise, Sanfilippo discute tutte le unità utilizzate nel suo sistema e il loro ruolo all'interno della rete. Partendo dalla descrizione di queste nell'articolo, tratterò ora una parte più operativa implementando queste tecniche nel linguaggio di programmazione FAUST (Grame), con un particolare Focus a tutte quelle *feature extraction* che nell'implementazione della rete permettono al sistema (nonostante questo sia chiuso rispetto all'ambiente esterno) di mantenersi in uno stato "emergente" manifestando comportamenti nuovi, e di "stabilità" rimanendo sempre in dei range controllati tramite feedback positivi e negativi.

La rete di Order From Noise ha sei nodi, ognuno dei quali contiene due unità in cascata, contenenti i seguenti algoritmi di elaborazione audio: *asynchronous granulation, recursive comb filtering, variable high-pass/low-pass filtering, pulse-width modulation (PWM), resampling and 16th-order feedback delay network (FDN) processing*.

---

<sup>31</sup>Sanfilippo, "Time-variant infrastructures and dynamical adaptivity for higher degrees of complexity in autonomous music feedback systems".



Schema della rete di Order From Noise

A parte le unità di elaborazione del suono, in questo sistema, l'*Information Processing* utilizzato per generare i segnali di controllo è diverso dalle implementazioni tipiche riportate precedentemente nel corso di questa tesi; piuttosto che calcolare *feature extraction* come l'RMS, la diffusione spettrale, ecc. Dario Sanfilippo utilizza in questo sistema una sorta di Low Frequency Oscillator non lineare dipendente dal segnale in ingresso. Questo comportamento viene ottenuto utilizzando un filtro Lowpass per far passare solo le componenti energetiche di un segnale sotto la soglia di 1Hz, come ad esempio segnali a 0,01Hz, il segnale risultante viene poi processato tramite normalizzazione dinamica per essere riportato ad una soglia in ampiezza in un range fra  $[-1; 1]$ , viene elevato a una potenza relativamente grande per forzarlo intorno a 0, ed infine utilizzato per pilotare la frequenza di un fasore.

```

nonLinearity(exponent, refPeriod, y) = y : lowFreqNoise <:
  (nonlinearsig(exponent, ma.tanh(_ * normRMS)))
with{
  lowFreqNoise(x) = x : seq(i, 4, LPTPT(1.0 / refPeriod));
  noiseRMS(x) = x * x : LPTPT(1.0 / (10.0 * refPeriod)) : sqrt;
  normRMS(x) = 1.0 / max(ma.EPSILON, noiseRMS(x));

```

```

    nonlinearsig(exponent, x) = ma.signum(x) * pow(abs(x), exponent);
};

process = no.noise : nonLinearity(1, 1);

// Zavalishin's Onepole TPT Filter
// reference : (by Will Pirkle)
// http://www.willpirkle.com/Downloads/AN-4VirtualAnalogFilters.2.0.pdf
onePoleTPT(cf, x) = loop ~ _ : ! , si.bus(3) // Outs: lp , hp , ap
with {
    g = tan(cf * ma.PI * (1.0/ma.SR));
    G = g / (1.0 + g);
    loop(s) = u , lp , hp , ap
    with {
        v = (x - s) * G; u = v + lp; lp = v + s; hp = x - lp; ap = lp - hp;
    };
};

// Lowpass TPT
LPTPT(cf, x) = onePoleTPT(cf, x) : (_ , ! , !);

```

Listing 7: non linearità in Order From Noise

## - Da Continuare -

Lookahead Limiters per la stabilità delle Feedback Network: In Order From Noise Dario Sanfilippo utilizza un'unità per raggiungere la stabilità globale della rete chiamata Lookahead Limiter.

My original design was based on two side-chained amplitude curves: a fast one for attack transients and one for sustained sounds, which had to be slow enough as to avoid intermodulation distortion. The fast curve was based on peak envelope estimation (see below), while the slow one was based on RMS to have a smooth behaviour. The curves were in a master-slave mode so that the effect of the fast

curve would decrease with regard to the growth of the slow curve: that was necessary to avoid that the processed signal would be scaled down twice by both curves. Despite the algorithm produced good results, it needed some empirical calibrations and it also involved a rather large number of objects in Pure Data which would considerably load the CPU. Besides, I was using some objects from PD-extended and I already had in mind to migrate to Pure Data Vanilla. A simplified design was based on only one amplitude curve calculated with a long-decay peak envelope (10 seconds). A peak envelope checks whether the input is greater than the output and, if that condition is true, it updates the peak with the new value from the input signal. Otherwise, the current peak decreases following an exponential curve and reaches a certain attenuation after a desired time which, in my specific case, is of 60dBs. This would allow detecting fast attack transient and, at the same time, the long decay would create a smooth curve for the sustained and slow sounds. *∩∩*  
<https://www.dariosanfilippo.com/blog/2017/lookahead-limiting-in-pure-data/>

This was a good compromise for my systems, although such a long decay is not always desirable: occasionally, that would create silences after high-amplitude impulses for the attenuating curve would decrease very slowly and the input signal would be scaled down even if below the limiting threshold.



## 4 RITI: un sistema caotico ibrido

RITI : Room Is The Interface è un Brano basato su un CAS autonomo *site-specific*, dove la personalità acustica della stanza dove viene eseguito il brano viene riflessa in variazioni del comportamento del sistema stesso. L'idea dell'acronimo RITI nasce come omaggio a: Sound is the interface, il famoso paper di Agostino Di Scipio, che introdusse per la prima volta una prospettiva sistemica sull'auto-organizzazione e sulla capacità di un sistema di auto-osservarsi tramite l'ambiente circostante.

### - Da Continuare -

- parlare del brano e della sua realizzazione + Codici Faust degli agenti e delle varie parti. Le analisi condotte e il contributo proveniente dai lavori di Agostino Di Scipio e Dario Sanfilippo. In coda al capitolo rimandare al codice completo in Appendice A e plot grafici di Faust in Appendice B - + Partitura dopo gli appendici (o appendice C)

## A First appendix

In questo appendice sono riportati tutti i codici dei sistemi e le relative librerie di oggetti trattati nel corso della tesi.

`Audible_Ecosystemics_2.dsp` è il file principale della implementazione completa del sistema di Audible Ecosystemics 2 di Agostino Di Scipio, sviluppato con il supporto e il prezioso aiuto di Dario Sanfilippo, nel Debug del sistema e del codice; e conseguente al prezioso lavoro svolto con i miei compagni nella Classe di esecuzione ed interpretazione della musica elettroacustica di Giuseppe Silvi, che mi ha permesso di approfondire le tematiche discusse nel corso della tesi e poter sviluppare strategie efficaci per questa implementazione. `aelibrary.lib` è invece la libreria degli oggetti utilizzati nella implementazione del sistema di Audible Ecosystemics 2 di Agostino Di Scipio.

`RITI_AutonomousNetwork_fixedVersion.dsp` è il file principale della implementazione del mio sistema di RITI v.1.0. `RITI.lib` è invece la libreria degli oggetti utilizzati nella implementazione del mio sistema di RITI v.1.0. `Cello_D2.lib` è infine una libreria con i risultati delle analisi condotte sulle note del violoncello, utilizzata per passare le informazioni ai filtri passabanda nel sistema di RITI v.1.0.

