



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Instituto de Artes

Micael Antunes da Silva

**Explorando Texturas Sonoras: Análise e Composição com
Suporte de Descritores de Áudio e Modelos Computacionais**

Campinas
2024

Micael Antunes da Silva

**Explorando Texturas Sonoras: Análise e Composição com Suporte de
Descritores de Áudio e Modelos Computacionais**

Tese apresentada ao Instituto de Artes da
Universidade Estadual de Campinas como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Doutor
em Música, na área de Música: Teoria, Criação e
Prática.

Orientador: Prof. Dr. Jônatas Manzolli

Coorientador: Prof. Dr. Danilo Augusto de Albuquerque Rossetti

Este trabalho corresponde à versão final da
Tese defendida por Micael Antunes da Silva e
orientada pelo Prof. Dr. Jônatas Manzolli.

Campinas
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Artes
Sílvia Regina Shiroma - CRB 8/8180

Si38e Silva, Micael Antunes da, 1992-
Explorando Texturas Sonoras : Análise e Composição com Suporte de
Descritores de Áudio e Modelos Computacionais / Micael Antunes da Silva. –
Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Jônatas Manzolli.

Coorientador: Danilo Augusto de Albuquerque Rossetti.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Artes.

1. Análise musical. 2. Psicoacústica. 3. Descritores de áudio. 4. Composição
(Música). 5. Musicologia. I. Manzolli, Jônatas, 1961-. II. Rossetti, Danilo
Augusto de Albuquerque, 1978-. III. Universidade Estadual de Campinas.
Instituto de Artes. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Exploring sound textures : Analysis and composition using audio
descriptors and computational models

Palavras-chave em inglês:

Musical analysis

Psychoacoustics

Audio descriptors

Composition (Music)

Musicology

Área de concentração: Música: Teoria, Criação e Prática

Titulação: Doutor em Música

Banca examinadora:

Danilo Augusto de Albuquerque Rossetti [Coorientador]

Ivan Eiji Yamauchi Simurra

Adriano Claro Monteiro

Stéphan Olivier Schaub

Tadeu Moraes Taffarello

Data de defesa: 20-05-2024

Programa de Pós-Graduação: Música

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0551-388X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9386000089184233>

COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE DOUTORADO

Micael Antunes da Silva

Prof. Dr. Danilo Augusto de Albuquerque Rossetti

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Ivan Eiji Yamauchi Simurra

Universidade Federal do Acre

Prof. Dr. Adriano Claro Monteiro

Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Stéphan Olivier Schaub

Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Tadeu Moraes Taffarello

Universidade Estadual de Campinas

Programa de Pós-Graduação em Música do Instituto de Artes da Universidade Estadual de Campinas

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DATA DA DEFESA: 20.05.2024

Agradecimentos

Uma tese é um marco na vida de um pesquisador. Isso não significa o ponto mais alto de seu desenvolvimento intelectual, mas com certeza representa uma acumulação substancial de conhecimentos e experiências, e estes não são construídos de forma solitária. Por isso, nesta seção agradeço às diversas pessoas que foram importantes nesse percurso.

Agradeço à minha mãe, Mara Aparecida, e ao meu pai, Amancio Antunes, que me criaram e sempre me incentivaram a ler e fazer música. Sem a formação de base proporcionada por eles, eu nunca chegaria a este estágio da vida pronto para escrever uma tese. À minha irmã, Priscila Antunes, que sempre me apoia, ajuda a revisar textos, me aconselha e me auxilia a pensar passos importantes da minha carreira.

Ao Prof. Dr. Jônatas Manzolli, figura generosa e companheira, que não só guiou a pesquisa desta tese como também sempre teve a preocupação de me preparar para o pós-tese. Seus conselhos serão essenciais para os futuros passos da minha carreira. Ao Prof. Dr. Danilo Rossetti, coorientador desta tese, que desde o meu mestrado tem sido uma pessoa generosa em compartilhar ideias e pontos de vista interessantes para a composição e para a pesquisa musical. Ao Prof. Dr. Marcelo Queiroz, cuja ajuda foi fundamental em seus diálogos sobre descritores de áudio e análise musical. Sua sensibilidade para com a composição e seu amplo conhecimento no campo de processamento de sinais foram cruciais para me ajudar a refletir durante o percurso deste trabalho. Ao Prof. Dr. Mikhail Malt, com quem tive trocas durante diferentes momentos da minha tese, e que é uma referência importante para mim na área de descritores de áudio e computação musical no contexto da música mista.

Ao Dr. Ivan Eiji Yamauchi Simurra, ao Dr. Adriano Claro Monteiro, ao Dr. Stéphan Olivier Schaub e ao Dr. Tadeu Moraes Taffarello, pela generosa leitura e pelos apontamentos durante a banca de defesa do meu doutorado, leitura essa que foi fundamental para a escrita da versão revisada da tese. Ao Prof. Dr. Manu Falleiros, que como diretor do NICS, sempre me deu todo o apoio para disponibilizar os recursos necessários para o meu trabalho, além de sempre fazer questão de ajudar a evidenciar para a comunidade os resultados parciais desta pesquisa por meio de eventos e divulgações. Ao Edelson Constantino, figura importante do NICS, cuja visão ampla e generosidade fazem com que nossas pesquisas funcionem. Devo a ele a paciência durante os acessos a recursos do laboratório, bem como os diversos conselhos sobre a vida prática da pesquisa e da universidade.

Ao Guilherme Feulo, amigo de longa data que me acompanhou também em alguns dos artigos aqui escritos. A ele devo a paciência de me explicar diversos elementos de processamento de sinais e programação. Se tenho o meu diálogo com o mundo da matemática e da computação, boa parte da “culpa” é dele. Ao amigo Gustavo Bonin, com quem converso rotineiramente sobre pesquisa, composição e carreira acadêmica, e com que compartilho colaborações artísticas e acadêmicas ao longo dessa pesquisa. Ao meu amigo, Guilherme Zanchetta, companheiro de diversos trabalhos artísticos e acadêmicos durante esta tese. A ele devo o companheirismo e a amizade sempre presentes nos momentos difíceis desta trajetória acadêmica. Ao Pedro Marques, companheiro de tantos trabalhos (alguns acabados e tantos

outros inacabados). Com ele, as massas sonoras desta tese se emaranharam em palavras e tomaram outros caminhos texturais, envolvidas em clusters conceituais de diversas naturezas. À Rebeca Bayeh, amizade super importante que se tornou sempre uma referência durante a minha trajetória, e a quem devo os meus primeiros passos e reflexões no campo da psicoacústica. Ber Neves, pela companhia de cafés, discussões e colaborações artísticas no NICS. Juntos, demos vozes a algumas das texturas que permeiam esta tese. Ao Guilherme Misina, que deu vida à composição *Rarefações* (2020) e com quem compartilho a autoria de textos desta tese. Ao Tales Botechia, companheiro de discussões sobre composição e computação musical. Ao Itamar Vidal, coautor de obras e artigos desta tese e com quem refleti sobre o papel da colaboração artística.

À Katharina Gross, pela idealização do projeto *Cellomondo*, que cria um espaço importante para a difusão da música brasileira. Além disso, como intérprete, realizou uma performance excelente da minha composição *Gestos: Uma homenagem a Jaques Morelenbaum* (2022). Ao Aurélio Edler-Copes, que compartilhou sua experiência composicional em discussões durante a construção do patch da eletrônica para a performance de *Gestos*. À Dra. Sølvi Ystad, pela sua supervisão durante o meu estágio de pesquisa no laboratório CNRS-PRISM. Sua generosidade em dialogar me permitiu ampliar meu ponto de vista de análise musical a partir da exploração de territórios de síntese sonora. Além disso, seus conselhos práticos serão considerados durante a continuidade de minha carreira como pesquisador. Ao Dr. Richard Kronland-Martinet e à Dra. Mitsuko Aramaki, que foram conselheiros importantes no contexto da elaboração de um protocolo experimental para o estudo de texturas musicais. Ao Dr. Marcelo Caetano, pelas diversas conversas importantes sobre descritores de áudio e seus possíveis rumos no contexto da análise musical. À Dra. Mylène Gioffredo, com quem sempre discuti sobre as áreas de musicologia e análise musical e seus desafios ante um cenário acadêmico internacional. Ao Prof. Dr. Vincent Tiffon, cujas críticas ao meu trabalho no contexto da música de massas sonoras foram consideradas para melhor redigir e explicar esses conceitos em meus textos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Processos nº 2019/09734-3 e 2021/11880-8.

Resumo

A presente tese apresenta estudos de análise musical e relatos de composição que exploram as características texturais da música de *massas sonoras*, situando-a no contexto das práticas criativas do século XX e de modelos psicoacústicos. O trabalho apresenta uma série de estudos analíticos, ao mesmo tempo em que introduz ferramentas de descritores de áudio relevantes para a pesquisa realizada. Além disso, oferece uma contribuição ao campo da composição por meio de discussões embasadas em relatos composicionais e da criação de uma ferramenta interativa para a geração de *massas sonoras* em tempo real.

Esta tese é composta por artigos, nos quais foram apresentados os resultados da pesquisa por meio da análise e discussão de diversos textos publicados durante o doutorado. Essa apresentação é dividida em dois módulos: no primeiro, dedicado à análise musical, discute-se uma metodologia de análise musical baseada em descritores de áudio para investigar composições eletroacústicas e instrumentais que exploram a noção de *massas sonoras*. No segundo módulo, são apresentados relatos e discussões nos quais os conceitos ligados às *massas sonoras* e modelos computacionais para eletrônica em tempo real foram aplicados em processos criativos. Dessa forma, a tese aborda questões analíticas ao introduzir as ideias de compositores como Edgard Varèse, que concebeu a noção de *novos instrumentos*, inspirando posteriormente a ideia de *massas sonoras* e o desenvolvimento de sistemas interativos para a luteria digital. Em seguida, explora-se a noção de música de *massas sonoras*, do ponto de vista da percepção musical como explorado no serialismo, influenciado por compositores como Karlheinz Stockhausen, Iannis Xenakis e György Ligeti. Após essa discussão de conceitos, são apresentados os descritores de áudio relevantes para o estudo da música de *massas sonoras*. Em seguida, essas ferramentas são aplicadas em estudos analíticos de música eletroacústica e instrumental. Posteriormente, são abordadas discussões sobre composição, destacando a necessidade do compositor em criar um campo semântico que faça a mediação entre ferramentas tecnológicas e aspectos criativos envolvidos. Por fim, propõe-se um ambiente interativo em *Max* para criar e manipular *massas sonoras* em tempo real, oferecendo uma plataforma prática para a exploração criativa nesse domínio musical.

Sendo assim, a tese oferece contribuições para três áreas principais: análise musical, composição musical e psicoacústica. Na análise musical, propõe um fluxo de trabalho aplicável em diversos contextos musicológicos e fornece representações de áudio derivadas da música de *massas sonoras*, oferecendo potencial para o estudo da textura musical em diferentes repertórios. No campo da composição, ao abordar duas obras realizadas durante a pesquisa, a tese promove reflexões sobre o processo criativo mediado pela tecnologia. Discute também uma ferramenta interativa adaptável para diferentes aplicações, que pode inspirar compositores a explorar criativamente a luteria digital. Por fim, diante do crescente interesse nos estudos sobre timbre na psicoacústica e na musicologia empírica, este trabalho abre espaço para investigações sobre percepção em abordagens experimentais nas ciências cognitivas.

Abstract

This thesis presents studies in musical analysis and compositional reports that explore the textural characteristics of *sound mass* music, situating it within the context of 20th century creative practices and psychoacoustic models. The thesis presents a series of analytical studies, while also introducing audio descriptors relevant to the research undertaken. In addition, it offers a contribution to the field of composition through discussions based on composition reports and on the creation of an interactive tool for the real-time generation of *sound masses*.

This thesis is composed of articles that present the results of the research through the analysis and discussion of different texts published during the doctoral research. This presentation is divided into two modules: the first, dedicated to musical analysis, discusses a methodology for musical analysis based on audio descriptors to study electroacoustic and instrumental compositions that explore the notion of *sound masses*. The second module presents reports and discussions in which the concepts related to *sound masses* and computational models for real-time electronics have been applied in creative processes. Thus, the work addresses analytical issues by introducing the ideas of composers such as Edgard Varèse, who conceived the notion of *new instruments*, later inspiring the idea of *sound masses* and the development of interactive systems for digital lutherie. Next, the notion of *sound mass* music is approached from the perspective of musical perception as explored in serialism, influenced by composers such as Karlheinz Stockhausen, Iannis Xenakis and György Ligeti. Following this discussion of concepts, relevant audio descriptors for the study of *sound mass* music are presented. These tools are then applied to analytical studies of electroacoustic and instrumental music. This is followed by a discussion of composition, highlighting the need for the composer to create a semantic field that mediates between technological tools and the creative aspects involved. Finally, an interactive environment in *Max* is proposed to create and manipulate *sound masses* in real time, providing a practical platform for creative exploration in this musical domain.

Thus, the thesis offers contributions in three main areas: musical analysis, musical composition and psychoacoustics. In the field of musical analysis, it proposes a workflow applicable in different musicological contexts and provides audio representations derived from *sound mass* music, offering potential for the study of musical texture in different repertoires. In the field of composition, the thesis encourages reflection on the creative process mediated by technology through two works created during the research. It also discusses an adaptable interactive tool for different applications that can inspire composers to creatively explore digital lutherie. Finally, given the growing interest in timbre studies in psychoacoustics and empirical musicology, this thesis opens space for investigations of perception in experimental approaches within the cognitive sciences.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	A motivação desta pesquisa	12
1.1.1	O meu percurso: a psicoacústica como ferramenta de análise e criação musical	13
1.1.2	Análise musical e composição	15
1.2	A metodologia de pesquisa	17
1.2.1	O papel da colaboração no contexto da pesquisa interdisciplinar	17
1.2.2	A proposta de um fluxo de trabalho para a análise musical com suporte de descritores de áudio	20
1.3	Fundamentação teórica	21
1.3.1	A música de <i>massas sonoras</i>	22
1.3.2	Ligeti e as massas sonoras	29
1.3.3	Uma abordagem interdisciplinar para a noção de <i>massas sonoras</i>	37
1.3.4	Descritores de áudio	37
1.4	A organização desta tese	45
2	Análise Musical	49
2.1	Introdução	49
2.2	A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors	50
2.3	Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos	62
2.4	Emerging structures within microtime of Ligeti's Continuum	102
2.5	A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Study Case in Ligeti's Continuum for harpsichord (1968)	109
2.6	Analysing Mikka "S": from Micro to Macrocomposition and Perception Features	119
2.7	A Psychoacoustic-Based Methodology for Sound Mass Music Analysis	132
2.8	Discussões	150
2.8.1	Contribuições para a análise de música instrumental e electroacustica	150
2.8.2	Sobre a característica <i>work-in-progrees</i> na trajetória de publicações	152
2.8.3	Sobre a representação de fenômenos microtemporais	153
3	Composição Musical	156
3.1	Introdução	156
3.2	Criação e Performance na Elaboração Colaborativa a Distância de Rarefações (2020)	159
3.3	Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum	175
3.3.1	A motivação criativa	175
3.3.2	O processo composicional	177

3.3.3	A concepção dos gestos	178
3.3.4	A interação com os gestos	182
3.3.5	Composição textural em Gestos	187
3.3.6	Discussões	188
3.4	Conclusão	191
3.4.1	Concepção poética	191
3.4.2	Elementos da partitura	192
3.4.3	Design de interações	193
4	Conclusões	194
	Referências bibliográficas	200
A	Partitura de <i>Rarefações</i> (2020)	207
B	Partitura de <i>Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum</i>	216

Capítulo 1

Introdução

O presente trabalho representa a contribuição de um compositor-pesquisador que, valendo-se da análise musical e da composição como campos de investigação, visa explorar algumas relações constituídas no repertório do século XX entre processos criativos, modelos psicoacústicos e ferramentas tecnológicas para análise de áudio. O foco principal da pesquisa recai sobre a textura musical, com ênfase especial na noção de *massas sonoras*. Utilizando descritores de áudio como ferramentas analíticas e modelos de percepção provenientes da psicoacústica, apresentamos neste texto uma série de análises musicais e composições dedicadas a esse recorte musicológico. Situados no Instituto de Artes da Unicamp e em constante colaboração com o Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS-Unicamp), nossa pesquisa se beneficia do contexto artístico, onde os desenvolvimentos musicológicos e tecnológicos estão a serviço da composição e da compreensão mais profunda dos processos criativos. Esta tese, centrada no ponto de vista de um compositor, utiliza ferramentas e conceitos musicológicos como suporte para a expressão criativa e para a compreensão dos fenômenos perceptivos como inspiração para a composição.

A contribuição central desta tese se revela através de análises musicais que lançam luz sobre fenômenos perceptuais das *massas sonoras*, investigados sobretudo por meio da análise de gravações. Além disso, através de discussões que integram os conceitos de composição presentes nas obras analisadas, destacaremos a necessidade dos compositores de criar um campo conceitual que faça um trânsito entre os mundos da composição musical, percepção e suportes tecnológicos e instrumentais. Além das análises, abordaremos o nosso percurso criativo como compositor, destacando a influência e apropriação das análises musicais aqui realizadas em nossos processos criativos. Assim, esta tese propõe uma sinergia entre análise

musical, composição, psicoacústica e tecnologia, evidenciando a riqueza e complexidade desse diálogo mediante interações criativas.

Ao optar pelo formato de compilação de artigos nesta tese, visamos proporcionar uma exposição modular dos resultados obtidos ao longo de nossa pesquisa de doutorado. Essa abordagem nos permite narrar os desafios de uma jornada dinâmica e interdisciplinar, delineando o progresso contínuo da pesquisa por meio da apresentação contextualizada dos artigos. A escolha desse formato não apenas reflete a dinâmica da metodologia adotada, mas também espelha a natureza colaborativa e a intensa atividade acadêmica que caracterizam nosso contexto interdisciplinar. Participar ativamente de ambientes dinâmicos de colaboração nos laboratórios de pesquisa, eventos acadêmicos e *workshops*, assim como contribuir para publicações em periódicos, são elementos fundamentais desse percurso que será narrado.

A estrutura desta tese compreende dois grandes blocos: o primeiro abordando trabalhos de análise musical (Capítulo 2) e o segundo centrado em composições (Capítulo 3), tal como será descrito na Seção 1.4. Sua abertura consiste em uma introdução que explora a motivação subjacente a esta pesquisa, destacando minha trajetória pessoal, na qual a psicoacústica emerge como uma ferramenta central tanto para a análise quanto para a criação musical. Sendo assim, nesta introdução a Seção 1.1 explora a influência desse percurso na minha trajetória, enquanto a Seção 1.1.2 delineia as interseções entre análise musical e composição no âmbito desta pesquisa. Em seguida, a metodologia de pesquisa é apresentada na Seção 1.2, enfocando a importância da colaboração em contextos interdisciplinares e propondo um fluxo de trabalho específico para análise musical com suporte de descritores de áudio (Seções 1.2.1 e 1.2.2, respectivamente). A Seção 1.3 destaca a fundamentação teórica, explorando temas como música de *massas sonoras*, a contribuição de Ligeti nesse campo específico, e a relevância dos descritores de áudio neste contexto analítico (Seção 1.3). Finalmente, a organização geral desta tese é delineada na Seção 1.4, fornecendo um panorama da estrutura que orientará a leitura dos artigos ao longo desse trabalho.

1.1 A motivação desta pesquisa

Nesta seção, exploraremos a motivação intrínseca que norteia esta pesquisa, destacando dois pilares fundamentais que moldaram o seu desenvolvimento. Em 1.1.1, adentramos no âmbito pessoal com uma reflexão sobre o meu percurso, revelando a

psicoacústica como uma ferramenta de significativa relevância tanto para a análise quanto para a criação musical. Este enfoque não apenas ressalta a importância da psicoacústica em meu próprio desenvolvimento como compositor e pesquisador, mas também estabelece a base para compreender como esse recorte epistêmico encontra terreno sólido para a pesquisa e colaboração no contexto interdisciplinar. A subsequente Seção 1.1.2 aborda a interconexão entre análise musical e composição, delineando como essas duas esferas convergem e influenciam mutuamente o processo criativo, a partir de exemplos centrados em compositores como György Ligeti e Iannis Xenakis. Esta dualidade entre o meu percurso pessoal e a interrelação entre análise e criação musical servem como alicerce para a compreensão do que esta pesquisa se propõe a oferecer.

1.1.1 O meu percurso: a psicoacústica como ferramenta de análise e criação musical

Durante o meu mestrado na Universidade de São Paulo, dediquei-me ao desenvolvimento de ferramentas para criação musical ancoradas em modelos de percepção. Nesse contexto, construí um arcabouço interdisciplinar que se situa na interseção de modelos matemáticos para sistemas de afinação, psicoacústica e música computacional. Desenvolvi um algoritmo para modelagem de dissonância sensorial em escalas temperadas iguais com divisões arbitrárias da oitava. Este algoritmo foi implementado no ambiente *PureData*, servindo como suporte tanto à performance musical quanto à composição. Para validar este algoritmo, foi realizado um teste psicoacústico que revelou a eficiência parcial na modelagem da dissonância por meio do modelo de síntese proposto. Os dados empíricos obtidos permitiram, adicionalmente, uma discussão sobre a multidimensionalidade da dissonância, a qual não depende apenas do conteúdo espectral, mas também de outros parâmetros contextuais e culturais. Por meio desta experiência de pesquisa, adquiri as ferramentas essenciais para unir a psicoacústica à análise musical.

No âmbito do meu doutorado, concentrei-me no desenvolvimento de ferramentas analíticas voltadas ao estudo da música de *massas sonoras*, associada a compositores como György Ligeti e Iannis Xenakis. A indagação central da minha pesquisa reside na compreensão de como podemos perceber estruturas musicais em um contexto em que os elementos perceptuais da textura musical assumem um papel central na composição. A relevância desta pesquisa se revela na combinação de informações da partitura com representações de áudio para análises musicais

sob uma ótica perceptual. Desenvolvi ferramentas analíticas que empregam descritores acústicos e psicoacústicos, permitindo a integração de diversas características sonoras em representações gráficas intuitivas, incluindo versões variáveis no tempo e gráficos de dispersão. Esse conjunto de representações possibilita a visualização de características essenciais do sinal de áudio relevantes para o estudo da música de massas sonoras, tais como *densidade espectral*, *rugosidade*, *fluxo espectral*, entre outras.

Durante meu estágio de pesquisa no CNRS-PRISM, um laboratório interdisciplinar co-fundado por Jean-Claude Risset (1938-2016) e reconhecido por suas investigações em síntese e percepção sonora, tive a oportunidade de explorar a interseção entre psicoacústica e análise musical. Sob a orientação da Dra. Sølvi Ystad, conduzi um teste psicoacústico no qual os participantes foram solicitados a realizar tarefas de segmentação enquanto ouviam diferentes texturas musicais realizadas com síntese FM, a fim de validar algumas hipóteses analíticas desenvolvidas durante essa pesquisa de doutorado. Os resultados confirmaram a hipótese de pesquisa, indicando que a velocidade do ataque e a *rugosidade* são fatores relevantes na percepção da estrutura musical na música de massas sonoras.

A colaboração com diferentes grupos de pesquisa também marca a minha trajetória acadêmica nesse terreno interdisciplinar. Minha colaboração com o CNRS-PRISM resultou em contribuições significativas para projetos em andamento, como o *Antiscope*, que se dedica ao estudo da orquestração na música espectral. Minha experiência com descritores de áudio contribuiu para as análises musicais das obras de Gérard Grisey (1946-1998) e permitiu a minha participação no desenho de um protocolo de teste psicoacústico sobre a percepção de fusão na orquestração. Além disso, a colaboração com pesquisadores do Instituto de Física e do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo resultou no desenvolvimento de ferramentas computacionais destinadas à criação e análise musical.

A interseção entre psicoacústica e música também tem sido determinante em minhas composições. A partir dos modelos de síntese desenvolvidos durante o meu mestrado, realizei uma série de composições eletroacústicas fundamentadas na manipulação dos fenômenos de dissonância, exemplificadas por obras como *Kalimba Super Consonante* (2018) e *Asperezas* (2018). Essa abordagem evoluiu naturalmente para a composição de obras de música mista, algumas das quais serão objeto desta tese. A peça *Rarefações* (2021) para caixa clara e eletrônica em tempo real utiliza descritores de áudio em sua interação, notadamente o descritor de *loudness*, enquanto é profundamente inspirada no conceito de *massas sonoras*.

Além disso, a composição *Gestos: Uma Homenagem a Jacques Morelenbaum* (2022) representa uma expansão das ideias apresentadas em *Rarefações*, buscando estabelecer um diálogo entre os gestos conforme são executados e o resultado perceptível das massas sonoras. Destaco também a composição *Descontinuum I* (2020) para fagote solo, que se inspira em fenômenos de integração horizontal e vertical, explorados no estudo da análise de cena auditiva. Por meio destas composições, fica evidente minha jornada na exploração criativa na intersecção entre os domínios da psicoacústica e da composição musical.

Ao refletir sobre minha jornada acadêmica, percebo que imergir nas interseções entre psicoacústica e música não apenas ampliou minha compreensão teórica, mas também esculpiu minha identidade como pesquisador e compositor. Essa trajetória, que entrelaça pesquisa teórica, composição musical e prática interdisciplinar, transcende a mera jornada acadêmica: representa uma exploração pessoal em constante evolução. Esta tese é parte desse percurso.

1.1.2 Análise musical e composição

A música de *massas sonoras* abrange um vasto repertório, cujas influências podem incluir as ideias de Edgard Varèse e seus *novos instrumentos*, passando pela música serial de Stockhausen, a micropolifonia de Ligeti, a música estocástica de Xenakis e a síntese granular de Vaggione (NOBLE, 2018). A inexistência de uma teoria consolidada para as *massas sonoras*, dada a sua natureza fluida e diversificada, torna o conceito desafiador para uma abordagem sistematizada em uma tese. Portanto, o foco principal de nossa pesquisa reside na análise dos aspectos perceptivos e na investigação de características do áudio relacionados às *massas sonoras*. Isso se deve ao fato de que os fenômenos perceptivos ligados às massas não podem ser totalmente compreendidos apenas pela representação simbólica da partitura.

Neste contexto, esta tese apresenta uma série de análises que esclarecem as dimensões perceptivas das massas, relacionando-as ao processo composicional necessário para sua criação. O ponto de vista adotado nessas análises é o de um compositor motivado a compreender as *massas sonoras* em sua complexidade, funcionamento e implicações psicoacústicas. Minha motivação pessoal advém da minha constante interação com a tecnologia e a composição. Diante do computador, enfrento diariamente o desafio de traduzir meus processos criativos para os diferentes ambientes de programação e softwares disponíveis para a composição. O computador, longe de ser capaz de pensar autonomamente, requer do compositor um esforço de programação para exploração de processos de síntese sonora,

processamentos de áudio e design de interações. Sendo assim, a contribuição fundamental desta tese é buscar compreender como os compositores, em sua interação com a tecnologia, criam conceitos e metáforas que conectam o campo conceitual da composição com as possibilidades tecnológicas e o conhecimento herdado da psicoacústica. Além das análises musicais e materiais musicológicos, esta pesquisa oferece uma reflexão sobre o campo conceitual que cerca o processo composicional para os compositores poderem mediar seus processos criativos em diálogo com suportes tecnológicos e diversas técnicas de composição.

Neste contexto de pesquisa, destaca-se a relevância da obra e do pensamento de György Ligeti (1923-2006), pois seus processos criativos estão estreitamente ligados a conceitos psicoacústicos (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993). É notável que Ligeti não apenas utiliza esses conceitos, mas, de fato, os recria e os modifica para estabelecer um espaço conceitual único para seu processo composicional. Assim, a contribuição significativa dos estudos sobre Ligeti nesta tese reside em evidenciar a capacidade singular do compositor em construir um campo conceitual que entrelaça sua experiência no estúdio de música eletrônica, sua composição instrumental e sua compreensão dos fenômenos sonoros, todos intrinsecamente ligados à psicoacústica, como discutido na Seção 1.3.2. A interpretação das obras de Ligeti foi enriquecida pela aplicação de seus conceitos composicionais como uma chave analítica, e.g. (ANTUNES; ESPIRITO SANTO et al., 2023). Essa abordagem na organização do discurso poético também influenciou diretamente nosso processo criativo, sendo incorporada em nossa própria prática composicional.

Além disso, Iannis Xenakis (1922–2001) emerge como outro compositor de extrema importância. Sua relevância reside no emprego de modelos estocásticos em seu processo composicional (XENAKIS, 1992), uma abordagem que permite a modelização das *massas sonoras* através do controle global da textura musical por meio de probabilidades. Adicionalmente, como será discutido na Seção 1.3.1, a música estocástica de Xenakis tem sua base em reflexões sobre a percepção musical. Essa visão do compositor é crucial para nossa análise musical, permitindo a interpretação da forma musical como uma *recorrência de padrões*. Essa perspectiva permeou todo nosso trabalho de análise, facilitando a segmentação das obras e a criação de diferentes tipos de representações de padrões a partir dos dados de áudio. Do ponto de vista da composição, integramos de forma quase sistemática os modelos estocásticos em nosso processo criativo, utilizando-os tanto na composição musical quanto no design das interações para a música mista.

1.2 A metodologia de pesquisa

Nesta seção, expomos a metodologia de trabalho que orientou esta pesquisa. Uma vez que em cada artigo será detalhada uma metodologia específica, esta seção visa elucidar a metodologia geral que permeou nosso percurso ao longo deste doutorado. A Seção 1.2.1 explora o papel vital da colaboração no contexto desta pesquisa interdisciplinar, expondo-a não apenas como uma dinâmica intrínseca à pesquisa, mas também evidenciando como esta permite um diálogo enriquecedor com a comunidade acadêmica. Examina-se assim não apenas a colaboração como um componente interno, mas também como uma ponte fundamental para a ampliação do impacto e da relevância do trabalho no cenário acadêmico mais abrangente. Por sua vez, a Seção 1.2.2 apresenta uma proposta detalhada de um fluxo de trabalho para a análise musical, destacando a integração estratégica de descritores de áudio junto à diversidade de fontes musicológicas. Essas duas facetas metodológicas convergentes estabelecem as bases para a abordagem interdisciplinar que ancora esta pesquisa.

1.2.1 O papel da colaboração no contexto da pesquisa interdisciplinar

Nesta seção, destacaremos a função fundamental da colaboração na condução desta pesquisa, focalizando sua relevância em dois aspectos cruciais: 1 - o impacto positivo da colaboração no desenvolvimento deste estudo e 2 - a abordagem colaborativa no enfrentamento de demandas e críticas ao longo de nossa trajetória acadêmica. Nosso objetivo é ressaltar que, no contexto acadêmico mais abrangente, a colaboração se apresenta como uma oportunidade para aprimorar e enriquecer o trabalho em meio ao desafio intrínseco de uma pesquisa interdisciplinar.

A colaboração no interior da pesquisa

O cerne desta pesquisa reside em sua natureza interdisciplinar, construída na integração de áreas como a musicologia, composição, computação e psicoacústica. A interdisciplinaridade não é apenas um componente incidental, mas uma trama essencial que permeia todo o tecido deste estudo, enriquecendo-o com múltiplas perspectivas especializadas. A colaboração acadêmica, marcante ao longo desta jornada, encontrou um solo fértil para florescer nos corredores do NICS e em laboratórios como o Grupo de Computação Musical do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo e o Laboratório CNRS-PRISM em Marselha, França. Nesse ambiente propício, a pesquisa se beneficiou de

uma abordagem colaborativa que permitiu que desafios complexos fossem enfrentados e superados.

A complexidade tecnológica envolvida nesta pesquisa levou à colaborações com especialistas em engenharia, psicoacústica e computação. Elas foram fundamentais para avaliar a adequação dos modelos e representações aplicados nas análises musicais. Além de superar desafios específicos, essas interações também tiveram impacto ao situar a pesquisa em questões mais amplas, especialmente no contexto da percepção musical, na comunidade acadêmica. Exemplo disso é a pertinência de temas como a percepção de *rugosidade* (BERNARD, C.; KRONLAND-MARTINET et al., 2022) e percepção de textura sonoras (BERNARD, C.; MONNOYER et al., 2022). Além disso, a perspectiva dos pesquisadores não nativos na área musical desempenhou um papel crucial. Sua contribuição foi fundamental para a conceptualização de textos e comunicações acadêmicas que transcendem o ponto de vista da comunidade musicológica. Essa abordagem interdisciplinar não apenas ampliou o alcance da pesquisa, mas também facilitou a comunicação efetiva com uma comunidade mais abrangente, estabelecendo uma ponte entre o campo da música e disciplinas tecnológicas.

As colaborações no contexto musicológico foram impulsionadas pela natureza *ad-hoc* da análise musical, que, por não se enquadrar como uma ciência exata, se beneficia de um diálogo mais amplo na colaboração entre pares. Dentro desse cenário, a análise musical emerge como uma interpretação de diversas fontes musicológicas, conforme será explorado na Seção 1.2.2. Nesse contexto, o ponto de vista artístico, composicional e poético do autor da análise musical fazem parte do seu percurso interpretativo, como discutido por Pople (ANTHONY POPLÉ, 2004).

Seguindo a dinâmica de outros trabalhos de análise musical realizados no NICS (ROSSETTI; TEIXEIRA; MANZOLLI, 2018; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019), adotamos, ao longo desta pesquisa, uma perspectiva colaborativa para a análise musical. Essa abordagem proporciona uma interação entre diversos pontos de vista, enriquecendo assim o arcabouço musicológico da análise musical. O diálogo constante promove uma maturidade no entendimento do trabalho, uma vez que as contribuições de diferentes perspectivas são integradas em um ponto de vista interpretativo de maneira sinérgica.

A colaboração e o diálogo com a comunidade acadêmica

Ao longo desta pesquisa, observamos que a abordagem da análise musical, apoiada por descritores de áudio, está em uma fase de expansão e consolidação no âmbito da musicologia. Durante a elaboração deste trabalho, ao nos comunicarmos com comunidades de musicologia e música e tecnologia mediante avaliações por pares, comunicações, workshops e palestras, identificamos críticas recorrentes por parte desses grupos.

No contexto da musicologia, constatamos que o principal desafio reside na comunicação das representações do áudio. Embora tais representações estejam presentes há muito tempo no contexto da musicologia (COOK, 2013), percebemos que para grande parte da comunidade essas abordagens ainda se apresentam como uma novidade. Adicionalmente, a falta de adoção de metodologias de análise ou teorias mais sedimentadas na prática musicológica é apontada comumente como uma possível fragilidade dessa abordagem. Por outro lado, no contexto da comunidade da música e tecnologia, recebemos críticas recorrentes acerca da ausência de validação por meio de testes subjetivos para as afirmações realizadas sobre o caráter perceptual das obras. No entanto, dada a natureza específica da análise musical proposta neste trabalho, não entendemos a validação psicoacústica como uma necessidade premente.

Diante dessas críticas, percebemos que a abordagem colaborativa desempenha um papel fundamental na resposta a essas preocupações. A colaboração não apenas enriquece a elaboração das representações do áudio e da partitura para facilitar sua comunicação com um público mais amplo, mas também contrapõe as críticas relacionadas à falta de validação perceptual. Isso ocorre ao criar um nível de consenso na interpretação de uma obra, ultrapassando a perspectiva individual de um pesquisador e estabelecendo um terreno mais sólido para a análise e compreensão coletiva.

Além disso, a integralidade dessa dinâmica de trabalho ressalta a importância de um embasamento teórico sólido, construído a partir de diversas fontes em psicoacústica, processamento de sinais e consulta a fontes musicológicas, conforme descrito na Seção 1.2.2. A inclusão de um fundamento teórico não apenas assegura a legitimidade e coesão da abordagem utilizada, mas também fortalece as bases conceituais essenciais para o desenvolvimento consistente deste estudo.

1.2.2 A proposta de um fluxo de trabalho para a análise musical com suporte de descritores de áudio

Um dos desafios mais significativos desta pesquisa foi estabelecer um fluxo de trabalho que integrasse os descritores de áudio, reconhecendo que eles não constituem a principal fonte de informação para análise musical, mas sim um componente integrado entre diversas fontes musicológicas. Essa consideração permeou todo o processo da nossa pesquisa e, após conduzir várias análises, desenvolvemos esta versão específica do fluxo de trabalho. Não sendo uma solução única ou definitiva, ele ainda assim apresenta uma generalidade que possibilita sua replicação e adaptação em variados contextos de análise musical. Assim, esse fluxo de trabalho tem por objetivo ilustrar nossa compreensão de uma metodologia de análise musical realizada ao longo da elaboração da pesquisa, sendo uma adaptação e generalização da proposta do artigo (ANTUNES; ESPIRITO SANTO et al., 2023).

A metodologia de análise musical apresentada aqui é uma tarefa interdisciplinar (COUPRIE, 2020), que visa integrar várias fontes musicológicas (MCADAMS; DEPALLE; CLARKE, 2004), como textos teóricos e estéticos, entrevistas, informações simbólicas da partitura e representações de descritores de áudio. Devemos enfatizar que a interpretação dos autores, ancorada nas informações musicológicas disponíveis, é um elemento-chave da análise musical, uma vez que diferentes estudiosos podem produzir interpretações distintas de uma mesma obra (ANTHONY POPLE, 2004). Assim, os critérios para escolha dos descritores de áudio e das representações gráficas derivadas deles estão ancorados na congruência entre as características perceptuais a serem destacadas, o processo criativo dos compositores e o as referências musicológicas.

