Q-CYCLE, ANALISI DELL'INTERAZIONE UOMO-MACCHINA IN UNO SCENARIO DI COMPOSIZIONE MUSICALE ASSISTITA

Q-CYCLE, ANALYSIS OF HUMAN-MACHINE INTERACTION IN A COMPUTER-AIDED COMPOSITION CASE

ANTONIO GRECO

Abstract (IT): Il presente contributo esplora il rapporto uomo-macchina all'interno di un *interactive music system*, analizzando come il sistema generativo ridefinisca il processo di composizione. A tale scopo viene introdotto Q-Cycle, un modello computazionale sperimentale per la sintesi sonora e la *performance* in tempo reale, la cui architettura si basa sul disaccoppiamento logico-strutturale tra il motore acustico e l'infrastruttura decisionale. La trasposizione dal dominio logico alla prassi performativa si concretizza nell'installazione *site-specific 'How To Choose In The Infinity*?'. Attraverso l'analisi quantitativa dei dati esportati in *runtime*, si determina la formalizzazione matematica del comportamento emergente. Ne deriva un paradigma di *Interactive Composing*, in cui la morfologia musicale scaturisce dal dialogo dinamico tra la variabilità generativa della macchina e l'intenzionalità umana, configurando l'ambiente sonoro come un ecosistema adattivo.
Keywords: Composizione Algoritmica, Interactive Music Systems, Processi Stocastici, Sistemi Generativi, Live Electronics.

Abstract (EN): This paper explores the human-machine relationship within an interactive music system, analyzing how the generative system redefines the composition process. To this end, Q-Cycle is introduced, an experimental computational model for sound synthesis and real-time performance, whose architecture is based on the logical-structural decoupling between the acoustic engine and the decision-making infrastructure. The transposition from the logical domain to performance practice is realized in the site-specific installation 'How To Choose In The Infinity?'. Through the quantitative analysis of data exported at runtime, the mathematical formalization of the emergent behavior is determined. The result is a paradigm of Interactive Composing, in which musical morphology stems from the dynamic dialogue between the generative variability of the machine and human intentionality, configuring the sonic environment as an adaptive ecosystem.
Keywords: Algorithmic Composition, Interactive Music Systems, Stochastic Processes, Generative Systems, Live Electronics.

Q-CYCLE. ANALISI DELL'INTERAZIONE UOMO-MACCHINA IN UNO SCENARIO DI COMPOSIZIONE MUSICALE ASSISTITA

ANTONIO GRECO

Introduzione

L'ingresso del calcolatore elettronico nell'ambito musicale ha scardinato i presupposti cognitivi della composizione tradizionale. Scrivendo per uno strumentista umano, l'autore si affida a una "coscienza musicale incosciente" fatta di istinti e consuetudini[1]. Interagire con un software, invece, esige l'esplicitazione di ogni parametro, costringendo il compositore a adottare un metodo adeguato alle intenzioni e trasformando l'atto creativo in un «*processo di decisione permanente*»[2]. L'intrinseca difficoltà di controllare l'ambiente esecutivo[3] genera una complessità tale da riattualizzare *le vieux dualisme forme et son*[4] descritto da Hugues Dufourt polarizzando la ricerca in due direzioni distinte: da un lato un approccio prevalentemente 'sonologico', incentrato sul *digital signal processing*; dall'altro uno

[1] Jonathan HARVEY, *Le miroir de l'ambiguïté*, in Jean-Baptiste BARRIÈRE (a cura di), *Le timbre, métaphore pour la composition*, Christian Bourgois Éditeur / IRCAM, Paris, 1991, p. 455.

[2] Leonard B. MEYER, *Style and Music: Theory, History, and Ideology*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1989.

[3] Alvise VIDOLIN, *Suonare lo spazio elettroacustico. Materiale didattico per il corso Sistemi di Elaborazione per la Musica*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova, Padova, 2001.

[4] Hugues DUFOURT, *Difficoltà di una presa di coscienza teorica*, in Agostino DI SCIPIO (a cura di), *Teoria e prassi della musica nell'era dell'informatica*, Editori Laterza, Bari, 1995, p. 30.

distintamente 'compositivo', fondato sulla *knowledge representation theory*[5]. Fin dalle origini tracciate da Max Mathews, la *Computer Music* ha evidenziato una natura «*multifaceted*»[6], scindendosi sull'indagine delle microstrutture del suono, ovvero l'*écriture interne* e l'organizzazione macro-strutturale della partitura o *écriture externe*[7].

Nel tentativo di misurare e oggettivare questa vasta rete parametrica, i teorici hanno inizialmente attinto a modelli puramente matematici. Abraham Moles, ad esempio, applicò la Teoria dell'Informazione per calcolare il valore di un evento sonoro in base alla sua probabilità statistica[8], mentre George D. Birkhoff propose un approccio algebrico in cui il valore estetico scaturiva dal rapporto diretto tra l'ordine strutturale e la complessità dell'opera[9]. Nei primi esperimenti, l'elaboratore gestiva esclusivamente l'organizzazione macro-strutturale, come nelle opere pionieristiche quali *Illiac Suite for String Quartet*[10] e *ST/10-1,080262*[11], lasciando l'esecuzione materiale a ensemble tradizionali. Il salto nella materia sonora avvenne con la sintesi numerica inaugurata dallo stesso Max Mathews con *MUSIC I* ai *Bell Telephone*

[5] Otto LASKE, *Toward a definition of computer music*, in Larry AUSTIN e Thomas CLARKE (a cura di), *Proceedings of the 1981 International Computer Music Conference (ICMC)*, Computer Music Association, Denton (Texas), 1981, p. 37.

[6] Charles DODGE e Thomas A. JERSE, *Computer Music: Synthesis, Composition, and Performance*, Schirmer Books, New York, 1985, p. xiii.

[7] Pierre Boulez, *Le timbre et l'écriture, le timbre et le langage*, in Jean-Baptiste BARRIÈRE (a cura di), *Le timbre, métaphore pour la composition*, Christian Bourgois Éditeur / IRCAM, Paris, 1991, pp. 545.

[8] Abraham MOLES, *Théorie de l'information et perception esthétique*, Flammarion, Paris, 1958.

[9] George d. BIRKHOFF, *Aesthetic Measure*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1933.

[10] Lejaren a. Hiller e leonard m. ISAACSON, *Experimental Music: Composition with an Electronic Computer*, McGraw-Hill, New York, 1959.

[11] Iannis XENAKIS, *Musiques formelles*, in «La Revue Musicale», 1963, p. 165.

Laboratories[12], portata avanti anche in Italia da poli di ricerca come lo S2FM a Firenze, lo SMET a Torino e il gruppo NPS a Padova[13]. Questi due aspetti – l'astrazione logica e la genesi fisica del suono – hanno viaggiato a lungo su binari paralleli, generando quel divario teorico definito «*semantic gap*»[14]. Proprio l'urgenza di sanare questa frattura ha guidato lo sviluppo degli odierni ambienti di *interactive composing systems*, capaci di controllare simultaneamente la macrostruttura algoritmica e la microstruttura timbrica[15].

1. Q-Cycle, un *framework* per la generazione sonora

Il presente capitolo documenta l'architettura di Q-Cycle, un *framework* sperimentale per l'informatica musicale orientato alla sintesi sonora e all'interazione performativa in tempo reale. L'obiettivo, tramite questo sistema, è formalizzare un paradigma compositivo in cui la generazione acustica e i processi decisionali autonomi operano in parallelismo asincrono. L'infrastruttura, basata su *Web Audio API*[16] per garantire la stabilità del rendering *DSP* tramite grafi asincroni, presenta una topologia a grafo radiale. Tale struttura si articola in un nodo decisionale centrale e quattro cicli generativi disaccoppiati in una configurazione logico-spaziale da cui deriva il nome

[12] Max V. MATHEWS, *The Digital Computer as a Musical Instrument*, in «Science», vol. 142, n. 3592, 1963, pp. 553-554.

