Medidas de quantificação recorrência: uma proposta de análise para *Audible Ecosystems* de Agostino Di Scipio

MODALIDADE: COMUNICAÇÃO

SUBÁREA: TEORIA E ANÁLISE MUSICAL

Gabriel Rimoldi
NICS-UNICAMP – gabriel.rimoldi@nics.unicamp.br

Jônatas Manzolli
NICS-UNICAMP – manzolli@nics.unicamp.br

Resumo: Propomos neste artigo a utilização de Medidas de Quantificação de Recorrência como ferramenta de análise via suporte computacional aplicada à obra *Audible Ecosystems*, do compositor Agostino Di Scipio. Nossa proposta visou observar aspectos da dinâmica de comportamentos da obra, considerando sua estrutura global como um aspecto emergente da interação de seus elementos. Os resultados encontrados corroboram aspectos apontados pelo compositor, sobretudo no que se refere à ideia de morfogênese e da morfostase como processos desencadeadores do processo de criação.

Palavras-chave: Gráficos de recorrência. Sistemas dinâmicos. Descritores acústicos. Análise musical.

Recurence Quantification Measurement: a Proposal Analysis for *Audible Ecosystems* of Agostino Di Scipio

Abstract: We propose the use of Recurrence Quantification Analysis to applied to musical analysis through audio features extraction. We analysed the work *Audible Ecosystems* by the composer Agostino Di Scipio. Our proposal aimed to observe aspects of dynamic behaviors considering the overall structure of the work as an emerging aspect of the interaction of its elements. The results corroborate aspects pointed out by the composer, especially regarding the idea of morphogenesis and morphostasis as triggering of creative processes.

Keywords: Recurence Plot. Dynamic Systems. Audio Features. Musical Analysis.

1. Introdução

A recuperação de informação musical via suporte computacional tem se tornado uma proposta metodológica recorrente no campo da análise musical. Tal metodologia tem como principal ferramenta a extração de características a partir da análise do sinal de áudio. A escolha do tratamento adequado aos dados torna-se, entretanto, uma tarefa laboriosa quando considerada a quantidade informacional obtida na análise de poucos segundos de áudio. Quando aplicado à análise de repertórios musicais em que a organização composicional está diretamente atrelada a aspectos performativos ou a situações em tempo real, torna-se relevante o estudo de estratégias que permitam a captura dessas interdependências.

Propomos assim neste artigo a aplicação de descritores acústicos (MALT; JOURDAN, 2009; MONTEIRO; MANZOLLI, 2011) associados ao uso de Gráficos de Recorrência e Medidas de Quantificação de Recorrência (ECKMANN; KAMPHORST; RUELLE, 1995;

WEBBER; ZBILUT, 1994) como estratégia de interpretação dos dados obtidos via sinal de áudio. Através do uso dessas ferramentas, originadas no campo dos estudos matemáticos em Sistemas Dinâmicos, procuramos aportar a análise musical por um viés dinâmico, considerando aspectos recorrentes entre estados da obra musical. Como objeto de estudo às ferramentas desenvolvidas, propomos uma análise da série *Audible Ecosystem*, do compositor italiano Agostino Di Scipio (n. 1962).

Ao longo das últimas décadas, Di Scipio tem se dedicado ao estudo de modelos dinâmicos aplicados à composição musical, investigando sobretudo como estruturas meso e macrotemporais podem emergir a partir de sistemas ou processos de ordem microtemporal. O paradigma granular manifesta-se na obra de Di Scipio não apenas como um método de síntese sonora, mas amplia-se enquanto modelo composicional, permitindo que "propriedades morfológicas globais da estrutura musical emerjam de condições locais do material sonoro" (DI SCIPIO, 1994). A sonoridade, estrutura global complexa e multifacetada, emerge assim da interações locais e de menor complexidade entre os componentes do sistema (MERIC; SOLOMOS, 2005).

O elemento crucial da abordagem proposta pelo compositor é a ideia de causalidade circular, princípio este herdado da Cibernética e que traz consigo uma outro significação à ideia de interação. O autor defende ação criativa não direcionada à determinação das estruturas e sonoridades da obra por si, mas à criação de condições ambientais favoráveis ao surgimento dessas estruturas como aspecto emergente da própria interação entre as partes do sistema. Nesta perspectiva, estrutura (formas restritas) e ordem (organização) surgem como um fenômeno interno do próprio sistema, sem a intervenção direta de um agente externo, mas resultante da interação entre seus componentes, em estado menos complexo e menos ordenado. As interações entre os componentes de um sistema, baseadas em regras da *morfogênese* (conservação da coerência, identidade) e da *morfostase* (mudança, comportamento dinâmico), se instituem sob o princípio da causalidade circular, capaz de propulsionar o estabelecimento de estados de equilíbrio do próprio sistema. Quando dessas interações locais entre os componentes resultam propriedades qualitativas capazes de modular o sistema de um dado estado de organização estrutural para um novo estado de ordem acontece o fenômeno conhecido como emergência.