O fluxo de trabalho compreende três tarefas principais: 1 - Pesquisa musicológica e revisão de literatura; 2 - Análise de áudio; e 3 - Validação musicológica. Os sub passos do fluxo de trabalho são detalhados da seguinte forma:

1. Pesquisa musicológica e revisão de literatura

- (a) Revisão de textos sobre o compositor e seus processos criativos (Entrevistas, textos teóricos e historiográficos)
- (b) Elaboração do arcabouço teórico, descritores de áudio e referências psicoacústicas
- (c) Compilação de análises prévias da obra a ser analisada

2. Análise de áudio

- (a) Escolha dos descritores de áudio ancorados nas descobertas musicológicas da etapa (1)
- (b) Segmentação manual do sinal de áudio segundo os resultados da pesquisa musicológica
- (c) Cálculo dos descritores de áudio selecionados e elaboração de suas representações gráficas correspondentes

3. Avaliação/validação musicológica

- (a) Cruzamento da informação do áudio com a análise da partitura (quando é o caso)
- (b) Validação musicológica por meio da avaliação dos resultados da análise de áudio em relação ao contexto musicológico
- (c) Discussão entre pares visando chegar a uma interpretação compartilhada.

1.3 Fundamentação teórica

Esta seção abordará os fundamentos conceituais desta pesquisa, expondo a literatura que fundamenta o conceito de música de *massas sonoras* e, assim, esclarecendo o campo conceitual que guiará a leitura dos artigos subsequentes. Inicialmente, a Seção 1.3.1 apresenta a noção de textura musical (Seção 1.3.1) que fundamentará o conceito específico de *massas sonoras* (Seção 1.3.1). Subsequentemente, exporemos a sua contextualização histórica, notadamente a partir da interação de compositores do Século XX com os *Darmstädter Ferienkurse* (Seção 1.3.1). Em seguida, discutiremos como discussões sobre percepção no serialismo fornecem uma possível contextualização do conceito de *massas sonoras* (Seção 1.3.1), seguido por uma demonstração de como noções relacionadas à exploração do continuum sonoro fornecem soluções composicionais fundamentais ligadas às massas (Seção 1.3.1).

Dada a importância de György Ligeti para nossa tese, a Seção 1.3.2 concentra-se no pensamento e obra do compositor, expondo como ele opera as *massas sonoras* utilizando técnicas composicionais como o *cluster sonoro*, *padrões mecânicos* e *micropolifonia*. Exploram-se, ainda, as noções de *timbre em movimento* e *permeabilidade*, elementos essenciais para

a compreensão do pensamento composicional de Ligeti que fazem a ponte entre processos criativos do compositor e modelos de percepção. Finalmente, é contextualizado na Seção 1.3.4 o papel dos descritores de áudio na análise musical da música de *massas sonoras*, bem como são apresentadas as suas definições conceituais e formalizações matemáticas. Este arcabouço teórico delineado nesta seção, estabelece o contexto necessário para a leitura dos artigos que serão apresentados durante essa tese.

1.3.1 A música de *massas sonoras*

Massa sonora, como será explorado nessa seção, é um caso específico de exploração da textura musical atingido a partir da execução de um grande número de eventos sonoros em um curto espaço de tempo e/ou frequência, buscando fazer emergir fenômenos sonoros ligados ao comportamento da orelha interna. Consequentemente, a música de *massas sonoras* foca-se em uma mudança de paradigma em relação à música clássica ocidental, onde elementos como ritmo, altura e harmonia não ocupam posição central na composição. A compreensão desse tipo de mudança pode ser abordada através da ideia de *post-tone* music (NOBLE; MCADAMS, 2020). Para iniciar uma exposição sobre a música de *massas sonoras*, apresentaremos a noção de *textura musical*.

Textura musical

A textura musical é descrita na literatura como uma metáfora da percepção visual e tátil (BERRY, 1987; FERRAZ, 1990; MACKAY, 1984). Segundo Berry, no contexto musical, “... é constituída por seus componentes sonoros; é condicionada em parte pelo número desses componentes, que soam em simultaneidade ou concorrência...” (BERRY, 1987, p. 184) ¹. Berry também afirma que a densidade é um aspecto quantitativo da textura (BERRY, 1987, p. 184). Essa pode ser observada a partir do número de eventos que ocorrem, e da sua compressão intervalar, dada pela altura mais grave e mais aguda. Ferraz destaca que a textura é “compatível com o sistema e procedimentos típicos ao qual esta se insere — polifônico, monódico, harmônico, serial, pontilista, estatístico”, sendo ela “a sensação gestáltica produzida pela configuração e pelo dinamismo dos elementos sonoros presentes num determinado fluxo sonoro” (FERRAZ, 1990).

¹Tradução nossa do original: “consists of its sounding components; it is conditioned in part by the number of those components sounding in simultaneity or concurrence...” (BERRY, 1987, p. 184)

Massas sonoras

No século XX há uma exploração particular da ideia de textura musical a partir das *massas sonoras* (NOBLE, 2018). Compositores como György Ligeti (1923-2006) e Iannis Xenakis (1922-2001), exploraram essa concepção, cada qual à sua maneira, em obras instrumentais e eletroacústicas. Segundo Hagan (HAGAN, 2008), neste repertório a textura musical é a grande protagonista. Ela define essa técnica composicional como “a prática de elevar e explorar a posição intermediária entre o singular e o plural, enquanto nega outros atributos musicais” (HAGAN, 2008, p. 1) ².

Ao observar os compositores que podem ser estudados a partir da concepção de *massa sonora*, ressaltamos de antemão que existe uma variedade de técnicas composicionais que podem gerar este estado, como síntese granular, clusters, fusão espectral, exploração de limites instrumentais, complexidade rítmica, micropolifonia ou procedimentos estocásticos (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016, p. 288). A ideia de *massa sonora* aponta para uma condição de saturação do sistema auditivo, pois nela se perde a sensação do intervalo musical. Ou seja, a percepção mais localizada no plano da frequência dá lugar à percepção mais global da textura sonora. Segundo Douglas; Noble; Mcadams (2016):

Massa sonora existe quando a identidade individual de múltiplos componentes ou eventos sonoros são atenuados e submetidos em um todo perceptual, que mesmo assim mantém uma impressão de multiplicidade. Tipicamente isso envolve um ou mais parâmetros do som — por exemplo, atividade rítmica, organização das alturas, ou conteúdo espectral — alcançando um nível de densidade, complexidade, e/ou homogeneidade que é percebido como saturação (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016, p. 287) ³.

Os autores ainda a definem “... como um tipo de agrupamento auditivo que retém uma impressão de multiplicidade mesmo sendo percebida como uma unidade perceptiva. A massa sonora exige que todas as marcas das identidades individuais do som sejam desenfáticas para evitá-las de se dividirem em fluxos separados” (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016, p. 287) ⁴. Os autores também defendem que essa desênfase necessita da colaboração de vários

²Tradução nossa do original: “... the practice of elevating and exploring the intermediary position between the single and the plural while denying other musical attributes.” (HAGAN, 2008, p. 1)

³Tradução nossa do original: “Sound mass exists when the individual identities of multiple sound events or components are attenuated and subsumed into a perceptual whole, which nevertheless retains an impression of multiplicity. Typically this involves one or more parameters of sound — for example, rhythmic activity, pitch organization, or spectral content — attaining a degree of density, complexity, and/or homogeneity that is perceived as saturation.” (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016, p. 287)

⁴Tradução nossa do original: “... as a type of auditory grouping that retains an impression of multiplicity even as it is perceived as a perceptual unit. Sound mass requires all markers of the individual identities of sounds to

parâmetros do som e da organização composicional, incluindo os contornos dinâmicos, perfis rítmicos e a saliência timbrística.

A associação entre as *massas sonoras* e fenômenos perceptivos têm sido usualmente explorada no contexto musicológico (ANTUNES; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019; ANTUNES; FEULO; MANZOLLI, 2020; ANTUNES; MANZOLLI, 2020; DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016; NOBLE; MCADAMS, 2020). Essa associação está intimamente ligada com o contexto de origem da música de *massas*, a partir das especulações de compositores e teóricos do século XX sobre a percepção. Esse contexto será detalhado no tópico a seguir.

Contextualização histórica - Os *Darmstädter Ferienkurse*

No contexto da música do século XX podemos destacar um intenso diálogo entre conhecimento sobre percepção e especulações composicionais. Sobre os atores presentes na construção deste diálogo, iniciamos dando destaque a Werner Meyer-Eppler (1913-1960). Físico, foneticista, linguista e colaborador do estúdio da rádio NWDR de Colônia, onde estavam presentes os primeiros compositores de música eletrônica (EIMERT, 1955, p. 5). Ele tinha como um dos seus focos de estudo a síntese de voz. Se dedicou também a pensar problemas relacionados às técnicas da música eletrônica. Seu ponto de vista era mostrar que as questões que envolviam essa prática não estavam circunscritas ao mundo da acústica, mas também a questões fisiológicas e de como esta condiciona a nossa percepção do som (MEYER-EPPLER, 1955). Participou dos *Darmstädter Ferienkurse*, ministrando palestras em diversas ocasiões. Suas exposições tratavam de acústica, síntese sonora e questões relativas à psicoacústica (BORIO; DANUSER, 1997).

Citamos também Hebert Eimert (1897-1974), diretor do estúdio da rádio NWDR (EIMERT, 1955, p. 5). Ele participou continuamente dos *Ferienkurse* entre 1951 e 1963, como compositor e palestrante (BORIO; DANUSER, 1997). Em 1957 ministrou uma palestra sobre a Teoria da Informação aplicada à música (BORIO; DANUSER, 1997). Mencionamos também Volker Ralhs que em 1965 apresenta no *Ferienkurse* uma conferência sobre os impactos da psicologia na percepção e teoria da música (BORIO; DANUSER, 1997). A presença desses teóricos nesse festival, que centralizava parte das discussões sobre a música

be deemphasized to prevent them from splitting off into separate streams.” (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016, p. 287)

de concerto ocidental, contextualiza nossa chave interpretativa para atuar nessa mediação entre análise musical e percepção.

O problema da percepção no serialismo

Encontramos em compositores do século XX como Stockhausen, Ligeti e Xenakis entre outros, técnicas de composição que se sustentam a partir de um diálogo entre o discurso musical e o conhecimento sobre fenômenos psicoacústicos do som (HUMIEŃKA-JAKUBOWSKA, 2010).

Para dar início a esta reflexão, apresentaremos inicialmente uma breve visão sobre o serialismo com base na definição de Gredinger (GREDINGER, 1955). Posteriormente, investigaremos como a des-hierarquização dos parâmetros musicais, induzida pelo emprego da técnica serial, gera uma série de indagações significativas sobre a percepção da forma e da estrutura musical, sob a perspectiva de Henri Pousseur, Karlheinz Stockhausen e Iannis Xenakis. Podemos retratar esse diálogo a partir do contexto no qual esses compositores se encontravam. Citamos como ponto de partida em comum neste diálogo entre percepção e processo composicional a relação de todos com a prática da música serial (GREDINGER, 1955).

A música serial pode ser entendida como um desdobramento do dodecafonismo proposto por Arnold Schoenberg (1874–1951) e desenvolvido por compositores como Anton Webern (1883–1945). A música serial dos anos de 1950 expandiu a organização do material musical a partir da utilização da série para o controle de diversos parâmetros sonoros (GREDINGER, 1955, p. 40-41). Sobre a técnica serial, lemos em Gredinger (1955):

Nossa série é um sistema de regulação de uma concepção de ordem; é o método pelo qual quantidades simples (seções menores ou maiores da área estática variando do tom puro ao ruído em branco) são sistematicamente deduzidas e estendidas; é o princípio fundamental de relações que gera a estrutura de uma obra. O princípio serial cria formas nas quais o todo, bem como as partes, dependem de uma única característica da Série (GREDINGER, 1955, p. 42) ⁵.

Esse tratamento desierarquizado dos parâmetros musicais, todos controlados a partir do procedimento serial, levantou questões relativas à percepção resultante desta técnica. Henri

⁵Tradução nossa do original: Our series is a system of regulating a conception of order; is the method by which simple quantities (smaller or greater sections of the static area ranging from the sinus note to blank noise) are systematically deduced and extended; is the fundamental principle of relationship which generates the structure of a work. The serial principle creates forms in which the whole as well the parts depend on a single characteristic of the Series (GREDINGER, 1955, p. 42)

Pousseur (POUSSEUR; BEHRMAN, 1966, p. 93), ao realizar uma análise de *Structures I* (1952) de Pierre Boulez (1925–2016), argumenta que operações de permutação na estrutura da série não necessariamente se manifestam na percepção da obra, causando assim uma incapacidade de percepção de diferenciação da forma musical. Stockhausen (STOCKHAUSEN, 1959, p. 78-79) destaca como processos contínuos de transformações dos parâmetros musicais levam a uma percepção de monotonia da forma musical. Essa técnica também é apontada por Ligeti (2010) como causadora de uma estaticidade na percepção da forma musical.

Xenakis atribui ao uso da série e à presença da polifonia as bases e o germe de destruição da prática serial (XENAKIS, 1994). Isso porque, segundo ele, o uso da série nos diversos parâmetros sonoros alinhado a uma grande complexidade da polifonia geraria na percepção o estado da massa, pois o ouvinte não poderia acompanhar os eventos e linhas individualmente (XENAKIS, 1994, p.42). Ele ainda acrescenta que, neste contexto, nossa percepção se fixa nos eventos que possuem maior recorrência na textura musical. Essa é a razão por trás da proposta de uma música estocástica. Se nossa percepção está estatisticamente relacionada aos eventos sonoros, uma alternativa seria utilizar modelos probabilísticos para controlar o material musical no lugar do procedimento serial.

Questões relativas à percepção também ficam evidentes no contexto da música eletrônica. As primeiras peças foram concebidas a partir das técnicas seriais, como pode ser observado em *Studie I* (1953) e *II* (1954) de Stockhausen. Essas primeiras experiências logo demonstraram que havia uma distância entre a idealização do timbre, a partir da síntese aditiva ⁶ e a sua percepção (STOCKHAUSEN, 1963). Tal ponto evidenciou a possibilidade inerente da sensação de fusão dos timbres, apontada por Stockhausen (STOCKHAUSEN, 1963). Assim, os fenômenos psicoacústicos relacionados à intensidade, da altura, a fusão e de batimentos encontraram espaço nas discussões musicais (STOCKHAUSEN, 1963; MEYER-EPPLER, 1955).

A exploração do continuum sonoro e a concepção de massas

Como resposta às questões relativas à percepção no contexto do serialismo, foram realizadas propostas composicionais focando na exploração do continuum sonoro no contexto da percepção de altura ou do tempo musical. Citamos como exemplo o uso do glissando em peças como *Glissandi* (1957) de Ligeti e *Metastaseis* (1954) de Xenakis. Outro exemplo é a

⁶Técnica de síntese sonora que consiste na criação de um espectro complexo por meio da soma de tons puros gerados por osciladores.

concepção de estruturação unificada do tempo (STOCKHAUSEN, 2009), que pode ser observada em procedimentos de exploração de ambiguidades entre a percepção de altura e ritmo na peça *Kontakte* (1960). Também destacamos a tentativa da criação de um continuum temporal na peça *Continuum para cravo* (1968) de Gyorgy Ligeti, que visa atingir uma percepção de continuidade na textura musical a partir da execução de ataques muito velozes no cravo. A exploração do continuum terá como desdobramento uma série de práticas musicais que elucidaremos a seguir, alinhadas com a noção de *massa sonora*, sendo elas: uma noção de exploração de textura musical a partir da concepção de *pontos, grupos e massas* de Stockhausen, além da concepção de *música estocástica* de Iannis Xenakis.

Stockhausen contextualiza parte do seu processo criativo ante a produção musical do século XX a partir das concepções de *pontos, grupos e massas* (STOCKHAUSEN, 2009). A noção de *pontos* é contextualizada a partir do serialismo de Anton Webern, onde “os motivos e os temas musicais são em última instância reduzidos a fórmulas de duas notas” (STOCKHAUSEN, 2009, p. 46). Neste exemplo, o compositor nos aponta para a concentração da ideia em poucas notas, podendo ser reduzida mesmo a um único intervalo. Essa concepção ainda teria desdobramento em *Mode de valeurs et d'intensités* (1950) de Olivier Messiaen, onde a atomização da ideia musical seria radicalizada a partir do tratamento igual dado a todos os parâmetros musicais de nota a nota. “Para todos nós que éramos alunos de Messiaen durante esse período, esse foi o ponto de partida: uma música na qual todas as características possíveis eram diferenciadas de nota em nota” (STOCKHAUSEN, 2009, p. 46). Os pontos seriam explorados, também, na prática do serialismo, vertente da qual Stockhausen foi um dos principais expoentes.

A partir da já citada crítica ao serialismo, Stockhausen se propôs a explorar a técnica de *grupos* em suas composições. Esta técnica consistia no “congelamento” de parâmetros musicais em um determinado grupo de notas. Dessa maneira, um determinado conjunto de notas manteria características sonoras internas em comum. Com esta técnica, o compositor busca responder a questões relacionadas à percepção impostas pela prática do serialismo. Segundo Stockhausen: “Por grupo, refiro-me ao número de notas que pode ser distinguido separadamente a qualquer momento, o qual vai até sete ou oito. E elas precisam ter pelo menos uma característica em comum” (STOCKHAUSEN, 2009, p. 49). A partir dessa afirmação, Stockhausen diz que a característica de um grupo pode ser construída a partir de parâmetros como dinâmica ou o timbre, e que a força de um grupo está relacionada à quantidade de características em comum.

Por fim, citamos a concepção de *massa*, que vem da extrapolação do grupo e que se relaciona diretamente com o nosso limite de percepção de eventos individuais. Segundo o compositor, “quando não podemos mais contar as notas individuais em um grupo, elas ultrapassam o grupo” (STOCKHAUSEN, 2009, p. 51). Stockhausen ilustra a massa com a seguinte metáfora: “Se vemos uma árvore, não contamos as folhas, mas ainda assim somos capazes de distinguir um pinheiro de uma faia. É um efeito dos elementos, mas há algo mais, o formato, a forma como um todo, que caracteriza a massa” (STOCKHAUSEN, 2009, p. 51). Essas concepções também foram fundamentais para proporcionar uma espécie de ruptura com as práticas fundamentais do serialismo na composição da obra *Kontra-Punkte* (1953):

O início de *Kontra-Punkte* é uma música pontilhista, porque tive de começar a composição com música pontilhista pura para romper, por assim dizer, com meu próprio sistema. Conforme a obra progride, mais e mais grupos pequenos aparecem, isto é, sequências de notas tocadas pelo mesmo instrumento, e finalmente o piano vem à frente tocando toda uma massa de notas (STOCKHAUSEN, 2009, p.49).

Em Xenakis, a exploração de fenômenos perceptivos encontra sua base em uma percepção temporal. Em seu texto *Concerning Time* (XENAKIS; BROWN, R., 1989) ele cita a diferença de percepção temporal entre sons rugosos curtos, percebidos como timbre, e longos, percebidos como fenômenos rítmicos internos. Esta percepção é consequência de variações de amplitudes no espectro sonoro (XENAKIS; BROWN, R., 1989, p. 91). Cabe ressaltar aqui que ele apoia suas especulações em fenômenos relacionados à membrana basilar e a impulsos elétricos dos neurônios no cérebro:

Por um lado, parece que os pontos de deformação da membrana basilar têm um papel fundamental no reconhecimento; mas, de outro lado, uma espécie de código Morse temporal das descargas elétricas é considerada estatisticamente para a detecção de um tom (tone). Uma contagem subliminar do tempo notavelmente complexa acontece (XENAKIS, 1992, p. 91).

Xenakis encontrou no que chamou de *música estocástica* uma ferramenta composicional para atuar nesse âmbito microtemporal (ROADS, 2001) da textura sonora. Usando como exemplo o som da colisão da chuva em superfícies duras e o som de cigarras no campo, o compositor destaca que “estes eventos sonoros são feitos de milhares de sons isolados, percebidos como totalidade, em um novo evento sonoro” (XENAKIS, 1992, p. 9). Conclui assim que “essa massa é articulada e forma um molde plástico do tempo que por si só segue leis estocásticas” (XENAKIS, 1992, p. 9). Desse modo, o compositor emprega modelos estocásticos para controlar o material sonoro e assim operar composicionalmente a textura

musical. Por exemplo, utilizando como material “uma infinidade de glissandos curtos” ou “uma infinidade de pizzicatos” (XENAKIS, 1992, p. 9). A partir de micros eventos, cria assim uma sensação de continuidade. Além disso, utiliza modelos estocásticos para criar passagens entre estados contínuos para estados descontínuos (XENAKIS, 1992, p. 9). Essas concepções de Stockhausen e Xenakis nos interessam, pois elas sintetizam um período histórico que perpassa a obra dos compositores e nos dão subsídio para refletir sobre elementos históricos das *massas sonoras*. Elas representam uma transição do serialismo para a música estritamente textural, que se concentra principalmente na exploração do conceito de massa na composição musical. Esta evolução será examinada mais detalhadamente por meio da análise dos processos composicionais de György Ligeti.

1.3.2 Ligeti e as massas sonoras

Nesta seção, focalizamos a nossa atenção em um conjunto de obras e concepções que vem sendo abordadas na literatura que associam Ligeti à música de *massas sonoras* (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016; NOBLE, 2018; NOBLE; MCADAMS, 2020). Desse modo, evidenciaremos aspectos da obra de Ligeti que contribuem para o esclarecimento da associação de algumas de suas obras com a noção de música de massas sonoras. Destacamos nos próximos parágrafos três aspectos importantes para o entendimento dessa concepção na obra de Ligeti: o seu contato com os compositores da música de vanguarda do Séc. XX, seu interesse pela matemática e pelas ciências naturais e a sua relação poética com associações extramusicais em sua obra.

Na biografia de Ligeti, destaca-se seu interesse pelas ciências naturais. Ele recebia incentivo dos pais e tinha aspirações na área científica (FLOROS, 2014, p.9). Em maio de 1941, planejava estudar matemática e física na Universidade de Cluj, mas seu direito foi negado devido à ocupação nazista na Romênia que começou em 1933 (FLOROS, 2014, p. 10). Esse interesse científico perdurou, e suas obras refletem amplamente essa influência, especialmente em seu repertório de massas sonoras.

Ligeti destacava o seu fascínio pela matemática, que para ele estava em “algum lugar entre as ciências naturais e a arte” (FLOROS, 2014, p. 23) ⁷. No entanto, Ligeti sustentava que a matemática e a ciência não eram, por si só, capazes de gerar produtos artísticos, mas que elas

⁷Tradução nossa do original: “somewhere between the natural sciences and art” (FLOROS, 2014, p. 23).

“... podem muito bem fertilizar ideias e concepções artísticas e, assim, afetar beneficentemente o desenvolvimento de uma nova arte visual e uma nova música” (FLOROS, 2014, p. 23) ⁸.

Knop destaca o papel da aplicação do conhecimento da psicoacústica e da matemática fractal nos processos composicionais de Ligeti (KNOP, 2017). Steinitz destaca a influência da matemática e das ciências naturais na obra de Ligeti principalmente a partir do conhecimento sobre fenômenos relacionados à orelha interna, destacando “uma imaginação auditiva governando cada decisão composicional” (STEINITZ, 1996, p. 14) ⁹. Isso também é ilustrado quando em sua conferência *Music in a technological era* realizada para a Sender Freies Berlin, Ligeti cita o seu interesse pela psicoacústica a partir da leitura do texto *Phänomene des musikalischen Hörens*, de M. Hesse (1960).

Outro importante aspecto da música de Ligeti é a associação do som com outros sentidos ou linguagens, onde “o ilusório, imaginário e o fantástico tem um grande papel” (FLOROS, 2014, p. 24). Este é outro elemento que contribui para a associação de obras de Ligeti à noção de *massas sonoras*, devido ao seu apelo às metáforas ligadas a outros sentidos, como visão ou tato (NOBLE, 2018, p. 114). Ligeti assume essa relação em sua poética, falando sobre o som em associação a outros sentidos, como vemos a seguir:

A conversão involuntária da visão e do tato em sensações acústicas é habitual para mim: eu quase sempre associei sons com cor, forma e textura: e forma, cor, e qualidade material com cada sensação acústica. Mesmo conceitos abstratos, como quantidades, relações, conexões, parecem tangíveis para mim e tem o seu lugar em um espaço imaginário (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 165) ¹⁰.

Essas associações também são visíveis no vocabulário que Ligeti utiliza para descrever a sua música. Destacamos a seguir:

Planos tonais e massas, que se sobrepõem, se interpenetram ou se fundem, — redes flutuantes que se rompem e se enroscam, — materiais úmidos, pegajosos, gelatinosos, fibrosos, secos, quebradiços, granulados e compactos, — retalhos, frases, fragmentos e vestígios de todos os tipos, — edifícios imaginários, labirintos, inscrições, textos, diálogos, insetos, — condições, eventos, processos, amálgamas, transformações, catástrofes, decadência,

⁸Tradução nossa do original: “... can well fertilize artistic ideas and conceptions and thereby beneficially affect the development of a new visual art and a new music” (FLOROS, 2014, p. 23).

⁹Tradução nossa do original: “an aural imagination governing every compositional decision” (STEINITZ, 1996, p. 14).

¹⁰Tradução nossa do original: The involuntary conversion of optical and tactile into acoustic sensations is habitual to me: I almost associated sounds with color, form and texture; and form, color, and material quality with every acoustic sensation. Even abstract concepts, such as quantities, relationships, connections, seem tangible to me and have their place in an imaginary space (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 165).

desaparecimento, — todos esses são elementos de minha música não pura (FLOROS, 2014, p. 27) ¹¹.

Ligeti teve contato com a música nova da Europa Central em 1956, época que começou a estabelecer contato com Hebert Eimert (1897 – 1972), Karlheinz Stockhausen (1928 – 2007), Otto Tomek (1928 – 2013) e Hanns Jelinek (1901 – 1969), solicitando-os textos, partituras e gravações musicais (FLOROS, 2014, p. 14). Em 10 de dezembro de 1956, Ligeti pega um trem e cruza ilegalmente a fronteira com a Áustria. A partir dos esforços de Eimert, Ligeti consegue uma bolsa de 4 meses para trabalhar no estúdio de Colônia, que por seu estilo de vida frugal, permitiu que ele se mantivesse por um ano e meio em Colônia (FLOROS, 2014, p. 13). Nessa época, trabalhou no estúdio com Gottfried Michael Koenig (1926 - 2021). Segundo o compositor, essa sua experiência no estúdio foi importantíssima para a concepção de suas obras instrumentais, a partir da noção do que ele chamou de *timbre em movimento*, que será explorado de maneira mais detalhada na seção 1.3.2.

Ligeti se consolidou como compositor diante de seus pares da Europa Central a partir das estreias das obras *Apparitions* em 19 de junho de 1960, no World Music Festival da Sociedade Internacional para Música Nova em Colônia, e com *Atmosphères* em 22 de outubro de 1961, no Donaueschinger Musiktage (FLOROS, 2014, p. 14). Podemos observar em suas obras de música de *massas sonoras* um conjunto de composições instrumentais, como *Atmospheres* (1960) ou *Lux Aeterna* (1966), que foram amplamente influenciadas por sua experiência no estúdio da rádio NWDR de Colônia e pelo contato com os compositores europeus da música do século XX ligados aos *Darmstädter Ferienkurse* ¹². Essas marcam o início do conjunto de obras que podemos entender como *música de massas sonoras* e cujo material musical será explorado nos tópicos a seguir a partir de estratégias composicionais ligadas ao *cluster sonoro*, *padrões mecânicos* e *micropolifonia*.

A emergência das massas sonoras no cluster sonoro, nos padrões mecânicos e na micropolifonia

O conceito de emergência ocupa um espaço importante em trabalhos de análise e criação musical, apontando para a complexidade dos fenômenos perceptivos (ANDERSON,

¹¹Tradução nossa do original: Tonal planes and masses, which supersede, interpenetrate or merge with each other, — floating networks that tear apart and get knotted, — wet, sticky, gelatinous, fibrous, dry, brittle, grainy and compact materials, — shreds, phrases, fragments and traces of all sorts, — imaginary buildings, labyrinths, inscriptions, texts, dialogues, insects, — conditions, events, processes, amalgamations, transformations, catastrophes, decay, disappearance, — all these are elements of my non-puristic music (FLOROS, 2014, p. 27)

¹²Ligeti participou pela primeira vez do *Darmstädter Ferienkurse* em 1957 (FLOROS, 2014, p. 13).

2005; MERIC; SOLOMOS, 2008; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019; SCIPIO, 2002). Segundo Schröder (SCHRÖDER, 2014) “Emergência, como um conceito da teoria dos sistemas, descreve uma nova qualidade ou Gestalt que evolui das interações do sistema e que não pode ser explicada baseado no conhecimento das interações separadamente” (SCHRÖDER, 2014, p. 38). Sendo assim, neste recorte epistêmico, entendemos a percepção das *massas sonoras* como um fenômeno emergente, que nasce em um nível mais alto da interação entre as partes envolvidas no processo de escuta (repertório, obra, performance, espaço acústico, ouvinte, etc.), não sendo possível explicar de maneira unívoca como esse processo de escuta ocorre.

Segundo Di Scipio em entrevista a Anderson (ANDERSON, 2005), “o som é o epifenômeno de um processo de baixo nível: você cria um processo de baixo nível, e as interações e interferências entre os componentes que participam do processo são ouvidos como uma forma dinâmica do som, um processo de *emergência sonológica*” (ANDERSON, 2005, p. 18). Dessa maneira, nosso estudo alinha a ideia de *massas sonoras* com as medidas dos *descritores de áudio* e dessa forma, representa características de nível *sensorial* presentes na escuta. Essas representações revelam características de fenômenos de segunda ordem, os quais são gerados por interações entre os componentes das *massas sonoras*. Podemos investigar as *massas sonoras*, neste contexto, como a *emergência sonológica* que nasce das características de técnicas composicionais de Ligeti a partir do uso de *clusters sonoros*, *padrões mecânicos* e *micropolifonia*.

O *cluster sonoro* é uma estratégia utilizada por Ligeti para a constituição das *massas sonoras* e, segundo o compositor, é articulado em suas obras a partir de dois tipos de materiais, sendo o primeiro:

[...] derivado do "cluster sonoro", está em algum lugar entre o som e o ruído e consiste em várias vozes estratificadas e entrelaçadas em semitons, que assim abrem mão de sua individualidade e se dissolvem completamente no complexo dominante resultante. [...] Essas "texturas" delicadas e ressonantes variam em qualidade de acordo com sua localização no registro, o tipo e a densidade de seu entrelaçamento e a natureza de suas vozes individuais constituintes (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 165) ¹³.

E o segundo:

[...] consiste em grupos fixos de sons, que, por assim dizer, povoam o "labirinto de ruídos" decorrente do primeiro tipo. [...] Todos os grupos de sons

¹³Tradução nossa do original: [...] derivative of the “tone cluster”, is somewhere between sound and noise and consists of several voices stratified and interwoven in semitones, which thereby give up their individuality and become completely dissolved into the resultant overriding complex. [...] These delicate, resonant “textures” vary in quality according to their registral placement, the type and density of their interweaving, and the nature of their constituent, individual voices. (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 165)

e sons individuais emergem repentinamente, como fenômenos ressonantes, e desaparecem na maior parte com a mesma rapidez (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 166) ¹⁴.

Ligeti utiliza a sua obra *Apparitions* (1960) como exemplo de articulação deste tipo de material. É interessante notar que em sua descrição da composição, o seu foco no uso de intervalos musicais muito próximos busca produzir fenômenos de interferências sonoras. Ao citar a segunda menor tocada de maneira contínua no começo da obra, Ligeti diz:

Este som estacionário não é inteiramente imóvel, pois o intervalo entre os dois tons é de segunda menor, do qual surge uma interferência oscilatória que turva um pouco o som à medida que ele se estende de uma maneira plana (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 166) ¹⁵.

Sendo assim, é interessante notar que o *cluster sonoro* não é tratado por Ligeti como um material sonoro estático, mas sim como um meio de viabilizar uma série de qualidades *psicoacústicas* que podem ser entendidas como fenômenos sonoros *emergentes*. Ou seja, mais do que um material pré-composicional abstrato, nos parece correto afirmar que Ligeti articula o seu material composicional focando no resultado sonoro *emergente* do *cluster*.

Esse tipo de fenômeno *emergente* do *cluster* também está relacionado aos estudos de Ligeti sobre as afinações de músicas do Gamelão Balinês. Essa conexão é ressaltada por Kris Shaffer em sua análise dos rascunhos de Ligeti, onde o compositor observa que os instrumentos eram ajustados em diferenças de apenas alguns *hertz* para criar efeitos timbrísticos (MARX, 2017). Essa observação pode ter influenciado *Ramifications* (1968-9), composto por dois conjuntos de 6 instrumentos de cordas afinados em diferenças de quarto de tom (MARX, 2017).

No mesmo contexto, destacamos o interesse de Ligeti pelo comportamento de máquinas e processos automatizados, estudados por Clendinning (CLENDINNING, 1993) a partir da noção do *pattern-meccanico*, que chamaremos aqui de *padrões mecânicos*. Talvez a obra que melhor ilustre este conceito seja o seu *Poema Sinfônico* (1962) para 100 metrônomos. Nesta obra, 100 metrônomos com velocidades diferentes são disparados. Embora a obra demonstre um certo interesse de Ligeti para com a arte conceitual e seu interesse pelas práticas da arte conceitual do grupo *fluxus* (DROTT, 2004), não se pode deixar de lado o resultado

¹⁴Tradução nossa do original: [. . .] consists of fixed groups of sounds, which, in a manner of speaking, populate the "noise labyrinth" arising from the first type. [. . .] All groups of sound and individual sounds emerge suddenly, as resonant phenomena, and disappear for the most part just as quickly (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 166).

¹⁵Tradução nossa do original: This stationary sound is not entirely motionless, for the interval between the two tones is a minor second, from which arise the interference oscillation that muddies the sound a little as it extends in planar fashion (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 166).

sonoro da obra, que nasce da *emergência* de sincronias e assincronias dos pulsos dos metrônomos. De acordo com Ligeti:

Embora a estrutura rítmica geral seja indeterminada em um nível intermediário — o resultado local da adição de períodos individuais de diferentes durações é arbitrário — ela é, no entanto, mais uma vez determinada em um nível superior, ou seja, o nível em que toda a forma se desdobra (DROTT, 2004, p. 224) ¹⁶.

É interessante notar assim como, a partir da influência da matemática dos fractais e da psicoacústica, Ligeti busca criar o seu discurso a partir da *emergência* de fenômenos sonoros que nascem dos *padrões mecânicos*, que são “... estratégias composicionais que Ligeti aplica visando criar estruturas que inicialmente parecem ser estáticas que, no entanto, se desdobram em unidades rítmicas e melódicas mais diferenciadas” (KNOP, 2017) ¹⁷.

Destacamos outra técnica de Ligeti que se relaciona à ideia de massas sonoras, conhecida como *micropolifonia*. Nesta técnica, é possível criar texturas muito densas a partir da sobreposição de um grande número de melodias de sons curtos. Sobre isso:

Chamei essa forma de composição de “micropolifonia” porque os diferentes elementos rítmicos ficavam abaixo do ponto de fusão no quadro polifônico. O tecido atinge tamanha densidade que as vozes não são mais perceptíveis em sua individualidade e só podem ser entendidas como um todo, em um nível superior de percepção (LIGETI, 2010, p. 185) ¹⁸.

Destacamos, assim, que entre as técnicas de *cluster sonoro*, *padrões mecânicos* e *micropolifonia*, há uma busca por atuar nos limites da percepção auditiva, por meio da exploração de características da orelha interna. Esse procedimento se desenvolve a partir da acumulação de um amplo espectro de alturas musicais, da saturação do número de ataques sonoros ao longo do tempo e de suas potenciais sincronias, ou através da sobreposição de melodias. Destacamos também como essa saturação leva a fenômenos *emergentes* da percepção, que não podem ser explorados completamente a partir do uso exclusivo da análise simbólica da partitura. Essas estratégias estão intimamente relacionadas com os conceitos de *timbre em movimento* e *permeabilidade*, detalhados a seguir.

¹⁶Tradução nossa do original: Although the overall rhythmic structure is indeterminate at an intermediate level — the local result of adding individual periods of different lengths is arbitrary — it is, however, once more determinate at a higher level, namely the level at which the entire form unfolds (DROTT, 2004, p. 224).

¹⁷Tradução nossa do original: ... compositional strategies that Ligeti applied in order to create what initially seem to be static textures which, however, develop into more differentiated rhythmical (and melodic) units (KNOP, 2017).

¹⁸Tradução nossa do original: J'appelais cette façon de composer «micropolyphonie» car les différents éléments rythmiques descendaient au-dessous du seuil de fusion dans la trame polyphonique. Le tissu atteint une telle densité que les voix ne sont plus perceptibles dans leur individualité et que l'on ne peut l'appréhender que dans son ensemble, à un niveau de perception supérieur (LIGETI, 2010, p. 185).

As noções de *timbre em movimento* e *permeabilidade*

A fim de aprofundar nossa compreensão da poética de Ligeti e sua interação com as *massas sonoras*, delineamos sucintamente duas concepções essenciais: em primeiro lugar, a noção de *timbre em movimento*; em segundo lugar, a concepção de *permeabilidade*.