## Audible\_Ecosystemics\_2.dsp

```

declare name "Agostino Di Scipio - AUDIBLE ECOSYSTEMICS n.2";
declare author "Luca Spanedda";
declare author "Dario Sanfilippo";
declare version "1.0";
declare description " 2023 version Realised on composer's instructions
    of the year 2017 edited in LAquila, Italy";

// import faust standard library
import("stdfaust.lib");
// import audible ecosystemics objects library
import("aelibrary.lib");

// PERFORMANCE SYSTEM VARIABLES
SampleRate = 44100;
var1 = hgroup("System Variables", nentry("Var 1", 20, 1, 20, 1));
var2 = hgroup("System Variables", nentry("Var 2", 100, 1, 10000, 1));
var3 = hgroup("System Variables", nentry("Var 3", .5, 0, 1, .001));
var4 = hgroup("System Variables", nentry("Var 4", 20, 1, 20, 1));

//-----
//-- AE2 -----
//-----

// MAIN SYSTEM FUNCTION
outputrouting(grainOut1, grainOut2, out1, out2, out3, out4, out5, out6, mic1,
    mic2, mic3, mic4, diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1,
    cntrlLev2, cntrlFeed, cntrlMain, cntrlMic1, cntrlMic2, directLevel,
    timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2, triangle3, sampWOut, sig1,
    sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7) =
out1, out2, out3, out4, out5, out6; // choose here the signals in output

```

```

process = si.bus(8) :> par(i, 4, _ * vgroup("Mixer ON/OFF",
checkbox("mute/unmute")))) :
(signalflow1a : signalflow1b : signalflow2a : signalflow2b : signalflow3) ~
si.bus(2) :
outputrouting;

signalflow1a( grainOut1, grainOut2, mic1, mic2, mic3, mic4 ) =
grainOut1, grainOut2,
mic1, mic2, mic3, mic4,
( (diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2,
cntrlFeed, cntrlMain) : vgroup("System Inspectors", par(i, 8, hgroup("Signal
Flow 1a", inspect(i, -1, 1)))) )
with {
Mic_1A_1 = mic3 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1A", gainMic_1A) );
Mic_1A_2 = mic4 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1A", gainMic_1A) );
map6sumx6 = (Mic_1A_1 : integrator(.01) : delayfb(.01, .95)) +
(Mic_1A_2 : integrator(.01) : delayfb(.01, .95)) :
\ (x). (6 + x * 6);

localMaxDiff = ((map6sumx6, Mic_1A_1) : localmax) ,
((map6sumx6, Mic_1A_2) : localmax) :
\ (x, y). (x - y);

SenstoExt = (map6sumx6, localMaxDiff) :
localmax <: _ , (_ : delayfb(12, 0)) : + : * (.5) :
LP1(.5) : vgroup("System Inspectors",
hgroup("Signal Flow 1a",
hgroup("Sens. to Ext. Cond.",
inspect(101, -1, 1))));

diffHL = ((Mic_1A_1 + Mic_1A_2) : HP3(var2) : integrator(.05)) ,
((Mic_1A_1 + Mic_1A_2) : LP3(var2) : integrator(.10)) :
\ (x, y). ((x - y) : vgroup("System Inspectors",
hgroup("Signal Flow 1a",
hgroup("diffHL Centroid",

```

```

                                inspect(100, -1, 1)))) *
(1 - SenstoExt) : delayfb(.01, .995) :
LP5(25) : \ (x).(.5 + x * .5) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

memWriteLev = (Mic_1A_1 + Mic_1A_2 : MicSum1Ainspect) : integrator(.1) :
delayfb(.01, .9) :
LP5(25) : \ (x).(1 - (x * x)) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

memWriteDel1 = memWriteLev : delayfb((var1 / 2), 0) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

memWriteDel2 = memWriteLev : delayfb((var1 / 3), 0) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

cntrlMain = (Mic_1A_1 + Mic_1A_2) * SenstoExt : integrator(.01) :
delayfb(.01, .995) : LP5(25) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

cntrlLev1 = cntrlMain : delayfb((var1 / 3), 0) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

cntrlLev2 = cntrlMain : delayfb((var1 / 2), 0) :
// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

cntrlFeed = cntrlMain : \ (x).(ba.if(x <= .5, 1.0, (1.0 - x) * 2.0)) :
// LIMIT - max - min

```

```

        limit(1, 0);
    };

    signalflow1b( grainOut1, grainOut2, mic1, mic2, mic3, mic4, diffHL, memWriteDel1,
        memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed, cntrlMain ) =
    mic1, mic2, mic3, mic4,
    diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed,
        cntrlMain,
    ( (cntrlMic1, cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1,
        triangle2, triangle3) : vgroup("System Inspectors", par(i, 8, hgroup("Signal
        Flow 1b", inspect(i, -1, 1)))) )
    with {
        Mic_1B_1 = mic1 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1B", gainMic_1B) );
        Mic_1B_2 = mic2 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1B", gainMic_1B) );
        // cntrlMic - original version
        cntrlMic(x) = x : HP1(50) : LP1(6000) :
            integrator(.01) : delayfb(.01, .995) : LP5(.5);

        // cntrlMic - alternative version
        // cntrlMic(x) = x : HP2(50) : LP1(6000) :
        // integrator(.01) : delayfb(.01, .995) : LP5(.04);
        cntrlMic1 = Mic_1B_1 : Mic11Binspect : cntrlMic :
            // LIMIT - max - min
            limit(1, 0);

        cntrlMic2 = Mic_1B_2 : Mic21Binspect : cntrlMic :
            // LIMIT - max - min
            limit(1, 0);

        directLevel =
            (grainOut1 + grainOut2) : integrator(.01) : delayfb(.01, .97) :
                LP5(.5) <:
                    - ,
                    ( _ : delayfb(var1 * 2, (1 - var3) * 0.5)) : + :
                    \ (x).(1 - x * .5) :

```

```

// LIMIT - max - min
limit(1, 0);

timeIndex1 = triangleWave(1 / (var1 * 2)) : \x).((x - 2) * 0.5);

timeIndex2 = triangleWave(1 / (var1 * 2)) : \x).((x + 1) * 0.5);

triangle1 = triangleWave(1 / (var1 * 6)) * memWriteLev;

triangle2 = triangleWave(var1 * (1 - cntrlMain));

triangle3 = triangleWave(1 / var1);
};

signalflow2a( mic1, mic2, mic3, mic4, diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2,
    memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed, cntrlMain, cntrlMic1,
    cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,
    triangle3 ) =
mic1, mic2, mic3, mic4,
diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed,
    cntrlMain,
cntrlMic1, cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,
    triangle3,
( (sampWOut, sig1, sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7) : vgroup("System
    Inspectors", par(i, 8, hgroup("Signal Flow 2a", inspect(i, -1, 1)))) )
with {
    Mic_2A_1 = mic1 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 2A", gainMic_2A) );
    Mic_2A_2 = mic2 * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 2A", gainMic_2A) );
    micIN1 = Mic_2A_1 : Mic12Ainspect : HP1(50) : LP1(6000) *
        (1 - cntrlMic1);

    micIN2 = Mic_2A_2 : Mic22Ainspect : HP1(50) : LP1(6000) *
        (1 - cntrlMic2);

    SRsect1(x) = x : sampler(var1, (1 - memWriteDel2), (var2 + (diffHL * 1000)) /