2. Sobre Audible Ecosystems

Audible EcoSystemics é uma série de cinco obras para eletrônica ao vivo produzidos entre 2002 e 2005, que utilizam como suporte uma interface desenvolvida pelo próprio

compositor, a AESI (*Audible Eco-Systemic Interface*). A interface estrutura-se a partir de um design ecossistêmico de interação entre máquina e ambiência. Apesar de ocasionalmente considerar relação direta entre o performer e sistema computacional, o aspecto elementar da abordagem proposta pelo compositor baseia-se na interação indireta estabelecida na triangulação entre performer, ambiência e sistema computacional. Por ambiência entende-se aqui o espaço físico de difusão da obra, do qual são extraídas características relacionadas ao processamento de sinais (amplitude, quantidade de transientes, brilho), bem como à correlação entre sinais de microfones localizados em diferentes posições da ambiência.

Nosso objetivo principal foi observar a dinâmica de comportamentos decorrentes dos mecanismos de retroação entre os parâmetros sub-simbólicos da máquina e as respostas detectadas no ambiente de difusão. O comportamento global do sistema pode ser observado através do percurso entre dois processos elementares: *morfogênese e morfostase*. O primeiro refere-se à tendência centrípeta de manutenção de um estação ou comportamento recorrente, enquanto que o segundo, ao contrário, trata da tendência centrífuga da transformação dinâmica, decorrente de novas situações impostas pelo meio.

Nossa hipótese é que a utilização de ferramentas de análise via sistema dinâmicos dos dados obtidos pelos descritores acústicos poderia nos indicar aspectos comportamentais do sistema. Para tanto, procuramos extrair informações que estivessem relacionadas aos parâmetros descritos pelo próprio compositor. Considerando a série de obras como instâncias de um mesmo design interativo, propomos a análise de três peças da série *Audible Ecosystem - Impulse Response Study*, *Feedback Study* e *Background Noise Study* - tendo em vista a observação de aspectos globais do próprio sistema.

3. Metodologia

3.1 Descritores Acústicos

Nossa proposta de análise tem como ponto inicial a extração de medidas a partir do áudio das obras da série *Audible Ecosystems*. A extração de informações de baixo nível a partir de técnicas de processamento de sinal é um processo que visa estimar um vetor de características que aporte as qualidades sonoras presentes no áudio. Considerando as variáveis de controle descritas pelo próprio compositor (DI SCIPIO, 2003), aplicamos nesta análise três diferentes descritores acústicos, a dizer: energia quadrática média (RMS), centroide espectral e fluxo espectral. Para a extração das características supracitadas utilizamos a biblioteca de descritores *PDescriptors*, implementada em Pure Data por Monteiro e Manzolli (2011). A partir dos vetores de caraterísticas extraídos do áudio das obras, foram gerados Gráficos de

Recorrência e Medidas de Quantificação de Recorrência, que visam observar a dinâmica de comportamento entre estados subsequentes do sistema.

3.2 Gráficos de Recorrência

A ideia de repetição e recorrência foram introduzida no estudo de Sistemas Dinâmicos pelo matemático francês Henri Poincaré (1854-1912), que em seu conhecido Teorema da Recorrência afirmaria que relativamente a qualquer medida invariante finita de um sistema, quase todo ponto x seria recorrente. Em outras palavras, as trajetórias retornariam infinitas vezes aos seus pontos iniciais (ou ao menos a uma região de vizinhança próxima a esses), formando assim um conjunto infinito de instantes de retorno.

Eckmann et. al introduziram então os gráficos ou mapas de recorrência (*Recurrence Plot*) como forma de observar a dinâmica de recorrência dos sistemas. O gráfico de Recorrência de uma série temporal $g(t)$, com $t = 0, 1, 2 \dots T$, é uma matriz quadrada TxT preenchida por pontos (i, j) pretos e brancos. Os pontos pretos, denominados recorrentes, referem-se àqueles que possuem distância $\rho(i, j)$ menor que um certo limiar ε estabelecido. Matematicamente, a função de recorrência pode ser descrita por:

$$\vec{R}_{i,j}^{\varepsilon} = \theta(\varepsilon - \left|\left|\vec{x}_i - \vec{x}_j\right|\right| \ , \ \ i, j = 1, 2, \dots T$$

onde $\theta(.)$ é a função Heaviside (ou função degrau), ||*|| é a norma de distância, $\rho(i, j)$ utilizada e T é o número de estados x_i considerados. O gráficos de recorrência têm sido utilizados em diversos campos da ciência no intuito de descrever e antecipar a formação de padrões em conjuntos de dados em larga escala. Na Figura **1** demonstramos quatro diferentes tipologias de Gráficos de Recorrência gerados a partir de diferentes sinais: (a) periódico; (b) estocástico; (c) deriva; e (d) descontínuo.