Para contextualizar parte dos trabalhos instrumentais de Ligeti, é importante destacar a sua interação com Gottfried Michael Koenig (1926-) no estúdio de música eletrônica de Colônia - Westdeutscher Rundfunk – WDR (LIGETI, 2017, p. 169). Em seu texto *Musique et Technique* (LIGETI, 2017, p. 169), o compositor relata que o que mais lhe chamou a atenção em sua experiência no estúdio foi a observação da consequência perceptiva do material sonoro. Ele estava particularmente interessado na possibilidade da fusão de sons a partir da mistura de um grande número de amostras sonoras (LIGETI, 2017, p. 169). Segundo Ligeti:

A experiência mais importante que realizei no estúdio de Colônia foi o desenvolvimento de texturas nítidas ou borradas. Podemos fazer aparecer e depois desaparecer super sinais e super melodias, passando abaixo e acima do limite de fusão. Sobrepondo um pequeno número de vozes em uma falsa polifonia, obtêm-se complexos tecidos sonoros cujo padrão de tecelagem está em perpétua transformação (LIGETI, 2017, p. 176) ¹⁹.

Ligeti aplicou esse conhecimento adquirido no estúdio de música eletrônica em seus trabalhos instrumentais. Ele relata que na estreia de *Atmospheres* (1961) o público pensava existirem sons eletrônicos sendo executados com a orquestra. Para ele, essa percepção estaria intimamente ligada ao que ele chama de *timbre em movimento*:

A aparência “eletrônica” do som geral é baseada no uso do “timbre em movimento”: é uma técnica que transpus para a orquestra após tê-la experimentado na música eletrônica. Ao cruzar o limiar da fusão, obtêm-se transformações do tecido musical e dos timbres que diferem sensivelmente daqueles que se obtêm pelas combinações instrumentais usuais (LIGETI, 2017, p. 185) ²⁰.

É importante destacar que para Ligeti, a ideia de timbre em movimento nasce com a música do século XX, mas encontra exemplos na orquestração da música do século XIX. Ele cita como exemplo *Feuerzauber* no final da ópera *Die Walküre* (1870) de Richard Wagner

¹⁹L’expérience la plus importante que j’ai faite au studio de Cologne, c’est la mise au point de textures nettes ou floues. On peut faire apparaître puis disparaître des super signaux et des «super mélodies» en passant en deçà et au-delà du seuil de fusion. En superposant un petit nombre de voix en une fausse polyphonie, on obtient des tissus sonores complexes dont le modèle de tissage se trouve en perpétuelle transformation (LIGETI, 2017, p. 176)

²⁰L’apparence «électronique» de la sonorité d’ensemble repose sur l’utilisation du «timbre de mouvement»: c’est une technique que j’ai transposée à l’orchestre après l’avoir expérimentée dans la musique électronique. En franchissant le seuil de fusion, on obtient des transformations du tissu musical et des timbres qui diffèrent sensiblement de ceux que l’on obtient par les combinaisons instrumentales habituelles (LIGETI, 2017, p. 185).

(1813–1883). Para ele, nesta composição a textura atinge tamanha complexidade em sua execução que acaba gerando a percepção de flutuações sonoras (LIGETI, 2017, p. 185).

Essa ideia de saturação e *timbre em movimento* também pode ser encontrada na música vocal de Ligeti, que privilegia a sonoridade dos fonemas no lugar do sentido das palavras, como, por exemplo, no uso da justaposição de uma diversidade de textos em *Nonsense Madrigals* (1988–93) (MARX, 2017).

Por fim, expomos a visão de Ligeti sobre o conceito de *permeabilidade*, que está relacionado com a nossa capacidade de perceber ou não um determinado intervalo musical:

A perda de sensibilidade aos intervalos é a fonte de uma condição que podemos chamar de permeabilidade. Isso significa que estruturas de naturezas diferentes podem se desdobrar simultaneamente, permear e até mesmo se fundir completamente, sendo alteradas apenas as relações de densidade horizontal e vertical (LIGETI, 2017, p. 123) ²¹

O sentido que Ligeti confere ao conceito de *permeabilidade* aponta para a percepção do intervalo associada ao seu contexto musical. Assim, ele diz que a técnica contrapontística da música de Giovanni Pierluigi da Palestrina (1525–1594) é o melhor exemplo de *impermeabilidade*. Isso porque a liberdade para troca de notas sem causar desequilíbrios na textura musical é muito pequena (LIGETI, 2017, p. 124). Em contrapartida, cita como a densidade do número de vozes nos *Concertos de Brandenburgo* de Johann Sebastian Bach (1685–1750) tornam a textura musical mais *permeável* (LIGETI, 2017, p. 124). Seguindo este raciocínio, a música de *massas sonoras* exibe assim um nível alto de *permeabilidade*.

Localizamos, a partir da definição do conceito de *massa sonoras* e de sua contextualização histórica, as técnicas e concepções musicais de György Ligeti, que permitem entender algumas de suas obras dentro deste recorte musicológico. Dada a relação com questões sobre a percepção sonora que esses conceitos e técnicas composicionais possuem, apresentamos a seguir a possibilidade da associação destes conceitos com *descritores de áudio*.

²¹Tradução nossa do original: La perte de sensibilité aux intervalles est à la source d'un état qu'on pourrait nommer perméabilité. Cela signifie que des structures de nature différente peuvent avoir un déroulement simultané, s'imprégner et même se fondre totalement, seuls les rapports de densité horizontale et verticale étant modifiés (LIGETI, 2017, p. 123).

1.3.3 Uma abordagem interdisciplinar para a noção de *massas sonoras*

Ao examinarmos os conceitos musicológicos relacionados à noção de *massas sonoras*, destacam-se características essenciais. Essa concepção está enraizada em discursos sobre percepção, frequentemente correlacionados com outros sentidos, como nas analogias com o sentido da visão. Em um contexto mais específico, esses conceitos emergem de discussões sobre a construção do material sonoro na composição e sua subsequente recepção auditiva, como as reflexões sobre o serialismo. Outro elemento crucial é o papel da metáfora e da construção de conceitos composicionais para interagir com essas características perceptivas. Além disso, todo esse contexto é moldado pelo diálogo dos compositores com um ambiente de desenvolvimento e descobertas tecnológicas no campo da gravação, edição e síntese sonora. Essa efervescência criativa, combinada com estudos de percepção musical e ferramentas tecnológicas, criou o cenário ideal para o desenvolvimento do que seria conhecido como música de *massas sonoras*.

Portanto, nesta tese, buscamos de alguma forma resgatar traços desse ambiente da época. Assim, nossa metodologia reflete o espírito da época que envolve esse contexto musicológico. No âmbito da composição, nos baseamos nos escritos de compositores e seus conceitos composicionais, como os de Gyorgy Ligeti, Iannis Xenakis e Karlheinz Stockhausen. No campo da percepção, nosso trabalho dialoga com a psicoacústica (ZWICKER; FASTL, 2007), análise de cena auditiva (BREGMAN, 1994) e estudos do timbre (MCADAMS, 2019). Por fim, no que diz respeito à tecnologia, esta tese investiga as manifestações sonoras por meio da análise de gravações (sejam de música instrumental ou eletroacústica), permitindo uma abordagem sobre como o som é produzido e recebido. Essa abordagem está ancorada na área em desenvolvimento da análise musical mediante ferramentas conhecidas como *descritores de áudio*. Dessa forma, na seção seguinte, apresentaremos uma revisão dessas ferramentas, das escolhas feitas para sua utilização nesta tese, bem como suas definições e formalizações matemáticas.

1.3.4 Descritores de áudio

O desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise de áudio serve como suporte para pesquisas musicológicas nos contextos de análise, criação e performance musical (BULLOCK, 2007; MALT; JOURDAN, 2009; MONTEIRO, 2012; PEETERS et

al., 2011). Essas ferramentas são comumente referenciadas na literatura como descritores de áudio (MONTEIRO, 2012; PEETERS et al., 2011). Descritores de áudio são implementações de algoritmos para análise de áudio digital que utilizam conhecimentos da área de processamentos de sinais digitais e de *music information retrieval* (MIR) associadas a áreas do conhecimento como acústica, psicoacústica, ciências cognitivas, musicologia e ciência de dados (MONTEIRO, 2012; PEETERS et al., 2011). Desse modo, é possível a elaboração de metodologias de pesquisa no contexto musical a partir de análises de dados e representações gráficas derivadas da energia do espectro sonoro e alinhadas com conceitos musicológicos e/ ou processos criativos (MALT; JOURDAN, 2009).

Malt e Jourdan (MALT; JOURDAN, 2009) desenvolveram um descritor para a análise musical com o objetivo de focalizar propriedades do brilho e do timbre musical e seu desenvolvimento durante uma composição. Monteiro (MONTEIRO, 2012) desenvolveu um extenso estudo sobre descritores de áudio, culminando na implementação da biblioteca *PDescriptors* (MONTEIRO, 2012), além de uma proposta de um algoritmo de segmentação automática utilizando um modelo do córtex auditivo (MONTEIRO, 2016). Simurra (SIMURRA, 2016) propôs o uso de descritores de áudio como ferramenta para orquestração assistida por computador, tendo como fim o seu uso em processos criativos (SIMURRA, 2016). Adicionalmente, Rossetti e Manzolli focalizaram nas propriedades emergentes do timbre no contexto da música eletroacústica e mista em suas análises com descritores de áudio (ROSSETTI; MANZOLLI, 2019; ROSSETTI; TEIXEIRA; MANZOLLI, 2018).

Os descritores de áudio possibilitam a análise do áudio em vários níveis (CELMA; HERRERA; SERRA, 2006). Bullock (BULLOCK, 2008, p. 44) elenca esses níveis do mais baixo para o mais alto, sendo eles: físico, sensorial, perceptivo, formal e expressivo. Podemos extrair informação no nível físico, por exemplo, com medidas de energia RMS ou *centroide espectral*. Também é possível extrair informação de áudio em um nível sensorial, utilizando medidas psicoacústicas, como de *loudness* ou de bandas críticas. E exemplos de algoritmos que atuam no nível expressivo são os descritores semânticos, que associam medidas de áudio com conhecimentos de forma e estruturação musical (BULLOCK, 2008; CELMA; HERRERA; SERRA, 2006). Neste cenário, nosso foco recai especialmente sobre os descritores de áudio que encapsulam fenômenos sensoriais através de modelos psicoacústicos, aqui denominados como descritores psicoacústicos (ANTUNES; ROSSETTI; MANZOLLI, 2021a). Além disso,

consideramos descritores relacionados ao comportamento do sinal, os quais contribuem para representar fenômenos associados às *massas sonoras*.

Descritores psicoacústicos estão disponíveis em diferentes bibliotecas de áudio. Monteiro (MONTEIRO, 2012) implementou um modelo de bandas críticas na biblioteca PDescriptors. Bullock (BULLOCK, 2008) também implementou diversos modelos psicoacústicos em sua biblioteca *Libxtract*, que pode ser utilizada no programa *Sonic Visualizer*. Implementações desses modelos também podem ser encontrados na biblioteca *Essentia*, desenvolvida pelo centro de pesquisa MTG da Universidade Pompeu Fabra (BOGDANOV et al., 2013).

Os modelos psicoacústicos oferecem medidas que permitem representar os estímulos sonoros, considerando as características do sistema auditivo (ZWICKER; FASTL, 2007). A constituição desses modelos se dá via metodologias experimentais, buscando consistências na percepção de atributos do som em respostas de voluntários submetidos a testes sensoriais (ZWICKER; FASTL, 2007). A partir da análise dos resultados de experimentos psicoacústicos com o uso de modelos estatísticos, são derivados os modelos matemáticos empregados em suas formalizações ²².

A associação entre modelos psicoacústicos e estudos musicológicos tem sido comumente explorada na literatura. Parncutt (PARNCUTT, 2012) analisou peças de música tonal utilizando modelos de percepção de altura, fusão tonal e harmonicidade. Sethares (SETHARES, 2005) investigou sistemas de afinação baseado no conceito de dissonância sensorial, e aplicou esse conhecimento na análise da música clássica Tailandesa. Sethares (SETHARES, 2005) também criou uma ferramenta computacional com o objetivo de gerar curvas de dissonância a partir de um determinado espectro sonoro utilizando modelos psicoacústicos. Vassilakis (VASSILAKIS, 2001) implementou um modelo visando calcular a *rugosidade* a partir da análise do áudio e fundamentou suas pesquisas etnomusicológicas a partir de questões psicoacústicas.

Dada a complexidade dos fenômenos perceptivos e a abrangência dos modelos que os abordam, escolhemos um recorte específico neste trabalho a partir do campo da psicoacústica. A nossa hipótese principal é que mecanismos relacionados com a percepção das *massas sonoras* podem ser observados primariamente a partir de modelos psicoacústicos ligados ao comportamento da membrana basilar (VON BÉKÉSY; WEVER, 1960). Portanto,

²²Para uma compreensão completa das metodologias dos experimentos psicoacústicos e uma análise aprofundada de seus principais modelos, recomenda-se consultar (ZWICKER; FASTL, 2007)

propomos construir uma metodologia de análise musical a partir de modelos psicoacústicos relacionados com o modelo de bandas críticas de Zwicker (ZWICKER; FASTL, 2007). Também associamos a essas medidas psicoacústicas descritores de áudio que têm sido consistentemente reconhecidos na literatura por alguma interpretação perceptual específica. Esses modelos serão descritos a seguir ²³.

Coeficientes Bark

Diversos modelos foram desenvolvidos visando simular o comportamento do ouvido interno por meio de conjuntos de filtros auditivos (LYON; KATSIAMIS; DRAKAKIS, 2010). Em nosso estudo, empregamos o modelo de *bandas críticas* de Zwicker (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957), implementado no descritor de *coeficientes bark* (BULLOCK, 2008). Com base nos conceitos discutidos na seção sobre textura e massa sonora, adotamos os *coeficientes bark* como uma abordagem para representar o comportamento das massas sonoras, considerando a quantidade de energia nas bandas críticas.

O descritor de *coeficientes bark* possibilita a observação da quantidade de energia em cada banda crítica e na implementação de Bullock (BULLOCK, 2008) tem um total de 26 subdivisões. A unidade de medida *bark* representa a unidade do modelo de *bandas críticas*. Esse modelo é fundamentado nas propriedades da membrana basilar e em dados experimentais formalizados por Zwicker (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957).

O modelo de *bandas críticas* de Zwicker prevê uma modelagem até frequências de 15.5 kHz, totalizando 25 *barks*. Tomando como referência o teorema de *Nyquist*, isso significa que o modelo permite a análise de áudio com a taxa de amostragem máxima de 31 kHz (SMITH; ABEL, 1999). A partir desta constatação, apresentamos uma função utilizada por Bullock (BULLOCK, 2008, p. 76) em seu descritor *coeficientes bark*, que permite uma conversão aproximada da escala *bark* em Hz visando extrapolar o modelo até 27 kHz, permitindo a representação do áudio até uma taxa de amostragem de 54 kHz (BULLOCK, 2008, p. 76). Essa aproximação é dada pela Equação 1.1:

$$B = 13 \tan^{-1} \left(7,6 \times 10^{-4} f \right) + 3,5 \tan^{-1} \left(\frac{f}{7500} \right)^2 \quad (1.1)$$

onde f é a frequência em hertz.

²³Existem variações de notação ao comparar as definições nesta seção com aquelas nos artigos da Seção 2. Isso se deve à nossa escolha de padronizar os termos da equação aqui, para oferecer uma apresentação mais uniforme e compreensível.

Loudness

O *loudness* é uma medida psicoacústica da intensidade sonora, geralmente associada à percepção de *dinâmica* (ANTUNES; ROSSETTI; MANZOLLI, 2021b) na análise musical. Nesta pesquisa, utilizamos 2 modelos diferentes para medida de *loudness*. O primeiro é o proposto por (THIEDE; KRAUSE, 1999). A ponderação da energia das componentes espectrais, fundamentada em características psicoacústicas, é expressa pela Equação 1.3:

$$W(k) = -0,6 \cdot 3,64 \cdot \delta f(k)^{-0,8} - 6,5 \cdot e^{-0,6 \cdot (\delta f(k) - 3,3)^2} + 10^{-3} \cdot \delta f(k)^{3,6} \quad (1.2)$$

onde $\delta f(k)$ representa a diferença entre frequências $f(k) - f(k-1)$, sendo k o *bin* de frequência da análise da *STFT*.

A partir da Equação 1.2, o calculo do *loudness* L para uma janela de análise i da *STFT* é dada pela Equação 1.3:

$$L(i) = \sum_{k=1}^K |a(k)|^2 \cdot 10^{W(k)/20} \quad (1.3)$$

onde $a(k)$ representa a magnitude do componente espectral do *bin* k .

Um segundo modelo de *loudness* utilizado é baseado no modelo de *bandas críticas* de Zwicker. Neste caso, o *loudness* total de uma janela de análise é dado pela soma das energias das bandas críticas (BULLOCK, 2008).

O *loudness* N para cada janela i pode ser calculado a partir da Equação 1.4:

$$N(i) = \sum_{b=1}^B E(b)^{0,23} \quad (1.4)$$

onde $E(b)$ é a energia na b -ésima banda *Bark* para a janela de análise considerada.

Sharpness

O modelo de *Sharpness* está ligado à percepção de densidade sonora, como definido por Fastl e Zwicker (ZWICKER; FASTL, 2007, p. 239). Este se evidencia como uma dimensão perceptual independente das demais, demonstrado através da consistência em estudos experimentais com uma extensa amostra de participantes. O modelo é fundamentado na teoria das *bandas críticas* já mencionada.

No modelo de *sharpness*, quanto maior a banda de ruído e a taxa Bark (B), maior também o *sharpness*. A unidade do modelo de *sharpness* é *acum*. Conforme Fastl e Zwicker (ZWICKER; FASTL, 2007, p. 242), 1 *acum* representa um som de referência, que é um ruído de banda estreita do tamanho de uma banda crítica ($B = 8.5$), com frequência central em 1 kHz e intensidade de 60 dB.

A dependência do *sharpness* do modelo de bandas críticas é expressa pelo fator $g(B)$, e seu cálculo pode ser realizado conforme a Equação 1.6.

Para calcular o *sharpness*, a Equação 1.5 leva em consideração o cálculo de *loudness* por Bark $N'(B)$ e o *loudness* total N , representando a soma do *loudness* de todas as bandas críticas. A equação é multiplicada por uma constante 0,11 para manter a normalização em 1 *acum* para o som de referência mencionado anteriormente.

Sendo assim, temos a Equação 1.5:

$$S = 0,11 \cdot \frac{\sum_{B=1}^{nband} B \cdot g(B) \cdot N'(B)}{N} \quad (1.5)$$

onde $N'(B)$ representa o cálculo de *loudness* específico para cada banda crítica, N é a soma do *loudness* de todas as bandas críticas, e $g(B)$ é definido pela Equação 1.6:

$$g(B) = \begin{cases} 1 & \text{se } B < 15, \\ 0,066 \cdot e^{0,171B} & \text{se } B \geq 15. \end{cases} \quad (1.6)$$

Rugosidade

Segundo Vassilakis (VASSILAKIS, 2001), a *rugosidade* é uma característica perceptual associada à sensação de variações de amplitude muito rápidas no som, sendo influenciada tanto pelo estímulo sonoro quanto pelas propriedades da membrana basilar. O valor de *rugosidade* de um quadro de tempo é baseado em uma aproximação, proposta em (SETHARES, 2005), da curva experimental de dissonância de Plomp & Levelt²⁴ (PLOMP; LEVELT, 1965).

Para sons complexos, o valor de *rugosidade* pode ser calculado usando uma formulação de Vassilakis, que incorpora os mecanismos físicos e psicoacústicos envolvidos em sua percepção, como na Equação 1.7:

²⁴Para uma revisão completa sobre as curvas de *rugosidade*, consulte (VASSILAKIS, 2001).

$$R = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i}^K \frac{(a_i * a_j)^{0,1}}{2} \left(\frac{2a_j}{a_i + a_j} \right)^{3,11} \left(e^{\frac{0,84|f_j - f_i|}{0,0207f_i + 18,96}} - e^{\frac{1,38|f_j - f_i|}{0,0207f_i + 18,96}} \right) \quad (1.7)$$

onde f_i é a i -ésima parcial do som e a_i sua amplitude correspondente.

Centroide espectral

O *centroide espectral* é definido como o baricentro da energia espectral em referência a uma janela de análise da *STFT*. Em estudos de timbre e na musicologia, o centroide é normalmente associado à sensação de brilho (MCADAMS, 2019). A formalização do *centroide espectral* é dada pela Equação 1.8:

$$C(i) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} f(k) \cdot a(k)}{\sum_{k=0}^{K-1} a(k)} \quad (1.8)$$

onde K é o número total de *bins* de frequência de uma janela de análise, $f(k)$ é a frequência do k -ésimo *bin* e $a(k)$ é a magnitude do componente espectral no *bin* de frequência k .

Espalhamento espectral (Spectral Spread)

De acordo com Peeters (PEETERS et al., 2011), o *espalhamento espectral* descreve a dispersão do espectro sonoro em torno de seu valor médio, ou seja, a variância da distribuição definida. Portanto, é uma medida da dispersão média do espectro em relação ao seu *centroide*. Um valor maior de *espalhamento espectral* indica uma dispersão mais ampla das frequências, enquanto um valor menor sugere uma concentração mais próxima ao centroide. O *espalhamento espectral* é definido da seguinte forma:

$$S(i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{K-1} (f(k) - C(i))^2 \cdot a(k)}{\sum_{k=0}^{K-1} a(k)}} \quad (1.9)$$

onde K é o número de *bins* de frequência ou amostras espectrais, $f(k)$ é a frequência do k -ésimo *bin*, $a(k)$ é a magnitude do componente espectral no *bin* de frequência k , $C(i)$ é o *centroide espectral* para a janela de análise i .

Fluxo espectral

O descritor de *fluxo espectral* é definido como a distância euclidiana (norma L_2) entre as magnitudes das componentes espectrais de duas janelas de análises consecutivas. Esta medida calcula as mudanças na distribuição de energia espectral ao longo do tempo,

sendo particularmente útil na identificação de transições e alterações significativas no conteúdo espectral de um sinal de áudio. A fórmula para o *fluxo espectral* para uma janela i é dada por:

$$F(i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |a(k_i) - a(k_{i-1})|^2 \quad (1.10)$$

onde i é o índice de tempo representado pela janela de análise, K é o número de *bins* de frequência ou amostras espectrais, $a(k_i)$ representa a magnitude do componente espectral no *bin* k no quadro atual i , $a(k_{i-1})$ representa a magnitude do componente espectral no *bin* k no quadro anterior $i - 1$.

Irregularidade Espectral

O modelo de *irregularidade espectral* usado neste trabalho foi proposto por Krimphoff et al. (KRIMPHOFF; MCADAMS; WINSBERG, 1994) e pode ser interpretado como uma medida do conteúdo de ruído do espectro (BULLOCK, 2008, p. 60). Ele é calculado para cada janela i de análise como:

$$I(i) = \sum_{k=2}^{K-1} \left| a_k - \frac{a_{k-1} + a_k + a_{k+1}}{3} \right| \quad (1.11)$$

onde a_k é a magnitude do componente do k -ésimo *bin* e K é o número total de *bins* do espectro.

Um valor baixo de *irregularidade* denota um espectro cuja energia está concentrada em poucos *bins* de frequência, associada a uma composição mais tonal do som. Por outro lado, um valor alto de *irregularidade* implica em uma distribuição de energia mais regular em todas as frequências, associada a um conteúdo mais ruidoso (BULLOCK, 2008).

Entropia

Entropia espectral é uma medida utilizada para estimar a informação e a complexidade do sinal de áudio (FIGUEIREDO, 2020). Valores mais altos de *entropia* estão geralmente associados a uma maior atividade espectral em todas as frequências, enquanto valores mais baixos estão relacionados à concentração de energia espectral em poucos componentes.

O descritor de *entropia espectral* é derivado da equação da teoria da informação de Shannon por meio de uma analogia entre densidades de energia do sinal e densidades de probabilidade (WILLIAMS; BROWN, M. L.; HERO III, 1991), sendo definido como:

$$E(i) = - \sum_{k=1}^K P(E_k) \ln(P(E_k)) \quad (1.12)$$

onde $P(E_k)$ representa a probabilidade relativa da energia presente no com ponente do *bin* k e $P(E_k)$ é definido por

$$P(E_k) = \frac{a(k)}{A(i)} \quad (1.13)$$

sendo que $a(k)$ é a magnitude do *bin* e $A(i)$ é a energia total do sinal de uma janela i .

1.4 A organização desta tese

O texto desta tese demandou o uso de diferentes estilos de escrita, apresentação e estruturação das subseções dos capítulos. Isso porque a análise musical e a composição são trabalhos de naturezas distintas. No contexto da análise musical, houve sempre uma preocupação na construção de um campo epistêmico que sustentasse e criasse uma unidade às diversas análises. Buscou-se uma coerência entre as noções de textura musical, *massas sonoras* e os fenômenos psicoacústicos que sustentam as nossas análises. Desse modo, a seleção dos descritores de áudio e suas respectivas representações gráficas foram realizadas tendo como pano de fundo os conceitos musicológicos desenvolvidos nesta tese. Ao mesmo tempo, juntamente com a construção desse campo, refletiu-se sobre o papel das diversas representações de áudio no contexto do fluxo de trabalho do analista musical.

De outro modo, no contexto da composição musical, a busca por um campo epistêmico unificado e por um fluxo de trabalho sistematizado não se impôs como necessária. Isso se deve ao fato de que a composição tem demandas de outra natureza, que dialogam com elementos musicais que escapam ao escopo desta tese. Por exemplo, minha relação com a música brasileira e com a improvisação, além de minhas aspirações poéticas que não estão contidas no escopo da música de massas sonoras, como será descrito na Seção 3.

Isso implica que esta tese apresenta uma mudança de estilo de escrita e de estruturação do texto entre o capítulo de análise musical e o capítulo de composição. No capítulo de análise musical, a estrutura de apresentação dos artigos, bem como os artigos em si, obedecem a um certo rigor de apresentação que reflete a busca por um campo epistêmico e um fluxo de trabalho coerente com as questões que esta tese visa responder. Por outro lado, no

capítulo de composição, a apresentação dos diversos elementos das criações segue uma estrutura mais livre, respeitando a lógica própria à história de cada uma das composições e ao contexto em que elas nasceram.

Esta tese é dividida em 2 grandes capítulos. Um dedicado à análise musical e outro dedicado à composição musical. O objetivo do capítulo 2 é apresentar os artigos de análise musical que compõem nossa pesquisa, delineando a elaboração de uma abordagem para música de *massas sonoras*. Esses artigos podem ser divididos em duas categorias: 1) artigos de conferências (Seções 2.2, 2.4, 2.5, 2.6), que abordam tarefas menores da pesquisa, como estudos exploratórios e implementação de descritores; e 2) artigos mais extensos que consolidam metodologias de análise. Especificamente, o artigo apresentado na Seção 2.3, publicado na revista *Música Hodie* (ANTUNES; BOTECHIA et al., 2021), consolida estratégias para a análise de música eletroacústica. Além disso, o capítulo de livro descrito na Seção 2.7, publicado no *Music in AI era — Lecture Notes on Computer Science* (ANTUNES; ESPIRITO SANTO et al., 2023), contribui para a consolidação de estratégias de análise para a música instrumental. Por fim, a Seção 2.8 de discussão destaca os principais pontos da trajetória desses artigos, incluindo a contribuição desta pesquisa para a análise da música eletroacústica e instrumental (2.8.1), o caráter *work-in-progress* presente na metodologia (2.8.2) e a contribuição para a descrição de fenômenos de *rugosidade* a partir da análise de áudio.

O propósito do capítulo 3 é explorar as aplicações artísticas do conceito de *massas sonoras*. Para isso, serão analisadas duas composições realizadas no contexto desta tese: *Rarefações* (2020) (Seção 3.2), para caixa e eletrônica em tempo real, e *Gestos: Uma homenagem a Jaques Morelenbaum* (2022) (Seção 3.3), para violoncelo e eletrônica em tempo real. Através de relatos composicionais, investigamos as possibilidades expressivas e estéticas oferecidas pelo uso das *massas sonoras*, bem como discutir o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a criação musical neste contexto. Buscaremos evidenciar como os conceitos de compositores previamente abordados nesta tese contribuíram significativamente para a constituição de um processo composicional. Ligeti servirá como fonte de inspiração enquanto exploramos suas técnicas de composição de *massas sonoras* e como seus conceitos influenciaram diretamente minha abordagem à textura em minhas composições. Por fim, os relatos composicionais serão discutidos em relação à sua Concepção poética (seção 3.4.1), elementos da partitura (Seção 3.4.2), e sob a perspectiva do Design de interações (Seção 3.4.3). Finalmente, no capítulo 4, faremos uma recapitulação do conteúdo da tese, discutindo suas

contribuições para os campos da Composição Musical, Análise Musical e da Musicologia Empírica.

“Agora retiram de mim a cobertura de carne
Escorrem todo o sangue
Afinam os ossos em fios luminosos [...]
E todas as figuras são assim
Desenhos de luz, agrupamentos de pontos
De partículas, um quadro de impulsos
Um processamento de sinais [...]
E assim dizem, recontam a vida”

(Pour Elis - Tom Zé)

Capítulo 2

Análise Musical

2.1 Introdução

Este Capítulo visa apresentar os artigos de análise musical que compõem nossa pesquisa, os quais delineiam a evolução de uma abordagem para música de *massas sonoras*. São artigos de duas naturezas: 1 – artigos de conferências (Seções 2.2, 2.4, 2.5, 2.6), que registram tarefas menores desta pesquisa, como estudos exploratórios e implementação de descritores; 2 – artigos mais extensos que consolidam metodologias de análise. Em particular, o artigo exposto na Seção 2.3, publicado na revista *Música Hodie* (ANTUNES; BOTECHIA et al., 2021), consolida estratégias para a análise de música eletroacústica. Além disso, o capítulo de livro exposto na Seção 2.7, publicado no *Music in AI era — Lecture Notes on Computer Science* (ANTUNES; ESPIRITO SANTO et al., 2023), contribui para a consolidação de estratégias de análise para a música instrumental.

A Seção 2.8 de discussão foca em pontos principais da trajetória desses artigos, destacando a contribuição desta pesquisa para a análise da música eletroacústica e instrumental (2.8.1), o carácter *work-in-progress* presente na metodologia desta pesquisa (2.8.2), e a contribuição desta pesquisa para a descrição de fenômenos microtemporais a partir da análise de áudio.

2.2 A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. *A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors. Proceedings of the 17^o Brazilian Symposium on Computer Music Federal. Em: 17^o BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER MUSIC. São João del Rey: 2019.*

Este artigo teve como objetivo realizar uma análise musical ancorada em descritores de áudio para descrever a evolução textural de duas composições eletroacústicas, centrada nos conceitos de *massa sonora*, *textura musical* e *volume*. A contribuição central deste artigo reside na aplicação de modelos psicoacústicos, como o modelo de *banda críticas* e a *loudness*, juntamente com o descritor de Volume (inspirado no descritor BSTD (MALT; JOURDAN, 2009)), para representar características espectrais de obras acusmáticas. Foram objetos de análise deste artigo as obras *Schall* (1995) de Horacio Vaggione e a obra *Asperezas* (2018) de Micael Antunes.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

A principal contribuição deste artigo para o percurso desta pesquisa é: 1 - fazer uma primeira revisão do estado da arte dos descritores de áudio, visando a incorporação do seu uso como ferramenta analítica nesta pesquisa; 2 - a criação de um diálogo com metodologias de análise que vinha sendo já desenvolvida por outros autores (MALT; JOURDAN, 2009; COUPRIE, 2020) e em especial, pesquisadores do Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (MAIA; SCHAUB, 2012; ROSSETTI; TEIXEIRA; MANZOLLI, 2018; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019). Além disso, esse estudo serviu como referência para levantar as bases teóricas de um problema que já tem sido enfrentado pela análise assistida por computador ao lidar com composições que não possuem a partitura como fonte adicional de informação musicológica (COUPRIE, 2020). Sendo assim, esse artigo marca um primeiro passo exploratório ao apresentar uma abordagem que utiliza descritores de áudio conectados com as noções de *textura musical* e *massas sonoras*.

Questões de Pesquisa

A elaboração deste artigo foi guiada pelas seguintes questões:

- Como os descritores de áudio podem contribuir para uma metodologia de análise da *textura musical* em composições acusmáticas?
- Podem essas representações de áudio conectar a noção de *massas sonoras* com diferentes parâmetros acústicos e psicoacústicos do som?
- Seriam essas ferramentas suficientes para a realização da segmentação de uma obra eletroacústica?

Essas questões estão enraizadas em um desafio amplo discutido nos estudos de análise musical assistida por computador, tema central desta pesquisa de doutorado: quais são as características do áudio pertinentes para a análise musical? O cerne desse problema já foi objeto de análise por diversos autores em trabalhos anteriores (MALT; JOURDAN, 2009; ROSSETTI; TEIXEIRA; MANZOLLI, 2018; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019). Dentro desse contexto, nossa proposta foi avançar nas questões previamente exploradas, concentrando-nos em modelos psicoacústicos e na noção de *massas sonoras*, aspectos fundamentais delineados no escopo epistêmico de nossa pesquisa de doutorado. Uma das limitações desse artigo foi a ausência de representações gráficas mais nítidas, que ocorreram em parte pela limitação de configuração dos softwares utilizados nas análises e em parte pela limitação de cores da direção editorial do evento em questão. Esse tipo de limitação foi enfrentada e solucionada posteriormente com o uso de softwares alternativos para a criação de representações gráficas, como com a biblioteca *Matplotlib* implementada em *Python*.

Metodologia

O background teórico que guiou a nossa análise foi a definição de *textura sonora*, tal como proposto por Berry (BERRY, 1987) e a noção de *massas sonoras* a partir da visão de compositores como Stockhausen, Ligeti e Xenakis (STOCKHAUSEN, 2009; LIGETI; BERNARD, J. W., 1993; XENAKIS, 1994), tal como já demonstrado na Seção 1.3.1. Essas referências também serviram para abordar o conceito de *massas sonoras* no contexto da síntese granular (NOBLE, 2018). Todo esse referencial é abordado a partir do ponto de vista da psicoacústica e da análise de áudio. O *corpus* analisado consistiu em versões estéreo das peças *Asperezas* (2018) e *Schall* (1995). O interesse subjacente a uma análise comparativa entre essas duas composições reside na distinção das técnicas utilizadas em sua criação: enquanto as texturas sonoras de *Schall* utilizam *síntese granular* através da técnica de micromontagem, *Asperezas* fundamenta-se na formação de *massas sonoras* por meio do acúmulo de fenômenos

de *rugosidade* via *síntese por modulação em frequência (FM)*. Sendo assim, atentou-se para o desenvolvimento de representações do áudio que transcendam as características específicas das obras em questão.

Para a análise e geração das representações gráficas dos descritores foram utilizados a biblioteca Libxtract (BULLOCK, 2007) do Sonic Visualizer e a biblioteca MuBu do software Max. Para a análise, utilizamos os descritores de *volume* e *bark coefficients*. O *volume* é uma representação gráfica tridimensional composta pelos valores do *centroide espectral* (Eq. 1.8), *espalhamento espectral* (Eq. 1.9) e *loudness* (Eq. 1.3), baseado no descritor *BTSD* (MALT; JOURDAN, 2009). O *coeficientes bark* 1.1, por sua vez, é uma implementação do modelo de bandas críticas de Zwicker (BULLOCK, 2008; ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957), permitindo uma análise das energias sonoras em diferentes faixas de frequência baseadas em um modelo da orelha interna.

A aplicação dessas ferramentas proporciona uma compreensão das características texturais das composições estudadas a partir da realização de 3 tarefas de análise: 1 - análise da segmentação; 2 - análise da fusão; e 3 - análise do nível de atividade textural. Para a validação foram utilizados os seguintes critérios: a — análise comparativa e unificada dos diversos dados de áudio extraídos; b — diálogo colaborativo entre os autores, para contextualizar a interpretação dos dados *vis-a-vis* os conceitos musicológicos abordados.

Resultados e implicações

Este artigo apresenta resultados que esclarecem particularidades das obras examinadas. No que diz respeito à segmentação, a interpretação conjunta das representações de áudio, alinhada a um nível de análise ancorado na audição da obra, revelou-se eficaz. Dessa forma, a observação de pontos críticos nas representações dos descritores de áudio possibilitou a segmentação das obras, mesmo considerando suas distintas características texturais. Quanto à fusão, a análise evidenciou diferenças fundamentais entre as duas composições: a técnica de síntese granular em *Schall* não propicia a estabilização dos fenômenos de fusão, ao passo que *Asperezas* apresenta um padrão de aumento e diminuição da fusão correlacionado ao comportamento da síntese FM. No tocante à atividade textural, *Schall* exibe um elevado nível de atividade, enquanto *Asperezas* revela um desenvolvimento mais gradual e contínuo ao longo da peça.

No tocante à fusão, a análise representa um primeiro passo na compreensão de como os descritores de áudio podem representar esse fenômeno, uma ideia que será explorada

ao longo desta tese, permeada por diferentes conceitos musicológicos e representações musicais. Vale ressaltar a relevância atribuída à identificação de padrões e tendências neste artigo, uma abordagem que já havia sido relevante em trabalhos anteriores (ROSSETTI; MANZOLLI, 2019) e que continua a ser uma questão explorada nesta pesquisa de doutorado. A perspectiva de abordar o áudio por meio de descritores abre caminho para conceber representações da *textura musical* em contextos diversos, como aqueles relacionados à *síntese granular* e à *modulação em frequência (FM)*. Essa abordagem será aprofundada nos artigos apresentados posteriormente nesta tese.

Em suma, este artigo consolida algumas estratégias de análise no escopo desta pesquisa. Primeiramente, contribui substancialmente ao estabelecer representações para a *textura musical*, abrindo a possibilidade de análise de texturas de diferentes naturezas. Além disso, evidencia a importância da observação de padrões e tendências, aprofundando a compreensão da forma musical. Em terceiro lugar, enfoca a representação da noção de fusão por meio de descritores de áudio, apresentando um panorama inicial sobre como essas representações baseadas no modelo de bandas críticas podem traduzir esse fenômeno perceptivo.