```

```

261) :
HP4(50) : delayfb(var1 / 2, 0);

SRsect2(x) = x : sampler(var1, (memWriteLev + memWriteDel1) / 2, (290 -
(diffHL * 90)) / 261) :
HP4(50) : delayfb(var1, 0);

SRsect3(x) = x : sampler(var1, (1 - memWriteDel1), ((var2 * 2) - (diffHL *
1000)) / 261) :
HP4(50);

SRsectBP1(x) = x : SRsect3 : BPsiftpt(diffHL * 400, (var2 / 2) * memWriteDel2);

SRsectBP2(x) = x : SRsect3 : BPsiftpt((1 - diffHL) * 800, var2 * (1 -
memWriteDel1));

SRsect4(x) = x : sampler(var1, 1, (250 + (diffHL * 20)) / 261);

SRsect5(x) = x : sampler(var1, memWriteLev, .766283);

SampleWriteLoop = loop ~ _
with {
  loop(fb) =
    (
      ( SRsect1(fb) ,
        SRsect2(fb) ,
        SRsectBP1(fb) ,
        SRsectBP2(fb) :> _
      ) * (cntrlFeed * memWriteLev)
    ) <:
    (
      _ + (micIN1 + micIN2) : _ * triangle1 ),
      _ ,
      SRsect4(fb) ,
      SRsect5(fb) ,

```



```

        SRsect3(fb) ;

};

sig1 = micIN1 * directLevel;

sig2 = micIN2 * directLevel;

sampWOut = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( A );

variabdelaysig3(x) = x : de.delay( max(0, ba.sec2samp(.05)), max(0,
    int(ba.sec2samp(.05 * cntrlMain))) );
sig3 = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( B ) : _ *
    memWriteLev : variabdelaysig3 * triangle2 * directLevel;

sig4 = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( B ) : _ *
    memWriteLev * (1-triangle2) * directLevel;

sig5 = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( C ) :
    HP4(50) : delayfb(var1 / 3, 0);

sig6 = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( D ) :
    HP4(50) : delayfb(var1 / 2.5, 0);

sig7 = SampleWriteLoop : \ (A,B,C,D,E).( E ) : delayfb(var1 / 1.5, 0) *
    directLevel;
};

signalflow2b( mic1, mic2, mic3, mic4, diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2,
    memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed, cntrlMain, cntrlMic1,
    cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,
    triangle3, sampWOut, sig1, sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7 ) =
mic1, mic2, mic3, mic4,
diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed,
    cntrlMain,
cntrlMic1, cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,

```

```

    triangle3,
    sampWOut, sig1, sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7,
    grainOut1, grainOut2,
    out1, out2
  with {
    grainOut1 = granular_sampling(var1, timeIndex1, memWriteDel1, cntrlLev1, 21,
      sampWOut);

    grainOut2 = granular_sampling(var1, timeIndex2, memWriteDel2, cntrlLev2, 20,
      sampWOut);

    out1 =
      (
        ((sig5 : delayfb(.040, 0)) * (1 - triangle3)),
        (sig5 * triangle3),
        ((sig6 : delayfb(.036, 0)) * (1 - triangle3)),
        ((sig6 : delayfb(.036, 0)) * triangle3 ),
        sig1,
        0,
        sig4,
        grainOut1 * (1 - memWriteLev) + grainOut2 * memWriteLev
      ) :> _ * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 3", gainMic_3) );

    out2 =
      (
        (sig5 * (1 - triangle3)),
        ((sig5 : delayfb(.040, 0)) * triangle3),
        (sig6 * (1 - triangle3)),
        (sig6 * triangle3),
        sig2,
        sig3,
        sig7,
        grainOut1 * memWriteLev + grainOut2 * (1 - memWriteLev)
      ) :> _ * hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 3", gainMic_3) );
  };

```

```

signalflow3( mic1, mic2, mic3, mic4, diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2,
             memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed, cntrlMain, cntrlMic1,
             cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,
             triangle3, sampWOut, sig1, sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7, grainOut1,
             grainOut2, out1, out2 ) =
grainOut1, grainOut2,
(
( out1, out2,
( out2 : delayfb((var4 / 2) / 344, 0)),
( out1 : delayfb((var4 / 2) / 344, 0)),
( out1 : delayfb(var4 / 344, 0)),
( out2 : delayfb(var4 / 344, 0)) )
: vgroup("System Inspectors", par(i, 6, hgroup("Signal Flow 3", inspect(i, -1,
1))) )
),
mic1, mic2, mic3, mic4,
diffHL, memWriteDel1, memWriteDel2, memWriteLev, cntrlLev1, cntrlLev2, cntrlFeed,
cntrlMain,
cntrlMic1, cntrlMic2, directLevel, timeIndex1, timeIndex2, triangle1, triangle2,
triangle3,
sampWOut, sig1, sig2, sig3, sig4, sig5, sig6, sig7;

```

## aelibrary.lib

```

declare name "Agostino Di Scipio - AUDIBLE ECOSYSTEMICS n.2";
declare author "Luca Spanedda";
declare author "Dario Sanfilippo";
declare version "1.0";
declare description " 2023 version Realised on composer's instructions
    of the year 2017 edited in LAquila, Italy";

// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// PERFORMANCE SYSTEM SampleRate
SampleRate = 44100;

//-----
//-- LIBRARY -----
//-----

//----- UTILITIES --
// limit function for library and system
limit(maxl,minl,x) = x : max(minl, min(maxl));
// see signal values
inspect(i, lower, upper) = _ * 1000 <: _ ,
    vbargraph("sig_%2i [style:numerical]", lower * 1000, upper * 1000) :
    attach : _ / 1000;
//process = (os.osc(.01) : inspect(1, .1, -1, 1));
diffDebug(x) = an.abs_envelope_tau(1, (x-x')) * (SampleRate/2);

//----- DELAYS --
delayfb(delSec,fb,x) = loop ~ _ : mem
with{
    loop(z) = ( (z * fb + x) @(max(0, ba.sec2samp(delSec)-1)) );