[13] Laura ZATTRA, *Teresa Rampazzi. Pioneer of Italian electronic music*, in *Proceedings of the XIV Colloquium on Musical Informatics (XIV CIM 2003)*, Firenze, 2003, p. 11.

[14] Otto LASKE, *Toward a definition of computer music* cit., pp. 37-41.

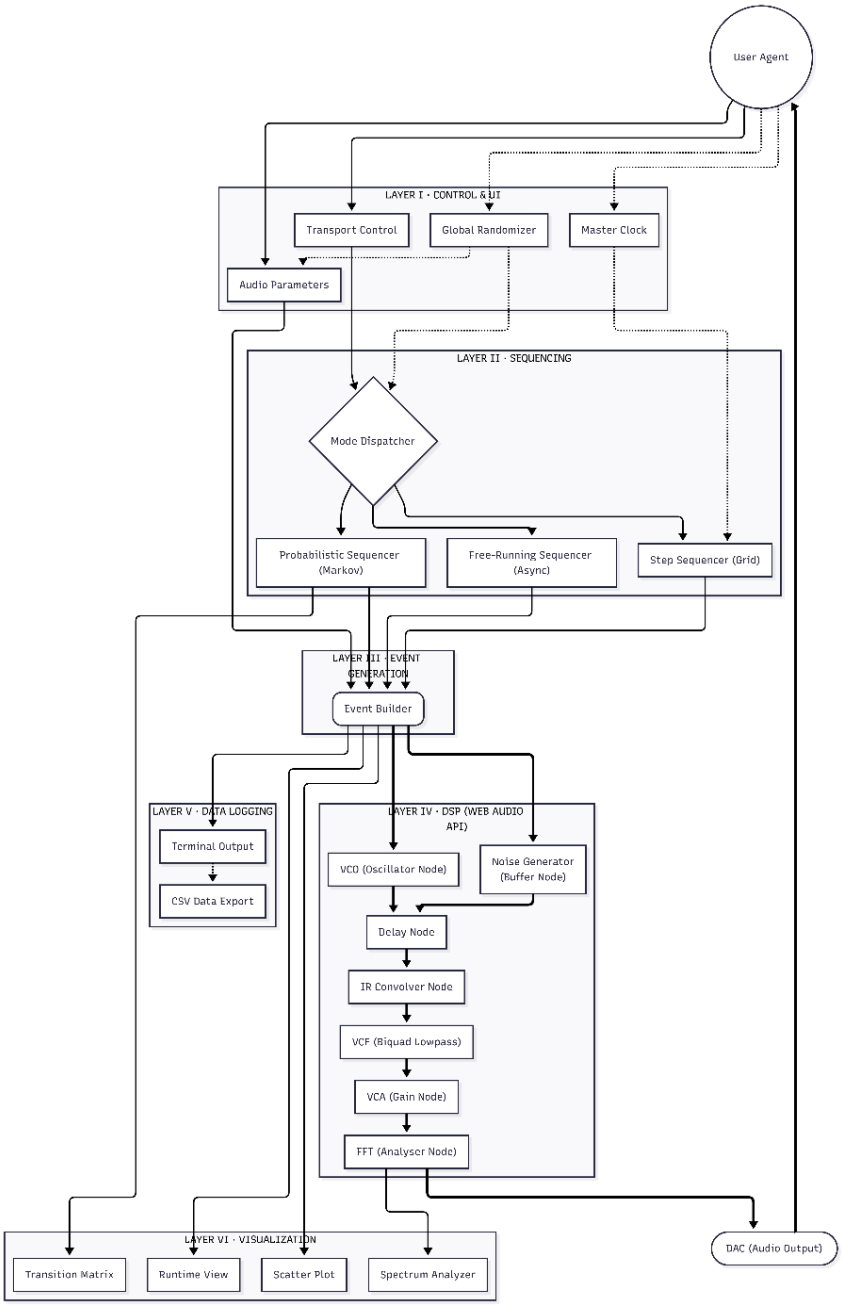
[15] *Ibidem.*

[16] Paul ADENOT e Raymond TOY (a cura di), *Web Audio API*, *W3C Recommendation, World Wide Web Consortium*, 2021, disponibile all'indirizzo https://www.w3.org/TR/webaudio/.

del progetto. L'entità computazionale primaria è il 'rotore', una macchina a stati autonoma che agisce come generatore di forme d'onda, operante in parallelo sui domini di frequenza e durata. Svincolata dalle tradizionali *timeline* lineari, la generazione dei pattern acustici è governata da algoritmi pseudo-casuali vincolati entro specifiche *boundary conditions* alterabili dinamicamente in *runtime*. Per organizzare l'elevata entropia acustica prodotta dall'automazione combinatoria, il processo di *routing* tra rotori è sottoposto al controllo logico di catene di Markov. Il nucleo algoritmico si fonda su un processo stocastico in cui il motore computazionale non si limita a calcolare la casualità parametrica del singolo evento sonoro, ma determina stocasticamente anche le probabilità di transizione tra i nodi del sistema.

1.1 Architettura di sistema

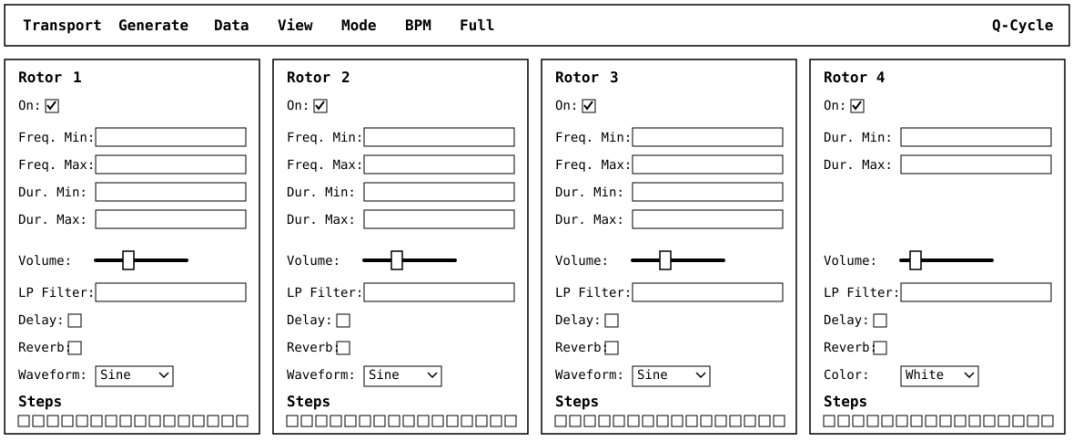
La formalizzazione architetturale di Q-Cycle si basa su un modello gerarchico a sei livelli operativi (*layers*). Tale struttura è concepita per stabilire un rigoroso disaccoppiamento tra l'astrazione logico-procedurale (*control rate*) e il dominio DSP per la generazione del segnale (*audio rate*). Questa partizione isola il calcolo stocastico e gli algoritmi di *scheduling* dal motore acustico, mitigando i rischi di *thread blocking* e garantendo la stabilità del flusso in tempo reale, anche con un'elevata densità macro-strutturale.