Os gráficos de recorrência foram gerados para cada um dos descritores aplicados às três primeiras peças da série *Audible Ecosystems*. Para cada serie temporal de descritores foi gerado um conjunto de gráficos que compreende janelas temporais de 1000 pontos da respectiva série, com sobreposição de 500 pontos entre gráficos.

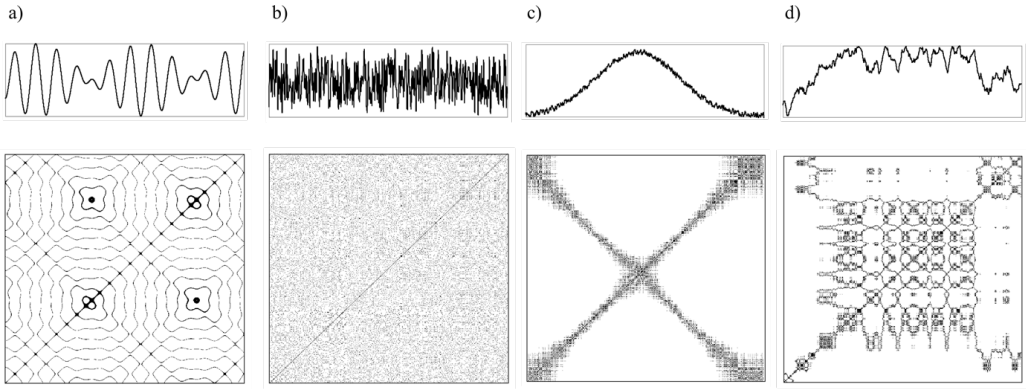

Figura 1: Tipologias de Mapas de Recorrência: (a) periódico (FM); (b) estocástico (ruído branco); (c) deriva (mapa logístico com ruído); e (d) descontínuo (movimento browniano).

3.3 Medidas de Quantificação de Recorrência

A partir dos gráficos gerados, realizamos a extração de Medidas de Quantificação de Recorrência que descrevem comportamentos globais detectados. O método de Análise de Quantifição de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis – RQA)* foi introduzido inicialmente por (WEBBER; ZBILUT, 1994) no intuito de descrever a formação de estruturas determinísticas e complexidade. Foram extraídas três categorias distintas de medidas, sendo a primeira relacionada à densidade de pontos recorrentes, e as outras duas à formação de linhas verticais e diagonais nos gráficos de recorrência. Conceituamos abaixo cada uma das medidas de quantificação de recorrência utilizadas.

I. Medida de densidade da recorrência

a. *Taxa de recorrência* (RR) [1]: mede a densidade de pontos no RP. Altos índices indicam maior semelhança entre estados do sistema sob um dado intervalo temporal.

II. Medidas relacionadas à formação de linhas diagonais

a. *Determinismo (DET)*[2]: calcula a razão entre a quantidade de linhas diagonais de tamanho mínimo l_{min} e o total de pontos recorrentes no RP. Sua interpretação demonstra o intervalo em que um segmento da trajetória evolui paralelamente a outro segmento. Processos estocásticos, caóticos ou com baixa correlação tendem a uma ausência ou baixas densidades de linhas diagonais, ou mesmo quando presentes, surgem em tamanhos muito curtos. Já processos determinísticos tendem ao surgimento de linhas diagonais mais longas e menos pontos recorrentes isolados.

b. *Comprimento médio das linhas diagonais (L)* [3]: indica a média de tempo em que segmentos de trajetórias permanecem de modo similar num sistema sob um determinado intervalo temporal.

c. *Comprimento máximo de diagonal* (L_{MAX})[4]: indica o maior tamanho de linha diagonal encontrada no RP. Sua medida inversa $1/L_{MAX}$ indica o grau de divergência (DIV) de um sistema, ou seja, o tempo máximo em que duas trajetórias divergem.