```

```

};

//----- SAMPLERead ---
sampler(lengthSec, memChunk, ratio, x) =
  it.frwtable(3, 20 * SampleRate, .0, writePtr, x, readPtr) * window
  with {
    memChunkLimited = max(0.010, min(1, memChunk));
    bufferLen = lengthSec * SampleRate;
    writePtr = ba.period(bufferLen);
    grainLen = max(1, ba.if(writePtr > memChunkLimited * bufferLen,
      memChunkLimited * bufferLen, 1));
    readPtr = y
    letrec {
      'y = (ratio + y) % grainLen;
    };
    window = min(1, abs(((readPtr + grainLen / 2) % grainLen) -
      grainLen / 2) / 200);
  };
// process = sampler(4, hslider("memChunkLimited", 0.05, 0, 1, .001),
  // hslider("ratio", 10, .1, 10, .001), os.osc(100)) <: _, _;

//----- INTEGRATOR ---
integrator(seconds, x) = an.abs_envelope_tau(limit(1000,.001,seconds), x);

//----- LOCALMAX ---
localMax(seconds, x) = loop ~ si.bus(4) : _ , ! , ! , !
with {
  loop(yState, timerState, peakState, timeInSamplesState) =
    y , timer , peak , timeInSamples
  with {
    timeInSamples = ba.if(reset + 1 - 1', seconds *
      ma.SR, timeInSamplesState);
    reset = timerState >= (timeInSamplesState - 1);
    timer = ba.if(reset, 1, timerState + 1);
    peak = max(abs(x), peakState * (1.0 - reset));
  }
}

```

```

    y = ba.if(reset, peak', yState);

};

};

//process = os.osc(.1245) : localMax(hslider("windowlocalM",-1,-1,8,.001));
localmax(resetPeriod, x) = localMax(limit(1000,0,resetPeriod), x);

//----- TRIANGLE ---
triangularFunc(x) = abs(ma.frac((x - .5)) * 2.0 - 1.0);
triangleWave(f) = triangularFunc(os.phasor(1,f));

//----- FILTERS ---
onePoleTPT(cf, x) = loop ~ _ : ! , si.bus(3)
with {
    g = tan(cf * ma.PI * (1/ma.SR));
    G = g / (1.0 + g);
    loop(s) = u , lp , hp , ap
    with {
        v = (x - s) * G;
        u = v + lp;
        lp = v + s;
        hp = x - lp;
        ap = lp - hp;
    };
};

LPTPT(cf, x) = onePoleTPT(limit(20000,ma.EPSILON,cf), x) : (_ , ! , !);
HPTPT(cf, x) = onePoleTPT(limit(20000,ma.EPSILON,cf), x) : (! , _ , !);

SVFTPT(Q, cf, x) = loop ~ si.bus(2) : (! , ! , _ , _ , _ , _ , _)
with {
    g = tan(cf * ma.PI * (1.0/ma.SR));
    R = 1.0 / (2.0 * Q);
    G1 = 1.0 / (1.0 + 2.0 * R * g + g * g);
    G2 = 2.0 * R + g;
    loop(s1, s2) = u1 , u2 , lp , hp , bp , bp * 2.0 * R , x - bp * 4.0 * R

```

```

        with {
            hp = (x - s1 * G2 - s2) * G1;
            v1 = hp * g;
            bp = s1 + v1;
            v2 = bp * g;
            lp = s2 + v2;
            u1 = v1 + bp;
            u2 = v2 + lp;
        };
    };

BPsVftpt(bw, cf, x) = Q , CF , x : SVFTPT : (! , ! , ! , _ , !)

    with {
        CF = max(20, min(20480, LPTPT(1, cf)));
        BW = max(1, min(20480, LPTPT(1, bw)));
        Q = max(.01, min(100, BW / CF));
    };

// Order Aproximations filters - Outs
LP1(CF, x) = x : LPTPT(CF);
HP1(CF, x) = x : HPTPT(CF);
LP2(CF, x) = x : LPTPT(CF) : LPTPT(CF);
HP2(CF, x) = x : HPTPT(CF) : HPTPT(CF);
LP3(CF, x) = x : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF);
HP3(CF, x) = x : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF);
LP4(CF, x) = x : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF);
HP4(CF, x) = x : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF);
LP5(CF, x) = x : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF) : LPTPT(CF);
HP5(CF, x) = x : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF) : HPTPT(CF);

//----- GRANULAR SAMPLING -----
grain(L, position, duration, x, trigger) = hann(phase) * buffer(readPtr, x)
with {
    maxLength = 20 * SampleRate;
    length = L * SampleRate;

```

```

hann(ph) = sin(ma.PI * ph) ^ 2.0;
lineSegment = loop ~ si.bus(2) : _ , ! , _
with {
  loop(yState, incrementState) = y , increment , ready
  with {
    ready = ((yState == 0.0) | (yState == 1.0)) & trigger;
    y = ba.if(ready, increment, min(1.0, yState + increment));
    increment = ba.if(ready, (1.0/ma.SR) / max((1.0/ma.SR), duration),
      incrementState);
  };
};
phase = lineSegment : _ , !;
unlocking = lineSegment : ! , _;
lock(param) = ba.sAndH(unlocking, param);
grainPosition = lock(position);
grainDuration = lock(duration);
readPtr = grainPosition * length + phase * grainDuration * ma.SR;
buffer(readPtr, x) =
  it.frwtable(3, maxLength, .0, writePtr, x, readPtrWrapped)
with {
  writePtr = ba.period(length);
  readPtrWrapped = ma.modulo(readPtr, length);
};
};

// works for N >= 2
triggerArray(N, rate) = loop ~ si.bus(3) : (! , ! , _) <:
  par(i, N, == (i)) : par(i, N, \ (x).(x > x'))
with {
  loop(incrState, phState, counterState) = incr , ph , counter
  with {
    init = 1 - 1';
    trigger = (phState < phState') + init;
    incr = ba.if(trigger, rate * (1.0/ma.SR), incrState);
    ph = ma.frac(incr + phState);
  };
};

```



```

        counter = (trigger + counterState) % N;

    };

};

grainN(voices, L, position, rate, duration, x) = triggerArray(voices, rate) :
    par(i, voices, grain(L, position, duration, x));

granular_sampling(var1, timeIndex, memWriteDel, cntrlLev, divDur, x) =
    grainN(8, var1, position, rate, duration, x) :> /(8)
with {
    rnd = no.noise;
    memPointerJitter = rnd * (1.0 - memWriteDel) * .01;
    position = timeIndex * (1.0 - ((1.0 - memWriteDel) * .01)) +
        memPointerJitter;
    density = 1.0 - cntrlLev;
    rate = 50 ^ (density * 2.0 - 1.0);
    grainDuration = .023 + (1.0 - memWriteDel) / divDur;
    duration = grainDuration + grainDuration * .1 * rnd;
};

//----- INPUTS/OUTPUTS MIXER ---
gainMic_1A =
    si.smoo( ba.db2linear( vslider("SF_1A [unit:db]", 0, -84, 24, .001)));
gainMic_1B =
    si.smoo( ba.db2linear( vslider("SF_1B [unit:db]", 0, -84, 24, .001)));
gainMic_2A =
    si.smoo( ba.db2linear( vslider("SF_2A [unit:db]", 0, -84, 24, .001)));
gainMic_3 =
    si.smoo( ba.db2linear( vslider("SF_3 [unit:db]", 0, -84, 24, .001)));

//----- INSPECTORS ---
VHmetersEnvelope = abs : max ~ -(1.0/ma.SR) :
    max(ba.db2linear(-84)) : ba.linear2db;

MicSum1Ainspect = _ <: attach(_, VHmetersEnvelope(_)) :