A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors

Micael Antunes^{1 2}, Danilo Rossetti^{1 2}, Jônatas Manzolli^{1 2}

¹ Arts Institute – Campinas University
Rua Elis Regina, 50 – Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Barão Geraldo, Campinas - SP

² Interdisciplinary Nucleus for Sound Communication- Campinas University
Rua da Reitoria, 165 – Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Barão Geraldo, Campinas, SP

micael.silva@nics.unicamp.br, danilo.rossetti@nics.unicamp.br, jonatas@nics.unicamp.br

Abstract

This paper discusses a computer-aided musical analysis methodology anchored on psychoacoustics audio descriptors. The musicological aim is to analyze compositions centered on timbre manipulations that explore sound masses and granular synthesis as their builders. Our approach utilizes two psychoacoustics models: 1) Critical Bandwidths and 2) Loudness, and two spectral features extractors: 1) Centroid and 2) Spectral Spread. A review of the literature, contextualizing the state-of-art of audio descriptors, is followed by a definition of the musicological context guiding our analysis and discussions. Further, we present results on a comparative analysis of two acousmatic pieces: *Schall* (1995) of Horacio Vaggione and *Asperesas* (2018) of Micael Antunes. As electroacoustic works, there are no scores, therefore, segmentation and the subsequent musical analysis is an important issue to be solved. Consequently, the article ends discussing the methodological implication of the computational musicology addressed here.

1. Introduction

Research in the late 20th century intensified the development of computer aid analysis using computer-integrated digital signal processes. There are studies in machine listening [1], auditory scene analysis [2], and music information retrieval [3]. In line with such trajectory, we discuss here an application of so-called Audio Descriptors (AD) to a musical analysis of textural works. Audio Descriptors (AD) comprises a series of algorithms, that uses statistical and mathematical models to analyze audio data using acoustics, psychoacoustics and/or musical parameters. It allows, for example, to perform a classification of pieces and musical styles [4] and musical information retrieval and classification such as in Peeters [4], Pereira [5], and Peeters et al. [6]. Additionally, Malt & Jourdan [7] and [8] have developed tools for the analysis of contemporary music. Rossetti & Manzolli [9] studied emergent sounds in the context of electroacoustic and live electronic music. Other approaches have been developed in the Interdisciplinary Nucleus for Sound Studies (NICS-UNICAMP). Monteiro [10] developed a methodology to automatic segmentation

of electroacoustic music and Simurra & Manzolli [11] and [12] applied audio descriptors in the context of computer-assisted orchestration. In line with these previous studies, our main question here is: How can psychoacoustic descriptors contribute to an analytical methodology in the context of acousmatic compositions focused on textures?

To solve this question, we introduce and apply two audio descriptors: Volume [13] e Bark Coefficients [14]. These tools provide multidimensional graphical representations centered on two aspects: a) Psychoacoustics models like Loudness, and Critical Bandwidths and b) Spectral measures like Spectral Centroid, Spectral Spread and Loudness.

Based on these descriptors, we discuss the proposed methodology of analysis and compare two acousmatic works: *Schall* (1995) of Horacio Vaggione and *Asperesas* (2018) of Micael Antunes. Previous discussions addressing the analysis of those works are found in [15], [16], [17], and [18], here we mainly discuss the methodology and the computational tools employed in the process.

2. Review of literature

2.1 Musical Analysis and Psychoacoustics

Musical analysis based on psychoacoustic models had been particularly studied in recent years. Parncutt [19] analyzed tonal music using psychoacoustic features, based on pitch perception, fusion, and harmonicity models. Sethares [20] investigated tuning systems based on sensorial dissonance models applied in the analysis of Thai Classical Music. Sethares also developed a computer tool to generate dissonance curves aiming to calculate dissonance of sound spectra. Vassilakis [21] implemented an algorithm to calculate the roughness of audio files.

Psychoacoustic measures are useful tools regarding the study of pitch, timbre and harmony perception. In this context, Monteiro [10] implemented the Critical Bandwidth model in an external library called

*PDescriptors*¹ for Pure Data. Bullock [14] implemented Zwicker's model [22] in a Sonic Visualiser software plugin to generate plots on the levels of Critical Bandwidth energy of audio files (see analytical plots in topic 4).

Other psychoacoustics models are also implemented in libraries of Sonic Visualiser, Pure Data and Max/MSP, such as Sharpness, Loudness, Pitch Detection, and Inharmonicity².

2.2 Sound Mass Music

The texture is a metaphor of visual and tactile perception. This concept offers a particular standpoint aiming to describe and analyze some musical phenomena [23], [24] and [25]. According to Mackay [23], "texture of music consists of its sounding components; it is conditioned in part by the number of those components sounding in simultaneity or concurrence". Ferraz [24] emphasizes that texture is "compatible with the system and typical procedures to which it belongs". Texture can be polyphonic, monophonic, harmonic, serial, pointillistic or static. He argues that textural perception is correlated with the Gestalt phenomenon [26] resulting from the interaction between the compositional sound material.

We can analyze musical texture starting with the measure of musical events that are found in the time-frequency space, giving us a measure of density [25]. We are particularly interested in sound mass texture. This phenomenon occurs when the music texture is the protagonist of the musical discourse. Further, other musical parameters (pitch, rhythm, intensity) are just parameters to create a "kind of spectromorphological hyper-instrument" [27].

Karlheinz Stockhausen stated that the perception of sound mass starts at our limit of perceiving separated musical sounds in time or frequency space [28]. This idea was explored by Ligeti with the concept of "timbre of movement" (*bewegungsfarbe*) [29]. Stockhausen's concept of sound mass could be related to the technique of micropolyphony, in which the perception of a sound texture is created by the fusion of multiple separated instrumental voices [29]. Pieces like *Atmosphères* (1961), *Continuum* (1968) or *Chamber Concerto* (1970) are examples of this concept. In the context of Ligeti's electronic music (*Glissandi*, 1957, *Artikulation*, 1958) the instrumental voices are replaced by multiple sound partials, that, juxtaposed and superimposed by similar processes to additive synthesis, form the timbre of movement.

Another theory, *Stochastic Music*, was developed by Iannis Xenakis in the 1950s [30]. Using mathematical models, Xenakis aimed to create continuous and discontinuous sound masses using a large number of *pizzicati*, *glissandi* or even electronic sounds [30]. He explored this technique in works such as *Pithoprakta* (1955-56), *Achorripsis* (1958) and *Aoura* (1971).

The granular synthesis technique is also an

important technique that generates sound masses. This process aims to generate sounds by the agglutination of thousands of 'grains', which are extremely short sound samples, belonging to the micro-time scale (in milliseconds) [31]. Perceptually, it is needed more than 20 grains per second to build a structure that is perceived as a sound event. When this fusion happens, a texture or a flux of a timbre varying in time is generated. Solomos [32] assumes that the Granular Paradigm corresponds to the corpuscular sound description, as opposed to the waveform description.

From the definitions presented above, it is possible to assume that sound masses create a kind of saturation in the auditory system. At a certain point in time, the listener starts to perceive sound events globally, i.e. a unique timbre rather than separated events [33]. Therefore, we claim here is that psychoacoustic descriptors offer a proper tool to analyze such phenomenon. Critical Bandwidths and Loudness feature extraction can be a useful tool to describe: a) how sound masses are formed and b) how they merge into a single perceived unity. Therefore, our analysis focus on these two aspects.

3. A Method of Computer Aid Analysis

Our method concerns the generation of plots of audio descriptors to describe spectral and psychoacoustic features from audio files (i.e. recordings of performance or acousmatic pieces). Those graphics are used to reveal important features of textural music. They are complemented by musicological discussions and further music analysis.

3.1 Volume Descriptors

One of our tools is a multidimensional descriptor comprising three curves in one graphic called Volume (Fig. 1 and 2, above). The volume is a concept defined by Truax [33] as the "perceived magnitude of sound or the psychological space it occupies".

Here, the Volume is a three-dimensional graphic representation created by Malt and Jourdan [13] by superposing three curves: Spectral Centroid, Spectral Spread, and Loudness. In the graphics, the Volume magnitude is given by the area between Spectral Centroid and Spectral Spread curves. Degrees of grey tonality indicates the Loudness of the perceived sound intensity. The dark is the higher level, while soft gray the is the lower.

The spectral centroid $C(i)$ can be defined as the barycenter of the spectral energy concerning to a window of analysis [5], [10]. It is calculated as the frequency weighted mean, where $X_i(k)$ are the magnitudes of the Discrete Fourier Transform of the i window, and k is the half of the adopted spectral components of the Transform. The spectral centroid $C(i)$ is calculated as follows:

¹ <https://sites.google.com/site/pdescriptors/> Accessed in 03 May 2019.

² <https://www.vamp-plugins.org/download.html>

Accessed in 03 May 2019.

$$C(i) = \frac{\sum_{k=1}^K k * |X_i(k)|^2}{\sum_{k=1}^K |X_i(k)|^2} \quad (1)$$

where $X_i(k)$ for $k = 1 \dots K$ is the frequency amplitude of the window of analysis.

According to Peeters [4], the Spectral Spread $S(i)$ describes the spread of the sound spectrum around its mean value, i.e. the variance of the defined distribution. Therefore, it is a measure of the average spread of the spectrum concerning its centroid. For noisy sounds, the Spectral Spread is expected to be high, while harmonic and tonal sounds, it is low. The Spectra Spread is defined as follows:

$$S(i) = \frac{\sum_{k=1}^K (k - C_i)^2 |X_i(k)|^2}{\sum_{k=1}^K |X_i(k)|^2} \quad (2)$$

where $X_i(k)$ for $k = 1 \dots K$ is the frequency amplitude of the window of analysis.

Pereira [5] and Monteiro [10] define the Loudness $L(i)$ as the psychoacoustic measure of the sound intensity perception, which varies in frequency according to the Fletcher and Munson curves [34]. Equation 3 defines the loudness $L(i)$ of a spectral window of analysis, according to Pereira's model. The Fletcher and Munson curves are included in equation 3 as the $W(k)$ weight function described in equation 4.

$$L(i) = \sum_{k=1}^K |X_i[k]|^2 10^{w[k]/20} \quad (3)$$

where $X_i(k)$ for $k = 1 \dots K$ is the frequency amplitude of the window of analysis.

$$W(k) = -0,6 * 3,64 * f(k)^{-0,8} - 6,5 * e^{-0,6 * (f(k) - 3,3)^2} + 10^{-3} * f(k)^{3,6} \quad (4)$$

where the frequency $f(k)$ is measured in kHz, defined as $f(k) = k.d$, the difference between two consecutive spectral bins in kHz.

Finally, the *Spectral Volume* $V(i)$ of the i -nth window of the DFT. is defined by the graphic:

$$V(i) = \{C(i), S(i), L(i)\} \quad (5)$$

where $C(i)$ is plot as the curve profile, $S(i)$ is plot as the distance within the profile and $L(i)$ is the colored scale.

3.2 Bark Coefficients Descriptor

Bark is a unit of critical bandwidths of Zwicker's model [22]. The model consists of a subdivision of the range of audible frequencies based on the physiological

properties of the basilar membrane.

Each *bark* is usually smaller than the pitch interval of one-third-octave and each slot is indexed with a number of the unit *bark*, i.e. the critical-band number zero is associated with 0 Hz. A critical-band-index smaller than one Bark indicates that two tones belong to the same critical band [22]. Consequently, masking, beating, and roughness can occur among these tones inside the same band.

It is important to say that psychoacoustic measures are based on empirical tests, therefore, a further mathematical formulation is required. An example is the so-called Fletcher & Munson's Curve of Iso-Loudness [34], equation (4). Moreover, we have already studied the Bark Scale anchored in Traunmüller [35] and others [36]. Our contribution is to present a new formula to convert frequency into barks.

We define a conversion function, $B(f)$, divided into three curves and a scaling factor $b(f)$. Nevertheless, our definition follows Traunmüller [35], clearness is improved.

Given a value $0 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$, the respective Bark Scale conversion function $B(f)$ is calculated as follows:

$$B(f) = \begin{cases} b(f) + 0.15(2 - b(f)) & \text{if } b(f) < 2 \\ b(f) + 0.22(b(f) - 20.1) & \text{if } b(f) > 20.1 \\ b(f) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

where the scaling factor $b(f)$ is given by

$$b(f) = \frac{26.81f}{(1960+f)} - 0.53 \quad (7)$$

In a previous study [18], we have used Bullock's [14] implementation to calculate the *bark coefficients* (e.g. Fig. 1 and 2, below). This descriptor divides the audible frequency range into 26 bark slots, using Zwicker's³ model. It provides a measure of the sound energy into 26 slots, and it is quite similar to the Chroma audio descriptor⁴.

Finally, the Bark coefficients and the Volume are used in three analytical tasks:

- 1) to create the piece segmentations using the Volume and Bark Coefficients;
- 2) to analyze harmonic fusion and segregation using Bark Coefficients;
- 3) examine the Sound Flux and the spectral evolution in time from the Volume representation.

4. Comparative Study

Here, we present a comparative study applying our analytical methodology in to three goals: 1) segmentaion, 2) fusion and segregation and 3) sound flux and loudness, as follows.

³ Zwicker's [22] presents only 24 bark because the higher frequency of his table is 15500hz. But by using the equation to convert Hz in barks, we can calculate the 26

barks, containing all the range of audible frequencies.

⁴ <https://www.vamp-plugins.org/download.html> Access 03 May 2019.

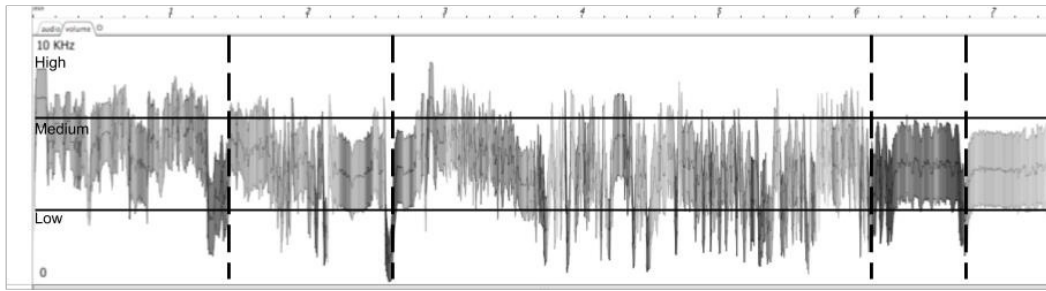


Figure 1: Plot of Volume *Schall* (1995). The vertical axis represents the frequency and the horizontal axis represents the time. The width of the line represents the spectral spread. The center line represents the spectral centroid. And the grayscale represents the loudness.

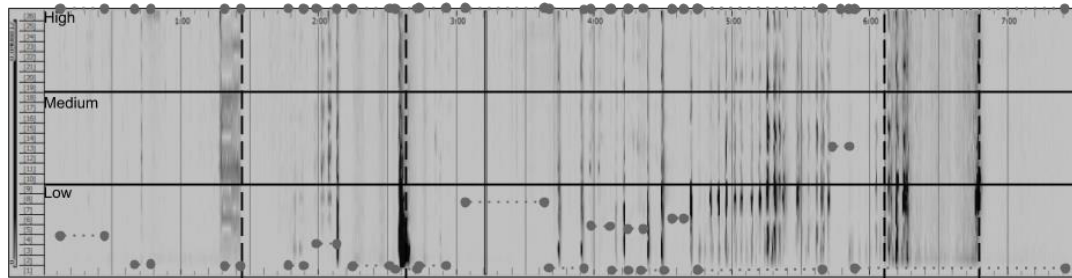


Figure 2: Plot of the Bark Coefficients of Schall (1995). The vertical axis represents the Bark Scale and the horizontal axis, time; grayscale, the energy of each bark bandwidth.

Segmentation: it is possible to segment a composition by observing peaks and valleys of energy, as well as breakpoints detected by in the Bark Scale and Volume descriptor.

Fusion and Segregation: it is possible to examine fusion or segregation levels of sound textures. These are related to the energy concentration of the Bark Scale.

Sound Flux and Loudness: it is possible to evaluate how much sound masses are not static applying the Spectral Spread and Loudness descriptors.

4.1 The Two Pieces

In this article, we analyze two works: *Schall* (1995) by Horacio Vaggione, and *Asperezas* (2018) by Micael Antunes. Since they are acousmatic works, there is no traditional musical score of the pieces. Thus, the provided segmentation is an important feature addressed by the computer-aid analysis.

Schall (1995) is an acousmatic piece by Vaggione composed using the *micromontage*, an important compositional technique of the granular paradigm. The employed sound materials are piano recordings. These samples were edited in microtime domain, intending to create granular textures. *Schall* is a representative work concerning texture and sound mass manipulation of the granular paradigm.

Asperezas (2018), on the other hand, is a piece in which the compositional process is based on the threshold of beats and roughness sensations. These phenomena are related with the critical bandwidths energy manipulation. Thus, the piece was created using the FM synthesis

technique, from a continuous timbre transformation in time [36]. *Asperezas* (2018) is anchored in a study of beats and roughness that is also correlated to our analytical model.

We compare both pieces under two main perspectives:

- To employ the segmentation provided by the computer-aid analysis in order to describe the macroform of the works;
- To enhance our musicological standpoint, comparing their analysis with the computer.

4.2 Comparing Descriptors segmentation

The pieces' segmentation was performed by employing together the Volume and Bark Coefficients. Peaks and valleys were taken into account in order to observe possible correspondences between them. In this sense, the information coming from both descriptors can be viewed as complementary, providing consistency in the segmentation of the piece.

Figures 1 and 2 show the Volume and Bark Coefficients of *Schall* (1995). The segmentation is represented by the dashed vertical lines. By this process, the piece was divided into 5 segments, see Table 1.

Section	1	2	3	4	5
Starting	0''	1'24''	2'39''	6'07''	6'49''

Table 1: Segmentation of *Schall* (1995), showing sections and its initial times.

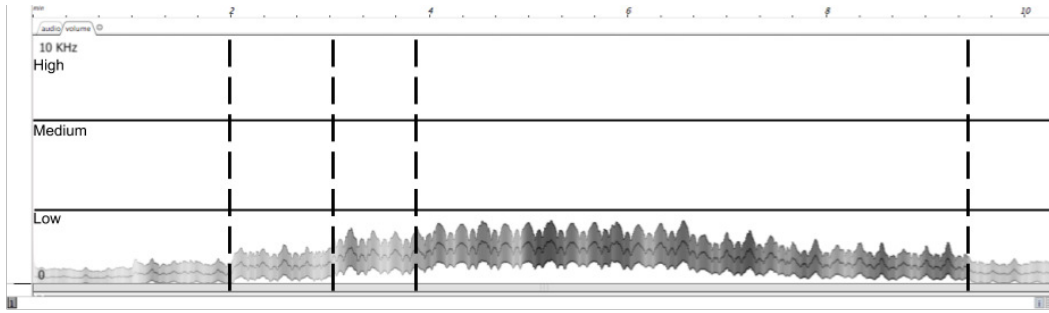


Figure 3: Volume of *Asperzas* (2018). The parameters are the same as in Figure 1.

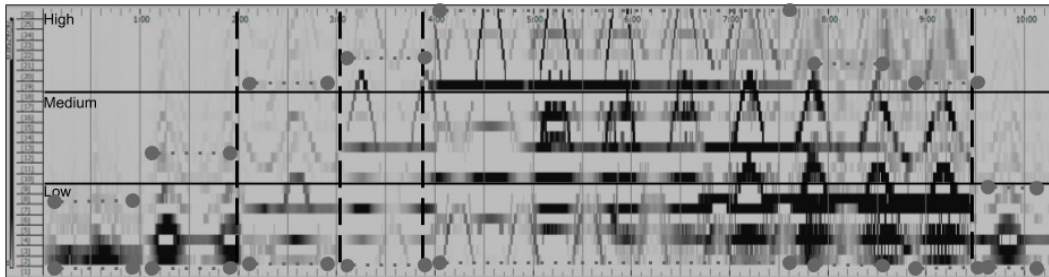


Figure 4: Plot of the Bark Coefficients of *Asperzas* (2018). The parameters are the same as in Figure 2.

Figures 3 and 4 show the Volume and Bark Coefficients of *Asperzas* (2018). The segmentation is represented by dashed lines. By this process, the piece was divided into 5 segments, see Table 2.

Section	1	2	3	4	5
Starting	0''	2'02''	3'05''	3'55''	9'22''

Table 2: Segmentation of *Asperzas* (2018), showing sections and its initial times.

4.3 Comparing Harmonic Fusion and Segregation

The Bark Scale graphic of *Schall* shows different density levels of grains, which mostly appear in the higher bark position. Grains with different changes in density do not allow significant harmonic fusion. For instance, in the second segment of the plot (Figure 2), the lowest level of fusion is found, while in segment 4 we have a peak of fusion.

Fusion and segregation in *Asperzas* are observed in Figure 4, within a pattern of recurrences. Therefore, there are frequencies which are present in the whole piece. We can highlight some aspects of the segment 4, in Figure 4: at the same time that some barks have constant energy (at some points, from 2 to 11), there is significant energy variation in all of the other bark slots. The consequence is a sensation of segregation because we perceive concomitant continuous frequencies and sound mass movement in their background.

Another aspect is the proximity of the barks concentrations that increases according to the evolution of the piece in time. This proximity generates several interferences. The consequence of this proximity is a high

sensation of roughness and beatings.

4.4 Comparing Volume (Sound Flux and Loudness)

Schall (1995) belongs to the granular paradigm and it presents a considerable Sound Flux, i.e. a high level of grain's movement in microtime, forming the sound texture or timbre of the work. The general level of loudness is low, except in the excerpt between 6'07'' e 6'49'', the fourth section of the piece, see Figure 1 and Table 1.

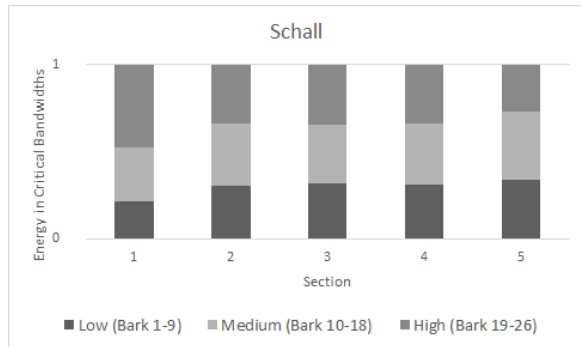
We can observe in Figure 1 that the third section (which lasts around 3'30'') presents a development focusing on the grain clouds' manipulation and variations. The flux in this section has the higher level of the piece, reached by the considerable variations of grains' intensity and frequency range. The first two sections present a considerable movement of sound clouds, but in a lower level compared to section 3. Sections 4 and 6 are more stable with lower sound flux, indicating an entropy movement inside the piece, such as the grains reaching a state of equilibrium. Therefore, in an overall view, the Spectral Volume in *Schall* (1995) is very diverse. The large Spectral Spread band indicates a preponderant timbre with noisy characteristics.

The sound flux of *Asperzas* (2018), on the other hand, has a clear direction. The development of the piece is linked with an expansion of the spectral frequencies and an increment of loudness (Section 4 has the peak of loudness). It is interesting to note that the spectral centroid of the volume representation increases at the same time that the bark concentration is higher.

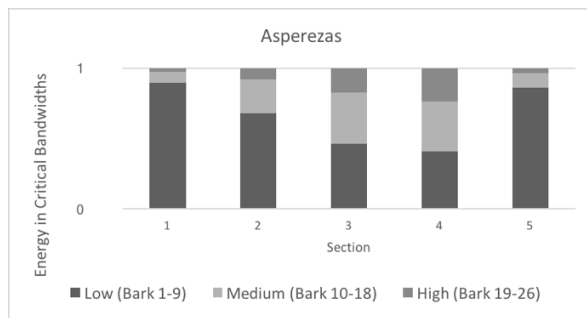
4.5 *Schall* (1995) versus *Asperzas* (2018)

According to the intention of comparing the two pieces, we integrate the collected data of the bark coefficients descriptor in graphics 1 and 2. Thus, it is

possible to have a global evaluation of the features extracted from the spectral development of the pieces. The graphics integrates the energy of the barks into three bands: Low (barks 1-9); Medium (barks 10-18); and High (barks 19-26). The energy of each band is plotted in Graphics 1 and 2 according to the sections of the pieces. The result is that *Schall* has its predominance in Medium and High bands while *Asperzas* has its predominance in the low bands.



Graphic 1: The energy of each section of *Schall* into bands of Bark Scale.



Graphic 2: The energy of each section of *Asperzas* into bands of Bark Scale.

We also integrated our analysis of Bark Coefficients, Spectral Fusion, Loudness and Spectral Flux in levels of variation: *Low*, *Medium* and *High*. Table 3 shows that *Schall* has a low variation on Bark; medium variation of Spectral Fusion and Loudness; and High variation of Spectral Flux. *Asperzas*, on the other hand, has a high variation in Bark and Spectral Fusion and low variation in Loudness and Spectral Flux.

	Bark	Spectral Fusion	Loudness	Spectral Flux
<i>Schall</i>	Low	Medium	Medium	High
<i>Asperzas</i>	High	High	Low	Low

Table 3: Level of variation of the parameters of analysis.

5. Discussions

The sound grains in *Schall* have some zones of concentration in each section. The montage of the grains

in microtime domain reflects points of agglutination with denser textures and moments where the grains are scattered in the frequency space, generating a subtle texture with rarefied grain clouds.

In the micromontage technique applied in *Schall*, the idea is to achieve the saturation from the manipulation of sound particles, exploring our threshold of the pitch, timbre, and loudness perception. Thus, the synthesis, from the variation of levels of density, creates masses using sound particles, causing spectral and temporal masking phenomena. Thereby, starting with an amount of discontinuity, we create a global idea of continuity in the sound.

The macroform of *Asperzas* shows movement expressed by a spectral and loudness increasing, that decreases in the final of the piece. In the microform, the constant spectral oscillation is remarkable, such as the variations on the spectral fusion, and consequently changes of roughness and beatings.

In this sense, *Asperzas*, in the opposite of *Schall*, offers us a formal process that is higher predictable. The descriptors reveal a quasi-symmetrical transformation of the sound material (see figure 4) in the microform, creating in consequence a previous expectation in listening.

A comparative analysis of the two pieces raises an interesting compositional question. The sound masses are an effect of saturation of our auditory system. However, different techniques explore different thresholds of perception in different ways.

6. Conclusions

We discussed a methodology of computer-aided musical analysis using psychoacoustics audio descriptors that afford tools to study textural music. The aims of this study were to understand its singularities and enhanced hypothesis on the creative process. We compared two works *Asperzas* (2018) and *Schall* (1995) under three analytical perspectives: formal segmentation, harmonic fusion/segregation, and sound flux.

These questions are relevant in the musicological context concerning the analysis of contemporary music field, as they reveal the details of the compositional practices. They also allow us to study composition, not only from the standpoint of its creation, but to perform an analysis that gives us clues about the perceptual processes related to the listening of the works. Finally, audio descriptors are considered useful tool to support these issues.

In our analysis, we observed the singularities of the sound textures explored in the pieces. In this way, we emphasize the difference between the texture explored by the granulation paradigm, supported by the *micromontage* technique and the construction of the masses through the accumulation of sound phenomena in the critical bands. In the specific case of the two pieces, it was also observed the differences in the development of the pieces, by highlighting that the expectation of listening can act from the manipulation of the sound material.

Since the analysis is performed from the audio data, it would be possible to conceive other experiments using different kinds of recordings. For example, to evaluate

different recordings of a piece using dummy head microphones in order to examine perceptual issues. The approach introduced here can also be explored in the context of live electronic and instrumental music, aiming to analyze textural music by Ligeti, Xenakis, and Penderecki, for example.

We also foresee applications in computer-aid composition, the psychoacoustic descriptors would be useful in sound designing of interactive performances and multimodal installations. They could be applied together with theories of ecological perception and dynamic cognition, creating immersive computer-controlled environments.

At least, computational musicology dialogues with experimental psychology and cognitive sciences, therefore, some of the future developments could be useful to implement algorithms of automatic classification.

7. Acknowledgments

Micael Antunes is supported by FAPESP in his doctoral research at Arts Institut of Unicamp/ NICS-UNICAMP, process 2019/09734-3. Danilo Rossetti is supported by FAPESP in his post-doctoral research at NICS-UNICAMP, process 2016/23433-8. Jônatas Manzolli is supported by CNPq under a Pq fellowship, process 304431/2018-4 and 429620/2018-7.

8. References

- [1] Rowe, R. Interactive music systems: machine listening and composing. MIT Press, 1992.
- [2] Bregman, A. S. Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound. MIT Press, 1994.
- [3] Herrera, P. MIRages: an account of music audio extractors, semantic description and context-awareness, in the three ages of MIR. PhD Thesis, Information and Communication Technologies, Universitat Pompeu Fabra. Barcelona, 2018.
- [4] Peeters, G. A Large Set of Audio Features for Sound Description (Similarity and Classification) in the CUIDADO Project (Cuidado Project Report). Paris: Ircam, 2004.
- [5] Pereira, E. Estudos sobre uma ferramenta de classificação musical. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Energia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2009. Campinas: UNICAMP, 2009.
- [6] Peeters, G. et al. The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. Journal of the Acoustic Society of America, Melville, v. 130, n. 5, p. 2902-2916, November 2011.
- [7] Malt, M; JOURDAN, Emmanuel. Z. Descriptors: A Library for Real-Time Descriptors Analysis. In: SOUND AND MUSIC COMPUTING CONFERENCE, 5, 2008, Berlin. Proceedings... Berlin: Sound and Music Computing, 2008.
- [8] Malt, M; Jourdan, Emmanuel. Z. Real-Time Uses of Low Level Sound Descriptors as Event Detection Functions Using the Max/MSP Zsa.Descriptors Library. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER MUSIC, 12., 2009, Recife. Proceedings... São Paulo: USP, SBC, 2009, p. 45-56.
- [9] Rossetti, D.; Manzolli, J. De Montserrat às ressonâncias do piano: uma análise com descritores de áudio. Opus, 23(3), 193-221. 2017.
- [10] Monteiro, A. Criação e performance musical no contexto dos instrumentos musicais digitais. Dissertação de Mestrado. Instituto de Artes da Universidade Estadual de Campinas, 2012. Campinas: UNICAMP, 2012.
- [11] Simurra, Ivan; Manzolli, Jônatas. Sound Shizuku Composition: A Computer-Aided Composition System for Extended Music Techniques. MusMat Brazilian Journal of Music and Mathematics, v. 1, n. 1, p. 86-101, 2016.
- [12] Simurra, Ivan; Manzolli, Jônatas. “O azeite, a lua e o rio”: o segundo diário de bordo de uma composição a partir de descritores de áudio. Revista Música Hodie, Goias, v. 16, n. 1, p. 121-123, 2016.
- [13] Malt, M; Jourdan, E. Le “BSTD”—Une représentation graphique de la brillance et de l’écart type spectral, comme possible représentation de l’évolution du timbre sonore. In: L’ANALYSE MUSICALE AUJOURD’HUI, CRISE OU (R)ÉVOLUTION, 2009, Strasbourg. Proceedings... Strasbourg: STAM, 2009.
- [14] Bullock, J. Libxtract: a lightweight library for audio feature extraction; Proceedings of the 2007 ICMC; ICMA, Sweden, 2007.
- [15] Rossetti, D. Temporalidades, morfologias e granulações em *Schall* de Horacio Vaggione. Proceedings of the IV Encontro Internacional de Teoria e Análise Musical, Eitam 2017, São Paulo, SP, 2017.
- [16] Rossetti, D; Manzolli, J. Timbre emergente na música eletroacústica: Uma análise com o aporte gráfico do volume e da vivacidade espectral. Proceedings of the XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Porto Alegre, Unisinos, 2018.
- [17] Rossetti, D; Manzolli, J. Analysis of Granular Acousmatic Music: Representation of Sound Flux and Emergence. *Organised Sound* v. 24, n. 2, p. 1-12, 2019.
- [18] Silva, M. A., Botechia, T., Rossetti, D. Manzolli, J. Análise musical por descritores de áudio baseados em modelos psicoacústicos. Anais do Simpósio Internacional de Cognição e Artes Musicais 14. Campo Grande, MS, 2019. in press.
- [19] Parncutt, R. Harmony: A psychoacoustical approach. Vol. 19. Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] Sethares, W. A. Tuning, timbre, spectrum, scale. Berlin: Springer Science & Business Media, 1998.
- [21] Vassilakis, P. N.; Fitz, K. SRA: A web-based research tool for spectral and roughness analysis of sound signals. In: Proceedings of the 4th Sound and Music Computing (SMC) Conference, 2007. p. 319-325.
- [22] Zwicker, E. Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). The Journal of the Acoustical Society of America, v.33, n.2, p.248-248,

1961.

[23] Mackay, J. On the perception of density and stratification in granular sonic textures: An exploratory study. *Journal of New Music Research*, v. 13, n. 4, p. 171-186, 1984.

[24] Ferraz, S. *Análise e Percepção Textural: Peça VII, de 10 Peças para de Gyorgy Ligeti*. *Cadernos de Estudo: Análise Musical*, vol. 3. São Paulo, pág. 68-79, 1990.

[25] Berry, W. *Structural functions in music*. Chelmsford: Courier Corporation, 1987.

[26] Cambouropoulos, E. Tsougras, C. Auditory Streams in Ligeti's Continuum: A Theoretical and Perceptual Approach. *Journal of interdisciplinary music studies*, v. 3, n. 1-2, p. 119-137, 2009.

[27] Smalley, D. Spectromorphology: explaining sound-shapes. *Organised sound*, Cambridge, v. 2, n. 2, p. 107-126, 1997.

[28] Stockhausen, K. Pontos e grupos. Im: Maconie, Robin. *Stockhausen sobre a música: palestras e entrevistas compiladas por Robin Maconie*. Tradução de Saulo Alencastre. São Paulo: Madras, 2009, pág. 45-50.

[29] Ligeti, G. *Neuf essais sur la musique*. Genebra: Éditions Contrechamps, 2010.

[30] Xenakis, I. Concerning time. *Perspectives of New Music*, Seattle, v. 27, n. 1, p. 84-92, 1989.

[31] Roads, C. *Microsound*. MIT Press. Massachusetts. 2001.

[32] Solomos, M. 2013. *De la musique au son: l'émergence du son dans la musique des XXe-XXIe siècles*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.

[33] Truax, B. Musical Creativity and Complexity at the Threshold of the 21st Century. *Interface* v. 21, p. 29-42, 1992.

[34] ISO, B. 226: 2003: Acoustics—Normal equal-loudness-level contours. *International Organization for Standardization*, v. 63, 2003.

[35] Traunmüller, H. "Analytical expressions for the tonotopic sensory scale", in *The Journal of the Acoustical Society of America* 88.1, 1990.

[36] SILVA, M. A. *Redução da Dissonância Sensorial em uma Escala Temperada Utilizando Timbres Inarmônicos: Uma Abordagem Experimental e Aplicações Artísticas*. Master Dissertation, 2018. 96 p. Music post-graduation program- School of Arts and Communications, São Paulo University, São Paulo, 2018.

2.3 Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; BOTECHIA, T.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. *Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos*. *Revista Música Hodie*, v. 21, 2021.

O principal objetivo deste artigo é a análise de duas peças acusmáticas, *Asperezas* (2018) e *Utopia* (2018), ambas criadas por autores do artigo, Micael Antunes e Tales Botechia, respectivamente. O foco central está nos fenômenos perceptuais relacionados à *textura musical*. Para isso, desenvolvemos uma metodologia de análise que visa associar medidas extraídas do áudio, como *fluxo espectral*, *coeficientes bark* e *sharpness*, com fenômenos perceptivos como *fusão*, *rugosidade* e *densidade*. Nosso objetivo é não apenas a extração de medidas de áudio, mas também explorar estratégias de visualização para fenômenos auditivos entendidos como *emergentes*. Assim, almejamos contribuir para o campo da análise musical assistida por computador, especificamente no contexto de obras eletroacústicas com foco na *textura musical*.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

No panorama da tese, o presente artigo desempenha um papel crucial, capitalizando os conhecimentos obtidos durante a nossa pesquisa de mestrado (SILVA, 2018) que explorou a aplicação da psicoacústica na composição musical. Esse conhecimento adquirido é agora aplicado no domínio da análise musical. Ao revisar a literatura sobre *textura musical*, identificamos uma oportunidade de avanço na construção de uma metodologia de análise focada em descritores de áudio. Pelo fato de grande parte da literatura se concentrar em ferramentas de análise simbólica da partitura, observamos uma lacuna nos estudos sobre aspectos perceptivos da *textura musical* através da análise de áudio. Aproveitando a nossa escolha de repertório, onde já estávamos imersos nos processos composicionais de nossas próprias obras, desenvolvemos uma metodologia para abordar essa questão. Sendo assim, introduzimos conceitos-chave que serão fundamentais nos desenvolvimentos futuros da tese, tais como a noção de *emergência*, agora incorporada para a análise de texturas musicais, uma abordagem inicial entre a noção de *permeabilidade* e a representação do áudio, e a consolidação da associação entre fenômenos psicoacústicos e características da percepção textural.

Questões de Pesquisa

A elaboração deste artigo foi guiada pelas seguintes questões:

- Como a análise do áudio, aliada à fundamentação teórica da psicoacústica, pode revelar as características texturais *emergentes* associadas à música eletroacústica?
- Como a análise dessas características podem auxiliar na segmentação formal de uma obra?
- Seria essa metodologia generalizável e aplicável em outros repertórios de música acusmática?