III. Medidas relacionadas à formação de linhas verticais

De modo similar às medidas baseadas nas linhas diagonais, Marwan (2003) propôs um conjunto de medidas baseadas na presença de linhas verticais (ou horizontais) no RP.

a. *Laminaridade* (*LAM*)[5]: calcula a razão entre a quantidade de linhas verticais de tamanho mínimo v_{min} e o total de pontos recorrentes no RP. A presença de linhas verticais representa a ocorrência de estados recorrentes que não mudam no tempo.

b. *Comprimento médio das linhas verticais (TT)*[6]: também conhecida como tempo de aprisionamento (*trapping time*), indica a média de tempo em que um segmento permanece em estado laminar, ou seja, que não muda no tempo.

c. *Comprimento máximo de linha vertical* (V_{MAX}) [7]: indica o maior tamanho de linha vertical encontrada no RP.

As medidas descritas acima foram extraídas a cada gráfico de recorrência gerado, resultando portanto da análise de janelas temporais de 1000 pontos dos vetor de característica extraído dos descritores acústicos, que equivalem a aproximadamente 11s de áudio.

4. Resultados Preliminares

Através dos gráficos de recorrência gerados foi possível observarmos diferentes comportamentos ao longo das peças. Na Figura **2** exemplificamos quatro estados intermediários ilustrados pelos gráficos de recorrência do descritor Centroide Espectral extraído da peça *Feedback Study*. A maior presença de pontos isolados no primeiro e último quadro indicam sinais mais ruidosos e caóticos, enquanto que a formação de linhas diagonais e horizontais nos quadros intermediários sinalizam a presença de singularidades do sistema.

Pelas medidas de quantificação de recorrência utilizadas foi possível observamos aspectos macroestruturais que outras propostas metodológicas de análise não demonstrariam facilmente. Na Figura **3**, por exemplo, apresentamos os gráficos das funções Determinismo e Laminaridade extraídas a partir do descritor Fluxo Espectral. Notamos nas três peças analisadas o contrabalanceamento entre estados mais estacionários (representados pelos picos

da Laminaridade) e estados com a presença de trajetórias evoluem paralelamente (demonstrado pelos picos do Determinismo).

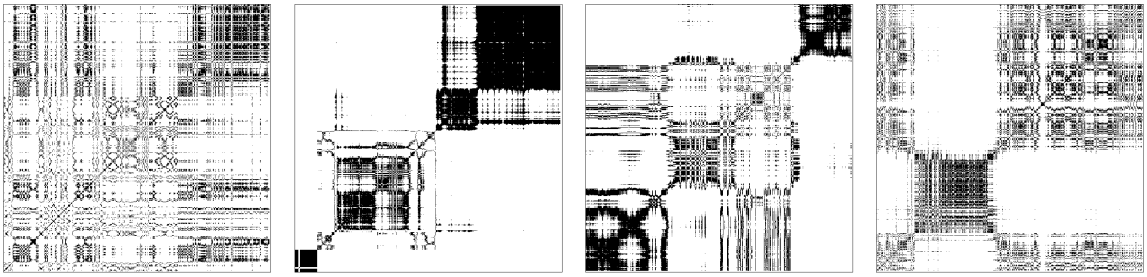

Figura 2: Estados intermediários de gráficos de recorrência do centroide espectral de *Audible Ecosystems* n. 2a – Feedback Study

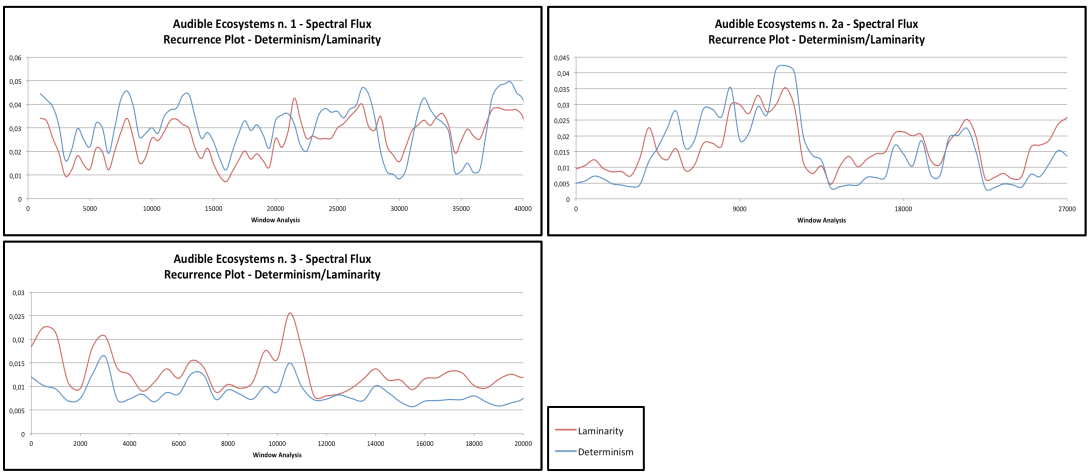

Figura 3: Determinismo e Laminaridade dos dados de Fluxo Espectral extraídos das peças *Audible Ecosystems* 1, 2a e 3a