```

```
hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1A",
    vbargraph("Mic SF1A Sum [unit:dB]", -80, 20))));
Mic11Binspect = _ <: attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
    hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1B",
        vbargraph("Mic1 SF1B [unit:dB]", -80, 20))));
Mic21Binspect = _ <: attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
    hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 1B",
        vbargraph("Mic2 SF1B [unit:dB]", -80, 20))));
Mic12Ainspect = _ <: attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
    hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 2A",
        vbargraph("Mic1 SF2A [unit:dB]", -80, 20))));
Mic22Ainspect = _ <: attach(_, VHmetersEnvelope(_) :
    hgroup( "Mixer", hgroup( "Signal Flow 2A",
        vbargraph("Mic2 SF2A [unit:dB]", -80, 20))));
```

## RITI\_AutonomousNetwork\_fixedVersion.dsp

```

// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// import audible ecosystemics objects library
import("RITI.lib");

// SYSTEM VARIABLES -----
DelSecondsMax = 12;
SystemSpaceVarOUT = 2.8713;
SystemSpaceVarIN = 2.3132;
BPFOrder = 1;
BPFilters = 32;
NetworkVoices = 4;
InitDCBlockzero = 1;
InitDCBlockpole = 0.995;
InitX0 = 1.2;
InitY0 = 1.3;
InitZ0 = 1.6;

// SYSTEM CONTROLS -----
RoomInterfaceNetwork(Mic1, Mic2, Mic3, Mic4) =
hgroup( "RITI Mixer",
    hgroup( "Lorenz Equation Parameters[0]", Dtf, Betaf, Rhof, Sigmaf),
    hgroup( "Bandpass Filters Bank [1]", BPFILTERBypassf, GlobalBPFrequenciesf,
        GlobalBPBWf, Interpolations1f, Interpolations2f),
    hgroup( "Amplificators [2]", Saturationf, LorenzFeedbackf, NetworkFeedbackf),
    hgroup( "Input/Output [3]", ExternalInputGainf, OutputGainf, MicsOutputf)
)
with {
    Dtf = (vslider("Dt", 0.62, 0, 1, .001)) : onepoletau(.5);
    Sigmaf = (vslider("Sigma", 8.2, 0, 100, .001)) : onepoletau(.5);
    Rhof = (vslider("Rho", 0.010, 0, .1, .001)) : onepoletau(.5);
    Betaf = (vslider("Beta", 0.10, 0, 10, .001)) : onepoletau(.5);

```

```

BPFILTERBypassf = (vslider("BP Bypass", 0, 0, .1, .001)) : onepoletau(.5);
GlobalBPFrequenciesf = (16 ^ vslider("Frequency", 0, -1, 1, .001)) :
    onepoletau(.5);
GlobalBPBWf = (vslider("Bandwidth", 1, 1, 100, .001)) : onepoletau(.5);
Interpolations1f = (vslider("Interpolations 1", 1, 0, 1, .001)) :
    onepoletau(.5);
Interpolations2f = (vslider("Interpolations 2", 1, 0, 1, .001)) :
    onepoletau(.5);
Saturationf = (vslider("Lorenz Tan", 0, 0, 10, .001)) : onepoletau(.5);
LorenzFeedbackf = (10 ^ vslider("Lorenz FB", 0, -1, 1, .001)) : onepoletau(.5);
NetworkFeedbackf = (10 ^ vslider("Network FB", 0, -1, 1, .001)) :
    onepoletau(.5);
OutputGainf = (vslider("Master", 0, 0, 1, .001)) : onepoletau(.5);
ExternalInputGainf = (vslider("External Sum", 0, 0, 100, .001)) :
    onepoletau(.5);
MicsOutputf = (Mic1, Mic2, Mic3, Mic4) :> _ / 4;
};

// MODIFIED LORENZ SYSTEM -----
ModifiedLorenzSystem(x0, y0, z0, dt, beta, rho, sigma, bypassFilter,
    filterPartials, filterOrder, globalFreq, globalAmps, globalBW,
    interpolation1, interpolation2, saturation, dcBlockzero, dcBlockpole,
    internalFeedback, externalInput) =
externalInput : (ModifiedLorenzEquations ~ si.bus(3) : par(i, 3, /(saturation +
    1)) :> _ / 3)
with {
    x_init = x0-x0'; y_init = y0-y0'; z_init = z0-z0';

    ModifiedLorenzEquations(x, y, z, external) =
        ( (( x + sigma * (y - x) * dt + x_init) * internalFeedback + external )
          : dcblocker(dcBlockzero, dcBlockpole) : saturator(saturation + 1) :
          BandpassFiltersBank(bypassFilter, filterPartials, filterOrder,
            globalFreq, globalAmps, globalBW, interpolation1, interpolation2)),

        ( (( y + (rho * x - x * z - y) * dt + y_init) * internalFeedback +

```

```

        external ) : dcblocker(dcBlockzero, dcBlockpole) :
        saturator(saturation + 1) :
    BandpassFiltersBank(bypassFilter, filterPartials, filterOrder,
        globalFreq, globalAmps, globalBW, interpolation1, interpolation2)),

    ( (( z + (x * y - beta * z) * dt + z_init) * internalFeedback +
        external ) : dcblocker(dcBlockzero, dcBlockpole) :
        saturator(saturation + 1) :
        BandpassFiltersBank(bypassFilter, filterPartials, filterOrder,
            globalFreq, globalAmps, globalBW, interpolation1, interpolation2));

};

// GLOBAL SYSTEM NETWORK -----
GlobalSystemNetwork(dt, beta, rho, sigma, bpFilterBypass, globalBPFrequencies,
    globalBPPBW, interpolations1, interpolations2, saturation, lorenzFeedback,
    networkFeedbackGain, externalInputGain, networkOutputGain, micsOutput) = ( loop ~
    _ : (si.block(1), si.bus(NetworkVoices)) ) :
    par( i, NetworkVoices, _ : normalization(1) ) : par( i, NetworkVoices, _ *
        networkOutputGain )
    with{
        loop(networkFeedback) = par(i, NetworkVoices,
            (
                ((networkFeedback * networkFeedbackGain) + ( micsOutput
                    * externalInputGain )) :
                timeVaryingDelay(SystemSpaceVarIN * (NetworkVoices -
                    i), 0) : ModifiedLorenzSystem(InitX0, InitY0,
                    InitZ0, dt, beta, rho, sigma, bpFilterBypass,
                    BPFilters, BPFOrder, globalBPFrequencies, 1,
                    globalBPPBW, interpolations1, interpolations2,
                    saturation, InitDCBlockzero, InitDCBlockpole,
                    lorenzFeedback) : timeVaryingDelay(SystemSpaceVarOUT
                        * (i + 1), 0)
            )
        ) <: (si.bus(NetworkVoices) :> +/NetworkVoices),
        (si.bus(NetworkVoices));

```

```
};
```

```
process = si.bus(8) :> si.bus(4) : RoomInterfaceNetwork : GlobalSystemNetwork;
```