Essas questões orientaram nossa investigação para identificar e interpretar as características perceptivas e estruturais ligadas à percepção textural. Por meio desta análise, visamos preencher uma lacuna na literatura existente, oferecendo uma investigação das relações entre características acústicas e psicoacústicas de texturas sonoras. Pretendemos assim não apenas descrever as propriedades psicoacústicas envolvidas, mas também compreender como essas características influenciam na percepção do desenvolvimento formal de uma obra. Além disso, visamos contribuir para o desenvolvimento de ferramentas e métodos computacionais aplicáveis à análise de músicas texturais, ampliando assim o escopo da musicologia computacional e da pesquisa em psicoacústica musical.

Nossa abordagem apresenta algumas limitações no contexto da música eletroacústica, sobretudo ao se concentrar na análise de versões estéreo das duas obras, abrindo mão da complexidade da situação de performance, como distintas configurações de salas de concerto e soluções de espacialização. Essa restrição impede uma exploração mais abrangente dos fenômenos *emergentes* da textura. Contudo, apesar dessa limitação, a abordagem ainda se mostra pertinente, contribuindo para o avanço da reflexão e das técnicas de análise de áudio, as quais poderiam ser posteriormente ampliadas em outros contextos analíticos. Outra limitação identificada neste artigo é a ausência de um descritor específico para avaliação da *rugosidade*, o que seria fundamental para uma análise mais precisa dos fenômenos microtemporais. Essa característica foi representada neste artigo por meio do descritor de *fluxo espectral*. No entanto, é relevante destacar que essa limitação foi superada em estágios subsequentes da nossa pesquisa de doutorado (ver Seções 2.5 e 2.6), por meio da implementação em *python* do modelo de *rugosidade* proposto por Vassilakis (VASSILAKIS, 2001).

Metodologia

O background teórico que fundamenta a nossa análise se ancora em um diálogo interdisciplinar entre questões musicológicas, modelos psicoacústicos e descritores de áudio. Dado o diálogo explícito das peças analisadas com fenômenos psicoacústicos, nossa intenção é de investigar, até que ponto, uma estratégia composicional é determinante no momento da escuta de uma obra. Foram analisadas versões estéreo das obras *Asperzas* e *Utopia* renderizadas em formato *wav*, 24-bits e taxa de amostragem de 48kHz. As análises de áudio foram realizadas no software *Sonic Visualizer*, utilizando as bibliotecas *Mazurka* e *Libxtract*, sendo que posteriormente foram criadas as representações gráficas em *python* utilizando a biblioteca *matplotlib*.

Foram utilizados os descritores de *fluxo espectral*, *coeficientes bark* e *sharpness* (BULLOCK, 2008; ZWICKER; FASTL, 2007). O *fluxo espectral* (Equação 1.10), que calcula a distância entre as componentes espectrais entre duas janelas de análise adjacentes da *FFT* utilizando a norma *L-2*, é particularmente relevante para capturar fenômenos microtemporais explorados nas composições. O descritor *coeficientes bark* (Eq. 1.1), o qual é uma implementação de filtros auditivos baseada no modelo de *bandas críticas* de Zwicker, oferece uma representação gráfica sobre a distribuição textural em diferentes faixas de frequência. Por fim, o modelo de *sharpness* (Eq. 1.5) relaciona-se com a densidade sonora. Juntos, esses descritores permitem diversos pontos de vista da evolução temporal do espectro sonoro, bem como permitem a segmentação das obras em questão. Por se tratar de uma metodologia de análise musical, a análise e interpretação dos resultados musicais se fez em diálogo entre os compositores da peça e os demais autores do artigo, reforçando assim o papel da interpretação dos analistas no processo de análise musical.

Resultados e implicações

Os resultados das análises indicam que os critérios de seleção dos descritores foram eficazes na captura das características musicais exploradas pelos compositores em suas obras. A validação musicológica desempenhou um papel crucial, permitindo a identificação da eficiência dos descritores de *fluxo espectral*, *bandas críticas* e *sharpness* na descrição de fenômenos musicais associados a aspectos *microtemporais*, *fusão* e *densidade* das texturas musicais.

No contexto das particularidades das composições, observa-se que os fenômenos microtemporais têm uma presença contínua e central nas texturas de *Asperzas*, ao passo que em *Utopia* emergem de forma mais esporádica, servindo como estratégia para destacar os limites

entre seções da composição. Em relação à distribuição espectral nos filtros auditivos, destaca-se que *Asperezas* apresenta um processo de acumulação contínua, sem grandes quebras abruptas, enquanto *Utopia* segue uma forma mais complexa, intrinsecamente ligada à divisão da peça em seções. No que concerne à densidade, nota-se que ela desempenha um papel estruturante tanto na macro quanto na microforma de *Asperezas*, ao passo que em *Utopia* é explorada principalmente no desenvolvimento da macroforma. Essas descobertas ressaltam a relevância dos descritores escolhidos e proporcionam uma compreensão sobre as características distintas das obras analisadas.

O presente estudo oferece oportunidades para diversas direções de pesquisas futuras. A ideia de que estratégias musicais de organização da textura musical podem ser representadas visualmente por meio dos descritores a partir da análise do áudio reafirma a relevância dessas ferramentas na prática musical. A incorporação dos descritores de áudio, como os *coeficientes bark*, o *fluxo espectral* e o *sharpness*, como ferramentas analíticas, possibilita uma representação visual das transformações timbrísticas relevantes para uma abordagem da análise textural.

A análise dos perfis da curva de *fluxo espectral*, associado à detecção de padrões microtemporais, foi explorada continuamente em nossa pesquisa, culminando em um descritor de *rugosidade*, que será apresentado na Seção 2.5. A identificação de tendências nas curvas desses descritores revelou o potencial para reconhecer *padrões emergentes* na música textural, indicando possíveis direções em futuras investigações sobre *padrões texturais*, as quais serão exploradas na Seção 2.7 desta tese. A segmentação das obras com base nos descritores de áudio oferece uma abordagem tangível para entender o desenvolvimento formal, permitindo uma compreensão mais aprofundada do papel da textura musical na percepção da forma musical, um problema que acompanha todo o desenvolvimento desta pesquisa e será explorado no contexto da música instrumental nas seções a seguir.

Em resumo, este artigo consolidou parâmetros cruciais para a análise da textura, abrangendo aspectos fundamentais como percepção microtemporal, evolução espectral e densidade. Além disso, destacou-se o potencial dos descritores de áudio em contribuir para uma segmentação eficiente de uma obra musical a partir da informação do áudio. Com base nas descobertas sobre a relação entre micro e macroformas, emergência textural e a representação visual de padrões, este estudo contribui substancialmente para a consolidação de estratégias replicáveis em outros contextos desta tese.

Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos

Musical analysis of acousmatic music with psychoacoustic descriptors



Micael Antunes

Instituto de Artes/ Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora,
Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil
michaelant@gmail.com



Tales Botechia

Instituto de Artes/ Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora,
Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil
tales.botechia@gmail.com



Danilo Rossetti

Faculdade de Comunicação e Artes, Universidade Federal
do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil
d.a.a.rossetti@gmail.com



Jônatas Manzolli

Instituto de Artes/ Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora,
Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil
jotamanzo@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta um estudo musicológico exploratório com suporte computacional que foca a análise de duas composições que utilizam as características perceptivas do som como estratégia criativa. O desenvolvimento de modelos computacionais do último século proporcionou a implementação de descritores psicoacústicos e esses tornaram-se, eventualmente, suportes para criação e análise musical. Esses estudos atuais se inserem no contexto da musicologia sistemática. Dessa forma, para analisar duas peças acusmáticas compostas pelos autores, o texto atualiza a discussão a partir do referencial teórico da psicoacústica. Apresentamos inicialmente o material composicional,

focado em especulações sobre o *temperamento por igual*, e ressaltamos suas consequências psicoacústicas baseados no modelo de *rugosidade*. Com o objetivo de focar em aspectos da textura musical, utilizamos os seguintes descritores de áudio: o de *fluxo espectral* como uma ferramenta para representar fenômenos microtemporais, como a *rugosidade*; o de *coeficientes bark*, para entender o desenvolvimento da textura no plano da frequência com um viés perceptivo; e o de *sharpness*, para representar uma medida quantitativa de percepção de densidade. Como resultado, apresentamos os gráficos dos descritores, acompanhados de análises contextualizadas e comparativas das duas peças. Analisamos e interpretamos as características sonoras descritas neste artigo como uma propriedade *emergente* da textura musical. Ao final, discutimos o potencial dessa perspectiva para o campo da análise musical com suporte em modelos perceptivos.

Palavras-chave: análise musical com suporte computacional, descritores de áudio, música acusmática, sharpness, coeficientes bark.

Abstract: This article presents an exploratory study in musical analysis with a focus on perceptual features of the sound. The development of computer science of the last century afforded the study of perceptual models through technological devices, which eventually became supports for music creation and analysis. Current studies focus on the application of computational tools in the context of systematic musicology. To study two acousmatic pieces composed by the authors, the text updates this discussion based on a psychoacoustics theoretical framework. We present the compositional sound material, focused on speculations about *equal-tempered* scales and its psychoacoustic consequences based on *roughness* models. To focus on aspects of musical texture, we use the following audio descriptors: the *spectral flux*, as a tool to represent microtemporal phenomena, such as *roughness*; the *bark coefficients*, to understand the development of texture in the frequency domain described by a perceptive model; and *sharpness*, to represent a quantitative measure of perception of density. As a result, we present graphical of the descriptors, with contextualized and comparative analyzes of the two pieces. We analyze and interpret the sound features

described in this study as an *emergent* property of the sound texture. Finally, we discuss the potential of new perspectives for musical analysis based on perceptual models.

Keywords: computer-aided musical analysis, audio descriptors, acousmatic music, sharpness, bark scale.

Submetido em: 27 de maio de 2020

Aceito em: 8 de janeiro de 2021

Introdução

A composição e a musicologia têm ocupado um espaço interdisciplinar que fomenta um diálogo entre conhecimento científico sobre o som, composição e análise musical. A atuação acadêmica nesses caminhos que se cruzam pode ser entendida sob a ótica do “músico pesquisador” (RAY, 2010). É com esse ponto de vista que introduzimos o nosso tema de estudo: a análise de duas obras compostas pelos autores que têm como background especulações no campo da percepção sonora: *Asperezas* (2018), de Micael Antunes, e *Utopia* (2018), de Tales Botechia. O artigo descreve uma análise musical com suporte de modelos computacionais para elucidar como determinados fenômenos psicoacústicos podem fundamentar estratégias composicionais. As obras têm como visão estética a interação entre o espectro sonoro e a percepção de *rugosidades e batimentos*.

A proposta interdisciplinar do nosso estudo dialoga com as pesquisas atuais em musicologia sistemática científica (PARNCUTT, 2007), que abrange uma série de disciplinas, como vemos a seguir:

Musicologia sistemática científica (ou musicologia científica) que é primeiramente empírica e orientada a dados; ela abrange psicologia empírica e sociologia, acústica, psicologia, neurociência, ciências cognitivas, computação e tecnologia. (PARNCUTT, 2007, p. 3).

A fundamentação metodológica deste artigo se ancora no escopo dessa musicologia, tendo como principal referência os fenômenos perceptivos, o conhecimento experimental abarcado pelo campo da psicoacústica e os modelos computacionais. Nas próximas seções, apresentamos a fundamentação teórica que dá suporte ao nosso estudo. Primeiramente discutimos as noções de *textura musical* e *massa sonora*, passando por uma breve definição do conceito de *emergência*, finalizando com a apresentação dos modelos psicoacústicos utilizados na análise aqui descrita.

Textura musical e massa sonora

A noção de textura musical é descrita na literatura como uma metáfora da percepção visual e tátil (BERRY, 1987; FERRAZ, 1990; MACKAY, 1984). Segundo Berry (1987, p. 184), a textura musical “é constituída por seus componentes sonoros; é condicionada em parte pelo número desses componentes, que soam em simultaneidade ou concorrência, e tem suas qualidades determinadas por interações”. Ferraz (1990, p. 71) destaca que a textura é “compatível com o sistema e procedimentos típicos ao qual esta se insere - polifônico, monódico, harmônico, serial, pontilista, estatístico”, sendo ela “a sensação gestáltica produzida pela configuração e pelo dinamismo dos elementos sonoros presentes num determinado fluxo sonoro” (FERRAZ, 1990, p. 71).

Berry (1987) afirma que a densidade é um aspecto quantitativo da textura. Esta pode ser observada a partir do número de eventos que ocorrem e da sua compressão intervalar. Essa propriedade da textura é particularmente importante para o nosso estudo, pois os processos composicionais utilizados nas peças que fazem parte deste artigo se ancoram na manipulação da compressão intervalar.

No século XX há uma exploração particular da ideia de textura a partir da noção de massas sonoras. Compositores como György Ligeti (1923-2006), Krzysztof Penderecki (1933-2020) e Iannis Xenakis (1922-2001) ampliaram essa concepção, cada qual à sua maneira, em obras instrumentais e eletroacústicas.

A ideia de massa sonora aponta para uma condição de saturação do sistema perceptivo, pois nela se perde a sensação de intervalo musical. Ou seja, a percepção mais localizada no plano da frequência dá lugar à percepção mais global de aglomerados sonoros. Essa ideia pode ser ilustrada a partir da concepção de *permeabilidade* de Ligeti (2010). Segundo o compositor:

A perda de sensibilidade dos intervalos está na origem de um estado que podemos nomear de *permeabilidade*. Isto significa que duas estruturas de naturezas diferentes podem ter um fluxo simultâneo, se absorver ou mesmo se fundir totalmente, modificando apenas as taxas de densidades horizontais e verticais. (LIGETI, 2010, p. 123).

Iannis Xenakis também explorou sua concepção de música estocástica alinhada à noção de massas sonoras. Ressaltamos aqui sua consciência de que suas especulações estavam conectadas com as propriedades da membrana basilar e a impulsos elétricos dos neurônios no cérebro:

Por um lado, parece que os pontos de deformação da membrana basilar têm um papel fundamental no reconhecimento; mas, de outro lado, uma espécie de código Morse temporal das descargas elétricas é levada em conta estatisticamente para a detecção de um tom (tone). Uma contagem subliminar do tempo notavelmente complexa acontece. (XENAKIS, 1992, p. 91).

Esses conceitos também fornecem subsídios para o desenvolvimento de ferramentas de suporte composicional. Vieira (2016) apresenta um estudo criativo sobre a textura musical utilizando o suporte computacional. Para tanto, o autor explora as noções de células texturais, camadas texturais e blocos sonoros. As células texturais utilizadas pelo autor se comportam como aglutinadores do processo de texturização e, portanto, a composição é o resultado da superposição hierárquica de níveis diferentes de camadas sonoras (VIEIRA, 2016).

Percepção e a noção de *emergência*

Os descritores de áudio fornecem modelos para extrair diversos níveis de informação do espectrograma. Bullock (2008, p. 44)

elencar esses níveis do mais baixo para o mais alto, sendo eles: físico, sensorial, perceptivo, formal e expressivo. No contexto musicológico, esses níveis podem ser articulados a partir de concepções como a de *emergência*, que tem ocupado um espaço importante em trabalhos de análise e criação musical, apontando para a complexidade dos fenômenos perceptivos (ANDERSON, 2005; MERIC; SOLOMOS, 2008; ROSSETTI; MANZOLLI, 2019; SCHRÖDER, 2014). Segundo Schröder (2014, p. 38, grifo do autor), “Emergência, como um conceito da teoria dos sistemas, descreve uma nova qualidade ou *Gestalt* que evolui das interações do sistema e que não pode ser explicada baseada no conhecimento das interações separadamente”. Nesse sentido, esse autor amplia a noção de Ferraz (1990), pois coloca que a *gestalt* resultante da textura musical emerge das interações dos seus elementos formadores.

Assim, entendemos que o estudo da percepção textural se vincula a um fenômeno *emergente*, que ocorre num nível mais alto da interação entre as partes envolvidas no processo de escuta (repertório, obra, performance, espaço acústico, ouvinte etc.), não sendo possível determinar de maneira unívoca como esse processo ocorre. Na tentativa de prospectar um recorte desses fenômenos no processo de escuta textural, utilizamos os descritores de áudio como medida das potências de determinados fenômenos psicoacústicos, os quais são produzidos pelas partes que constituem a própria textura. Ainda, segundo Di Scipio em entrevista a Anderson (2005, p. 18), o “som é o epifenômeno de um processo de baixo nível: você cria um processo de baixo nível, e as interações e interferências entre os componentes que participam do processo são ouvidos como uma forma dinâmica do som, um processo de emergência sonológica”.

Convergindo com esses pontos de vista teóricos, nossa análise utiliza a psicoacústica como recorte epistêmico para o estudo da percepção textural e dessa forma aponta para algumas propriedades de baixo nível presentes na escuta. Queremos compreender as características de fenômenos de segunda ordem gerados por interações entre os componentes da textura musical. Assim, a nossa hipótese analítica é que tais características podem ser

descritas com representações dos gráficos de *fluxo espectral*, da escala bark ou a partir do *sharpness*, tal como detalharemos na seção de metodologia.

Referencial da psicoacústica

Ainda no século anterior, o estudo da música textural se apoiou em ferramentas desenvolvidas no campo da psicoacústica. As implementações utilizadas têm como fundamento a modelagem do ouvido interno, por meio do modelo de *bandas críticas* de Zwicker (ZWICKER, E.; FLOTTORP; STEVENS, 1957).

Os modelos psicoacústicos fornecem uma mediação entre o estímulo sonoro e a resposta sensorial (FASTL; ZWICKER, 2007). A análise musical via descritores de áudio ancorados em modelos psicoacústicos (aqui denominados de descritores psicoacústicos) tem como objetivo aproximar o resultado sonoro da gravação de uma obra com a recepção do ouvinte. Por se tratar de peças acusmáticas e, portanto, não possuírem partituras, os descritores permitem a constituição de gráficos das peças que dão suporte para a análise musical.

Na análise que apresentaremos, os descritores têm a propriedade de revelar nuances do timbre percebido e permitir a visualização de uma possível segmentação formal das peças. A biblioteca *Libxtract* (BULLOCK, 2007) e a biblioteca *Mazurka* (CHARM, 2020), implementadas no software *Sonic Visualiser*, são as ferramentas computacionais utilizadas neste estudo, pois já contam com um conjunto de rotinas que implementam os modelos aqui utilizados.

Elementos das obras

Analisamos neste trabalho duas obras acusmáticas: *Asperezas* (2018), de Micael Antunes, e *Utopia* (2018), de Tales Botechia.

Ambas têm características texturais e exploram a sobreposição de diferentes camadas sonoras, operando a estrutura da composição a partir de escalas do *temperamento por igual*.

O *temperamento por igual* é definido como um sistema de afinação que consiste em dividir um determinado intervalo de altura (como uma oitava justa) em um número de partes de igual proporção (ANTUNES; FARIA, 2017; BARBOUR, 2004). No contexto da música ocidental é comumente manifesto pela divisão da oitava em 12 partes. A seguir, descreveremos algumas consequências psicoacústicas do *temperamento por igual* e como ele se insere nas peças aqui estudadas.

Temperamento por igual e modelo de *rugosidade*

Como é bem presente na literatura musical, as escalas permitem uma previsão e um dimensionamento das propriedades harmônicas decorrentes das combinações de alturas (PORRES; MANZOLLI, 2005; SETHARES, 1998) que são atravessadas historicamente pela noção de consonância (TENNEY, 1988). No início do século XIX, o trabalho de Helmholtz (1954) introduziu uma concepção de dissonância baseada em atributos psicofísicos, ressaltando a relação que há entre a composição espectral de um som e a interação com a percepção. Essa concepção é conhecida na literatura como *dissonância sensorial* (PORRES, 2007; SETHARES, 1998). Ou seja, uma concepção que busca investigar a dissonância a partir de seus atributos psicofísicos. O modelo de Helmholtz (1954) foi revisado por Plomp e Levelt (1965) a partir de dados colhidos em experimentos psicoacústicos,¹ revelando assim a correlação entre dissonância sensorial e as propriedades da membrana basilar. Essas propriedades são simuladas pelo modelo de *bandas críticas* de Zwicker, que representa a faixa de frequências audíveis

¹ Voluntários expostos a estímulos sonoros (díades geradas com tons puros) eram convidados a classificar os sons em valores de 1 a 7 a partir de sua sensação de dissonância. Para um maior detalhamento de experimentos relacionados à dissonância, ver Antunes (2018).

a partir de uma série de filtros auditivos (ZWICKER, E.; FLOTTORP; STEVENS, 1957), tal como detalhado no tópico 3.2 deste artigo.

O estudo das propriedades psicoacústicas das *bandas críticas* abriu caminho para que diversos pesquisadores e compositores explorassem o conceito de dissonância sensorial em análise e composição musical, estimando a curva de dissonância de um determinado espectro em função de uma escala musical, ou mesmo planejando os níveis de dissonância sensorial a partir da manipulação do espectro (MATHEWS *et al.*, 1988; PIERCE, 1966; PORRES, 2007, 2012; SETHARES, 1998).

Historicamente, a noção de tensão e relaxamento associada à dissonância está principalmente atrelada ao seu papel funcional na música tonal. Por isso, é atravessada por pontos de vista estéticos e culturais que não estão, na sua totalidade, previstos no estudo da psicoacústica. Em linha com esse recorte específico, alguns autores têm defendido que os modelos de dissonância sensorial sejam entendidos como modelos de *rugosidade* (ANTUNES, 2018; VASSILAKIS, 2001).

Segundo Vassilakis (2001), existem três categorias perceptivas relacionadas à variação de amplitude do som: a primeira é o *batimento*, que ocorre quando dois sons estão em uma diferença de 1 Hz a cerca de 20 Hz. A segunda é a *rugosidade*, que se inicia no limiar da percepção de batimentos até atingir um pico em 1/4 da banda crítica. Depois decai até atingir uma diferença maior que a de uma banda crítica. Nesse estado há uma ausência de percepção de variação de amplitude (VASSILAKIS, 2001, p. 3-4). Sendo assim, as propriedades da cóclea e do ouvido interno desempenham um papel considerável na sensação de dissonância, mas não explicam completamente o fenômeno em si, que é multidimensional. Esse é também o ponto de vista que adotamos neste trabalho.

Contextualização das peças

Asperezas (2018)

A peça *Asperezas* teve como ponto de partida a definição de Vassilakis (2001) sobre a *rugosidade*, apresentada na seção anterior, que prevê a sensação de *rugosidade* iniciando a partir da diferença de 20 Hz entre tons puros e com sua presença associada ao tamanho da banda crítica. A partir dessa definição, a composição explora uma passagem contínua entre batimentos, *rugosidade* e ausência de variação de amplitude.

A peça foi inteiramente composta a partir da aplicação de um modelo computacional de Síntese por Modulação de Frequência (Síntese FM),² utilizando o Sintetizador *Helm* como gerador dos sons.³ A estrutura da peça ancora-se em dois procedimentos de modulação da Síntese FM: a) variação da frequência da onda moduladora no entorno da frequência da onda portadora, para assim produzir uma variação contínua de *batimentos* e *rugosidades*; b) variação do índice de modulação⁴ da Síntese FM, para assim produzir uma variação contínua no espectro sonoro resultante.

O primeiro aspecto foi modelado na programação, fazendo com que o sinal ou onda portadora (onda triangular) tenha frequências e amplitudes fixas, extraídas de uma escala do *temperamento por igual* (12 partes, ver Tab. 1) e alteradas a cada seção da peça. Já o sinal ou onda moduladora possui uma mudança contínua de sua frequência e amplitude, com valores de frequência central igual a da onda portadora. O índice de modulação é variado continuamente, modificando assim a quantidade de parciais do espectro.

Utilizando os dois procedimentos de manipulação da Síntese FM, obtém-se o resultado de uma contínua transformação espectral

2 Processo de síntese não linear onde uma onda portadora é modulada pela frequência e amplitude da onda moduladora. Por meio desse processo, é possível manipular a riqueza de um espectro sonoro, bem como suas qualidades harmônicas. Para um entendimento mais amplo do processo de síntese FM, Cf. Chowning (1973).

3 O sintetizador *Helm* também utiliza modulação de fase em conjunto com a modulação FM. Para uma descrição detalhada da técnica de síntese utilizada e de seus parâmetros, ver Antunes (2018, p. 72-78).

4 O índice de modulação define a quantidade de modulação que a onda moduladora aplicará na onda portadora. No espectro que resulta da síntese, significa que quanto maior o índice de modulação, maior o número de parciais no espectro.

e de intensidade. A segunda, em virtude também do mecanismo de cancelamento produzido pelos batimentos, que alternam interferências que aumentam e diminuem a intensidade do sinal. Essas duas transformações somadas visam à reprodução dos fenômenos perceptivos de flutuação de amplitude destacados por Vassilakis (2001). Cada seção da peça tem uma ou mais frequências centrais extraídas de uma escala do *temperamento por igual* em 12 partes (Quadro 1). A peça é planejada em 11 seções, cada qual com sua frequência central, tal como expostas em valores arredondados no Quadro 1. A peça inicia com relações harmônicas entre essas frequências centrais, que caminham no decorrer da peça para relações de inarmonicidade.⁵ O resultado sonoro final é uma crescente evolução de características perceptivas de densidade, relacionada com a quantidade de parciais e energia do espectro, além do seu registro e *rugosidade*, a partir das interações entre os parciais do espectro.

Quadro 1 – Frequências centrais da síntese FM em *Asperezas*

Seção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tempo da peça	0' a 1'	1' a 2'	2' a 3'	3' a 4'	4' a 4'49"	4'49" a 5'45"	5'45" a 6'36"	6'36" a 7'30"	7'30" a 8'26"	8'26" a 9'16"	9'16" a 10'16"
Frequências centrais em HZ	65	130	261	523	523	523	523	293	293	277	130
						1318	1318	784			
					784	784	784	523	523	293	
							277	277	277	261	
	Harmonicidade						Inarmonicidade			Harm.	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Descrição de imagem: O quadro exhibe na linha 3 as frequências centrais (arredondadas) da síntese FM de *Asperezas* para cada seção da composição (linha 1) e de acordo com o respectivo tempo inicial e final (linha 2). Além disso, indica na última linha os

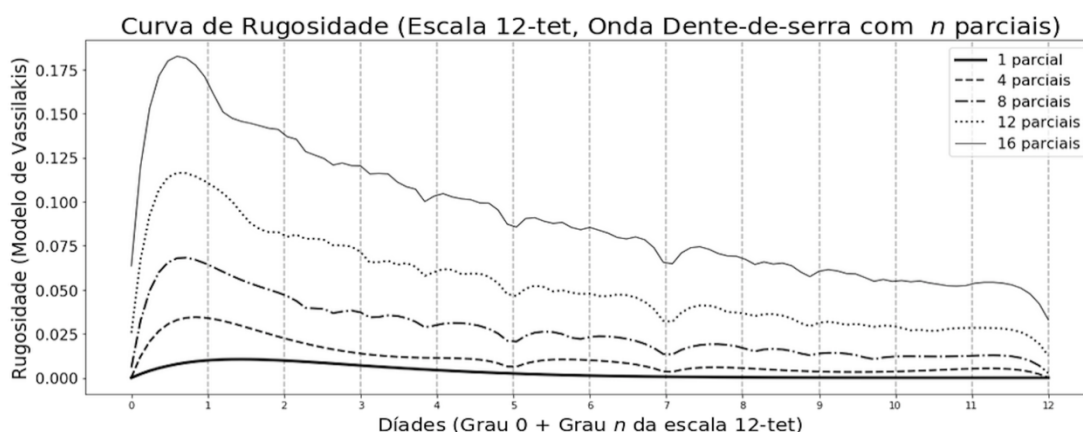
⁵ Entende-se por inarmônicos intervalos cuja razão não possui uma proporção de múltiplos inteiros.

momentos em que as frequências centrais estão em uma relação de harmonicidade ou inarmonicidade.

A fim de ilustrar as propriedades do material composicional de *Asperezas*, apresentamos na Figura 1 uma curva que estima a sensação de *rugosidade* esperada, com 1, 4, 8, 12 e 16 componentes espectrais de uma onda dente-de-serra.⁶ Essa curva foi gerada a partir do modelo de Vassilakis (2001). A *rugosidade* é plotada em função das díades da escala 12-tet,⁷ que são formadas pelo grau 0 mais o grau n da escala.

Nessa figura conseguimos visualizar como a *rugosidade* estimada muda conforme a quantidade de parciais do espectro. Com um parcial existe apenas um pequeno relevo na díade 0-1, com um decaimento que chega a 0 na díade 0-5 e permanece assim até a díade 0-12. De outra maneira, com 16 parciais há um perfil de *rugosidade* mais complexo e com níveis muito mais altos. Observamos também que há um decaimento da *rugosidade* proporcional à distância das fundamentais de uma díade. Vide mais informações sobre a curva de *rugosidade* em Antunes (2018), Sethares (1998) e Vassilakis (2001).

Figura 1 - *Rugosidade* em função de uma escala 12-tet, para um espectro de uma onda dente-de-serra com n parciais.



Fonte: Elaborada pelos autores.

⁶ Que possui parciais harmônicos com amplitudes de 1/parcial.

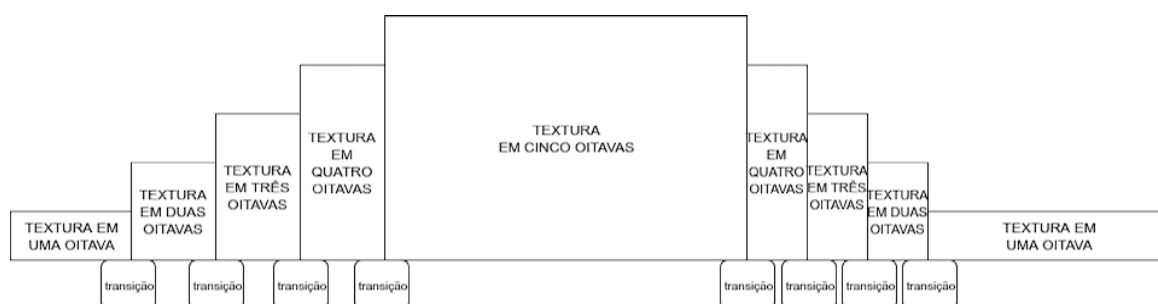
⁷ Do inglês, tempered equal tone.

Descrição da imagem: Curvas de *rugosidade* para uma onda dente de serra com 1, 4, 8, 12 e 16 parciais plotadas em função de intervalos da escala 12-tet. O eixo vertical representa o nível de *rugosidade* e o horizontal os intervalos da escala 12-tet.

Utopia (2018)

Em *Utopia* (2018), de Tales Botechia, o material harmônico da peça foi criado a partir do *temperamento por igual* em 53 partes da oitava. A forma da peça foi construída como um arco, cujo elemento que se desenvolve de modo mais proeminente é uma textura constituída de 7 alturas da escala temperada em 53 partes escolhidas aleatoriamente pelo computador. Seguindo o arco, essa textura aumenta em intensidade e em seu âmbito de oitavas, expandindo-se até uma distribuição de 5 oitavas (vide Fig. 2). As transições de expansão e contração dessa textura são marcadas por uma unidade sonora em que se pode perceber a sequência de dois acordes, sendo o primeiro em *fade in* e o seguinte em *fade out*.

Figura 2 - Esquema geral da composição de *Utopia*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: A série de retângulos representa a extensão da textura em número de oitavas (eixo vertical) em função de sua duração no tempo (eixo horizontal). Os quadrados abaixo da figura representam os momentos de transição da composição.

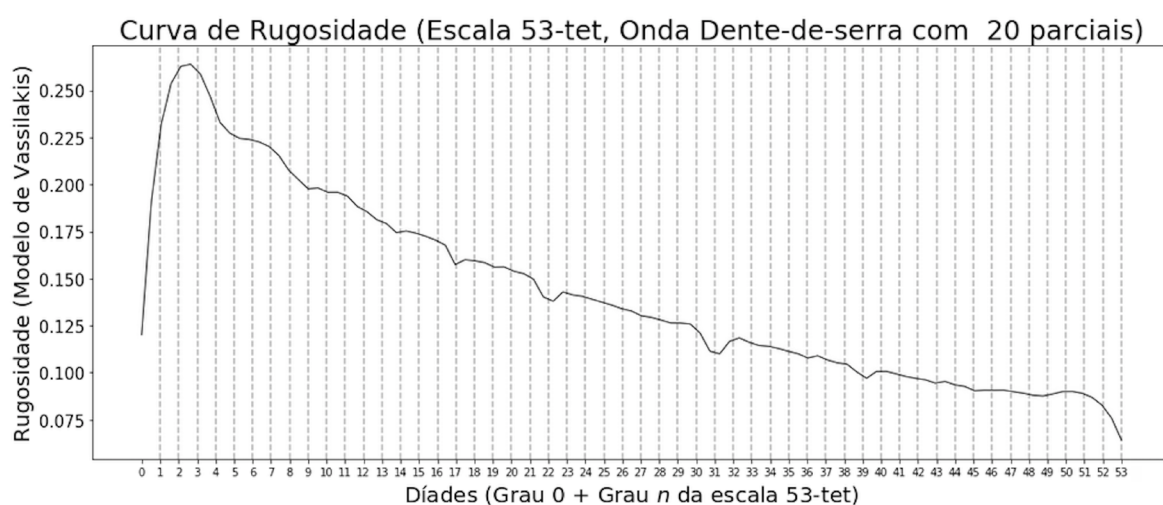
A respeito da textura principal da peça, cada uma de suas 7 alturas é elaborada utilizando um modelo de síntese subtrativa

com ruído rosa⁸ com uma fundamental e outros 3 parciais de oitava. Esses parciais tornam-se proporcionalmente mais audíveis de acordo com a intensidade enviada ao sintetizador. Tons puros alternam rapidamente e aleatoriamente entre os primeiros 16 parciais e com desvios de 7 ou 8 Hz em relação às frequências da série harmônica. Essas 7 alturas, por sua vez, criam micro arcos de intensidade em *fade in/out*, cada uma com uma duração própria, gerando uma densidade sempre mutável no resultado final da textura (vide Fig. 2, acima).

A unidade sonora que indica a transição é feita por uma passagem entre ruído rosa filtrado e ondas dente-de-serra. Outras sínteses, com sons de ataques mais pontuais, também permeiam a peça, sempre explorando a divisão escalar de 53 partes por oitava.

Com o objetivo de criar um paralelo com o material musical de *Asperezas*, exibimos na Figura 3 o nível de *rugosidade* para uma escala que divide a oitava em 53 partes iguais. A *rugosidade* é plotada em função das díades da escala 53-tet, que são formadas pelo grau 0 mais o grau *n* da escala:

Figura 3 - Rugosidade em função de uma escala 53-tet, para um espectro de uma onda dente-de-serra com 20 parciais.



Fonte: Elaborada pelos autores.

8 Puckette (2007, p. 250, grifo nosso) define a síntese subtrativa como "a técnica de usar filtros para modelar o envelope espectral de um som, formando outro som, geralmente preservando qualidades do som original tais quais altura, roughness (rugosidade), noisiness (nível de ruído), ou graniness (granularidade)".

Descrição da imagem: Curvas de *rugosidade* para uma onda dente de serra com 20 parciais plotadas em função de intervalos da escala 53-tet. O eixo vertical representa o nível de *rugosidade* e o horizontal os intervalos da escala 12-tet.

A Figura 3 nos revela que, quando comparamos uma escala 53-tet com uma escala 12-tet, os tamanhos dos intervalos resultam em uma maior variedade de níveis de *rugosidade* e a maior possibilidade de sua manipulação. Por exemplo, temos grandes níveis de *rugosidade* nos passos de 1 a 9 da escala. Também possuímos intervalos bem alinhados com as mínimas de *rugosidade* do espectro, como nos graus 17, 22, 31 e 39 da escala.

Metodologia da análise

Estudos sobre a percepção apresentam a possibilidade de que a mesma possa ser observada a partir do estímulo físico e pela resposta do nosso aparato fisiológico (FASTL; ZWICKER, 2007). Dado que já destacamos o diálogo que as composições aqui estudadas possuem com a psicoacústica, a nossa metodologia analítica tem por objetivo entender como o material sonoro das duas obras aqui analisadas exploram esses fenômenos nos seus desenvolvimentos musicais específicos. Buscamos também analisar como essas propriedades de modelos psicoacústicos fomentam a emergência das respectivas formas musicais. Para tanto, utilizamos três descritores: o de fluxo espectral, pertencente à biblioteca Mazurka (CHARM, 2020); o de coeficientes barks, a partir do modelo de bandas críticas de Zwicker (ZWICKER, E.; FLOTTORP; STEVENS, 1957); e o de sharpness, sendo estes dois últimos pertencentes a biblioteca Libxtrac (BULLOCK, 2007) e cuja fundamentação teórica será detalhada brevemente a seguir.

Fluxo espectral

Dentre os parâmetros perceptuais mais relevantes presentes na dinâmica do envelope espectral está a variação da amplitude de suas componentes. Vassilakis (2001) dedicou um extenso trabalho buscando evidenciar como a flutuação da amplitude das parciais do espectro é explorada musicalmente em diversos contextos culturais, como nos cantos rurais bósnios denominados *ganga* e na execução de instrumentos do oriente médio como o *mijwis*⁹ (VASSILAKIS, 2001, p. 8). O que esse estudo evidencia é que tais fenômenos são condicionados pelas características dos estímulos físicos junto com a resposta neurofisiológica do nosso sistema auditivo (VASSILAKIS, 2001; ZWICKER, E.; FLOTTORP; STEVENS, 1957; FASTL; ZWICKER, 2007).