[**Fig. 1 –** Q-Cycle, *Block diagram*. Lo schema illustra l'architettura di sistema strutturata a livelli (*layers*), evidenziando il rigoroso disaccoppiamento funzionale tra il dominio logico-decisionale e il sottosistema preposto alla sintesi sonora]

1.1.1 Layer I, interfaccia utente

Il primo livello funge da interfaccia e definisce lo stato di inizializzazione dell'architettura. Operando come strato di configurazione statica attraverso cui l'operatore imposta le condizioni, il sistema istanzia dinamicamente l'infrastruttura di controllo per ciascun rotore indipendente. Nello specifico, questa fase consente di parametrizzare i domini operativi fondamentali: i limiti di escursione tonale (*Pitch* Min/Max) e temporale (*Speed* Min/Max), i livelli di ampiezza (*VCA*), le frequenze di taglio dei filtri passa-basso (*VCF*), i nodi di convoluzione (*delay e reverb*) e la selezione della sorgente acustica primaria (forma d'onda o generatore di rumore). Oltre gli standard operativi di sistema, una *navbar* in alto permette all'utente di poter selezionare diverse configurazioni disponibili.



[**Fig. 2** – Interfaccia utente di Q-Cycle]

1.1.2 Layer II, Mode Dispatcher

Il secondo livello definisce i criteri di pianificazione temporale e determina l'indice del rotore da attivare. Un modulo di smistamento indirizza il flusso verso tre possibili paradigmi di sequenziamento che l'utente può definire:

1. *Step Grid* esegue una scansione deterministica di una griglia temporale quantizzata, convertendo i BPM in intervalli assoluti in millisecondi per le suddivisioni in sedicesimi.
2. *Asynchronous* adotta un'architettura asincrona con timer indipendenti per ciascun rotore, in cui l'intervallo è calcolato campionando una distribuzione uniforme entro i limiti di velocità.
3. *Markov Chain* è governato da una catena di Markov del primo ordine. La transizione allo stato successivo dipende esclusivamente dallo stato precedente ad esso. Il comportamento predittivo si struttura su una matrice di transizione in cui la somma delle probabilità di ciascuna riga soddisfa il vincolo di unitarietà. L'algoritmo integra le probabilità e le confronta con una variabile pseudocasuale $r \in [0,1)$ per attivare il passaggio di stato. Questo modello conferisce al sistema una coerenza sintattica intrinseca, elevando l'automazione dalla singola nota agli «oggetti di livello superiore»[17] e rendendo la manipolazione della matrice un concreto atto compositivo. Tale modalità sarà quella maggiormente approfondita.

[17] Charles AMES, *The Markov Process as a Compositional Model: A Survey and Tutorial*, in «Leonardo», vol. 22, n. 2, 1989, p. 175.

1.1.3 Layer III, Middleware

Il terzo livello opera in qualità di interfaccia logica di traduzione tra la struttura decisionale astratta e il motore acustico. Il modulo *Event Builder* acquisisce le condizioni di confine dal primo livello e calcola algebricamente i valori assoluti per lo specifico evento sonoro. Nello specifico, per la frequenza f, la valutazione impiega un'interpolazione lineare formalizzata dall'equazione

$$f = f_{min} + r \cdot (f_{max} - f_{min})$$

dove r rappresenta una variabile pseudocasuale campionata nell'intervallo $[0,1)$. Questo livello amministra l'intero ciclo di vita dell'istanza DSP, provvedendo al *dispatching* simultaneo dei dati generati verso l'uscita audio, il *logging* e il *rendering* visivo.

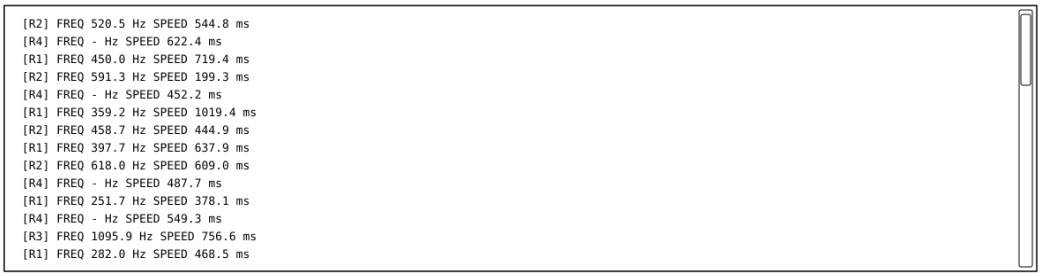
1.1.4 Layer IV, Digital Signal Processing (DSP)

Il quarto livello implementa la generazione del suono tramite un grafo di nodi volto a emulare la sintesi sottrattiva. I primi tre 'rotori' sono composti da *Oscillator Node* (VCO) con selettore per forma d'onda (*Sine, Square, Triangle, Sawtooth*), mentre il quarto è riservato alla generazione di rumore tramite manipolazione diretta di *buffer* PCM (*Pulse-Code Modulation*). Il segnale attraversa nodi a convoluzione come *delay* e riverbero, il flusso sonoro attraversa un filtro passa-basso biquadratico (*VCF*) e converge in un nodo di guadagno operante come amplificatore controllato (*VCA*). L'architettura terminale del grafo prevede l'inserimento di un nodo per la Trasformata di Fourier veloce *(FFT*), collocato a monte del convertitore digitale-analogico (*DAC*),

allo scopo di garantire l'estrazione sincrona dei dati spettrali necessari ai livelli di visualizzazione.

1.1.5 LAYER V, Data Log

Il quinto livello dell'architettura gestisce il tracciamento persistente e l'archiviazione dei parametri acustici generati, assolvendo a una funzione critica per l'analisi statistica e morfologica a posteriori. Il processo di *logging* si dirama in due direzioni operative simultanee: il *mirroring* testuale in *runtime* e la serializzazione dei dati in memoria temporanea. A ogni ciclo di esecuzione, le specifiche dell'evento sonoro popolano dinamicamente un *array* di oggetti, all'interno del quale vengono indicizzati l'identificativo numerico del rotore, la frequenza in Hz e la durata in millisecondi. L'intero *dataset* accumulato viene infine serializzato e convertito in un formato *CSV* (*Comma-Separated Values*); l'esportazione verso la memoria di massa locale avviene generando proceduralmente un oggetto binario (*Blob*), che il *browser* converte in un URI scaricabile, garantendo l'archiviazione dei dati senza la necessità di appoggiarsi a un'infrastruttura *server-side*.

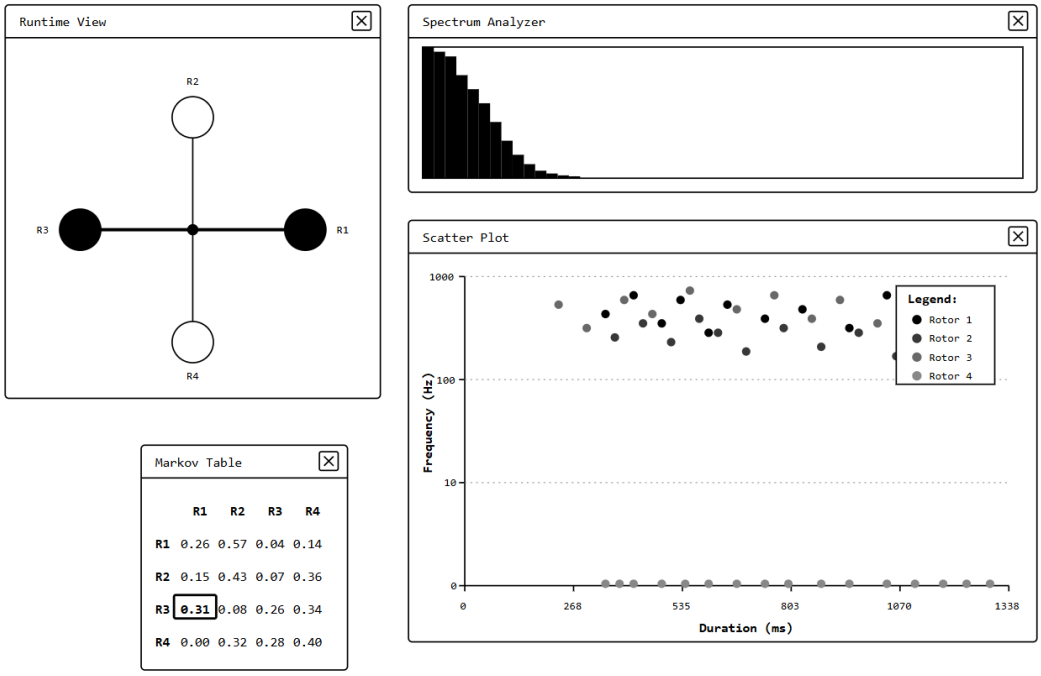


[**Fig. 3** – Log Visualization]