## RITI.lib

```

// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// Import lists: Frequencies, Amps, Bandwidth
import("Cello_D2.lib");

//----- FUNCTIONS ----

// Give a distance in meters - Delay time in samples in output
meterstoSamps(Meters) = ((1000 / 343.1) * Meters) * (ma.SR / 1000);
ms2samp(t) = (t/1000) * ma.SR;
sec2samp(t) = t * ma.SR;
limit(maxl,minl,x) = x : max(minl, min(maxl));
vmeter(i, minx, maxx, x) = attach(x, x: vbargraph("chan %i[2]", minx, maxx));
hmeter(i, minx, maxx, x) = attach(x, x: hbargraph("chan %i[2]", minx, maxx));
VHmetersEnvelope = abs : max ~ -(1.0/ma.SR) :
    max(ba.db2linear(-80)) : ba.linear2db;

//----- CHAOTIC EQUATIONS CONSTRICTIONS ----

saturation(lim, x) = lim * ma.tanh(x / (max(lim, ma.EPSILON)));

dcblocker(zero, pole, x) = x : dcblockerout
    with{
        onezero = _ <: _,mem : _,*(zero) : -;
        onepole = + ~ * (pole);
        dcblockerout = _ : onezero : onepole;
    };

timeVaryingDelay(delTime, fbGain, x) = loop ~ _ : mem
    with {
        loop(fb) = (fb * fbGain + x) :
            de.sdelay( ba.sec2samp(DelSecondsMax),
                1024,
                ba.sec2samp(delTime)-1 );
    };

```

```

    };

//----- FILTERS ----
// Zavalishin's SVF BP FILTER
// optimized BP from the TPT version of the SVF Filter by Vadim Zavalishin
// reference : (by Will Pirkle)
// http://www.willpirkle.com/Downloads/AN-4VirtualAnalogFilters.2.0.pdf
BPSVF(glin, bw, cf, x) = loop ~ si.bus(2) : (! , ! , _)
    with {
        g = tan(cf * ma.PI * (1.0/ma.SR));
        Q = cf / max(ma.EPSILON, bw);
        R = 1.0 / (Q + Q);
        G = 1.0 / (1.0 + 2.0 * R * g + g * g);
        loop(s1, s2) = u1 , u2 , bp * glin
            with {
                bp = (g * (x - s2) + s1) * G;
                bp2 = bp + bp;
                v2 = bp2 * g;
                u1 = bp2 - s1;
                u2 = v2 + s2;
            };
    };

// Zavalishin's Onepole TPT Filter
// reference : same of BPSVF
onePoleTPT(cf, x) = loop ~ _ : ! , si.bus(3) // Outs: lp , hp , ap
    with {
        g = tan(cf * ma.PI * (1.0/ma.SR));
        G = g / (1.0 + g);
        loop(s) = u , lp , hp , ap
            with {
                v = (x - s) * G; u = v + lp; lp = v + s; hp = x - lp; ap = lp - hp;
            };
    };

// Lowpass TPT
LPTPT(cf, x) = onePoleTPT(cf, x) : (_ , ! , !);

```



```

// Highpass TPT
HPTPT(cf, x) = onePoleTPT(cf, x) : (! , _ , !);

// Spectre BP Filter Banks
BandpassFiltersBank(bypassFilter, filterPartials, filterOrder, globalFreq,
    globalAmps, globalBW, interpolation1, interpolation2, x) = x <:
    par(i, filterPartials,
        seq(r, filterOrder,
            BPSVF(
                AmplitudesListinterpolate( (i + 1), interpolation1, interpolation2)
                * globalAmps,
                BandwidthsListinterpolate( (i + 1), interpolation1, interpolation2)
                * globalBW,
                FrequenciesListinterpolate( (i + 1), interpolation1,
                    interpolation2) * globalFreq
            )
        )
    ):> (+ / filterPartials) * (1 - bypassFilter) + x * bypassFilter;

onepoletau(tau, x) = fb ~ _
with {
    fb(y) = (1.0 - s) * x + s * y;
    s = ba.tau2pole(tau);
};

//----- ANALIZERS -----
peakHolder(holdTime, x) = loop ~ si.bus(2) : ! , _
with {
    loop(timerState, outState) = timer , output
    with {
        isNewPeak = abs(x) >= outState;
        isTimeOut = timerState >= (holdTime * ma.SR - 1);
        bypass = isNewPeak | isTimeOut;
        timer = ba.if(bypass, 0, timerState + 1);
        output = ba.if(bypass, abs(x), outState);
    }
}

```

```

    };

};

// RMS with independent attack and release time:
// reference:
// Udo Zlzer: Digital Audio Signal Processing Second Edition
// reference :
// https://fmipa.umri.ac.id/wp-content/uploads/2016/03/
// Udo-Zolzer-digital-audio-signal-processing.9780470997857.40435.pdf
RMS(att,rel,x) = loop ~ _ : sqrt
with {
    loop(y) = (1.0 - coeff) * x * x + coeff * y
    with {
        attCoeff = exp(-2.0 * ma.PI * (1.0/ma.SR) / att);
        relCoeff = exp(-2.0 * ma.PI * (1.0/ma.SR) / rel);
        coeff = ba.if(abs(x) > y, attCoeff, relCoeff);
    };
};

// Moving Average RMS
movingAverage(seconds, x) = x - (x @ N) : fi.pole(1.0) / N
with {
    N = seconds * ma.SR;
};
RMSRectangular(seconds, x) = sqrt(max(0, movingAverage(seconds, x * x)));

// Peak Envelope (envelope follower)
// reference :
// https://www.dariosanfilippo.com/blog/2017/
// lookahead-limiting-in-pure-data/
// reference :
// https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spr05/cos579/DSP/DSP.html
peakenvelope(t,x) = abs(x) <: loop ~ _ * rt60(t)
with{
    loop(y,z) = ( (y,z) : max);
};

```

```

    rt60(t) = 0.001^((1/ma.SR)/t);
};

// peak-hold module with an exponential decay curve
peakHoldwDecay(holdSeconds, frequencyCut, decayT60, x) = x :
    peakHolder(holdSeconds) : LPTPT(frequencyCut) : peakenvelope(decayT60);

//----- LOOKAHEAD LIMITERS ----
// reference :
// https://www.dariosanfilippo.com/blog/2017/
// lookahead-limiting-in-pure-data/
// reference :
// https://users.iem.at/zmoelnig/publications/limiter/
// Peak normalization
// reference :
//
// https://www.hackaudio.com/digital-signal-processing/amplitude/peak-normalization/

normalization(treshold, x) = treshold / ( x : peakHoldwDecay(.1, 500, 10) ) *
    x @ (( 2/1000 ) * ma.SR);

limitation(threshold, x) = ( x : peakHoldwDecay(.1, 500, 10) ) :
    ( threshold / max(ma.EPSILON, _) : min(1.0) ) *
    ( x @ (ms2samp(1))) ;

//----- NONLINEARITY ----

nonLinearity(exponent, refPeriod, y) = y : lowFreqNoise <:
    (nonlinearsig(exponent, ma.tanh(_ * normRMS)))
with{
    lowFreqNoise(x) = x : seq(i, 4, LPTPT(1.0 / refPeriod));
    noiseRMS(x) = x * x : LPTPT(1.0 / (10.0 * refPeriod)) : sqrt;
    normRMS(x) = 1.0 / max(ma.EPSILON, noiseRMS(x));
    nonlinearsig(exponent, x) = ma.signum(x) * pow(abs(x), exponent);