5. Discussão e Perspectivas Futuras

A caracterização da dinâmica é um objeto de contínuo estudo no mais diversos campos da ciência. Diversos metodologias de análise musical têm focado em propostas similares, sobretudo voltadas ao estudo de repertórios que tratem a complexidade como paradigma composicional. Propusemos neste trabalho um estudo piloto sobre o uso de Gráficos de Recorrência e Medidas de Quantificação de Recorrência para a análise de dados obtidos via descritores de áudio. Nossa hipótese é que tal metodologia poderia evidenciar aspectos de interesse à análise musical, sobretudo relacionados à dinâmica de recorrências ao longo de uma obra. Apresentamos os resultados iniciais obtidos pelo uso de tais ferramentas na análise de três peças da série *Audible Ecosystem*, do compositor Agostino Di Scipio. Os dados corroboram com aspectos apontados pelo próprio compositor, sobretudo relacionados à morfogênese e morfostase como fatores desencadeadores do material sonoro. Em trabalhos

futuros, pretendemos aplicar estas ferramentas a outros repertórios e, principalmente, à ambientes de improvisação musical assistida por computadores.

Referências

DI SCIPIO, A. Micro-time sonic design and timbre formation. Contemporary Music Review, v. 10, n. 2, p. 135–148, 1994.
DI SCIPIO, A. "Sound is the interface": from interactive to ecosystemic signal processing. Organised Sound, v. 8, n. 3, p. 269–277, 2003.
ECKMANN, J. P.; KAMPHORST, S. O.; RUELLE, D. Recurrence plots of dynamical systems. World Scientific Series on Nonlinear Science Series A, v. 16, p. 441–446, 1995.
MALT, M.; JOURDAN, E. Real-time uses of low level sound descriptors as event detection functions using the max/msp zsa. descriptors library. Proceedings of the 12th Brazilian Smposium on Computer Music, 2009.
MERIC, R.; SOLOMOS, M. Audible Ecosystems and Emergent Sound Structures in Di Scipio ' s Music : Music Philosophy Helps Musical Analysis Agostino Di Scipio ' s music : emergent sound structures and audible ecosystems. Journal of Interdisciplinary Music Studies, v. 3, n. 1, p. 57–76, 2005.
MONTEIRO, A.; MANZOLLI, J. A Framework for Real-time Instrumental Sound Segmentation and Labeling. Proceedings of IV International Conference of Pure data--Weimar. Anais...2011
WEBBER, C. L.; ZBILUT, J. P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. Journal of applied physiology, v. 76, n. 2, p. 965–973, 1994.

---

[1] A taxa de recorrência (RR) é obtida por: $RR(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^{N} R_{i,j}(\varepsilon)/N^2$, sendo N o número de pontos da série e ε o limiar de recorrência.

[2] O determinismo pode ser obtido por: $DET = \sum_{l=l_{min}}^{N} lP(l)/\sum_{l=1}^{N} lP(l)$, sendo l o tamanho da estrutura diagonal, $P(l)$ a probabilidade de ocorrência dessa estrutura diagonal no RP e l_{min} o tamanho mínimo de diagonal a ser detectada.

[3] O comprimento médio de diagonais é determinado por: $L = \sum_{l=l_{min}}^{N} lP(l)/\sum_{l=l_{min}}^{N} P(l)$.

[4] O comprimento máximo e divergência podem ser obtidos, respectivamente, por: $L_{MAX} = (\{l_i\}_{i=1}^{N_l})$ e $DIV = 1/L_{MAX}$.

[5] A Laminaridade pode ser obtida por: $LAM = \sum_{v=v_{min}}^{N} vP(v)/\sum_{v=1}^{N} vP(v)$, sendo v o tamanho da estrutura vertical, $P(v)$ a probabilidade de ocorrência dessa estrutura vertical no RP e v_{min} o tamanho mínimo de vertical a ser detectada.

[6] O comprimento médio das linhas verticais pode ser obtido por: $TT = \sum_{v=v_{min}}^{N} vP(v)/\sum_{v=v_{min}}^{N} P(v)$.

[7] O comprimento máximo de linhas verticais pode ser obtido por: $V_{MAX} = (\{v_i\}_{i=1}^{N_l})$.