1.1.6 Layer VI, Data Visualization

In conclusione, la *pipeline* traduce la logica numerica in *feedback* visivo sincrono. Include una *Markov Table* dinamica per evidenziare le transizioni di stato e una rappresentazione vettoriale radiale sincronizzata con il *trigger* degli eventi. Per l'analisi distributiva, un diagramma a dispersione (*scatter plot*) mappa temporalmente gli eventi, collocando la durata sulle ascisse e la frequenza sulle ordinate. Per gestire l'ampia escursione dello spettro acustico, l'asse verticale adotta una specifica trasformazione logaritmica proporzionata alla frequenza massima del sistema. Questa scelta matematica permette di assecondare il modo naturale in cui l'orecchio umano percepisce l'altezza dei suoni, garantendo una leggibilità analitica. Evitando infatti che le frequenze basse si comprimano in modo illeggibile sul fondo del grafico, si assicura una distribuzione visiva coerente dell'intero spettro sonoro[18].

[18] Antonio GRECO, *Q-Cycle - A model for data-driven sound generation*, 2026, video demo disponibile all'indirizzo https://www.youtube.com/watch?v=h3pJkR54RRs.



[**Fig. 4** – Data Visualization Tool (Sezione View)]

1.2 Possibili sviluppi futuri

La descrizione organizza l'architettura di Q-Cycle sotto un profilo strettamente logico, astraendola dalle specificità del linguaggio di programmazione. Tale analisi architetturale pone le basi per un'evoluzione del *framework* in senso puramente modulare. Sotto il profilo computazionale, il rigoroso disaccoppiamento strutturale, oltre a garantire maggiore stabilità in fase esecutiva, permette un'elevata intercambiabilità dei moduli logici; in quest'ottica, il livello di *middleware* (*Event Builder*) si presta a essere esteso per integrare nuovi modelli decisionali (come reti neurali) per l'assegnazione dinamica dei pesi stocastici, delegando funzioni di *triggering* e instradamento dei nodi operativi. Un'ulteriore linea implementativa

risiede nell'evoluzione del dominio generativo e del motore di sintesi sonora. Oltre alla sintesi sottrattiva, i rotori potrebbero essere convertiti o affiancati da moduli di riproduzione campionata (*sample-based*). L'indipendenza dei livelli architetturali consentirebbe infatti di applicare le medesime trasformazioni algebriche direttamente su *buffer* audio preregistrati. Infine, per quanto concerne l'applicazione in contesti di *live electronics* e installazioni *site-specific*, il sistema offre ampi margini per l'integrazione di un piano di spazializzazione del suono. L'introduzione di algoritmi di *panning* multicanale, come la codifica in quadrifonia o l'audio *ambisonics*, permetterebbe di mappare le matrici probabilistiche anche nel dominio spaziale, traducendosi in un'esperienza 'acusmatica' multicanale.

1.3 Formalizzazione dell'interazione in Q-Cycle

La seguente sezione propone la formalizzazione di un caso studio specifico, esaminando l'applicazione di processi stocastici sia al dominio delle grandezze acustiche (livello microstrutturale), sia all'infrastruttura decisionale di sequenziamento (livello macro-strutturale). In questo assetto, l'autore sospende il proprio arbitrio compositivo diretto tramite manipolazione dei domini, delegando integralmente la determinazione delle variabili parametriche e lo sviluppo dell'intera forma musicale al sistema. L'obiettivo teorico consiste nel delineare un paradigma basato su una delega procedurale totale, assimilabile a un sistema generativo operante in logica *black-box*. Nello specifico, mantenendo costante e inalterato il dominio finito delle grandezze acustiche generate (tramite funzione di *Random Values*), il motore di *scheduling* viene sottoposto all'iterazione di due distinte matrici di transizione stocastica (funzione di *Random Sequences*). L'obiettivo dell'analisi è dimostrare come la sola variazione dei pesi decisionali modifichi la macrostruttura sonora. Il fine ultimo è formalizzare che il risultato acustico emergente non è casuale, ma è direttamente

determinato dall'interazione tra la nuova sintassi probabilistica imposta al sistema e i vincoli acustici di base che caratterizzano i singoli rotori.

Si definisce l'insieme dei contesti generativi (corrispondenti ai rotori indipendenti del sistema) come un insieme finito:

$$R = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$$

A ciascun contesto $r \in R$ è associato un dominio $D_r \subset \mathbb{R}$, che rappresenta lo spazio dei valori acustici ammessi per frequenza e durata. Di conseguenza, un singolo evento sonoro generato al passo k si configura come una terna ordinata:

$$e_k = (r_k, f_k, d_k)$$

dove $r_k \in R$ indica il rotore attivo, mentre la coppia $(f_k, d_k) \in D_{r_k}$ definisce rispettivamente la frequenza in Hz e la durata in millisecondi. L'evoluzione temporale — ovvero la traiettoria sonora prodotta dal sistema — è descritta dalla sequenza ordinata degli eventi:

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_N)$$

Tale successione è governata tramite una Catena di Markov omogenea, la cui sintassi è definita in una matrice stocastica di transizione:

$$W = [w_{ij}], \ dove \ \ i, j \in R$$

Ogni coefficiente w_{ij} esprime la probabilità condizionata di transitare dallo stato r_i allo stato r_j, tale per cui $w_{ij} \geq 0$ e $\sum_{j \in R} w_{ij} = 1$. Si assume inoltre una distribuzione di probabilità iniziale π_0 sullo spazio degli stati R, avente supporto pieno, ossia tale da garantire che ogni rotore abbia una probabilità non-nulla di essere il nodo di origine della sequenza ($\pi_0(r) > 0$).

La forma sonora emergente Φ è definita come la legge di distribuzione probabilistica della traiettoria E in funzione della matrice W. Essa formalizza la relazione matematica diretta tra la successione dei micro-eventi acustici e_k e i pesi decisionali w_{ij}. In questo spazio relazionale la densità e la ricorrenza degli eventi acustici sono vincolate in modo strutturale dai coefficienti stocastici, determinando l'output macro-strutturale come evento sonoro pilotato dal peso.

$$\Phi(E, W) = \pi_0(r_i) \prod_{k=1}^{N-1} w_{i_k, j_k} \quad \text{con } j_k = i_{k+1}$$