No contexto da música eletroacústica, a flutuação de amplitude das componentes do espectro sonoro é amplamente explorada e pode ser consequência do uso de diversas técnicas de tratamento sonoro. Entendemos que os fenômenos de flutuação de amplitude ocorrem em uma escala microtemporal que, segundo Roads (2001, p. 4), se referem a “partículas de som em uma escala de tempo que se estende até o limite de percepção auditiva (medido em milésimos de segundo ou milissegundos)”.

Deveras, esses fenômenos de flutuação foram explorados pelos compositores nas duas peças em análise. Para tanto, utilizaram a interação de intervalos musicais atrelados a escalas do *temperamento por igual* e, por isso, utilizamos um descritor de áudio que quantifique tal flutuação. Assim, introduzimos o descritor de *fluxo espectral*, que é definido como a distância Euclidiana (norma l2) entre as magnitudes das componentes espectrais de 2 janelas de análises sucessivas (CHARM, 2020), que pode ser representado pela Equação 1:

⁹ Uma flauta de cano duplo que permite a execução de duas alturas simultaneamente.

$$F = \sum_{k=1}^K |M_{kn} - M_{kn-1}|^2 \quad (1)$$

onde $n=1,2,3...N$ é o índice da janela de análise e a magnitude do bin da fft. Sendo assim, é possível a partir da Equação 1 medir o nível de flutuação da amplitude do espectro, calculando a diferença das magnitudes entre duas janelas de análise consecutivas. Desse modo, quanto maior a variação nas magnitudes do espectro entre duas janelas consecutivas, maior o *fluxo*. Na nossa análise, a variação das magnitudes espectrais está relacionada à percepção das flutuações de amplitude que utilizamos no processo composicional. O nosso objetivo é descrever eventos microtemporais.

Modelo de bandas críticas de Zwicker

Diversos modelos têm por objetivo a simulação do comportamento do ouvido interno utilizando um conjunto de filtros auditivos. É o caso do modelo *MFCC* (PEETERS, 2004) e do descritor que utilizamos no nosso estudo, chamados de *coeficientes bark* (BULLOCK, 2008, p. 76). A medida de um *bark* equivale a unidade mínima do modelo de *bandas críticas* que representa o espectro de frequências audíveis baseada nas divisões da membrana basilar e em dados experimentais formalizados por ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS (1957). Segundo o prognóstico de modelos psicoacústicos, quanto mais frequências estimulam um determinado ponto da membrana basilar, menor é a nossa capacidade de distinguir tais frequências. Isso tem como consequência fenômenos de mascaramento, nos quais frequência(s) deixam de ser ouvidas por conta da composição espectral, e do já citado fenômeno da *rugosidade*. O descritor de *coeficientes bark* possibilita a observação da quantidade de energia em cada uma das *bandas críticas*.

Utilizando as ideias apresentadas na sessão sobre textura e massa sonora, entendemos que os *coeficientes bark* podem representar o comportamento textural a partir da quantidade de energia nas *bandas críticas*. Assim, fornece uma maneira de descrever

a saturação gerada no aparato perceptivo e a noção de *permeabilidade*, já discutidas acima.

O modelo de *bandas críticas* de Zwicker prevê uma modelização dos filtros auditivos abrangendo frequências até 15.5 kHz. Tomando como referência o teorema de *Nyquist*, isso significa que o modelo permite a análise de áudio com a taxa de amostragem máxima de 31 kHz (SMITH; ABEL, 1999). A partir dessa constatação, apresentamos uma função que permite uma conversão aproximada da escala *bark* em Hz com o objetivo de extrapolar o modelo até 27 kHz, permitindo a representação do áudio até uma taxa de amostragem de 54 kHz (BULLOCK, 2008, p. 76). Essa aproximação é dada pela Equação 2:

$$B = 13 \tan^{-1}(7.6 * 10^{-4} f) + 3.5 \tan^{-1}\left(\frac{f}{7500}\right)^2 (2)$$

Essa equação foi utilizada por Bullock (2008, p. 76) em sua implementação na *Libxtract* para definir as frequências limites de cada banda *bark*. Utiliza assim as frequências: 0, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4400, 5300, 6400, 7700, 9500, 12000, 15500, 20500, 27000 para os *barks* de 0 a 25, totalizando assim 26 *barks* (BULLOCK, 2020).

Na nossa análise, essa escala é utilizada para indicar a distribuição de energia por bandas da escala *bark*, geradas pelos processos composicionais desenvolvidos pelos autores. O objetivo é estimar a distribuição em bandas de frequência dos componentes texturais das duas obras.

Modelo de *sharpness*

Segundo Fastl e Zwicker (2007), diversos parâmetros psicoacústicos são úteis para a investigação da percepção de fenômenos sonoros. Esses parâmetros são relevantes, pois temos como muito bem definidas e delimitadas as sensações de altura e intensidade

de um som, e o que escapa a esses dois parâmetros, frequentemente atribuímos a um lugar comum que chamamos de timbre (FASTL; ZWICKER, 2007, p. 239). Caberia, portanto, à psicoacústica investigar diferentes dimensões presentes na percepção do que chamamos genericamente de timbre.

Um desses parâmetros é conhecido como *sharpness* e, segundo os autores, está relacionado à sensação de densidade de um som (FASTL; ZWICKER, 2007, p. 239). A noção de *sharpness* pode ser estudada de maneira separada e demonstra uma consistência quando submetida a estudos experimentais com um grande número de voluntários.

O já apresentado modelo de *bandas críticas* é também utilizado no descritor de *sharpness*. O modelo preconiza que, quanto maior a banda de ruído e quanto maior a taxa *bark* (B), maior o *sharpness*.

A Equação 3, extraída de Bullock (2007, p. 69), representa o modelo de *sharpness*. A unidade do modelo de *sharpness* é *acum*. Segundo Fastl e Zwicker (2007, p. 242), 1 *acum* representa um som de referência, que é um ruído de banda estreita do tamanho de uma banda crítica ($B = 8.5$), com frequência central em 1 kHz e intensidade de 60 dB. A dependência de *sharpness* do modelo de *bandas críticas* é dada pelo fator $g(B)$ e pode ser calculado de acordo com a Equação 4. Podemos notar que nela estão contidos o cálculo de *loudness* por bark $N'(B)$ (Eq. 5) e o *loudness* total N , que é uma somatória do *loudness* de todas as *bandas críticas*. A equação é multiplicada por uma constante 0.11 para manter a normalização de 1 *acum* para o já citado som de referência.

$$S = 0.11 \frac{\sum_{B=1}^{nband} B \cdot g(B) \cdot N'(B)}{N} \quad (3)$$

onde $g(B)$ é dado por:

$$\begin{aligned} &se \ B < 15, g(B) = 1 \\ &se \ B \geq 15, g(B) = 0.066 * \exp(0.171B) \end{aligned} \quad (4)$$

e $N'(B)$ é dado por:

$$N'(B) = E(B)^{0.23} \quad (5)$$

onde E representa a somatória das magnitudes de todos os *bins* de uma determinada banda B .

Na nossa análise, o *sharpness* é utilizado para descrever a densidade textural das obras analisadas. Sintetizamos no Quadro 2 o uso dos descritores de áudio discutidos nesta sessão.

Quadro 2 – Descritores de áudio, suas medidas e funções analíticas.

Descritor	O que o modelo representa?	Qual a sua função na análise?
<i>Fluxo Espectral</i>	Variação da magnitude das componentes espectrais entre duas janelas de análise	Descrever eventos microtemporais
<i>Coefficientes Bark</i>	Curva Espectral utilizando a escala <i>bark</i> que modela o comportamento da membrana basilar	Estimar o comportamento textural no plano frequencial
<i>Sharpness</i>	Medida da percepção da densidade sonora	Descrever a densidade textural da peça

Fonte: Elaborado pelos autores.

Descrição de imagem: O quadro oferece um resumo dos descritores utilizados em nossa metodologia analítica. Na coluna 1, exibimos o nome do descritor; na coluna 2, a sua medida; e na coluna 3, sua função em nossa análise.

Resultados das análises

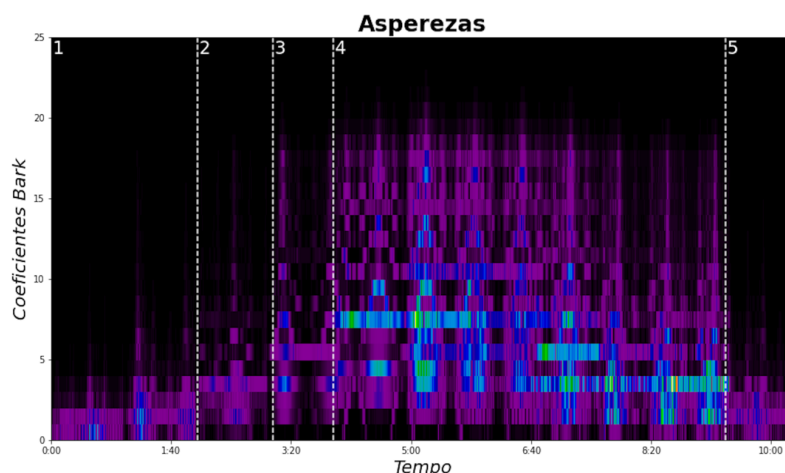
Nesta seção apresentamos os resultados de nossas análises, os quais são baseados nos dados extraídos com os três descritores de áudio mencionados anteriormente. Os dados foram colhidos utilizando os descritores de áudio do *Sonic Visualiser* e, posteriormente, foram plotados utilizando a biblioteca *Matplotlib* (HUNTER *et al.*, 2020) do *Python*. Segue a segmentação da obra utilizando o

comportamento das curvas dos descritores como meio de criar seções a partir da distinção do comportamento espectral nas duas obras. Finalmente, fazemos as análises comparativas tomando por base os gráficos com os dados dos descritores.

Extração de características

A Figura 4 apresenta o descritor *coeficientes barks* e a Figura 5 os descritores de *fluxo espectral* e *sharpness* de *Asperezas*, ambas acompanhadas da segmentação (linhas pontilhadas).

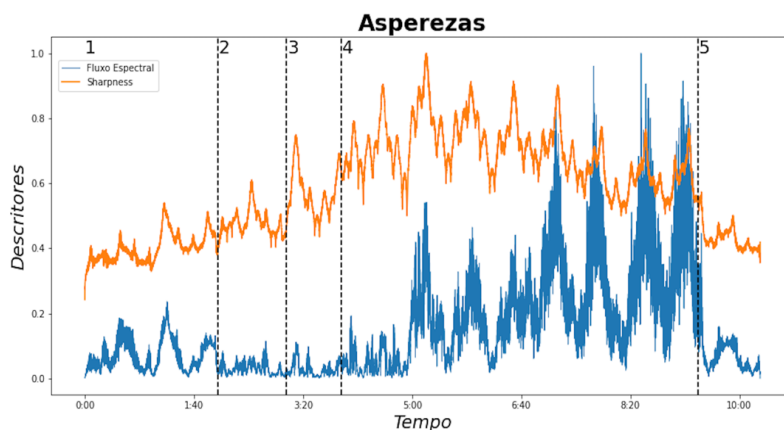
Figura 4 - Descritor de coeficientes *bark* da peça *Asperezas*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: No eixo vertical os 26 barks e no eixo horizontal o tempo da composição. As linhas tracejadas verticais representam a segmentação. A temperatura da cor representa a intensidade do som.

Figura 5 - Descritores da peça *Asperezas*.

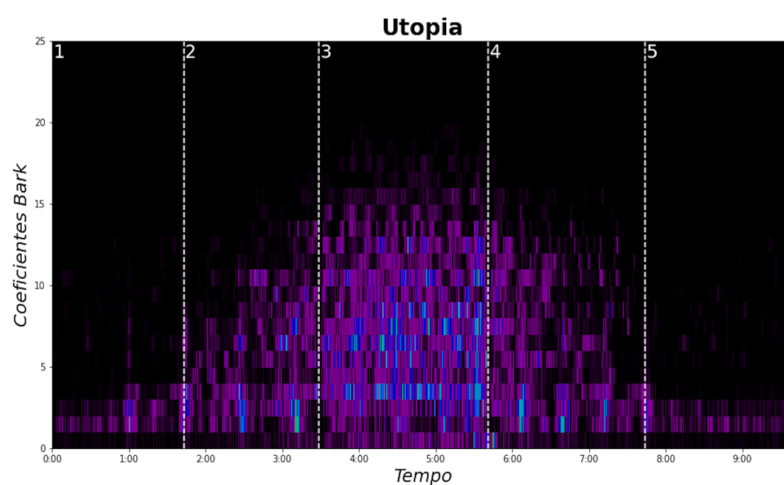


Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: Em azul, o *fluxo espectral* e em laranja o *sharpness*, ambos normalizados em 1, em função do tempo da composição. As linhas tracejadas verticais representam a segmentação.

A Figura 6 apresenta o descritor *coeficientes barks* e a Figura 7 os descritores de *fluxo espectral* e *sharpness* de *Utopia*, ambas acompanhadas da segmentação com as linhas pontilhadas.

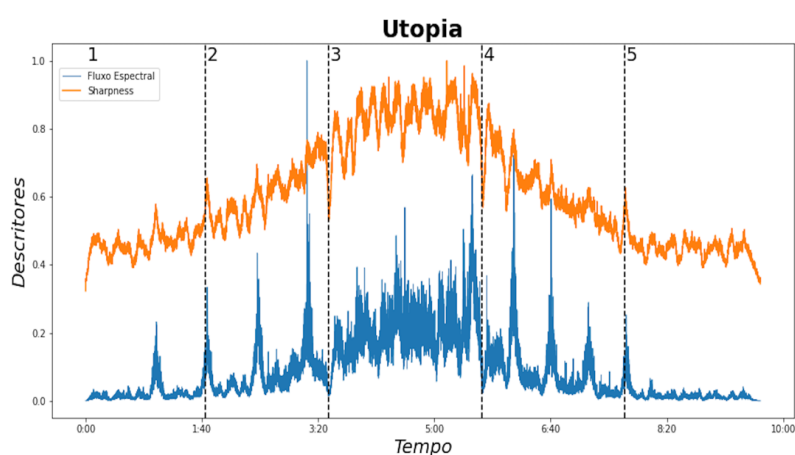
Figura 6 - Descritor de coeficientes *bark* da peça *Utopia*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: No eixo vertical os 26 barks e no eixo horizontal o tempo da composição. As linhas tracejadas verticais representam a segmentação. A temperatura da cor representa a intensidade do som.

Figura 7 - Descritores da peça *Asperezas*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: Em azul, o *fluxo espectral* e em laranja o *sharpness*, ambos normalizados em 1, em função do tempo da composição. As linhas tracejadas verticais representam a segmentação.

Com o objetivo de realizar uma análise detalhada das duas peças, apresentaremos nosso estudo por tópicos, sendo eles: a) segmentação das peças, b) análise do *fluxo espectral*, c) análise dos *coeficientes bark*, d) análise do *sharpness*.

Segmentação

Para realizar uma segmentação da peça *Asperezas*, observamos a variação temporal dos *coeficientes bark* no tempo. Na primeira seção, que ocorre de 0'a 2'22", observamos uma superconcentração de energia no grave, principalmente na região do *bark* 2. No segmento 2, de 2'02" a 3'05", a maior energia está no *bark* 4,

e passa para o *bark* 6 no segmento 3, que ocorre de 3'05" a 3'55". O segmento 4, que dura de 3'55" a 9'22", revela a maior distribuição de energia em quase todos os *barks* até 22. Já no segmento 5, de 9'22" a 10'19", a energia se dissipa, tendo como resultado uma retomada de um nível de energia semelhante à do segmento 1. Os tempos iniciais de cada seção são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo inicial de cada segmento em *Asperezas*.

Segmento	1	2	3	4	5
Tempo Inicial	0"	2'02"	3'05"	3'55"	9'22"

Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição de imagem: A Tabela 1 indica o tempo inicial de cada segmento em *Asperezas*, onde a primeira linha representa o segmento e a segunda linha o respectivo tempo inicial.

A segmentação de *Utopia* também teve como referência a distribuição de energia nos *coeficientes bark* e resultou em 5 seções, vide Tabela 2. O primeiro segmento, que ocorre de 0' a 1'43", mantém-se mais estável nos *barks* de 1 a 4 e com pouca energia. No segmento seguinte, de 1'43" a 3'29", podemos notar uma distribuição crescente e com maior concentração de energia dos *barks*. A princípio, esse segmento tem uma distribuição entre os *barks* 1 a 5, alcançando ao final uma distribuição até o *bark* 16. Entre 3'29" e 5'41", a distribuição de *barks* permanece relativamente constante, com sua energia ainda mais intensa nos *barks* de 1 a 16. Já no quarto segmento, o comportamento decrescente da energia nos *barks* acontece de 5'41" a 7'44". Começando com a distribuição entre os *barks* de 1 a 16, esse segmento tem uma perda de energia e reduz sua distribuição aos *barks* de 1 a 4. O quinto e último segmento, de 7'44" a 9'40", tem um comportamento similar ao primeiro segmento, mantendo uma distribuição entre os *barks* de 1 a 4 e com energia de baixa intensidade.

Tabela 2 – Tempo inicial de cada segmento em *Utopia*.

Segmento	1	2	3	4	5
Tempo Inicial	0"	1'43"	3'29"	5'41"	7'44"

Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição de imagem: a tabela 2 indica o tempo inicial de cada segmento em *Utopia*, onde a primeira linha representa o segmento e a segunda linha o respectivo tempo inicial.

Análise do *Fluxo espectral*

A observação do descritor de *fluxo espectral* é reveladora da percepção da forma da peça *Asperezas*, dado que a obra é estruturada em variações do nível de *rugosidade*, por meio da manipulação da síntese FM, como descrito anteriormente. Ao observar a grande quantidade de picos e vales do gráfico do *fluxo espectral*, percebemos sua constante movimentação durante a peça. Ou seja, a microestrutura da peça é formada por oscilações constantes do *fluxo espectral*. Damos destaque ao segmento 4, pois nessa seção há o maior pico de *fluxo espectral*, assim como a maior oscilação desses níveis. Entendemos, a partir desses pontos, que a *rugosidade* ganha intensidade e protagonismo no decorrer da peça, gerando o que pode ser entendido como clímax da obra. Também é interessante notar que o uso de um grande nível de energia em *barks* graves nos segmentos 1 e 5 geram níveis maiores do *fluxo espectral* que nos segmentos 2 e 3.

Em *Utopia*, o gráfico do descritor de *fluxo espectral* coincide com a forma em arco da peça. Ele revela picos de *fluxo espectral* que são propostos pelo compositor como pontos de transição nos diversos materiais da peça, como descrito anteriormente. Esses picos acontecem devido à qualidade timbrística do sintetizador que, nesses momentos, utiliza um efeito de *chorus* que causa uma modulação nas parciais do espectro e amplia proporcionalmente a quantidade de *rugosidade* em relação à variação de intensidade do sinal. Vale ressaltar também que esses picos passam a descrever

curvas mais pontiagudas à medida em que a intensidade aumenta, como vemos no final do segmento 2. Além disso, as pequenas oscilações de curvas menos acentuadas em outros momentos se relacionam às variações da densidade da textura durante a peça.

Análise dos Coeficientes *Bark*

Observando os *coeficientes bark* da peça *Asperezas*, percebemos que há uma grande quantidade de energia nas 5 primeiras bandas no início e no final da peça. É possível notar que há um trânsito contínuo de energia entre *barks*, que se deve às mudanças espectrais e de altura consequentes da síntese FM. Assim, o descritor ressalta que o desenvolvimento espectral ocorre sem rupturas ou quebras abruptas. No centro há uma maior concentração de energia em regiões específicas, com maior energia em pontos entre 2 e 22 *barks*. Destacamos que os segmentos de 2 a 4 reservam uma particularidade: é possível observar que a energia em alguns *barks* é quase constante, enquanto uma massa de frequências se movimenta em um segundo plano. Relacionando este gráfico com a escuta da peça, observamos que neste trecho ocorre uma sobreposição de duas texturas: em primeiro plano, alturas definidas; e em segundo plano, uma massa sonora com altos níveis de fusão.

Na peça *Utopia* há uma relação clara entre a distribuição de oitavas criada pela textura e os coeficientes bark. Nos momentos de menor distribuição de oitavas, nos segmentos 1 e 5, os *barks* 2 e 3 são os que contêm mais energia; já no segmento 3, o momento com maior expansão da textura, há um grande acúmulo de energia nos *barks* de 1 a 16, refletindo a expansão do campo textural e também um aumento de intensidade da energia espectral.

Análise do *Sharpness*

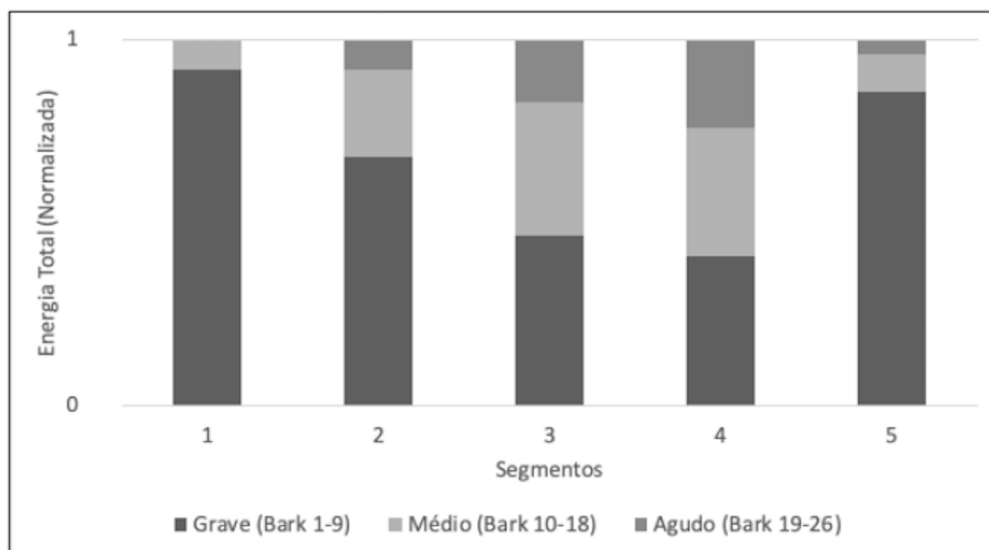
Asperezas exhibe os valores de *sharpness* em um perfil em arco, com maior energia no segmento 4. A ideia de arco é reforçada pelos níveis semelhantes de *sharpness* nos segmentos 1 e 5. A peça exhibe padrões simétricos na microforma, observados a partir dos perfis locais de *sharpness* em pequenos espaços de tempo. Esses padrões também exibem uma variação relativamente grande em seus valores. Além disso, quanto maior o nível de *sharpness* na peça, maior a extensão da variação.

Utopia também exhibe um perfil em arco, mas com o eixo de simetria mais próximo ao centro da peça, no segmento 3. Há um perfil complexo do *sharpness* no tempo, mas que não demonstra grandes variações de nível em um curto espaço de tempo. Picos de *sharpness* ocorrem em momentos estruturais da peça, coincidindo com picos de *fluxo espectral*. Do mesmo modo, vales de *sharpness* antecipam a passagem entre segmentos, como observamos antes dos segmentos 3 e 4.

Discussão: análise comparativa

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre as duas peças, nós integramos os dados do descritor *coeficientes bark* separando em 3 bandas, sendo elas: grave (*barks* de 0 a 8); médio (*barks* de 9 a 18); e agudo (*barks* de 19 a 25). A integração foi feita tendo como referência a segmentação da peça, já descrita anteriormente.

Figura 8 - Descritor de bandas *bark* de *Asperezas*.

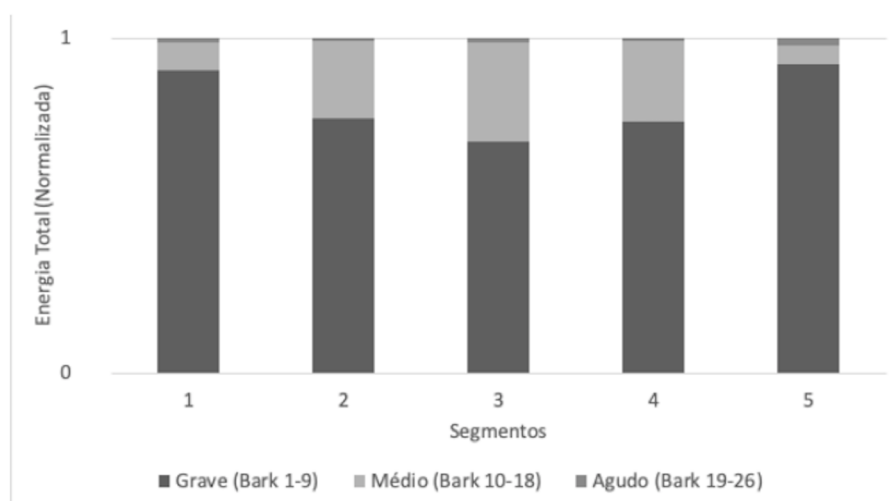


Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: O eixo horizontal representa os segmentos da peça e o eixo vertical a energia normalizada das bandas.

Ao observarmos a Figura 8, notamos que a peça *Asperezas* tem uma grande quantidade de energia na banda grave, com pico nos segmentos 1 e 5. No quarto segmento, notamos um maior equilíbrio entre as bandas, que é construído progressivamente a partir dos segmentos 2 e 3.

Figura 9 - Descritor de bandas bark de *Utopia*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Descrição da imagem: O eixo horizontal representa os segmentos da peça e o eixo vertical a energia normalizada das bandas.

Observando a Figura 9, notamos proporcionalmente uma ampla presença da banda grave na peça *Utopia*, com níveis mais altos nos segmentos 1 e 5, e menor nível no segmento 3. A banda média apresenta uma expansão de 1 a 3, com retração nas bandas 4 e 5. Quase não há energia nas bandas agudas.

Ambas as peças demonstram, portanto, uma larga exploração das regiões grave e média em suas texturas. No entanto, *Asperezas* apresenta uma crescente exploração dos *barks* agudos, com pico no segmento 4, enquanto *Utopia* quase não explora a região aguda em sua textura.

Todos os gráficos apontam para uma forma em arco das peças, tendo *Utopia* uma simetria que tende ao centro da peça (segmento 3), enquanto *Asperezas* reserva sua maior energia do meio para frente, no segmento 4. Os valores de *sharpness* e *fluxo espectral* de *Utopia* ocupam uma extensão menor de níveis em relação a *Asperezas*. Em *Utopia*, as mudanças de *sharpness* na microforma não apresentam padrões em seu comportamento, ao contrário de *Asperezas*.

Enquanto os níveis de *fluxo espectral* de *Asperezas* demonstram uma variação grande entre picos e vales reiterados durante toda a peça, *Utopia* realiza um uso mais pontual de grandes níveis de *fluxo espectral*, criando saliências em alguns momentos da obra. Entendemos assim que o *fluxo espectral* desenvolve um papel mais constante durante o desenvolvimento de *Asperezas*, enquanto em *Utopia* atua de maneira mais pontual, como articuladora da forma musical.

Conclusão

Podemos notar em ambas as peças que, apesar das diferenças de estruturação dos materiais sonoros, seus desenvolvimentos

ocorrem através de evoluções timbrísticas, tendo como consequência a percepção de adensamento e rarefação textural, reveladas pelo descritor *coeficientes bark*. Além disso, é possível perceber que a estruturação no nível microtemporal de seus sons reflete a macroforma das peças. Em *Asperezas*, a percepção de *rugosidade* e intensidade planejadas a partir da síntese FM podem ser vistas também na forma da peça. Da mesma maneira, as evoluções de *fade in/ fade out* presentes na textura base de *Utopia* e a sua distribuição de oitavas se relacionam com a forma em arco da peça, além da aparição de outros sons mais pontuais próximos do segmento 3.

Destacamos que, embora presente em ambas as peças, os fenômenos de flutuação de amplitude aferidos pelo *fluxo spectral* são utilizados de maneiras distintas. Em *Asperezas*, a textura de toda a peça é constituída e permeada por fenômenos de flutuação. De outra maneira, *Utopia* exhibe um uso pontual desse recurso, como um demarcador de fronteiras entre segmentos da peça.

Pontuamos também que a noção de *emergência* é pertinente na observação das peças aqui estudadas, pois a ênfase em fenômenos de flutuação de amplitude pode ser associada à ideia de *emergência sonológica* apresentada em entrevista por Di Scipio (ANDERSON, 2005), dado que esses fenômenos podem se manifestar de maneiras distintas a cada execução da obra. Ressaltamos isso porque fenômenos de flutuação de amplitude se comportam de maneira diferente a partir das condições de execução da peça (sala, sistema de difusão, posição do ouvinte etc.), não cabendo à análise musical definir como isso será recebido pelo ouvinte.

Notamos ainda que a noção de textura percebida nas peças está associada à de *permeabilidade*, mencionada por Ligeti (LIGETI, 2010), ou seja: de um som cujo timbre emerge das relações de fusão de diferentes timbres concomitantes, estimulados neste contexto pelos agregados sonoros das escalas do *temperamento por igual* e com o objetivo de mascarar a percepção de altura. Os descritores auxiliam assim na representação gráfica dos momentos das peças em que a fusão desses timbres é percebida.

É importante ressaltar, portanto, o papel que os descritores de áudio podem desempenhar na segmentação de obras que atuam dentro do contexto da música de massas sonoras e que se apoiam nas possibilidades de fusão, segregação e transformação do timbre no seu discurso musical. Como vimos nas análises, os descritores fornecem informação visual que permite observar de maneira mais minuciosa tais transformações. Assim, conseguimos proceder à segmentação das obras aqui estudadas, abrindo caminho para a apreensão da forma musical.

Notamos a partir da simetria da curva de *sharpness* um potencial para detecção de padrões no contexto da música textural. Desse modo, estudos futuros podem realizar testes para verificar a pertinência do uso deste descritor para a análise de padrões *emergentes* da textura musical.

Trabalhos futuros poderão buscar compreender como essa abordagem analítica fomenta novos processos composicionais. Assim, podemos concluir que os métodos de síntese e geração de material sonoro ou mesmo o planejamento da forma de uma composição podem partir da exploração de parâmetros psicoacústicos, como aqui apresentado. Ou seja, os fenômenos psicoacústicos associados ao modelo de *bandas críticas* têm a capacidade de contribuir com o campo da composição, baseada na interação do som e suas consequências no seu discurso musical com um viés perceptivo. Por fim, entendemos que procedimentos de análise similares aos aqui apresentados também podem ser usados como ponto de partida em trabalhos experimentais na área das ciências cognitivas.

Referências

ANDERSON, C. Dynamic networks of sonic interactions: An interview with Agostino Di Scipio. **Computer Music Journal**, Cambridge, v. 29, n. 3, p. 11–28, 2005.

ANTUNES, M. **Redução da dissonância sensorial em uma escala temperada utilizando timbres inarmônicos**: uma abordagem experimental e aplicações artísticas. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado em Música) – Escola de Comunicação e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

ANTUNES, M.; FARIA, R. R. A. Duas propostas de adaptação de escalas do temperamento por igual utilizando o teclado de um controlador MIDI. *In*: ENCONTRO INTERNACIONAL DE TEORIA E ANÁLISE MUSICAL, 4., 2017, São Paulo. **Anais** [...], São Paulo: USP [s.n.], 2017. p. 397–406.

ANTUNES, Micael. **Asperezas**. Peça Acusmática. São Paulo: 2018. Disponível em: <https://soundcloud.com/micaelantunes/asperezas-binaural>. Acesso em: 15 de mar. 2021.

BARBOUR, J. M. **Tuning and temperament**: A historical survey. New York, N.Y.: W. W. Norton & Company, 2004.

BERRY, W. **Structural functions in music**. New York, N.Y.: Dover Publications Inc., 1987.

BOTECHIA, Tales. **Utopia**. Peça Acusmática. Campinas: 2018. Disponível em: <https://soundcloud.com/tales-botechia/utopia-revisada-2018>. Acesso em: 15 de mar. 2021.

BULLOCK, J. **Implementing audio feature extraction in live electronic music**. 2008. 244 f. Tese (Doutorado em Música) – Birmingham Conservatoire, Birmingham City University, Birmingham, 2008.

BULLOCK, J. **jamiebullock/LibXtract**. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://github.com/jamiebullock/LibXtract>. Acesso em: 9 dez. 2020.

BULLOCK, J. Libxtract: A lightweight library for audio feature extraction. *In*: INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE 2007, 2007, København. **Proceedings of the International Computer Music Conference 2007**, København: Digital Arts Forum, 2007. p. 4.

CHARM. **Manpage for SV Mazurka Plugin**: MzSpectralFlux. Disponível em: <http://www.mazurka.org.uk/software/sv/plugin/MzSpectralFlux/>. Acesso em: 9 dez. 2020.

CHOWNING, J. M. The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation. **Journal of the audio engineering society**, Nova York, v. 21, n. 7, p. 526–534, 1973.

FASTL, H.; ZWICKER, E. **Psychoacoustics: facts and models**. 3. ed. Berlin ; New York: Springer, 2007.

FERRAZ, S. Análise e Percepção Textural: Peça VII, de 10 peças para Gyorgy Ligeti. **Cadernos de Estudos**, São Paulo: Através, p. 68–79, 1990.

HUNTER, J. *et al.* **Matplotlib**: Python plotting — Matplotlib 3.3.3 documentation. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 14 dez. 2020.

LIGETI, G. **Neuf essais sur la musique**. Genève – Suisse: Éditions Contrechamps, 2010.

MACKAY, J. On the perception of density and stratification in granular sonic textures: An exploratory study. **Journal of New Music Research**, Londres, v. 13, n. 4, p. 171–186, 1984.

MATHEWS, M. V. *et al.* Theoretical and experimental explorations of the Bohlen–Pierce scale. **The journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 84, n. 4, p. 1214–1222, 1988.

MERIC, R.; SOLOMOS, M. Audible Ecosystems and emergent sound structures in Di Scipio's music. Music philosophy helps musical analysis. **Journal of interdisciplinary music studies**, Graz, v. 3, n. 1-2, p. 57-76, 2008.

PARNCUTT, R. Systematic musicology and the history and future of western musical scholarship. **Journal of interdisciplinary music studies**, Graz, v. 1, n. 1, p. 1–32, 2007.

PEETERS, G. A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. **CUIDADO IST Project Report**, Paris, v. 54, n. 0, p. 1–25, 2004.

PIERCE, J. R. Attaining consonance in arbitrary scales. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 40, n. 1, p. 249–249, 1966.

PLOMP, R.; LEVELT, W. J. M. Tonal consonance and critical bandwidth. **The journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 38, n. 4, p. 548–560, 1965.

PORRES, A. T. **Modelos psicoacústicos de dissonância para eletrônica ao vivo**. 2012. 224 f. Tese (Doutorado em Artes) – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PORRES, A. T. **Processos de composição microtonal por meio do modelo de dissonância sensorial**. 2007. 207 f. Dissertação (Mestrado em Música) – Instituto de Artes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PORRES, A. T.; MANZOLLI, J. Sistemas de afinação: um apanhado histórico. *In*: SEMINÁRIO DE MÚSICA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 1., 2005, São Paulo. **Proceedings online**. São Paulo: SciELO Brasil, 2005. p. 1-5. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/smct/n1/n1a15.pdf>. Acesso em: 16 Mar. 2021.

PUCKETTE, M. **The Theory and Techniques of Electronic Music**. Singapura: World Scientific Publishing Company, 2007.

RAY, S. Colaborações compositor-performer no Século XXI: uma idéia de trajetória e algumas perspectivas. *In*: XX Congresso Da Associação Nacional De Pesquisa E Pós-Graduação Em Música, 20., 2010, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: Udesc, 2010. p. 1310–1314.

ROADS, C. **Microsound**. Cambridge, Mass: MIT Press, 2001.

ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. Analysis of Granular Acousmatic Music: Representation of sound flux and emergence. **Organised Sound**, Cambridge, v. 24, n. 2, p. 205–216, 2019.

SCHRÖDER, J. H. Emergence and Emergency: Theoretical and Practical Considerations in Agostino Di Scipio's Works. **Contemporary Music Review**, Londres, v. 33, n. 1, p. 31–45, 2014.

SETHARES, W. A. **Tuning, timbre, spectrum, scale**. Berlin: Springer Science & Business Media, 1998.

SMITH, J. O.; ABEL, J. S. Bark and ERB bilinear transforms. **IEEE Transactions on Speech and Audio Processing**, Nova York, v. 7, n. 6, p. 697–708, 1999.

TENNEY, J. **A history of 'consonance' and 'dissonance'**. Nova York: Excelsior Music Publishing Company, 1988.

VASSILAKIS, P. N. **Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance**. 2001. 329 f. PhD Thesis (Doutorado em Etnomusicologia) – (Faculdade/Instituto/Departamento ??), University of California, Los Angeles, Califórnia, 2001.

VIEIRA, W. **Composição textural assistida por computador**. 2016. 276 f. Tese (Doutorado em Música) – Herb Alpert School of Music, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

VON HELMHOLTZ, H. **On the Sensation of Tones**. 2. ed. New York: Dover, New York, 1954.

XENAKIS, I. **Formalized music: thought and mathematics in composition**. Maesteg: Pendragon Press, 1992.

ZWICKER, E.; FLOTTORP, G.; STEVENS, S. S. Critical Band Width in Loudness Summation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 29, n. 5, p. 548–557, 1957.