```

};
----

## Cello\_D2.lib

```

// import faust standard library
import("stdfaust.lib");

// INSTRUMENT SPECTRES -----
// FFT analysis

Cello1_D2_frequencies = (
368.0, 221.0, 147.0, 515.0, 736.0, 74.0, 589.0, 810.0, 883.0, 295.0, 442.0,
    662.0, 1693.0, 956.0, 1030.0, 2282.0, 1914.0, 1546.0, 1104.0, 1472.0, 2356.0,
    2503.0, 2135.0, 1251.0, 1398.0, 1325.0, 1178.0, 2061.0, 2429.0, 2209.0,
    1619.0, 2572.0, 1840.0, 2655.0, 1766.0, 2865.0) ;

Cello1_D2_amplitudes = (
1.0, 0.883508750371294, 0.6105272358722508, 0.25009984168236576,
    0.2004373971446242, 0.19782531572463796, 0.15986608084324763,
    0.15408867955329245, 0.15388399774271314, 0.12206611629626225,
    0.07568694217870818, 0.0749419685950924, 0.04993743413946004,
    0.04296305701601583, 0.03695324484801036, 0.035190168499954565,
    0.034299901561064564, 0.027814420294695608, 0.025519908386620865,
    0.025451275008886335, 0.024970356245165314, 0.02376619002590769,
    0.02359690477324046, 0.02108580284017779, 0.020955020563014883,
    0.02080994218773682, 0.020502590513884294, 0.019359564369447416,
    0.01934635943322834, 0.018745547950376563, 0.014962909727368317,
    0.011249397635411025, 0.00849049090994134, 0.0070851384197025405,
    0.006322712098150642, 0.0062269201300692465) ;

Cello1_D2_bandwidths = (
1.0
) ;

Cello2_D2_frequencies = (

```

```
129.0, 782.0, 260.0, 521.0, 391.0, 1042.0, 1949.0, 912.0, 1558.0, 2079.0, 651.0,
2351.0, 1699.0, 2221.0, 1433.0, 1819.0, 442.0, 1308.0, 1178.0, 569.0, 2481.0,
2275.0, 2861.0, 2532.0, 2403.0, 2991.0, 2600.0, 2142.0, 3116.0, 1753.0,
2667.0, 3377.0, 3637.0, 3446.0, 3523.0, 3268.0) ;
```

```
Cello2_D2_amplitudes = (
```

```
1.0, 0.5539841329657997, 0.5527755241243919, 0.3798690322097816,
0.24385623120426272, 0.1858573818584144, 0.1718924484719696,
0.13549203046918346, 0.09550335625230665, 0.06326345700196957,
0.05721228382207657, 0.046121609704541516, 0.04311865463771355,
0.032964828166694375, 0.02880281110676074, 0.02747889262701017,
0.02513218851591026, 0.02498359541143432, 0.024351519031547093,
0.022320475851666407, 0.020022022408488896, 0.01947464397996532,
0.018274828098453825, 0.017151821615801758, 0.016455897816434754,
0.014466403589882717, 0.011927332037780307, 0.010669371414647293,
0.008807995446126208, 0.007513211416567189, 0.007349012756623662,
0.0044685740115062425, 0.004297015920414301, 0.004118966421804356,
0.003062546865966815, 0.002902563274463849) ;
```

```
Cello2_D2_bandwidths = (
```

```
1.0
) ;
```

```
Cello3_D2_frequencies = (
```

```
98.0, 783.0, 294.0, 587.0, 685.0, 196.0, 489.0, 1566.0, 2055.0, 391.0, 1957.0,
1468.0, 881.0, 1076.0, 2153.0, 1664.0, 2544.0, 2349.0, 2251.0, 1370.0,
2446.0, 1272.0, 2642.0, 978.0, 2936.0, 1761.0, 1174.0, 3033.0, 2740.0,
3229.0, 832.0, 2838.0, 3327.0, 3621.0, 3717.0, 3816.0, 3425.0, 3523.0) ;
```

```
Cello3_D2_amplitudes = (
```

```
1.0, 0.5246811846335828, 0.4012585768972376, 0.22942034106512663,
0.20079641370293627, 0.18876983281899867, 0.12502443350296757,
0.0933584257472202, 0.07841217109023603, 0.07786536078021235,
0.06732374792084482, 0.06398941035139119, 0.06048111263906231,
```

```

0.05915731723672648, 0.058731470170536024, 0.05118398937740636,
0.046391926665833076, 0.040066228067825026, 0.03988990722982784,
0.03345736827139034, 0.032867690289697674, 0.026159698256227056,
0.02450082955507741, 0.022720013057591623, 0.01673071239995854,
0.01386228359792361, 0.011125330538207747, 0.01045539895797359,
0.008912949330652495, 0.008614981571685254, 0.007903782014397535,
0.006904461116857643, 0.005737821129793645, 0.004468696578275683,
0.004458611785686046, 0.004255083332897215, 0.004082351498449864,
0.003974921717750587) ;

```

```

Cello3_D2_bandwidths = (
1.0
) ;

```

```

Cello4_D2_frequencies = (
165.0, 247.0, 82.0, 412.0, 329.0, 576.0, 824.0, 906.0, 741.0, 494.0, 659.0,
1560.0, 1725.0, 1071.0, 1658.0, 2152.0, 1313.0, 994.0, 1488.0, 1807.0,
2564.0, 1905.0, 1230.0, 2296.0, 1972.0, 2214.0, 2070.0, 2399.0, 1395.0,
1153.0, 2950.0, 2873.0, 2708.0) ;

```

```

Cello4_D2_amplitudes = (
1.0, 0.40463907988091696, 0.24305538012575184, 0.09564215197843938,
0.07882101859578412, 0.07272871966988338, 0.06616610763986651,
0.05372820415795432, 0.03670485927598048, 0.027388497371127554,
0.021635361017390872, 0.010607924019265583, 0.009233410589260653,
0.008987446999479275, 0.008735131399976701, 0.007861982586356843,
0.007105490361846338, 0.006690209866887384, 0.005720588228210853,
0.005655438992297758, 0.00564938401160071, 0.0054292290841770575,
0.00528525120649931, 0.0051118414293123745, 0.004984368543658675,
0.004299506779823275, 0.004149143995148571, 0.003924111275742912,
0.003601811817177141, 0.002426805651034355, 0.001983449226846196,
0.0017614827121850407, 0.0015088640939487819) ;