1.4 Dimostrazione formale

Siano dati due insiemi di dati A e B che condividono i medesimi limiti microstrutturali: lo stesso insieme di rotori R, gli stessi domini acustici continui $\{D_r\}_{r \in R}$ e la medesima distribuzione iniziale π_0. Ai due processi vengono assegnate due matrici di transizione differenti:

$$W^{(A)} \text{ e } W^{(B)}$$

L'obiettivo analitico è dimostrare che se $W^{(A)} \neq W^{(B)}$, le distribuzioni probabilistiche indotte sulle traiettorie sonore finali Φ, saranno intrinsecamente diverse, ovvero

$$\Phi\left(W^{(A)}\right) \neq \Phi\left(W^{(B)}\right).$$

Poiché le due matrici non coincidono, deve esistere per definizione almeno una coppia di stati $(i, j) \in R \times R$ per la quale le probabilità di transizione divergano

$$w_{ij}^{(A)} \neq w_{ij}^{(B)}$$

Considerando la probabilità congiunta che una traiettoria abbia origine nel contesto r_i e che il contesto immediatamente successivo sia r_j, tale valore è calcolabile come

$$\pi_0(r_i) w_{ij}$$

Sostituendo i parametri dei due processi in esame, si ottiene che per il Processo A tale probabilità è pari a $\pi_0(r_i) w_{ij}^{(A)}$, mentre per il Processo B equivale a $\pi_0(r_i) w_{ij}^{(B)}$. Per la proprietà non-nulla $\pi_0(r_i) > 0$, ne consegue che

$$\pi_0(r_i) w_{ij}^{(A)} \neq \pi_0(r_i) w_{ij}^{(B)}$$

Tale disuguaglianza dimostra che i due processi assegnano probabilità differenti alla medesima configurazione sequenziale di partenza. Di conseguenza, le distribuzioni stocastiche indotte sull'intero spazio delle traiettorie non possono coincidere.

$$\Phi\left(W^{(A)}\right) \neq \Phi\left(W^{(B)}\right).$$

1.5 Analisi dei dati

L'analisi condotta sulla coppia di dataset generati denominati A e B ha l'obiettivo di verificare l'impatto dell'alterazione dei pesi decisionali sulla struttura musicale generata. Per determinare quantitativamente se la distanza tra le due esecuzioni indichi una reale deviazione compositiva o un semplice artefatto probabilistico, si adotta la metodologia dell'Analisi della Varianza (ANOVA), elaborata tramite il modulo *f_oneway* della libreria *scipy.stats* (*Python*).

La procedura di validazione si allinea ai criteri di valutazione standardizzati per gli *Auditory Displays*[19]. L'impiego di questa statistica non è finalizzato al semplice confronto delle medie parametriche, ma all'esame strutturale della fluttuazione del sistema. L'analisi procede scomponendo la variabilità totale in due metriche contrapposte, sintetizzate tramite il Test F di Fisher-Snedecor. Il primo parametro stimato è la Varianza Tra i Gruppi (*Between-Group Variance*, $\sigma^2_{between}$). Questo calcolo quantifica l'effetto diretto della rigenerazione dei pesi, misurando la dispersione delle medie dei singoli dataset rispetto alla media generale dell'intero sistema:

$$MS_{between} = \frac{n_A(\bar{x}_A - \bar{x}_{tot})^2 + n_B(\bar{x}_B - \bar{x}_{tot})^2}{k - 1}$$

Nel modello analitico:

- n_A e n_B indicano la numerosità campionaria dei rispettivi gruppi.

[19] Thomas HERMANN, Andy HUNT, John G. NEUHOFF (a cura di), *The Sonification Handbook*, Logos Verlag, Berlin, 2011, p. 127.

- $\bar{x}_A$ e $\bar{x}_B$ rappresentano le medie campionarie calcolate in modo indipendente.
- $\bar{x}_{tot}$ è la media generale calcolata sull'intero set di dati congiunto.
- $k-1$ esprime i gradi di libertà intergruppo (pari all'unità nel confronto bi-campionario studiato, dove $k=2$).

Per stabilire la rilevanza dello scostamento calcolato al punto precedente, è necessario definire un termine di paragone interno. Viene pertanto calcolata la Varianza Entro i Gruppi (*Within-Group Variance*, σ^2_{within}). Tale parametro stima la naturale tolleranza probabilistica all'interno dei singoli dataset, misurando le fluttuazioni transizionali generate in *runtime* dalle Catene di Markov:

$$MS_{within} = \frac{(n_A - 1)s_A^2 + (n_B - 1)s_B^2}{N - k}$$

in cui s_A^2 e s_B^2 rappresentano le varianze campionarie specifiche dei due dataset, mentre il denominatore $N-k$ esprime i gradi di libertà intragruppo ottenuti dal totale delle osservazioni. L'indice di validazione conclusivo è fornito dalla Statistica F, calcolata come rapporto diretto tra l'allontanamento intergruppo e la fluttuazione intragruppo

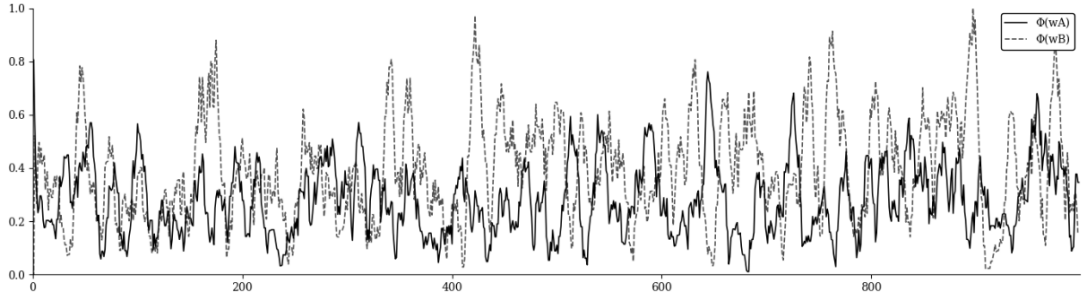
$$F = \sigma^2_{between}/\sigma^2_{within}$$

Un valore F prossimo a 1 indica che la distanza tra le tracce è sovrapponibile al normale rumore probabilistico del sistema (scostamento non significativo).
Valori di F elevati indicano invece che il sistema ha intrapreso una deviazione formale esplicita e misurabile. L'analisi è stata condotta su due dataset comprendenti 999 campioni registrati.

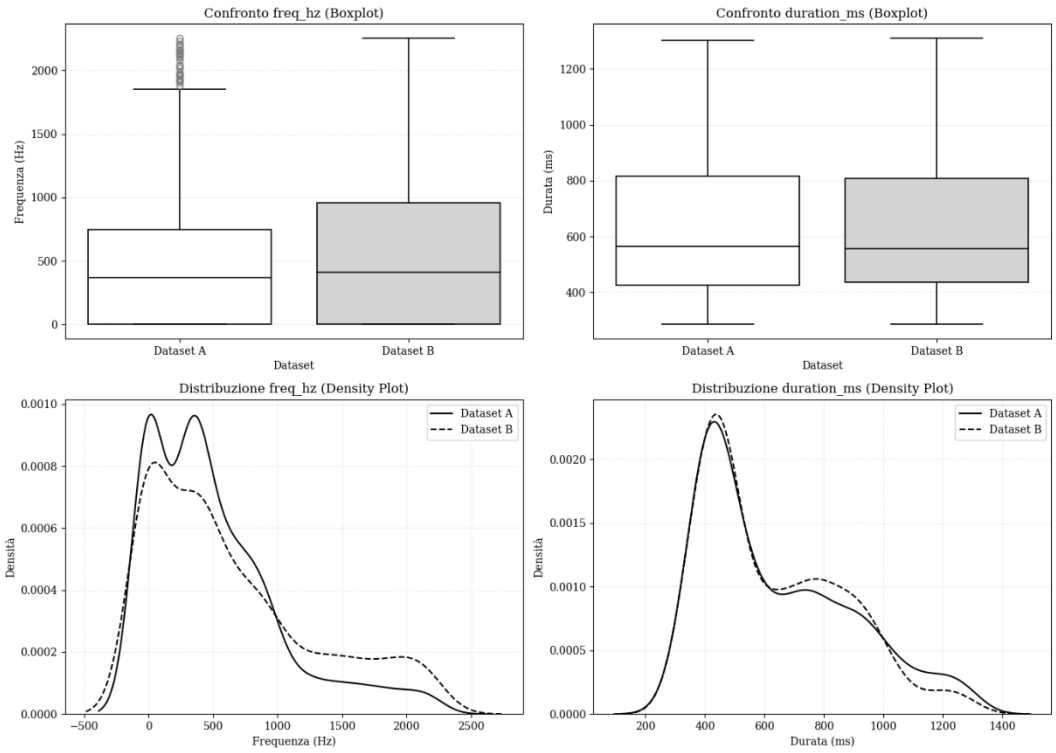
Target Variable	Mean Dataset A	Mean Dataset B	Divergence Index (F-Test)	Percentage Deviation (Δ)
duration_ms	641.49 ms	627.42 ms	1.65	- 2.19 %
freq_hz	501.15 Hz	641.92 Hz	29.07	+ 28.09 %