2.4 Emerging structures within microtime of Ligeti's Continuum

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. *Emerging structures within micro-time of Ligeti's Continuum. Proceedings of the 2021 International Computer Music Conference. Em: 2021 INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE. Santiago, Chile: 2021.*

O presente estudo realiza uma análise do *Continuum* (1968) de Gyorgy Ligeti, com o objetivo principal de investigar a relação entre a performance do *Continuum* e a emergência de padrões de intensidade sonora e microtemporais, utilizando descritores de áudio e modelos psicoacústicos. Dado que essa obra já foi fruto de diversas análises a partir da informação simbólica da partitura (CLENDINNING, 1993; CAMBOUROPOULOS; TSOUGRAS, 2009), abordada a partir de modelos de análise de cena auditiva e estudos empíricos (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016), a contribuição desse artigo foi a investigação de parâmetros do áudio que representam como a técnica de *padrão-mecânico* (CLENDINNING, 1993) do *Continuum* leva ao surgimento de mudanças em padrões de intensidade e microtemporais.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

A importância desse artigo no contexto da tese é uma primeira aproximação entre os conceitos e técnicas de composição de *massas sonoras*, tal como concebidos por Ligeti, e as representações de áudio que já tinham sido incorporadas no escopo dessa pesquisa. Desse modo, realizamos uma introdução aos conceitos de *permeabilidade* e *timbre em movimento*, articulados no *Continuum* por meio da técnica de *padrões mecânicos*, resultando na *emergência* de fenômenos psicoacústicos, notadamente, fenômenos de intensidade sonora e microtemporais. Esta análise também representa um passo significativo nesta pesquisa ao abordar a análise da música instrumental. Ao confrontar essa questão, ela não apenas se debruça sobre as características intrínsecas da gravação de obras instrumentais, mas também considera questões fundamentais relacionadas à informação contida na partitura. Nesse sentido, a validação dessa análise ganha relevância ao incorporar estudos anteriores que se dedicaram à análise específica do *Continuum* por meio da partitura.

Questões de Pesquisa

As questões que fundamentam este estudo são as seguintes:

- Como os padrões mecânicos presentes no *Continuum* contribuem para o surgimento de fenômenos *emergentes* na intensidade sonora e na percepção microtemporal (e.g. batimentos, rugosidade)?
- A segmentação baseada em áudio nesse contexto converge com as abordagens anteriores do *Continuum* realizadas por meio da análise da partitura?

A abordagem adotada neste estudo encontra justificativa, pois ainda são escassos na literatura estudos que estabelecem a ligação entre a informação do áudio e as análises e segmentações fundamentadas na partitura musical. Apesar de algumas análises anteriores terem sido formuladas com base na análise da cena auditiva (DOUGLAS; NOBLE; MCADAMS, 2016), explorando as características dessas texturas do ponto de vista da percepção, ainda carecemos de modelos que representem esses fenômenos através do áudio. Essa lacuna na pesquisa motiva a presente investigação, visando preencher uma brecha significativa no entendimento das relações entre a informação sonora e a representação simbólica da partitura. Dentro deste contexto, este trabalho representa um primeiro estudo exploratório. Uma das limitações deste estudo é que ainda não havíamos utilizado o descritor de *rugosidade* para examinar os fenômenos microtemporais. Adicionalmente, é importante observar que as representações gráficas utilizadas neste estudo estão sujeitas a limitações inerentes aos softwares e ferramentas editoriais empregados, o que pode impactar a visualização dos dados de áudio.

Metodologia

Em primeiro lugar, são explorados os conceitos composicionais de Ligeti, notadamente a *permeabilidade* e o *timbre em movimento* (LIGETI, 2017), concebidos a partir de sua vasta experiência no estúdio. Além disso, incorporamos a noção de *padrões mecânicos*, uma técnica intrínseca ao estilo de Ligeti neste período, que foi analisada por Clendinning (CLENDINNING, 1993). Esses elementos conceituais são fundamentais para a compreensão da música de *massas sonoras* de Ligeti. Paralelamente, integramos técnicas de análise de áudio previamente desenvolvidas no contexto desta pesquisa, proporcionando uma abordagem integrada para a análise das obras em questão. Essa interconexão entre os conceitos composicionais, técnicas analíticas e metodologias de pesquisa formam a base teórica que sustenta este estudo.

A gravação selecionada para a análise é proveniente do álbum *Requiem / Lontano / Continuum* do compositor György Ligeti, interpretado por Antoinette Vischer, gravado em 1968

na França. Para a execução da análise, foram empregados os seguintes descritores do software *Sonic Visualizer*: o *segmenter* da *Queen Mary Library*, bem como os *bark coefficients*, *spectral irregularity* e *loudness* provenientes da biblioteca *Libxtract*.

A abordagem analítica adotada neste estudo consistiu em dois passos distintos. Inicialmente, realizou-se uma segmentação automática, visando proporcionar uma descrição macroestrutural da peça em questão. Esse processo permitiu identificar as principais seções da composição através do áudio. Em seguida, concentramo-nos na extração de características, direcionando nossa atenção para a evolução da *textura musical* em suas dimensões microtemporais. Para validar musicologicamente as análises realizadas, primeiramente comparamos os resultados obtidos com estudos analíticos anteriores, buscando consistência e identificando eventuais pontos de convergência e visando contextualizar nossa análise no panorama da literatura. Além disso, a validação musicológica foi enriquecida por meio de discussões entre os autores do texto, passo usual que reforça o caráter interpretativo da análise musical.

Resultados e implicações

No contexto específico do *Continuum*, a análise revelou estratégias empregadas na construção da macroforma, evidenciadas pela sua segmentação em 10 seções distintas. Notavelmente, essa abordagem sugere um processo global de acumulação nas seções de A a F, seguido por uma filtragem das *massas sonoras* nas seções de G a J. Os perfis dos descritores oferecem descobertas valiosas nesse contexto. Na *irregularidade espectral*, observamos um perfil crescente de A a F, indicando um acúmulo gradual do conteúdo de ruído, potencialmente resultando no aumento da *rugosidade*, *batimentos* e *sons diferenciais*. Contrariamente, de H a J, a *irregularidade* demonstra uma diminuição. O *loudness*, por sua vez, revela uma correlação entre o acúmulo de notas na *massa sonora* e as variações na percepção dinâmica. Destacamos também a correlação entre *irregularidade espectral* e *loudness*, descrevendo como a percepção da intensidade sonora deriva do conteúdo de ruído gerado pelos clusters no cravo.

Essa análise fornece uma compreensão mais profunda da intenção composicional de Ligeti, destacando como ele se vale das características sonoras do cravo para a construção das *massas sonoras*. Este artigo representa uma contribuição significativa ao delineamento de um fluxo de trabalho preciso para a análise musical no domínio do áudio. Sendo assim, busca-se integrar as informações do áudio com outras fontes musicológicas e a análise da partitura.

Emerging structures within microtime of Ligeti's *Continuum*

Micael Antunes

Interdisciplinary Nucleus for Sound
Studies/ Arts Institute – University
of Campinas
micael.antunes@nics.uni-
camp.br

Danilo Rossetti

Department of Arts, Federal University of
Mato Grosso
d.a.a.rossetti@gmail.com

Jônatas Manzolli

Interdisciplinary Nucleus for
Sound Studies/ Arts Institute –
University of Campinas
jonatas@nics.uni-
camp.br

ABSTRACT

We present a computer-aided analysis of Ligeti's *Continuum*. This composition is representative of Ligeti's fascination to explore sound masses and microtime perception in musical works. The central idea of the composition is to create a constellation of continuous sounds with short durations of the harpsichord. Previously, authors explored Ligeti's *Continuum* from a perceptual point of view, by analyzing the patterns in the composition and by performing experimental studies. Our contribution is focused on the analysis of the performance and its perceptual outcome. We hypothesize that the performance of the *Continuum* leads to the emergence of changes in dynamics and microtemporal patterns. To that, we associate these emergent features with psychoacoustical audio descriptors, anchored in models of bark scale, loudness, and spectral irregularity. These tools generate graphical representations of the piece and allow us to discuss the microtime features of the composition.

INTRODUCTION

The present study addresses a computer-aided analysis using music information retrieval techniques. Our approach is supported by audio descriptors that extract perceptual features [1] and implement automatic segmentation of musical structures [2]. In the following paragraphs, we are briefly contextualizing György Ligeti's compositional approach and also presenting the perceptual viewpoint about the *Continuum* (1968) and how audio descriptors contribute to a musicological analysis of the piece.

1.1 Ligeti's Micropolyphony and the *Continuum*

The *Continuum* for harpsichord was composed in 1968 and dedicated to the harpsichordist Antoinette Vischer. The piece represents the interest of Ligeti for *pattern-mecanico* techniques [3] and in continuous sound transformations [4] in composition.

The central idea of the composition is to create a constellation of continuous sounds with short durations of the harpsichord, as we can see in the following Ligeti's affirmation: "I thought to myself, what about composing a piece that would be a paradoxically continuous sound,

something like Atmospheres, but that would have to consist of innumerable able thin slices of salami?" [4]. According to the composer, this is possible because the harpsichord can be played very fast. The piece also explores acoustics artifacts of the instrument, considering that the plectrum in the strings produces "quite a loud noise" [4].

The enthusiasm of Ligeti for sound mass composition was driven by his experience with electronic music and interest in renaissance polyphony [5]. Ligeti's understanding of sound mass is linked with the concept of permeability [6], as he said: "The loss of perception of intervals is the origin of a state that we can call permeability. This means that two structures of different natures can have a simultaneous flow if they absorb or even merge completely, modifying only the horizontal and vertical density rates" [6].

Ligeti explores the permeability in his compositions using a technique designated *timbre of movement*. According to him, it was an application to instrumental music composition of processes learned in the electronic music studio [6]. Ligeti scored fusions of layers of independent note patterns to create a complex polyphony where individual rhythmic figures were strongly merged. It was called micropolyphony and, according to him, "the texture reaches such density that the voices are no longer perceptible in their individuality and can be recognized only as a whole, at a higher level of perception" [6]. This approach is central to understand the musical structure of the *Continuum*.

1.2 Perceptual Studies of Ligeti's *Continuum*

Cambouropoulos and Tsougras [7] present an extensive study of Ligeti's *Continuum*, investigating the melodic patterns of the composition by using models of *Gestalt* grouping rules associated with models of Bregmans' auditory scene analysis theory [8]. The focus of the study is to understand how the melodies of the *Continuum* generate integration and segregation phenomena and lead to the perception of auditory streams.

Douglas et. al. [9] investigate the perception of sound masses in Ligeti's *Continuum* by performing an experimental study. The investigation shows how complex is the analysis of sound mass composition from an empirical viewpoint. They point out the multifactorial character of the sound mass perception, which includes "attack rate,

pitch organization, spectral content, register, and the music training of the listener"[9].

Our contribution is to investigate, from a perceptual point of view, how the *pattern-meccanico* technique of the *Continuum* lead to the *emergence* of changes in *loudness* and *microtemporal patterns*. Therefore, it is necessary to employ specific tools to extract perceptual features that in turn can be associated with those emergent patterns. For that, we use audio descriptors featuring psychoacoustic models.

1.3 Audio descriptors and Perception

In our analytical methodology, we employed the *Libxtract* library [1] implemented in Sonic Visualiser [10] which is anchored in psychoacoustical models [11]. The psychoacoustics models embody phenomena of the auditory human perception based on the physiology of the inner ear, specifically the cochlea and the basilar membrane [12].

In computer-aided musical analyses, these tools provide data to generate graphic representations of the audio signal allowing segmentation and analysis of musical structures. Here we are developing a musicological study on instrumental music and the application of the audio descriptors within this framework is presented in the methodology section.

1.4 The Emergence of Microtemporal Perception

Emergence is a property of the complex systems, which is a consequence of the interaction between the parts of the system and cannot be understood by analyzing the parts separately [13, p. 38]. We argue that the *emergence* in the performance of the *Continuum* leads to the perception of psychoacoustical microtemporal patterns. According to Di Scipio, "[...] sound is the epiphenomenon of a lower-level process: you design a low-level process, and the interactions and interferences among particle components taking part in the process are heard as a dynamic shape of sound, a process of sonological emergence" [14, p. 18].

The score of the *Continuum* consists of a constant rhythm, with diverse patterns of melodies. The instruction on the first page is "*Prestissimo*= extremely fast, so that the individual tones can hardly be perceived, but rather merge into a continuum. Play very evenly, without articulation of any sort".

Therefore, Ligeti suggests no changes in tempo. Also, changes in dynamics are not possible due to the harpsichord mechanical construction. Then, we assume in our analysis that the perception of *loudness* and *microtemporal patterns* behave as an emergent phenomenon. These features are a consequence of the interaction of the *pattern-meccanico* technique [3] scored by Ligeti. Therefore, fast interaction results in microtime changes of the sound masses. All these aspects are related to our analytical guidelines, which are:

- 1) to extract perceptual features derived from Ligeti's *pattern-meccanico* technique [3].
- 2) to represent the generation of a continuum through the fusion of several short attacks of the harpsichord with graphical representations.

- 3) to discuss the perception of spectral irregularities emerging in microtime with graphical tools.

In short, our approach is to associate the microtime variations with acoustical and psychoacoustical features [15] such as the fluctuations in the amplitude of the spectrum partials produced by fast variations and interferences in the frequency contents. Those features are also described in the literature as properties of the basilar membrane which generates sensorial dissonance, roughness, and masking [11].

METHODOLOGY

The methodology is anchored in feature extraction from a digital audio recording aligned with symbolic information within Ligeti's score. We describe the corpus of analysis provided by different means:

A. Ligeti's score

- a. Performance instructions
- b. Organization of the mechanical patterns
- c. Pitch intervals and its respective ranges

B. Digital audio recording

- a. Acoustic parameters
- b. Psychoacoustic parameters
- c. The noise produced by the harpsichord

Previously studies such as [3], [7] and [9] are focused on **A**. Our analysis is focused on **B** and consists of two phases: 1) automatic segmentation; and 2) features extraction.

Phase 1: Segmentation of the audio recording to provide a macrostructural description of the piece. It is generated by comparing the similarity of the neighboring spectral windows along with the digital recording of the piece. This technique, which was already adopted to analyze Ligeti's *Atmospheres* [5], was applied using the *Segmenter* from Queen Mary Library [2].

Phase 2: Feature extraction of the audio signal connected to the parameters related to the microtemporal perception within each segment generated in **Phase 1**. In line with the guidelines from Section 1.4, the *Bark Coefficients*, *Spectral Irregularity*, and *Loudness* from the *Libxtract* library [1] were applied and they are introduced below.

Bark Coefficients plots a spectrogram layered in frequency bands according to the properties of the inner ear based on the basilar membrane model of Zwicker [12].

To provide accuracy for that model, we develop a formalization of the Bark Scale conversion function ([16], [17]).

Given a value $0\text{Hz} \leq f \leq 20\text{kHz}$, the respective *Bark* conversion function $B(f)$ is defined as follows:

$$B(f) = \begin{cases} b(f) + 0.15(2 - b(f)) & \text{if } b(f) < 2 \\ b(f) + 0.22(b(f) - 20.1) & \text{if } b(f) > 20.1 \\ b(f) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

where the scaling factor $b(f)$ is given by

$$b(f) = \frac{26.81f}{(1960+f)} - 0.53 \quad (2)$$

Spectral Irregularity represents the noise content of the spectrum [18], stated by Krimphoff [19] as:

$$I = \sum_{k=2}^{N-1} \left| a_k - \frac{a_{k-1} + a_k + a_{k+1}}{3} \right| \quad (3)$$

where a_k is the value in the k -th magnitude coefficient and N is the total number of frequency bins in the spectrum.

Loudness corresponds with the psychoacoustic perception of the signal intensity. The Loudness $L(i)$ of a spectral window of analysis, according to Pereira [20]:

$$L(i) = \sum_{k=1}^K |X_i[k]|^2 10^{W(k)/20} \quad (4)$$

where $X_i(k)$ for $k = 1 \dots K$ is the frequency amplitude of the window of analysis.

The Fletcher and Munson curves are included in equation 4 as the $W(k)$ weight function described in Eq. 5.

$$W(k) = -0.6 * 3.64 * f(k)^{-0.8} - 6.5 * e^{-0.6 * (f(k) - 3.3)^2} + 10^{-3} * f(k)^{3.6} \quad (5)$$

where the frequency $f(k)$ is measured in kHz, defined as $f(k) = k.d$, the difference between two consecutive spectral bins in kHz.

RESULTS AND DISCUSSION

Firstly, **Phase 1** results on 10 sections for the *Continuum*, from A to J. In Figure 1, presenting the *Bark Coefficients*. There is a great confluence of segmentation within the bark frequency bands. We observed that the short attacks of the harpsichord contribute to enlarge the diffusion of frequency in the bark scale within the sound mass. This saturation is also aligned with gradual changes in the amplitude of high-frequency partials.

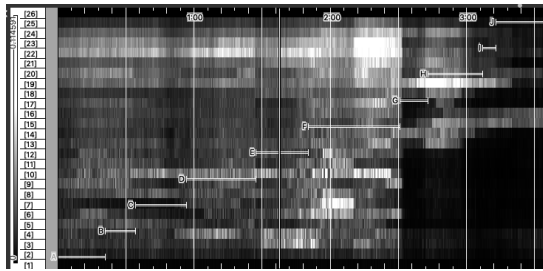


Figure 1. Bark Coefficients (26 barks) energy in white color and the segmentation represented by the letters and horizontal lines.

Fig. 2 shows the *Spectral Irregularity* (black line) and *Loudness* (gray line). Evaluating the *Spectral Irregularity*, we verified a considerable growth from section A to F, representing a gradual accumulation of the noise content, which might lead to the increasing of *roughness*, *beatings*,

and differential sounds. After, from H to J the *Irregularity* witnessed a decrease.

The *Loudness* lets us verify that there is a correlation between the accumulation of notes within the sound mass and the variation on the perception of dynamics. We also highlight the correlation between *Spectral Irregularity* and *Loudness*. That aspect also describes how *Loudness* perception is derived from the noise content produced by short intervals of the harpsichord notes.

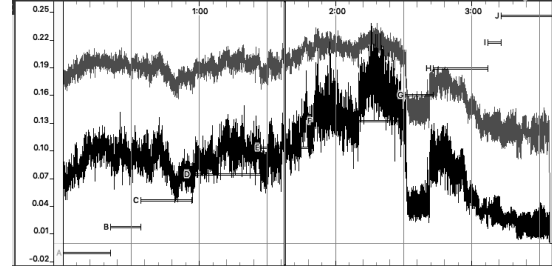


Figure 2. Loudness in gray, *Spectral Irregularity* in black, and segmentation represented by the letters and the horizontal lines.

Fig. 3 shows *Bark Coefficients* divided into 4 regions: the low region (bark 1-6), medium-low region (bark 7-12), medium-high region (bark 13-18) and high region (bark 19-26). Fig. 3 describes that the piece frequency spectra is concentrated on medium-low to high bands in segments A to G. The energy is concentrated in the medium-high and high bands in segments H to J. Finally, it shows Ligeti does not explore considerably energy in the low-frequency band due to the quality of the harpsichord's spectrum partial dispersion.

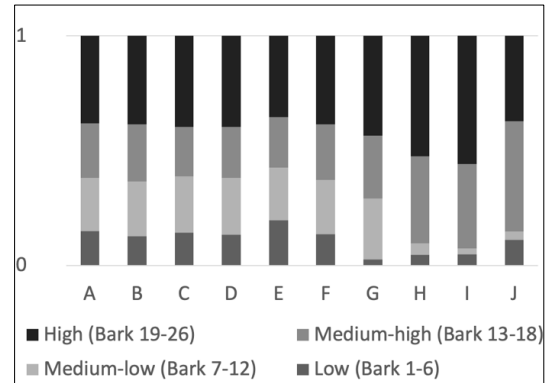


Figure 3. Average values for *Bark Coefficients* in each segment of Ligeti's *Continuum*.

Shortly, figures 1-3 indicate an overall strategy in Ligeti's composition: *accumulation*, from the segments A to F, and *filtering*, from G to J. Ligeti's *Continuum* analysis reveals a complex profile of *Spectral Irregularities*, which is the source of the perception of beatings. That could be also related to the perception of differential sounds that emerges during the *Continuum*'s performance.

The *pattern-meccanico* technique induces the perception of clustered notes, and these clustered notes lead to the

saturation of energy in different barks. The consequence is the emergence of psychoacoustical phenomena, such as beatings, roughness, and fluctuations, derived from the noise content of the sound spectrum. We also highlight that Ligeti's strategy of exploring different densities of notes produces variations in the perception of musical dynamics.

CONCLUSION

The analytical perspective presented here is a new contribution to previous analysis by providing lights into micro-time modulations in Ligeti's *Continuum*. We aimed to elucidate how the spectral manipulations in Ligeti's micropolyphony induce changes in the microtemporal perception. Therefore, we employed audio descriptors to provide a better understanding of the complexity of the piece. Shortly, we enriched previous studies [3], [7], and [9] from a perceptual point of view.

We conclude that the modulations and irregularities of the sound spectra induced the emergence of microtemporal perceptual features. That, in turn, will change dramatically facing the performance situation, room, or studio recording techniques. That will be considered in future works. Besides, the recordings of *Continuum* are very different in sonority, and also in duration and instrumentation (e.g. Ligeti's version for organ).

Furthermore, as already pointed by [9], given the multidimensionality of the sound masses, the complexity and saturation emerge to the listeners in their individuality, according to musical experience and expertise. In this concern, we can forth see comparative studies on different performances of *Continuum* anchored on psychoacoustic studies.

Acknowledgments

Micael Antunes is supported by FAPESP in his doctoral research at Arts Institut of Unicamp/ NICS-UNICAMP, process 2019/09734-3. Jónatas Manzoli is supported by CNPq under a Pq fellowship, process 304431/2018-4, and 429620/2018-7.

REFERENCES

- [1] J. Bullock, "Libxtract: A lightweight library for audio feature extraction," in *Proceedings of the 2007 International Computer Music Conference*, 2007, p. 4.
- [2] "QM Vamp Plugins: User Documentation." <https://vamp-plugins.org/plugin-doc/qm-vamp-plugins.html> (accessed Jan. 28, 2020).
- [3] J. P. Clendinning, "The Pattern-Meccanico Compositions of György Ligeti," *Perspect. New Music*, vol. 31, no. 1, p. 192, 1993, doi: 10.2307/833050.
- [4] G. Ligeti and P. Várnai, *Ligeti in conversation*. Da Capo Press, 1983.
- [5] I. E. Simurra and R. Borges, "Combining Automatic Segmentation and Symbolic Analysis based on Timbre Features – A Case Study from Ligeti's Atmospheres," in *Proceedings of the 11th International Conference of Students of Systematic Musicology*, 2019, p. 4.
- [6] G. Ligeti, *Neuf essais sur la musique*. Éditions Contrechamps, 2017.
- [7] E. Cambouropoulos and C. Tsougras, "Auditory Streams in Ligeti's Continuum: A Theoretical and Perceptual Approach," *J. Interdiscip. Music Stud.*, vol. 3, no. 1–2, pp. 119–137, 2009.
- [8] A. S. Bregman, *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT press, 1994.
- [9] C. Douglas, J. Noble, and S. McAdams, "Auditory Scene Analysis and the Perception of Sound Mass in Ligeti's Continuum," *Music Percept. Interdiscip. J.*, vol. 33, no. 3, pp. 287–305, Feb. 2016, doi: 10.1525/mp.2016.33.3.287.
- [10] "Sonic Visualiser." <https://www.sonicvisualiser.org/> (accessed Jan. 28, 2020).
- [11] H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics: facts and models*, 3rd. ed. Berlin ; New York: Springer, 2007.
- [12] E. Zwicker, G. Flottorp, and S. S. Stevens, "Critical Band Width in Loudness Summation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 29, no. 5, pp. 548–557, May 1957, doi: 10.1121/1.1908963.
- [13] J. H. Schröder, "Emergence and Emergency: Theoretical and Practical Considerations in Agostino Di Scipio's Works," *Contemp. Music Rev.*, vol. 33, no. 1, pp. 31–45, 2014.
- [14] C. Anderson, "Dynamic networks of sonic interactions: An interview with Agostino Di Scipio," *Comput. Music J.*, vol. 29, no. 3, pp. 11–28, 2005.
- [15] P. N. Vassilakis, "Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance," PhD Thesis, University of California, Los Angeles, 2001.
- [16] H. Traunmüller, "Analytical expressions for the tonotopic sensory scale," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 88, no. 1, pp. 97–100, 1990.
- [17] M. Antunes, D. Rossetti, and J. Manzoli, "A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors," in *Proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Computer Music/Federal*, São João del Rey, 2019, pp. 4–11.
- [18] J. Bullock, "Implementing audio feature extraction in live electronic music," Tese de Doutorado. Ph.D. em Música., Birmingham City University, Birmingham, 2008.
- [19] J. Krimphoff, S. McADAMS, and S. Winsberg, "Caractérisation du timbre des sons complexes.II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique," *J. Phys. IV*, vol. 04, no. C5, pp. C5-625–C5-628, May 1994, doi: 10.1051/jp4:19945134.
- [20] E. M. Pereira, "Estudos sobre uma ferramenta de classificação musical," Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

2.5 A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Study Case in Ligeti's Continuum for harpsichord (1968)

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; FEULO, G.; MANZOLLI, J. *A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Study Case in Ligeti's Continuum for harpsichord (1968)*. *Proceedings of the 18th brazilian symposium on computer music*. Em: 18TH BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER MUSIC. Pernambuco: 2021.

O foco deste artigo reside na introdução e implementação de um descritor de *rugosidade* fundamentado no modelo proposto por Pantelis Vassilakis (VASSILAKIS, 2001). Empregamos esse descritor de *rugosidade* na análise da obra *Continuum* para cravo, de György Ligeti (1968). Como resultado, apresentamos uma representação gráfica da *rugosidade* derivada da gravação, propondo simultaneamente uma segmentação formal para a peça. Além disso, conduzimos uma análise do seu desenvolvimento formal, abordando-o do ponto de vista musicológico.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

Este artigo representa um avanço significativo na pesquisa ao incorporar e implementar o descritor de *rugosidade*. Essa implementação se revela como uma ferramenta eficaz na captura de fenômenos microtemporais, estendendo e aprimorando as análises previamente realizadas com os descritores de *fluxo espectral* (Seção 2.3) e *irregularidade espectral* (Seção 2.4). Além disso, ao oferecer uma medida vinculada à quantidade de energia nos filtros de *bandas críticas*, o descritor de *rugosidade* emerge como uma ferramenta particularmente relevante para o estudo das *massas sonoras*.

Questão de Pesquisa

Este artigo se concentra nas seguintes questões:

- Quais são os requisitos técnicos essenciais, do ponto de vista da *STFT*, para uma implementação otimizada do descritor de *rugosidade*?
- De que maneira o modelo de *rugosidade* pode oferecer uma contribuição significativa para uma compreensão mais ampla da composição *Continuum* e, de forma mais abrangente, para a compreensão de fenômenos relacionados às texturas de *massas sonoras*?

Embora a implementação de um descritor de *rugosidade* não seja inédita, sendo previamente disponível em *PureData* e *Max*, a escolha por uma implementação em *Python* revelou-se vantajosa, conferindo-nos uma flexibilidade crucial para diversas aplicações da *rugosidade* ao longo da pesquisa. Além disso, ela propõe uma solução técnica ao problema da resolução da *STFT* utilizando o espectrograma reatribuído. A utilização de uma representação tempo-frequência otimizada para a medida da *rugosidade* encontra justificativa, principalmente, na importância dos fenômenos microtemporais nos discursos de Ligeti sobre suas composições (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993) e nas discussões mais amplas sobre as *massas sonoras*, como já apresentadas na Seção 2.4.

Este artigo, embora represente um avanço significativo na abordagem da medida da *rugosidade* no contexto musical, ainda apresenta algumas limitações deste descritor que requerem considerações adicionais. Uma dessas limitações reside na ausência de uma solução completamente satisfatória para o problema da escolha do tamanho da janela de análise da *STFT*. Embora o artigo tenha reconhecido e destacado a complexidade desse desafio, não conseguiu propor uma resolução plenamente eficaz para solucionar essa questão, dado que isto demandaria uma pesquisa mais ampla nos campos de processamentos de sinais e psicoacústica. Além disso, é crucial notar que o modelo atual de análise de *rugosidade* não considera características morfológicas importantes como os transientes de ataque dos instrumentos. Esta não é uma limitação do descritor, mas do modelo de *rugosidade*. A ausência de consideração para esses elementos pode impactar a precisão e a abrangência do seu uso, uma vez que os transientes de ataque desempenham um papel crucial na percepção e na estruturação do som musical. Portanto, a aplicabilidade do modelo de *rugosidade* pode ser aprimorada futuramente através do enfrentamento dessas limitações, proporcionando uma análise mais abrangente e precisa das texturas sonoras em contextos musicais.

Metodologia

A fundamentação teórica deste trabalho se estabelece no entrelaçamento entre a psicoacústica e questões musicológicas, delineando o escopo desta pesquisa. O modelo de *rugosidade* proposto por Vassilakis (VASSILAKIS, 2001) desempenha um papel crucial, fornecendo um modelo eficaz para a análise de fenômenos microtemporais em obras musicais. Ademais, este estudo se respalda em pesquisas anteriores de análise musical desenvolvidas ao longo desta pesquisa, conforme previamente apresentadas, além de incorporar conceitos

composicionais de Ligeti (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993; LIGETI, 2017) e estudos sobre *massas sonoras* (NOBLE; MCADAMS, 2020).

A implementação do descritor de *rugosidade* foi realizada em *Python*, fazendo uso da biblioteca *librosa*. Para a análise, utilizamos uma janela de 4096 amostras com um tamanho de salto de 1024 amostras. Para a extração da *STFT*, utilizamos o espectrograma reatribuído associado com um algoritmo de detecção de picos. Implementamos uma função em *Python* fundamentada no modelo de Vassilakis para a estimação da *rugosidade*, a qual é descrita no artigo e disponibilizada no GitLab ¹ para a comunidade. Na análise, empregamos a gravação do álbum *Requiem / Lontano / Continuum* de György Ligeti, interpretado por Antoinette Vischer em 1968, e gravado na França. A validação musicológica foi conduzida por meio da segmentação da obra utilizando as curvas de *rugosidade*, fornecendo uma descrição sobre a macroestrutura da peça. A leitura dos perfis de *rugosidade* foi realizada em sintonia com o conceito de *permeabilidade* (LIGETI, 2017), destacando a interação entre as distintas qualidades das texturas sonoras ao longo da obra. A discussão entre os autores complementou a validação, enriquecendo a interpretação e análise dos dados de áudio obtidos.

Resultados e implicações

A análise do perfil de *rugosidade* ao longo do *Continuum* se mostra como uma representação útil para a investigação das *massas sonoras*. Detectamos uma tendência decrescente ao longo da peça, atingindo seu valor mais alto por volta dos 25 segundos e apresentando valores mais baixos na fase final. Além disso, identificamos um padrão oscilatório na curva de *rugosidade*, o que instigou a proposta de uma segmentação baseada nos mínimos locais dessa curva. Dessa maneira, é possível interpretar a estratégia composicional de Ligeti como a manipulação das características perceptuais das *massas sonoras*, que se ancora, entre outros fatores, nas variações no nível de *rugosidade*. É interessante ressaltar a convergência entre este estudo e o artigo anterior sobre o *Continuum* (Seção 2.4), fortalecendo a compreensão da estratégia de filtragem adotada na textura musical. Esses resultados não apenas enriquecem a análise do *Continuum*, mas também contribuem para uma compreensão mais abrangente das escolhas composicionais de Ligeti, consolidando a importância da *rugosidade* nas construções das *massas*. Este trabalho representa um avanço significativo ao disponibilizar uma nova ferramenta psicoacústica para os analistas musicais. A incorporação desta ferramenta proporciona não apenas uma ampliação do conjunto de recursos disponíveis,

¹Disponível em <https://gitlab.com/Feulo/ligeti-wind-quintet-analysis>.

mas também estimula uma reflexão crítica sobre sua aplicação específica no âmbito da música de *massas sonoras*, e no contexto mais amplo das *texturas musicais*. Em síntese, este trabalho representa um avanço nessa pesquisa com a criação de uma função de *rugosidade* em *python*, proporcionando uma ferramenta eficaz e flexível para avaliar fenômenos microtemporais em obras musicais. A introdução desse novo descritor de *rugosidade* fornece uma camada adicional para representação do áudio, abrindo novas possibilidades que serão aproveitadas no decorrer da pesquisa.

A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Case Study in Ligeti's *Continuum* for Harpsichord (1968)

Micael Antunes^{1*}, Guilherme Feulo do Espirito Santo², Jônatas Manzolli^{1†}

¹NICS - Interdisciplinary Nucleus for Sound Studies, University of Campinas
R. da Reitoria, 165 – 13083-872 Campinas, SP

²Computer Science Department, University of São Paulo
Rua do Matão, 1010 – 05508-090 São Paulo - SP

micael.antunes@nics.unicamp.br

Abstract. We present in this paper an implementation of a roughness descriptor based on the model of Pantelis Vassilakis. We use the implemented descriptor to carry out a computer-aided musical analysis of György Ligeti's *Continuum* for harpsichord (1968). Our analysis establishes a parallel between the roughness model, concepts of sound mass composition, microtime perception, and Ligeti's ideas of timbre of movement and permeability. As a result, we display a graphical representation for the roughness computed from the *Continuum*'s recording, propose a formal segmentation for the piece, and analyze its formal development from a musicological point of view.

1. Introduction

In this paper, the implementation of a *roughness* descriptor is presented, aiming at the musical analysis of *sound mass* composition [1]. As a case study, a musical analysis of Ligeti's *Continuum* for harpsichord (1968) was carried out. This approach is justified in this context due to the perceptual characteristics of Ligeti's compositional poetics [2].

The use of audio descriptors in musical analysis is a well-known practice in the context of systematic and empirical musicology [3]. The graphical representation of audio descriptors provides extra insights into the formal aspects of a musical work, offering a complementary perspective with respect to the symbolic information from the score [3, 4]. Different types of audio descriptors have been also applied to investigate emergent and perceptual properties in the electroacoustic and live electronic music repertoire [5, 6, 7, 8].

An important characteristic of the *sound masses* is their *microtime* behavior [9, 10]. *Microtime* refers to a scale of sound perception, which Roads define as “Sound particles on a time scale that extends down to the threshold of auditory perception (measured in thousandths of a second or milliseconds)” [11, p. 4]. *Roughness* is a psychoacoustic model that represents the perception of very fast amplitude fluctuations in sound [12]. Therefore, we

may understand *roughness* as a representative feature of *microtime* perception.

Ligeti's *Continuum* for harpsichord (1968) has been studied through the symbolic analysis of the score according to the *pattern-meccanico* technique [13] and the *Gestalt* model of perception [14]. From an experimental perspective, Douglas et al. used *auditory scene analysis* to study excerpts of *Continuum* and its *sound mass* characteristics [15]. *Microtime* perception in *Continuum* was also investigated using *audio descriptors* [10, 9].

In this study, we propose an implementation for a *roughness* audio descriptor based on Vassilakis' *roughness* model. Also, as a case study, we conduct an analysis of Ligeti's *Continuum* with the implemented descriptor. Considering *Continuum*'s very peculiar *sound mass* characteristics associated with its performance, we investigate how *microtime* features may be represented by the *roughness* descriptor. We describe how such a computer-aided musical analysis may lead to a segmentation of the piece that enhances the understanding of its formal development concerning *sound masses*. Therefore, we extend previous studies based on the symbolic analysis of *Continuum*'s score [13, 14, 15] by investigating singular characteristics of the chosen performance.

In Section 2 we present the central musicological concepts for this work: the idea of *sound mass* composition, Ligeti's concepts of *permeability* and *timbre of movement*, and an overview of his *Continuum* for harpsichord. In Section 3, we present the *roughness* model, its theoretical background, its mathematical formalization, and its proposed implementation. In Section 4 we present the guidelines and methodology for the musical analysis. In Section 5 we display results and in Section 6 we present a conclusion and a discussion about the perspectives for the computer-aided musical analysis of *sound mass music*.

2. Musicological Background

2.1. Sound Mass Composition

Sound mass composition aims to achieve the limits of the perception by exploring a large agglutination of sound in the time and frequency domains [15]. Composers like Karlheinz Stockhausen (1928-2007) have a contribution to the theoretical and aesthetics discussion of *sound*

*Micael Antunes is supported by FAPESP in his doctoral research at Arts Institut of Unicamp/ NICS-UNICAMP, process 2019/09734-3.

†Jônatas Manzolli is supported by CNPq under a Pq fellowship, process 304431/2018-4 and 429620/2018-7.

mass concept [16], and pioneer works with this approach became with composers like Iannis Xenakis (1922-2001), György Ligeti (1923-2006), and Krystof Penderecki (1933-2020). *Sound masses* could be achieved through many compositional techniques, like *sound clusters*, stochastic procedures, granular synthesis, *micropolyphony*, instrumental extended techniques, etc.

According to Douglas et. al. [15], “Sound mass exists when the individual identities of multiple sound events or components are attenuated and subsumed into a perceptual whole, which nevertheless retains an impression of multiplicity”. The authors also point that the *sound mass* is comprised by the complexity of the sound organization, including rhythmic, melodic and spectral parameters of a composition [15]. This concept will be central in our study because the compositional techniques of György Ligeti are strongly related to the concept of *sound mass*. The details of this relationship will be clarified in the next topic.

2.2. György Ligeti’s poetics

György Ligeti (1923 - 2006) is a composer born in Transilvania in a region disputed by Hungary and Romania during the world wars. He is a fruitful composer with a large number of works exploring a diversity of musical techniques and artistic movements. Most of his famous works, like *Atmosphères* (1961) and *Lux Aeterna* (1966), can be associated with the musical concept of *sound mass* composition [1].