```

```

Cello4_D2_bandwidths = (

```

```

1.0
) ;

// INSTRUMENT SPECTRES -----
// index of the lists

FrequenciesListCH1(index) = ba.take(index, Cello1_D2_frequencies) ;
AmplitudesListCH1(index) = ba.take(index, Cello1_D2_amplitudes) ;
BandwidthsListCH1(index) = ba.take(1, Cello1_D2_bandwidths) ;

FrequenciesListCH2(index) = ba.take(index, Cello2_D2_frequencies) ;
AmplitudesListCH2(index) = ba.take(index, Cello2_D2_amplitudes) ;
BandwidthsListCH2(index) = ba.take(1, Cello2_D2_bandwidths) ;

FrequenciesListCH3(index) = ba.take(index, Cello3_D2_frequencies) ;
AmplitudesListCH3(index) = ba.take(index, Cello3_D2_amplitudes) ;
BandwidthsListCH3(index) = ba.take(1, Cello3_D2_bandwidths) ;

FrequenciesListCH4(index) = ba.take(index, Cello4_D2_frequencies) ;
AmplitudesListCH4(index) = ba.take(index, Cello4_D2_amplitudes) ;
BandwidthsListCH4(index) = ba.take(1, Cello4_D2_bandwidths) ;

// INSTRUMENT SPECTRES -----
// interpolations

// linear interpolation
linInterpolate(x0, x1, delta) = x0 + delta * (x1-x0);
siglinInterpol(order, x) = x : seq(r, order, interpolate)
with{
    interpolate(y) = y + .5 * (y' - y);
};

// bilinear interpolation
bilinInterpolate(x0, x1, x0b, x1b, dt1, dt2) =
    linInterpolate(

```



```
    linInterpolate(x0, x1, dt1),
    linInterpolate(x0b, x1b, dt1),
    dt2)
with{
    linInterpolate(x0, x1, delta) = x0 + delta * (x1-x0);
};

// lists interpolations
FrequenciesListinterpolate(index, dt1, dt2) =
    bilinInterpolate(FrequenciesListCH1(index), FrequenciesListCH2(index),
    FrequenciesListCH3(index), FrequenciesListCH4(index), dt1, dt2);
AmplitudesListinterpolate(index, dt1, dt2) =
    bilinInterpolate(AmplitudesListCH1(index), AmplitudesListCH2(index),
    AmplitudesListCH3(index), AmplitudesListCH4(index), dt1, dt2);
BandwidthsListinterpolate(index, dt1, dt2) =
    bilinInterpolate(BandwidthsListCH1(index), BandwidthsListCH2(index),
    BandwidthsListCH3(index), BandwidthsListCH4(index), dt1, dt2);
```

## **B Second appendix**

## References

Alberto Giustiniano, Luca Fabbris e. *CFP18 cibernetica, sistemi, teorie, modelli*.

URL: <https://philosophykitchen.com/2022/03/cfp18-cibernetica-sistemi-teorie-modelli/>. (accessed: 03.11.2022).

Barrow-Green, June. *L'Ottocento: astronomia. Il problema dei tre corpi e la sta-*

*bilità del Sistema solare*. URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare\\_%28Storia-della-Scienza%29/#:~:text=La%20formulazione%20del%20problema%20dei,il%20moto%20negli%20istanti%20successivi..](https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare_%28Storia-della-Scienza%29/#:~:text=La%20formulazione%20del%20problema%20dei,il%20moto%20negli%20istanti%20successivi..) (accessed: 03.11.2022).

Black, H.S. “Stabilized Feed-Back Amplifiers”. In: *ALEE. committee on communication* (1933).

Collins, Nicolas. “‘Pea Soup’ – A History”. In: (September, 2011), pp. 1–23. URL: <http://www.nicolascollins.com/texts/peasouphistoryOLD.pdf>.

Di Scipio, Agostino. *A Relational Ontology of Feedback*. en. Jan. 2022. DOI: 10.47041/TKUL7223. URL: <https://echo.orpheusinstituut.be/article/a-relational-ontology-of-feedback> (visited on 11/22/2022).

— *Circuiti del Tempo Un percorso storico-critico nella creatività musicale elettroacustica e informatica*. it. N. 38. Lucca: Libreria Musicale Italiana, 2021. ISBN: 9788855430685.

— “Composition by exploration of non-linear dynamic systems”. In: *ICMC Glasgow 1990 Proceedings*. C.S.C. University of Padova, 1990, pp. 324–327.

— “Polveri Sonore - Una prospettiva ecosistemica della composizione”. it. In: *La Camera Verde* (2014). Publisher: La Camera Verde, 17–42 Pages. (Visited on 11/22/2022).

Dunbar-Hester, Christina. “Listening to Cybernetics: Music, Machines, and Nervous Systems, 1950-1980”. en. In: *Science Technology e Human Values* 35.1 (2010), pp. 113–139. URL: <http://www.jstor.org/stable/27786196>.

- Lorenz, Edward. “Deterministic Nonperiodic Flow”. In: *Journal of Atmospheric Sciences* 20.2 (1963), pp. 130–148.
- Maxwell, Mr. J. C. “on Governors”. In: (1868).
- Nitschke, Mathis. *Analog Neural Synthesis*. URL: <https://mlure.art/analog-neural-synthesis/>. (accessed: 04.11.2022).
- Patteson, Thomas W. “The Time of Roland Kayn’s Cybernetic Music”. In: (), pp. 1–11. URL: <https://kayn.nl/wp-content/uploads/2016/12/The-Time-of-Roland-Kayns-Cybernetic-Music-Thomas-Patteson.pdf>.
- Ranzato, Sofia. “L’origine del mondo divino Una lettura di Esiodo”. ita. Thesis. Facoltà di Lettere e Filosofia C. d. L. S. in Scienze dell’Antichità, 2006/2007, p. 10.
- Sanfilippo, Dario. “Time-Domain Adaptive Algorithms for Low- and High-Level Audio Information Processing”. en. In: *Computer Music Journal* 45.1 (Mar. 2021), pp. 24–38. ISSN: 0148-9267, 1531-5169. DOI: 10.1162/comj\_a\_00592. URL: <https://direct.mit.edu/comj/article/45/1/24/110389/Time-Domain-Adaptive-Algorithms-for-Low-and-High> (visited on 11/22/2022).
- “Time-variant infrastructures and dynamical adaptivity for higher degrees of complexity in autonomous music feedback systems: the Order from noise (2017) project”. en. In: *Musica/Tecnologia* (Aug. 2018). Artwork Size: 119-129 Pages Publisher: Musica/Tecnologia, 119–129 Pages. DOI: 10.13128/MUSIC\_TEC-23804. URL: <https://oajournals.fupress.net/index.php/mt/article/view/7482> (visited on 11/22/2022).
- Sanfilippo, Dario and Andrea Valle. “Feedback Systems: An Analytical Framework”. In: *Computer Music Journal* 37.2 (2013), pp. 12–27. DOI: doi:10.1162/COMJa00176. URL: <https://direct.mit.edu/comj/article-abstract/37/2/12/94420/Feedback-Systems-An-Analytical-Framework?redirectedFrom=PDF>.
- Scott, Bernard. “Second-order cybernetics: an historical introduction”. In: *Kybernetes* 33.9.10 (2003), pp. 1365–1378. DOI: doi:10.1108/03684920410556007.

URL: <https://sites.ufpe.br/moinhojuridico/wp-content/uploads/sites/49/2021/10/Ciber-2b-22-out.-second-order-cybernetcs.pdf>.

Technology, Massachusetts Institute of. *Alvin Lucier on "I am sitting in a room"*.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=v9XJWBZBzq4>. (accessed: 04.11.2022).

Von Foerster, Heinz. *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*. en. Vol. 2. 1. 2005. DOI: 10.29173/cmplct8737. URL: <https://journals.library.ualberta.ca/complicity/index.php/complicity/article/view/8737> (visited on 11/22/2022).