[**Tab. 1 –** Analisi ANOVA tra i Dataset A e B]

L'analisi dei log evidenzia che l'alterazione dei pesi agisce sui parametri esecutivi in modo asimmetrico: nel dominio temporale, le durate subiscono una variazione trascurabile (-2.19%) con una Statistica *F* pari a 1.65. Essendo la varianza intergruppo assimilabile alla fluttuazione intragruppo, il test denota uno scostamento non significativo, dimostrando che il modello mantiene inalterata la macrostruttura temporale iniziale rispetto alla seconda alterazione. Al contrario, nel dominio spettrale si osserva un discostamento del +28.09%. Il test restituisce un indice *F* pari a 29.07, un valore ampiamente superiore alla soglia del rumore di fondo che certifica una varianza statisticamente significativa.



[**Fig. 5 -** Evoluzione temporale della macrostruttura sonora. Il grafico attesta visivamente che pur attingendo alla medesima microstruttura acustica, l'alterazione dei soli pesi decisionali è sufficiente a generare due traiettorie divergenti]



[**Fig. 6** - Analisi distribuzionale asimmetrica della variazione. I grafici evidenziano l'impatto della riorganizzazione sintattica sui singoli parametri: si registra una forte divergenza microstrutturale sull'asse spettrale (frequenza) contrapposta all'invarianza sull'asse cronometrico (durata). Quest'ultima è la diretta conseguenza visiva della sovrapposizione dei domini temporali]

L'analisi statistica quantifica le dinamiche di attuazione della divergenza formale precedentemente enunciata. Si evidenzia inoltre che, pur generando una nuova macrostruttura sonora, l'alterazione della matrice stocastica produce effetti strettamente subordinati alla topologia dei domini microstrutturali originari, preservando così la stabilità del sistema in uno stato di bassa entropia.

2. L'esperienza presso la Sala Superiore di Casa Viola

Il presente capitolo documenta la trasposizione del framework *Q-Cycle* dal dominio logico all'effettiva dimensione fisica e performativa. L'indagine teorica si traduce nell'installazione site-specific "*How To Choose In The Infinity?"* concepita come un vero e proprio ambiente di *open test* e allestita presso la Sala Superiore di Casa Viola all'interno del MUDIT di Taranto nei mesi di gennaio e febbraio 2026. È bene sottolineare che l'interrogativo posto dal titolo non si riferisce al concetto di infinito nella sua accezione puramente matematica, bensì al potenziale inesauribile di alternative acustiche generate dal sistema in tempo reale.



[**Fig. 7 –** Allestimento dell'installazione *site-specific* presso Casa Viola.
Autore: Antonio Causi, 2026]

Come citato da Pietro Grossi nel manifesto *Homeart* (1986), il sistema opera a tutti gli effetti come un «*programma a elaborazione illimitata*»[20]: l'algoritmo esplora un vasto dominio di possibilità, le cui uniche condizioni di confine coincidono con i vincoli parametrici imposti al momento dell'acquisizione dello stato. La pratica performativa si articola in n. 3 sessioni distribuite su due giornate di lavori, specificamente dedicate alla generazione acustica, all'osservazione fenomenologica delle morfologie sonore e all'archiviazione sequenziale dei dati di sistema per la successiva analisi strutturale.

2.1 Speaker Placement

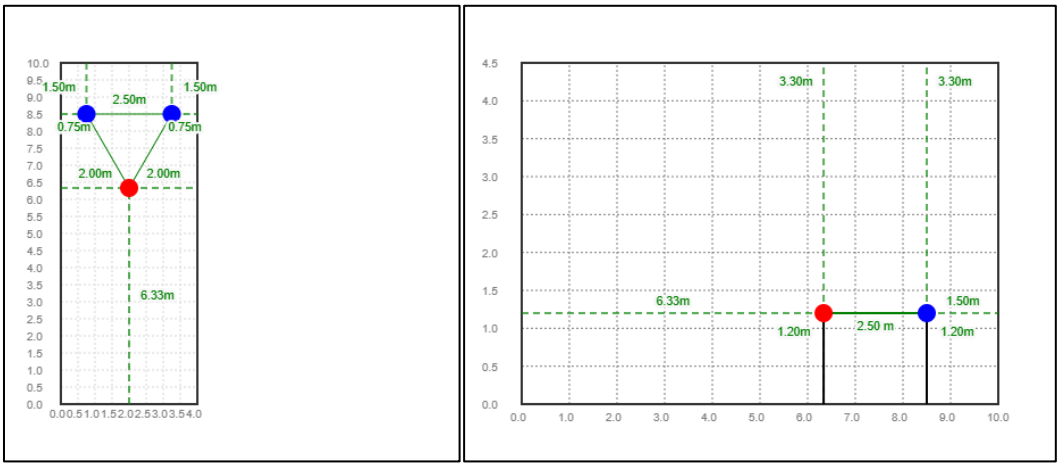
L'esecuzione sonora all'interno dello spazio è preceduta da una procedura che segue una configurazione geometrica equilatera, in accordo con le raccomandazioni dello standard *ITU-R BS.1116-3*[21] per lo *speaker placement* in configurazioni stereo a 2 canali. Secondo tali linee guida, i monitor sono disposti in modo da formare un angolo interno di 60° rispetto al vertice di ripresa e ascolto, venendo quindi collocati a ±30° rispetto all'asse mediano frontale. La norma stabilisce che l'interasse tra i due diffusori debba essere identico alla distanza tra ciascun diffusore e il microfono, applicando inoltre un preciso *toe-in* affinché l'asse acustico di ciascun altoparlante punti direttamente verso la capsula microfonica. Per completare l'assetto, al vertice del triangolo viene posizionato un microfono con pattern polare cardioide. Le caratteristiche di tale diagramma direzionale, le cui metriche fanno riferimento allo

[20] Pietro GROSSI, *Manifesto Homeart*, Sezione Musicologica CNUCE-CNR, Pisa, 1968, disponibile all'indirizzo https://www.pietrogrossi.org/homeart/.

[21] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), *Recommendation ITU-R BS.1116-3: Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems,* ITU, Ginevra, 2015, p. 19.

standard *IEC 60268*[22], includono simmetria frontale, comportamento monotòno dipendente dall'angolo e totale assenza di lobo posteriore.

Al fine di valutare la corretta copertura del fronte sonoro, l'analisi prende in riferimento la configurazione di attenuazione a -3 dB, limite che per questo specifico pattern si colloca a 65° dal fuori asse. L'interasse tra i diffusori risulta pari a circa 2.50 m. Questo valore definisce automaticamente anche l'esatta distanza euclidea che intercorre tra il microfono e ciascun diffusore, completando l'assetto spaziale nel pieno rispetto delle proporzioni imposte dalla norma[23].



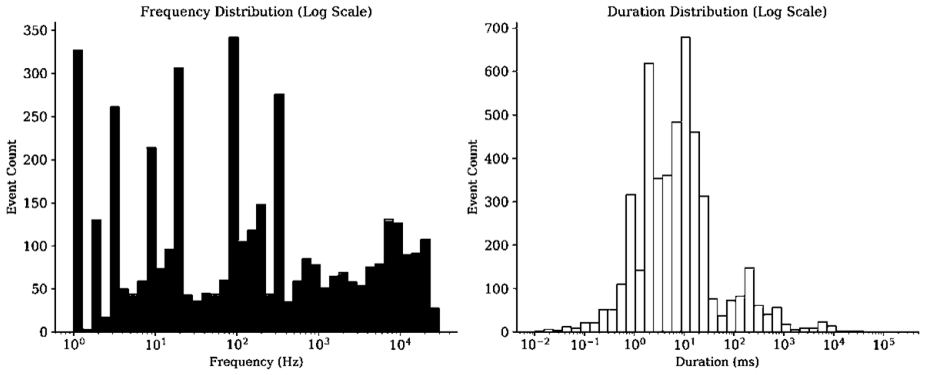
[**Fig. 8** – Planimetria 2D – Vista dall'alto (sinistra) Vista laterale (destra). Si evidenzia in colore rosso il microfono, in blu gli speakers]

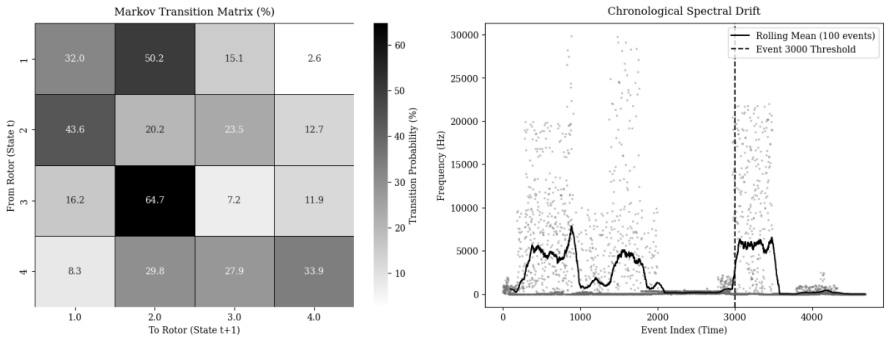
[22] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), *IEC 60268-4: Sound system equipment - Part 4: Microphones*, IEC, Geneva, 2018.

[23] Lo studio si concentra unicamente sulla disposizione degli apparati elettronici rispetto le dimensioni architetturali, non sono state eseguite ulteriori verifiche acustiche per caratterizzare l'interazione con l'ambiente, escludendo pertanto il computo di fenomeni di acustica quali diffrazioni, prime riflessioni o risonanze modali della sala.

2.2 Analisi dei log

L'esame della matrice di transizione rivela una netta polarizzazione funzionale all'interno dell'algoritmo stocastico, ma con dinamiche di interscambio ben diverse da una stazionarietà. I Rotori 1 e 4 esibiscono le probabilità più elevate di auto-transizione — ovvero la tendenza stocastica a reiterare il proprio stato corrente prima di cedere il controllo — pari rispettivamente al 32.04% e al 33.93%. Tuttavia, è l'interazione tra i Rotori 1 e 2 a fungere da vera ancora macro-strutturale: il Rotore 1 cede il controllo al Rotore 2 nel 50.2% dei casi, generando un denso *loop* sintattico. Nello specifico, l'analisi delle varianze parametriche assegna al Rotore 2 il ruolo di generatore di micro-eventi nel registro acuto, esibendo deviazioni standard enormi nel dominio spettrale ma in tempi contratti (F: 2975.3 ± 5655.7 Hz; D: 21.1 ± 42.1 ms). Al contrario, il ruolo di modulatore macro-morfologico di lunga tenuta (fino a generare macro-pause o droni) spetta al Rotore 3, le cui durate sfiorano l'imprevedibilità (D: 453.5 ± 7556.8 ms) a fronte di un'auto-transizione puramente marginale (7.18%).

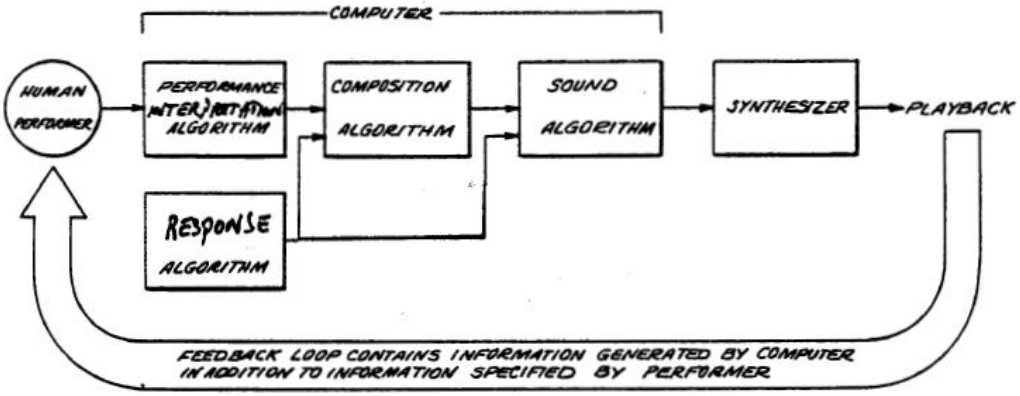




[Fig. 9 – Telemetria del processo generativo: densità probabilistiche per frequenza e durata (in alto), mappatura delle transizioni di stato stocastiche (in basso a sinistra) ed evoluzione spettrale nel tempo con evidenza dell'alterazione parametrica post-3000 eventi (in basso a destra)]

Il profilo quantitativo registrato per il Rotore 4 ne delinea un'identità strettamente atonale e di controllo ritmico (F: 0.0 ± 0.0 Hz; D: 88.0 ± 485.3 ms.). Agendo come generatore di gate temporali brevissimi e privi di parziali armoniche, il quarto rotore frammenta la densità della tessitura acustica, innescando una successiva ricaduta sequenziale verso gli strati attivi dell'algoritmo (cedendo il passo principalmente ai Rotori 2 e 3). L'interazione all'interno dell'installazione instaura un sistema a ciclo chiuso che supera la tradizionale dicotomia tra azione ed esecuzione. In tale contesto, l'output propagato nell'ambiente si configura come un'interfaccia complessa per *real-time composition*[24]. Il performer non percepisce l'evento acustico come un fenomeno isolato, ma ne decodifica l'evoluzione strutturale e la densità spettrale, elementi costantemente ridefiniti dalla risposta acustica della sala.

[24] Joel CHADABE, *Interactive Composing: An Overview*, in «Computer Music Journal», vol. 8, n. 1, 1984, p. 22.



[**Fig. 10** – *Description of the system,* JOEL CHADABE, *Interactive Composing: An Overview*, in «Computer Music Journal», vol. 8, n. 1, 1984]

I log di sistema documentano tale interazione, registrando una forte deriva stocastica in corrispondenza del superamento dei 3000 eventi generati. In questa specifica fase, i grafici evidenziano un incremento repentino della variabilità frequenziale, portando l'algoritmo a saturare lo spettro con transienti che eccedono i 20.000 Hz. Tale perturbazione del tracciato non va intesa come un'anomalia computazionale, ma rappresenta l'oggettiva trascrizione di una ricalibrazione parametrica effettuata manualmente in tempo reale. Mentre la telemetria registra fedelmente la modifica dei limiti operativi (*boundary conditions*), la matrice decisionale del performer sfugge alla formalizzazione matematica formale, configurandosi come un adattamento empirico al feedback acustico dell'ambiente.

Riflessioni conclusive

Il presente *framework* rappresenta chiaramente un modello a puro scopo dimostrativo, la sua trasposizione dall'analisi teorica alla validazione empirica vuole verificare come la delega computazionale non rappresenti una rinuncia all'intenzionalità creativa, bensì alla sua trasformazione. Il *performer* (o chiunque si interfacci con sistemi musicali automatizzati) si emancipa dalla scrittura della singola nota per assumere il ruolo di progettista di macrostrutture, determinando le condizioni di probabilità che permettono l'emersione del suono. L'esperienza di Casa Viola documenta come la macchina, secondo il proprio dominio combinatorio, non produce dispersione entropica, ma struttura autonomamente gerarchie musicali. Il display acustico restituisce all'operatore l'informazione necessaria per perturbare costantemente lo spazio sonoro in un anello di retroazione che permettono di modulare l'intenzionalità creativa. Nell'illimitata tavolozza timbrica a disposizione[25], la scelta non risiede nel determinare l'esito, ma nel modulare continuamente le condizioni di confine fino al raggiungimento di un possibile risultato desiderato, spostando il fulcro creativo dall'invenzione *ex nihilo* alla necessità di filtrare le alternative proposte dalla macchina. Tale approccio fu già classificato nel 1993 come «*composition by refinement*»[26] da Robert Rowe. Resta inteso che, se la formalizzazione algoritmica è perfettamente in grado di descrivere le proprietà matematiche del materiale, il giudizio artistico sfugge a una quantificazione univoca del risultato.

[25] York HÖLLER, *Résonance: la composition aujourd'hui*, in Tod MACHOVER (a cura di), *L'Ircam: une pensée musicale*, Éditions des archives contemporaines, Paris, 1984, p. 69.
[26] Robert ROWE, *Interactive Music Systems: Machine Listening and Composing*, MIT Press, Cambridge (MA), 1993, p. 6.

Come ricordano Juslin, Barradas, Eerola e Västfjäll, l'esperienza estetica conserva un nucleo soggettivo ineliminabile, basato su un insieme di criteri individuali pesati in modo variabile[27]. Chiaramente, gli studi di estetica sperimentale confermano che esistono correlazioni misurabili tra le proprietà strutturali dell'oggetto musicale e le risposte percettive degli ascoltatori[28]. L'elaboratore automatizza e riorganizza la complessità formale, ma la responsabilità di scegliere, indirizzare e validare esteticamente il risultato rimane ancora una prerogativa inalienabile di chi ascolta.

Contribuiti e media

Fotografia a cura di Antonio Causi.
Field recordings a cura di Alessio Sangregorio.
Si ringrazia Mangrovie APS - Casa Viola, Taranto per la concessione di spazi e strumenti.
https://casaviola.eu/

Allegato multimediale:
https://urly.it/31gb8n

[27] Patrik n. JUSLIN, Laura S. SAKKA, Gonçalo T. BARRADAS, Olivier LARTILLOT, *Emotions, mechanisms, and individual differences in music listening: A stratified random sampling approach*, in «Music Perception: An Interdisciplinary Journal», vol. 40, n. 1, 2022, p. 56.

[28] Manuela M. MARIN, A. LAMPATZ, M. WANDL, H. LEDER, *Berlyne Revisited: Evidence for the Multifaceted Nature of Hedonic Tone in the Appreciation of Paintings and Music*, in «Frontiers in Human Neuroscience», vol. 10, n. 536, 2016, pp. 1-2.

Bibliografia

Abraham MOLES, *Théorie de l'information et perception esthétique*, Flammarion, Paris, 1958.

Alvise VIDOLIN, *Suonare lo spazio elettroacustico. Materiale didattico per il corso Sistemi di Elaborazione per la Musica*, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova, Padova, 2001.

Charles AMES, *The Markov Process as a Compositional Model: A Survey and Tutorial*, in «Leonardo», vol. 22, n. 2, 1989.

Charles DODGE e Thomas A. JERSE, *Computer Music: Synthesis, Composition, and Performance*, Schirmer Books, New York, 1985.

George D. BIRKHOFF, *Aesthetic Measure*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1933.

Hugues DUFOURT, *Difficoltà di una presa di coscienza teorica*, in Agostino DI SCIPIO (a cura di), *Teoria e prassi della musica nell'era dell'informatica*, Editori Laterza, Bari, 1995.

Iannis XENAKIS, *Musiques formelles*, in «La Revue Musicale», n. 253-254, 1963.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), *IEC 60268-4: Sound system equipment - Part 4: Microphones*, IEC, Geneva, 2018.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), *Recommendation ITU-R BS.1116-3: Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems, ITU,* Ginevra, 2015.

Joel CHADABE, *Interactive Composing: An Overview*, in «Computer Music Journal», vol. 8, n. 1, 1984.

Jonathan HARVEY, *Le miroir de l'ambiguïté*, in Jean-Baptiste BARRIÈRE (a cura di), *Le timbre, métaphore pour la composition*, Christian Bourgois Éditeur / IRCAM, Paris, 1991.

Laura ZATTRA, *Teresa Rampazzi. Pioneer of Italian electronic music*, in *Proceedings of the XIV Colloquium on Musical Informatics (XIV CIM 2003)*, Firenze, 2003.

Lejaren A. HILLER e Leonard M. ISAACSON, *Experimental Music: Composition with an Electronic Computer*, McGraw-Hill, New York, 1959.

Leonard B. MEYER, *Style and Music: Theory, History, and Ideology*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1989.

Manuela M. MARIN, A. LAMPATZ, M. WANDL, H. LEDER, *Berlyne Revisited: Evidence for the Multifaceted Nature of Hedonic Tone in the Appreciation of Paintings and Music*, in «Frontiers in Human Neuroscience», vol. 10, n. 536, 2016.

Max V. MATHEWS, *The Digital Computer as a Musical Instrument*, in «Science», vol. 142, n. 3592, 1963.

otto LASKE, *Toward a definition of computer music*, in Larry AUSTIN e Thomas CLARKE (a cura di), *Proceedings of the 1981 International Computer Music Conference (ICMC)*, Computer Music Association, Denton (Texas), 1981.

Patrik N. JUSLIN, Laura S. SAKKA, Gonçalo T. BARRADAS, Olivier LARTILLOT, *Emotions, mechanisms, and individual differences in music listening: A stratified random sampling approach*, in «Music Perception: An Interdisciplinary Journal», vol. 40, n. 1, 2022.

Paul ADENOT e Raymond TOY (a cura di), *Web Audio API*, *W3C Recommendation, World Wide Web Consortium*, 2021, disponibile all'indirizzo: https://www.w3.org/TR/webaudio/.

Pierre BOULEZ, *Le timbre et l'écriture, le timbre et le langage*, in Jean-Baptiste BARRIÈRE (a cura di), *Le timbre, métaphore pour la composition*, Christian Bourgois Éditeur / IRCAM, Paris, 1991.

Pietro GROSSI, *Manifesto Homeart*, Sezione Musicologica CNUCE-CNR, Pisa, 1968, disponibile all'indirizzo https://www.pietrogrossi.org/homeart/.

Robert ROWE, *Interactive Music Systems: Machine Listening and Composing*, MIT Press, Cambridge (MA), 1993.

Thomas HERMANN, Andy HUNT, John G. NEUHOFF (a cura di), *The Sonification Handbook*, Logos Verlag, Berlin, 2011.

York HÖLLER, *Résonance: la composition aujourd'hui*, in Tod MACHOVER (a cura di), *L'Ircam: une pensée musicale*, Éditions des archives contemporaines, Paris, 1984.