Ligeti’s *sound mass* compositions are linked with his interest in natural sciences, mathematics, acoustics, and psychoacoustics [17]. These interests are transposed to his musical thinking under musical concepts like *timbre of movement* and *permeability*.

Timbre of movement refers to the sound fusion, which occurs when the musical texture reaches such a level of complexity that one can not perceive individual events [18, p. 169]. Therefore, the listener’s attention is led to global characteristics and inner movement of the musical texture.

Permeability refers to the absence of pitch perception in the musical texture. According to the composer: “*The loss of sensitivity to intervals is at the source of a state that could be called permeability*” [18, p. 123]. These concepts are operated in his composition by using techniques like *micropolyphony* [19], *pattern-meccanico* technique [13], and *sound clusters* [20]. The *Continuum for harpsichord* (1968) is a representative example of these compositional techniques.

2.3. The *Continuum* for harpsichord

Continuum is a consequence of Ligeti’s interest in machinery, under the concept of *pattern-meccanico* technique [13]. Maybe, the most representative work that illustrates this concept is the *Poème symphonique* for 100 metronomes (1962). In this work, 100 metronomes with different velocities are displayed. The main remarkable

sound result of this piece is the rhythmic behavior, which is a consequence of the emergent synchronicity between metronomes in time [21].

Also, *Continuum* is representative of Ligeti’s interest in aural illusions [2]. According to Ligeti: “*I thought to myself, what about composing a piece that would be a paradoxically continuous sound, something like Atmospheres, but that would have to consist of innumerable thin slices of salami?*” [2]. According to Ligeti, he chose the harpsichord to create this piece because this instrument can play very fast notes, and the plectrum in the strings produces “*quite a loud noise*” [2].

Continuum’s score has only one rhythm with the instruction “*Prestissimo = extremely fast, so that the individual tones can hardly be perceived, but rather merge into a continuum. Play very evenly, without articulation of any sort*”. Therefore, the variation in the piece sound result comes from the variety of melodic profiles and *pattern-meccanico* technique written by Ligeti [13].

The musicological interest of Ligeti’s *Continuum* resides in the manner that the constant patterns of the score lead to the emergence of *sound mass* perceptual characteristics during the performance [9]. According to Knop: “*Peitgen remarks on the compositional strategies that Ligeti applied to create what initially seem to be static textures which, however, develop into more differentiated rhythmical (and melodic) units*” [17]. Knop also highlights that this compositional strategy could be understood under Ligeti’s interest in math and psychoacoustics [17]. So, in this context, we want to focus on the *microtime* perceptual characteristics, through the *roughness*’ descriptor.

3. A model for roughness

3.1. Roughness model

The application of audio descriptors to analyze electronic and instrumental composition was largely explored in the computational musicology context (e.g. [22], [23],[24]). The choice of the descriptor that will be applied in the analysis is strongly related to the musical context of the composition and its musicological interest. We explore the main concepts of the *roughness model* to justify its choice for this analysis.

Previous studies have associated the *roughness* model with *microtime* perception in the context of *Continuum*’s *sound mass* composition [10, 9]. The first one applied the *roughness* model to perform a formal segmentation of the piece [10]. The second one investigates how the *pattern-meccanico* technique, proposed by Clendinning [19] leads to the emergence of *microtime* patterns in perception. By using the *roughness* model to analyze the *sound masses* of Ligeti’s *Continuum*, we aim to describe *microtime* perceptual characteristics [11] of *sound masses* based on inner ear properties.

According to Vassilakis [12], *roughness* is a perceptual feature related to the sense of very fast amplitude

variation of the sound [12, p. 2]. It is partially conditioned by the sound stimulus and partially conditioned by the properties of the basilar membrane. This model is related to the concept of *sensory dissonance* in the context of western music [25, 23], but has also been explored in other non-tonal musical contexts, like Bosnian *Ganga songs* [12, p. 17].

The *roughness* models of Sethares [23] and Vassilakis [12] are based on Plomp and Levelt's dissonance curve [25], which displays a correlation between the sensation of dissonance and Zwicker's critical bandwidth model [26]. According to the results of Plomp and Levelt's experiment [25], the sensation of maximum dissonance for a pair of pure tones occurs when the distance between their respective frequencies is about a quarter of the critical bandwidth size [25]. Based on these results, Sethares [23] developed a model that consists of a parameterized curve for the dissonance values between a pair of pure tones, as we see in Figure 1. The *roughness* curve exhibits a profile with a peak in a quarter of critical bandwidth, which matches in this case with a semitone of the scale. Then, the *roughness* decreases until its minimum, in the final part of the *critical bandwidth*, around the major third of the scale (4 semitones).

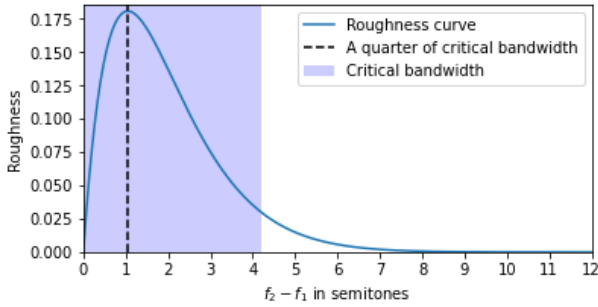


Figure 1: Roughness curve for two pure tones, in function of the twelve-tone equal-tempered scale with fundamental frequency 440Hz.

3.2. Roughness descriptor

The *roughness* value of a time frame is based on an approximation, proposed by Sethares [23] of the Plomp & Levelt's experimental dissonance curve¹ [25], and is defined for two pure sinusoidal tones with frequencies f_1 and f_2 as follows

$$r(f_1, f_2) = e^{\frac{0.84|f_2-f_1|}{0.0207f_1+18.96}} - e^{\frac{1.38|f_2-f_1|}{0.0207f_1+18.96}}. \quad (1)$$

The formulation present in Equation 1 was revised by Vassilakis (Eq. 2) to incorporate the amplitude fluctuation characteristics in the sound stimulus on *roughness* perception, which were underestimated in Sethares' model

$$r(f_1, a_1, f_2, a_2) = (a_i * a_j)^{0.1} \left(\frac{2a_j}{a_i + a_j} \right)^{3.11} r(f_1, f_2), \quad (2)$$

¹For a full revision on *roughness* curves see [12, 27].

where a_1 and a_2 are amplitude values for the f_1 and f_2 components respectively.

For complex sounds, the *roughness* value can be computed using a formulation by Vassilakis [12], which combines all pairwise *roughness* values corresponding to pairs of sinusoidal partials

$$\text{Roughness} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r(f_i, a_i, f_j, a_j)}{2} \quad (3)$$

The computational implementation of the *roughness* descriptor is displayed in Algorithm 1. The magnitude spectrum is computed from the input signal x using the Short-Time Fourier Transform (STFT). Based on the spectral content, the frequency values and their respective amplitudes are obtained through peak selection for each time window. The frequency and amplitude values are then used to compute the *roughness* values as described in Equation 3.

Algorithm 1 Roughness descriptor

```

1: function ROUGHNESS(x)
2:    $X \leftarrow |\text{STFT}(x)|$ 
3:    $F, T \leftarrow \text{SIZE}(X)$   $\triangleright X$  is a  $F \times T$  matrix
4:   for  $t \leftarrow 1$  to  $T$  do
5:      $\text{freqs}, \text{amps} \leftarrow \text{PEAK\_PEAK}(\text{frame})$ 
6:      $R[t] \leftarrow 0$ 
7:     for  $f1, a1 \in \text{freqs}, \text{amps}$  do
8:       for  $f2, a2 \in \text{freqs}, \text{amps}$  do
9:          $R[t] \leftarrow R[t] + r(f1, a1, f2, a2)/2$ 
10:  return  $R$ 
```

The source code for the implementation of the *roughness* descriptor and all the graphical analysis was done using Python² and the Jupyter³ environment and are available at this Gitlab repository⁴.

The frequency and amplitudes values were obtained from the magnitude spectrogram using the Librosa [28] library, with a window size of 4096 samples and a hop length of 1024 samples.

4. Methodology

With the following methodology, we aim to apply the *roughness* psychoacoustic model to represent the *microtime* characteristics [11] in the *Continuum* through the analysis of the performance recording shown in Table 1, enlarging the proposal of previous studies [29, 30].

We hypothesize that this descriptor could represent the concept of *timbre of movement* and *permeability*, as well the *microtime* behavior of the *sound masses*. These concepts could be associated with the principles of *minimum masking* and *limited density* [31], which states that

²<https://www.python.org/>

³<https://jupyter.org/>

⁴<https://gitlab.com/Feulo/ligetis-continuum-analysis>

Album	Requiem / Lontano / Continuum
Composer	György Ligeti
Performer	Antoinette Vischer
Year	1968
Country	France

Table 1: Metadata of the chosen performance recording.

the higher the level of spectral information in the auditory nerves, the lower the ability to perceive musical pitches and intervals. These principles of *minimum masking* and *limited density* were already associated with the concept of *sound mass* [1]. Starting from this point of view, we argue that the *roughness* model will provide a one-dimensional representation that will reflect:

- (A) *The density level and agglutination of the spectra in the frequency domain*- The *roughness* model is based on the level of the energy into the *critical bandwidths*, the higher the density and agglutination of the sound spectra, the higher the level of *roughness*.
- (B) *Perceptual features related to microtime amplitude fluctuation*- As already pointed, the *roughness* model presented is based on subjective tests and properties of the inner ear aligned with the subjective perception of sound amplitude fluctuation [12].

Based on the above guidelines, we conducted the musical analysis of the chosen performance recording of the *Continuum* as follows:

1. *Roughness calculation from the audio data*: By applying the algorithm presented in section 3.1, a *roughness* curve of the *Continuum*'s recording will be generated.
2. *Segmentation of the piece*: Based on the *roughness* curve levels, we propose a segmentation of the piece based on the *local minimums* of the curve. It provides an overview of the temporal development of the sound material through the composition.
3. *Musicological considerations*: In this step, we perform the analysis starting from the musicological information about the *Continuum* and the *roughness* descriptor representation.

5. Results

We disclose in this section the results of the analysis, divided into the three steps we present above in section 3.2. The analysis is anchored in the graphical representation of Figure 2, which displays the *roughness* in blue and its respective moving average, for 20 samples, in orange. The formal segmentation of the piece is represented by the dotted vertical black lines, as we will detail below.

1. Roughness calculation

By plotting the *roughness* curve in function of the time of the *Continuum*, we could observe a decreasing profile of the curve through the piece, with the highest value

around 25 seconds, and the lowest values in the final part of the piece. Also, we observe a pattern-like behavior during the piece, with an increasing and decreasing behavior with local maximums and minimums in time.

2. Segmentation of the piece

We propose a segmentation of the *Continuum* using as criteria the local minimums in time, which leads to the following initial time of Table 2 for the segments from A to F, as shown in black dotted vertical lines in the Figure 2.

A	B	C	D	E	F
00:00	01:02	01:41	02:17	02:45	03:25

Table 2: Initial time for each proposed segment of the *Continuum*'s recording.

So, we may observe that the segmentation of the piece highlights the *roughness* patterns inside each of the segments.

3. Human conducted musical analysis

The analysis of the *Continuum* with a *roughness* descriptor allows us to speculate about the perceptual outcome of Ligeti's compositional strategy. First, we may notice an overall strategy: the manipulation of the tension of the *sound mass* through the *roughness*. Second, in terms of the development of the material in time: a kind of pattern in each segment of the piece could be the source of a perceptual coherence in the composition. Third, by observing the descending profile of the *roughness* in the composition, this analysis reinforces the filtering strategy of the musical texture, as already pointed by [9]. Thus, we may conclude that the diversity of the melodic patterns of the *Continuum* does not dazzle a kind of coherence at the perceptual level. This is achieved by an internal coherence in each segment and an overall directionality during the piece.

It is interesting to remember in this context that the *roughness* model is related to the accumulation of energy into the critical bandwidths. So, we may argue that the sound masses allow different levels of pitch perception, as stated by the concept of *permeability*. Thus, strategies of blurring are at a source of the inner movement of the sound masses in the composition.

6. Discussion and Conclusions

In this paper we presented an implementation of a *roughness* descriptor, applying it in the context of Ligeti's *sound mass music*. With that, we privilege a perceptual approach in the musicological study. The *roughness* descriptor is a feature that, combined with other audio descriptors and symbolic information of the score, could provide a broader methodology of musical analysis of the *sound mass* characteristics.

It is important to notice that the segmentation through the *roughness* profile displays a great convergence with the segmentation anchored in a symbolic analysis of the score performed by Clendinning [13]. It means that the

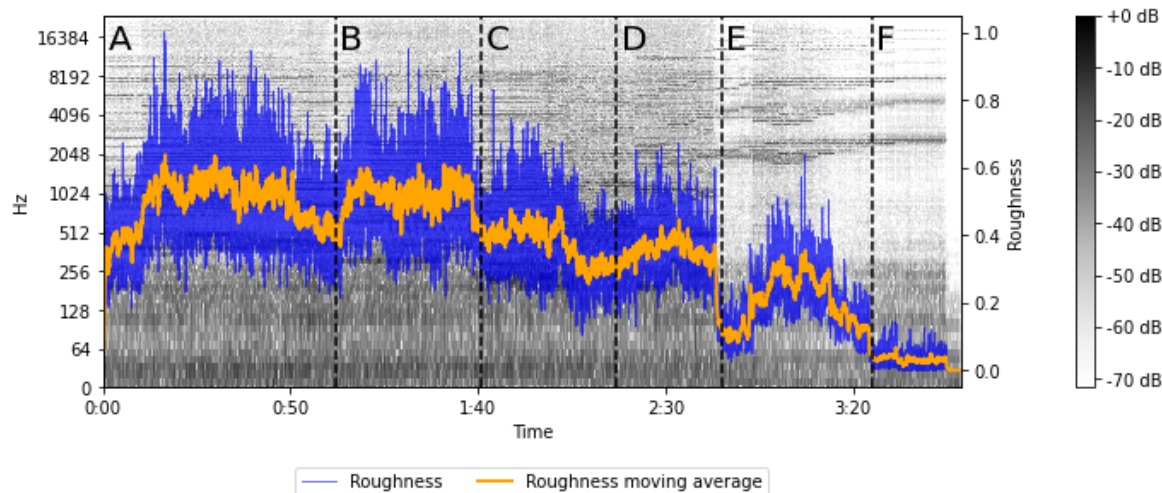


Figure 2: Roughness for the *Continuum*'s recording (blue) and its moving average (orange). The black dotted lines represent the proposed segmentation of the piece. The spectrogram is displayed in the background.

roughness descriptor could provide a meaningful musical representation in the context of *sound mass* composition which explores a great variety of *sound clusters*.

As already demonstrated, the *roughness* profile of the *Continuum* shows an oscillatory pattern through the segments, which is a consequence of the *sound mass* behavior. Therefore, future musical analysis of the *Continuum* could investigate in more detail the relationship between the *pattern-meccanico* technique detected in the symbolic analysis from the score and psychoacoustic patterns obtained through audio descriptors.

Due to the diversity of techniques and instrumental ensembles in the context of *sound mass* music, we need to improve audio signal processing strategies to represent properly the psychoacoustic features. Also, the use of more accurate time-frequency representations could provide better for the *roughness* descriptor computation.

The musical analysis methodology exposed in this paper could be applied in other musicological contexts. Firstly, by enlarging the perceptual knowledge of a musical performance from the audio data, the *roughness descriptor* fills a gap in the context of psychoacoustic descriptors that could be particularly interesting to the musicological field. Second, the *roughness* provides relevant information about the energy concentration of the frequencies in the musical texture that could be used to enlarge the understanding of invariant properties of the *sound masses*.

Future works may perform a comparative analysis between the audio features of the *Continuum*'s performance with a symbolic analysis of the score, to verify how the melodic patterns lead to these psychoacoustic characteristics. Also, experimental works with expert and non-expert listeners could provide more information about the accuracy of the *Roughness* feature in the segmentation of the piece.

References

- [1] Jason Noble and Stephen McAdams. Sound mass, auditory perception, and 'post-tone' music. *Journal of New Music Research*, 49(3):231–251, May 2020.
- [2] György Ligeti and Péter Várnai. *Ligeti in conversation*. Da Capo Press, 1983.
- [3] Stephen McAdams, Philippe Depalle, and Eric Clarke. Analyzing musical sound. In *Empirical musicology: Aims, methods, prospects*, pages 157–196. Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [4] Pierre Couprie. Graphical representation: an analytical and publication tool for electroacoustic music. *Organised Sound*, 9(1):109–113, 2004.
- [5] Danilo Rossetti, William Teixeira, and Jonatas Manzioli. Emergent Timbre and Extended Techniques in Live-Electronic Music: An Analysis of Desdobramentos do Contínuo Performed by Audio Descriptors. *Revista Música Hodie*, 18(1), 2018.
- [6] Danilo Rossetti, Micael Antunes, and Jônatas Manzioli. Compositional Procedures in Electronic Music and the Emergence of Time Continuum. *Organised Sound (pre-print)*, 2020.
- [7] Mikhail Malt and Emmanuel Jourdan. Le "BSTD"—Une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore, 2009.
- [8] Ivan Eiji Simurra and Rodrigo Borges. Combining Automatic Segmentation and Symbolic Analysis based on Timbre Features – A Case Study from Ligeti's Atmospheres. In *Proceedings of the 11th International Conference of Students of Systematic Musicology*, page 4, 2019.
- [9] Micael Antunes, Danilo Rossetti, and Jônatas Manzioli. Emerging structures within micro-time of Ligeti's Continuum (pre-print). In *Proceedings of the 2021 International Computer Music Conference*, Santiago, Chile, 2021.
- [10] Micael Antunes, Guilherme Feulo, and Jônatas Manzioli. A perceptual approach to Ligeti's Continuum with a Roughness descriptor. In *Livro de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia*, pages 18–19, Évora, 2020.
- [11] Curtis Roads. *Microsound*. MIT Press, Cambridge, Mass, 2001.

- [12] Pantelis Nestor Vassilakis. *Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance*. PhD Thesis, University of California, Los Angeles, Califórnia, 2001.
- [13] Jane Piper Clendinning. The Pattern-Meccanico Compositions of György Ligeti. *Perspectives of New Music*, 31(1):192, 1993.
- [14] Emílios Cambouropoulos and Costas Tsougras. Auditory Streams in Ligeti's Continuum: A Theoretical and Perceptual Approach. *Journal of interdisciplinary music studies*, 3(1-2):119–137, 2009.
- [15] Chelsea Douglas, Jason Noble, and Stephen McAdams. Auditory Scene Analysis and the Perception of Sound Mass in Ligeti's Continuum. *Music Perception*, 33:287–305, 2016.
- [16] Karlheinz Stockhausen and Robin Maconie. *Stockhausen on Music Lectures and Interviews*. Marion Boyars Publishers Ltd, London, 1989.
- [17] Frederik Knop. Making it home? The natural sciences as a site of belonging in György Ligeti's music. In *György Ligeti's Cultural Identities*. Routledge, New York, 2018.
- [18] György Ligeti. *Neuf essais sur la musique*. Éditions Contrechamps, Genève – Suisse, 2010.
- [19] Jane Piper Clendinning. *Contrapuntal techniques in the music of György Ligeti*. PhD thesis, Yale University, 1990.
- [20] György Ligeti and Bernard Jonathan W. States, Events, Transformations. *Perspectives of New Music*, 31(1):164, 1993.
- [21] Eric Drott. Ligeti in Fluxus. *Journal of Musicology*, 21(2):201–240, April 2004.
- [22] Pierre Couprie. EAnalysis: aide à l'analyse de la musique électroacoustique. 2012.
- [23] William Sethares. *Tuning, timbre, spectrum, scale*. Springer, London, 2nd ed edition, 2005.
- [24] Micael Antunes, Danilo Rossetti, and Jônatas Manzolli. A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors. In *Proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Computer Music* Federal, pages 4–11, São João del Rey, 2019.
- [25] Reinier Plomp and Willem Johannes Maria Levelt. Tonal consonance and critical bandwidth. *The journal of the Acoustical Society of America*, 38(4):548–560, 1965. Publisher: Acoustical Society of America.
- [26] Eberhard Zwicker, Gordon Flottorp, and Stanley Smith Stevens. Critical Band Width in Loudness Summation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(5):548–557, May 1957.
- [27] Micael Antunes. *Redução da dissonância sensorial em uma escala temperada utilizando timbres inarmônicos: uma abordagem experimental e aplicações artísticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [28] Brian McFee, Colin Raffel, Dawen Liang, Daniel Ellis, Matt McVicar, Eric Battenberg, and Oriol Nieto. *librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python*. pages 18–24, Austin, Texas, 2015.
- [29] Micael Antunes and Jônatas Manzolli. A psychoacoustical approach to Ligeti's concept of permeability. In *Livro de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia*, pages 20–21, Évora, 2020.
- [30] Micael Antunes, Danilo Rossetti, and Jônatas Manzolli. A computer-aided analysis of the Orchestration in Iannis Xenakis' Aroua (pre-print). In *Proceedings of the 10th European Music Analysis Conference*, Moscow, 2021.
- [31] David Huron. Tone and voice: A derivation of the rules of voice-leading from perceptual principles. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 19(1):1–64, 2001.

2.6 Analysing Mikka “S”: from Micro to Macrocomposition and Perception Features.

Esta seção se dedica à apresentação do artigo *ROSSETTI, D.; ANTUNES, M.; MANZOLLI, J. Analysing Mikka “S”: from Micro to Macrocomposition and Perception Features. Em: Centenary International Symposium XENAKIS 22: Lectures Workshops Concerts. Greece: Spyridon Kostarakis, 2022. .*

Este artigo relata a realização de uma análise da composição *Mikka 'S* (1976) para violino solo, de Iannis Xenakis. O artigo integra a análise da *rugosidade* com informações da análise simbólica da partitura. A principal contribuição deste artigo consiste em evidenciar, por meio de dados provenientes da partitura e do áudio, como a evolução da *rugosidade* pode ser um elemento-chave na descrição das texturas ao longo do tempo de *Mikka 'S*.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

Este artigo representa mais uma aplicação do descritor de *rugosidade* no âmbito do repertório da música do Século XX. Além disso, destaca-se por abordar concretamente o desafio da integração de dados simbólicos da partitura com informações de áudio para a análise musical, oferecendo um passo importante que será incorporado em tarefas posteriores desta pesquisa.

Questões de Pesquisa

Esse trabalho de análise parte de 2 questões principais:

- As características texturais de *Mikka 'S* podem ser descritas a partir de curvas de *rugosidade*?
- Como essas curvas de *rugosidade* podem servir de suporte para uma segmentação dessa obra?

Essa abordagem é justificada neste contexto devido ao emprego do modelo de *síntese estocástica* (XENAKIS, 1992) por Xenakis na composição dessa obra. Essa estratégia de composição é conectada com a composição de diversos gestos musicais, tais como *glissandos*, *double stops*, *microtonalidade*, entre outros. Essas características da composição possibilitam a manifestação de elementos psicoacústicos que não podem ser completamente descritos apenas por meio da análise da partitura.

Uma das limitações deste estudo está associada às características inerentes ao modelo de *rugosidade* utilizado, já expostos na seção 2.5. Modelos de *rugosidade*, incluindo o modelo de

Vassilakis (VASSILAKIS, 2001) empregado neste estudo, não consideram aspectos relacionados aos transientes de ataque. Portanto, enfrentamos uma limitação ao avaliar a *rugosidade* na seção D da peça, a qual explora diferentes modos de ataque ruidosos e com grande intensidade no violino.

Metodologia

A metodologia desse artigo se baseia no conceito de música estocástica proposto por Iannis Xenakis, conforme expresso em sua obra (XENAKIS, 1992, p.42), que fundamenta tanto seus modelos de síntese quanto o processo composicional específico de *Mikka 'S* (SOLOMOS, 1996). Utilizamos como *corpus* analítico a gravação do Arditti String Quartet, extraída do álbum *Iannis Xenakis: Chamber music 1955 – 1990*, gravado em 2016. As análises de áudio foram conduzidas por meio da implementação do modelo de *rugosidade* desenvolvido em nossa pesquisa (ver Seção 2.5, utilizando as bibliotecas *Librosa* e *Matplotlib* no *Python*. Para as representações simbólicas da partitura, empregamos os softwares *Excel* e a biblioteca *Matplotlib* do *Python*. Os critérios para a criação da representação da informação simbólica são detalhadamente descritos no artigo. A validação musicológica desta análise foi realizada mediante um processo que envolveu a análise combinada da informação dos descritores de áudio com os dados simbólicos provenientes da partitura. Além disso, a avaliação da coerência dos dados extraídos foi confrontada sob o ponto de vista teórico dos sistemas dinâmicos. Por fim, a interpretação crítica por parte dos autores do artigo desempenhou um papel no processo de validação.

Resultados e implicações

A análise realizada neste estudo revelou distintas estratégias empregadas na manipulação da *rugosidade* ao longo da composição. Essas estratégias incluíram a 1 - manipulação dos intervalos entre as notas; 2 - a exploração de nuances na dinâmica; e 3 - a exploração de diversos níveis de complexidade na polifonia. Desse modo, a análise foi capaz de revelar como diferentes configurações das *massas sonoras* podem levar à emergência de similaridades do ponto de vista perceptivo. Além disso, a análise comparativa entre a partitura e o áudio foi capaz de mostrar que existe, de certa forma, uma desproporção entre a dinâmica notada e a dinâmica executada na gravação.

Analysing Mikka “S”: from Micro to Macrocomposition and Perception Features

Danilo Rossetti, Department of Arts, Federal University of Mato Grosso, Brazil,
d.a.a.rossetti@gmail.com – <https://orcid.org/0000-0001-7690-8048>

Micael Antunes, Interdisciplinary Nucleus for Sound Studies, State University of Campinas, Brazil,
michaelant@gmail.com – <https://orcid.org/0000-0002-0551-388X>

Jônatas Manzolli, Interdisciplinary Nucleus for Sound Studies, State University of Campinas, Brazil,
jotamanzo@gmail.com – <https://orcid.org/0000-0003-4257-7118>

Proceedings of the Xenakis 22: Centenary International Symposium Athens & Nafplio (Greece), 24-29 May 2022 - <https://xenakis2022.uoa.gr/>

Abstract

Iannis Xenakis always questioned traditional music theories, and acoustic theories applied to music, particularly. Based on Xenakis’ writings, it is possible to notice a critical position to the Fourier series, natural harmony, and serialism, among other points. Anchored in such viewpoint, in the 1970s, Xenakis created a synthesis method using finite juxtaposed elements to model the stochastic variations in the sound level pressure. In parallel, he used this method as a sonification strategy to be applied to instrumental composition resulting in a series of works including *Mikka “S”* (1976), for solo violin. In this article, we analysed *Mikka “S”* based on two hypotheses: 1) Xenakis’s viewpoint dialogue with complex dynamic systems theory correlated to the multidimensionality of musical parameters and their complex inter-relation; and 2) *Mikka “S”* can be analysed by the evolution of the psychoacoustic feature of roughness, which is a perceptual sensation also dependent on multiple musical variables. We argue that the compositional and instrumental techniques employed in this work such as polyphony, microintervals, different types of glissandi, intensities, modes of attack, durations are Xenakis’s strategies employed to control the roughness evolution during the piece. We conclude by observing a general tendency of the *Mikka “S”* musical texture to increase the roughness in time. In addition, we point out that the multidimensionality of the roughness perception opens the possibility of a large exploration of the musical material producing stimuli to different sensorial responses.

1. Introduction

We introduce our study describing how Xenakis’s questioning of Fourier Analysis and Synthesis converged to his development of a new method of sound synthesis.

He seems to always have questioned traditional music theories and acoustic theories applied to music. Based on his writings, and also in his compositions, one can rapidly observe that had a critical position concerning this musical conception founded on the Fourier analysis-synthesis approach, natural harmony, and serialism (Xenakis, 1971, p. 242). Xenakis’s position can be attributed to multiple factors, but maybe one passage in an interview with François Delalande could resume his viewpoint: “One must always cultivate a new view, that is to say the distancing. One should be constantly an immigrant”¹ (Delalande, 1997, p. 123).

¹ « C’est à dire qu’il faut cultiver constamment le regard neuf. C’est-à-dire la distanciation. Il faut être constamment un immigré » (Delalande, 1997, p. 123).

Starting upon such Xenakis's concept of dynamicity and change over time, we can also highlight his interest in complexity and interdisciplinarity, concerning the mathematization of musical parameters and the construction of abstract relations between sounds and concepts, leading to the formalization of composition processes (Gibson, 1994, p. 9).

In "*La crise de la musique sérielle*" (1955), the main points of Xenakis's criticism of serialism are that the principal materials of such music are frequency, intensity, and timbre, although the frequency has a preponderance in dodecaphonism as the linear arrangement of the twelve tones. Besides the row, another issue is the use of a polyphonic arrangement to organise the pitch material in serial music. Given that, in polyphony, a complex passage, with a considerable number of voices, results in amalgams of pitches in different registers. Xenakis identifies such use as a contradiction of serial music. It is because the polyphonic amalgam results in a perception of sound masses due to the saturation of auditory perception, and therefore one cannot identify the voices separately (Xenakis, 1994, p. 39-41).

Starting upon such viewpoint, Xenakis created the principles of stochastic music, where polyphony disappears, and sounds are independent. Its organization is based on the statistical mean of the isolated states of transformation in time. Thus, we have the introduction of the notions of probability and combinatorial calculation in musical composition. Another crucial issue is that macroscopic perception (that can be the perception of sound objects or the perception of macroform) is controlled by the mean of the internal movement of sounds (Xenakis, 1994, p. 42). Then, the abandonment of the traditional notions of harmony and counterpoint would result in the notion of time-varying frequencies density, which could be vertical aggregates or horizontal sequences of sounds (Xenakis, 1994, p. 45). Just such characteristics of the sonic aggregation created by Xenakis, inspire us to use a model of Roughness to analyse the musical texture of *Mikha "S"*.

During the end of the 1960s, Iannis Xenakis had worked at Bloomington, using computers to work on sound synthesis. Normally, at this time, synthesis was conceived as a superposition of harmonic or inharmonic partials, as a kind of additive synthesis (Solomos, 1996, p. 47). For Xenakis, sounds produced by simple sinusoidal oscillators were marked by a simplistic sonority, moreover, the serial approach utilized in electronic music could not improve the sound result. Xenakis enumerated a few problems related to such synthesis method used in electronic music, as follows: 1) Studies of Meyer Eppler have shown that orchestral sounds present spectral variations in frequency and amplitude in their stationary parts that give "life" to sounds. These variations should be approached by new theories with different acoustic and harmony conceptions. 2) The importance of the transient part of the sound for timbre recognition. 3) The inexistence (until the beginning of the 1970s) of a pattern and form recognition theory to translate synthesized curves in the perception of forms and configurations (Xenakis, 1992, p. 243-244).

As an attempt to solve those problems identified in microcomposition, Xenakis proposed the synthesis method of finite juxtaposed elements by taking the atmospheric pressure as a control parameter of sound variation as a function of time, therefore he expected to obtain a complex curve with increasing irregularity, in a quasi-periodic manner approximating the sound result to noise. Xenakis pointed out that this strategy did not pretend to simulate already-known sounds but to produce unexpected and interesting "new" sounds. Also, the start point, different from additive synthesis, was an order-disorder concept, combined with means to increase or decrease it. Xenakis's idea was not to construct a complex sound from unity discontinuous elements (similar to the additive synthesis partials) but to generate sounds with continuous variations controlled using a stochastic approach (Xenakis, 1992, p. 245-246).

As Solomos (1996, p. 47) explains, Xenakis's method of sound recomposition (or sonification) was based on the most complex state of sound, the noise. On one hand, the sound pressure curves were directly generated using the vertical axis (Y) for sound amplitude and the horizontal axis (X) for time. Those aleatory curves are obtained with Brownian movements (chaotic displacement processes of

suspended particles in a liquid or gas, which are the result of their collision with the molecules of the environment).

In this article, our analytical perspective is that Xenakis's method for sound synthesis dialogue with the theories of Complex Dynamic Systems. As we can understand from Solomos's statements above, the process of recomposition engaged by Xenakis deals with the multidimensionality of musical parameters and their inter-relation, conceiving them as a system of multiple variables evolving in time: e.g. the inter-relation of sound pressure curves with other musical parameters such as pitch, noise, time, musical intensity, density, and instrumental techniques. In addition, we observe the attention given by Xenakis to the transient part of the sound, which is very complex in comparison with the other parts of the sound envelope, presenting an irregular and unpredicted behaviour that is very difficult to be modelled by traditional synthesis methods.

Complex dynamic systems are normally unstable and formed by a large number of variables or isolated states. Moreover, in those systems, time is considered an independent dimension that evolves in a "one-way direction" (Prigogine, 1995, p. 26). In our view, music can be understood based on these notions (Rossetti & Manzolli, 2019; Rossetti et al., 2020). On the other hand, music theory historically gave more importance to one variable, the pitch, and many examples of this fact can be found. One of them is in Schoenberg's *Theory of Harmony* (1983, p. 421), where he affirmed that musical sounds have three operatory dimensions, pitch, timbre, and intensity, however, up to now the most largely expanded was the pitch.

Therefore, we present an analysis of *Mikka "S"* (1976), a violin solo work by Xenakis that deals with the theoretical background presented above and, at the same time, with technical issues of the violin. In the first moment, the sounds of *Mikka "S"* are produced by the interaction of two independent voices that interfere with each other in a polyphony constructed with large and continuous *glissandi* with microtone intervals. In the second moment, Xenakis used abrupt attacks *au talon*, and fast and discontinuous *glissandi* of different directions and sizes. As already pointed out, this kind of amalgam sonority can be analysed by a model of the psychoacoustic phenomenon of roughness, which is linked to this sensation of harshness. The roughness was first described by Helmholtz (1954) and more details of this psychoacoustic feature will be presented next. We highlight that although the roughness sensation was explained by Helmholtz in terms of traditional acoustic and psychoacoustic theories based on the Fourier approach, it is also a multidimensional phenomenon linked to complexity, and is dependent on multiple variables such as pitch intervals, intensity, and different modes of attack of the musical instruments. Moreover, this sound material is very prominent in *Mikka "S"*, and we hypothesize that it was explored by Xenakis in different ways in the composition process of this work.

2. Roughness definition

Roughness produces a type of harsh aural sensation and was introduced in psychoacoustics literature by Helmholtz (1954). This harshness sensation is perceived when a sound signal contains amplitude fluctuation rates between 20 and 150 fluctuations per second, depending on the pitch register. By the end of the 19th Century, Helmholtz defined the basis of psychoacoustics considering the Fourier law, which enunciated that "any given regular periodic form of vibration can always be produced by the addition of simple variations, having pitch numbers that are once, twice, thrice, four times, etc., as great as the pitch numbers of the given motion" (Helmholtz, 1954, p. 34). Analogously, the ear performs the inverse operation to perceive pitch: "musical tones could be resolved into a series of partial tones corresponding to the simple pendular vibrations in a mass of air", as Ohm's acoustical law indicated (Helmholtz, 1954, p. 49).

Traditionally, in Western music, roughness is also related to consonance and dissonance, and a clear example of a roughness sensation is achieved by a minor second interval performed by any instruments or voices. The reason that harmonic intervals different from unisons exhibit amplitude fluctuations are linked to the phenomenon of interference, and the reason that some of those intervals correspond to rough sounds is related to the mechanical properties of the inner ear. Roughness sensation

is usually understood in terms of the sine-component interaction between the same frequency band and the critical band² (Vassilakis, 2005, p. 119-122).

The roughness model is related to the sense of very fast amplitude variations of the sound. It is partially conditioned by the physical characteristics of the sound signal (mainly pitch and intensity), and by the properties of the inner ear (Vassilakis, 2001). For the audio-feature roughness analysis and its graphs elaboration, an implementation of the descriptor using Vassilakis's model (2001) in a Python environment was performed by Antunes; Feulo; Manzolli, 2021 and will be used in the analysis presented here.

The roughness calculation is commonly anchored in the parametrization of the dissonance curve in the function of the critical bandwidth (Vassilakis, 2001), as introduced by Plomp and Levelt's experiment (Plomp; Levelt, 1965). The roughness, as proposed by Vassilakis (2001), is calculated as a sum of the local roughness for each pair of partials of the spectra, as follow:

$$R(f_1, f_2, A_1, A_2) = \frac{1}{2} (A_1 * A_2)^{0,1} \left(\frac{2A_2}{A_1 + A_2} \right)^{3,11} [e^{-b_1 s(f_2 - f_1)} - e^{-b_2 s(f_2 - f_1)}] \quad (1)$$

where $f \in A$ are the partials frequency and amplitude, and $b_1 = 3,5$, $b_2 = 5,75$, $s = \frac{0,24}{s_1 f_1 + s_2}$, $s_1 = 0,0207$ e $s_2 = 18,96$, parameters deduced by the approximation of Plomp and Levelt's experimental curve. We used in this analysis a python implementation of the Vassilakis roughness model, as introduced by Antunes; Feulo; Manzolli, 2021.

3. Analysis of Mikka "S"

In the mid-1970s, Xenakis could not realize his new synthesis technique by lack of means. Instead, he applied the principle to instrumental music, resulting in a series of works including *Mikka* (1971), for solo violin, *N'Shima* (1975), for two sopranos and instrumental quintet, *Theraps* (1975-76) for solo double bass, and *Mikka "S"* (1976), for solo violin. In those works, continuous and non-linear (discontinuous) *glissandi* are largely found, varying from tiny to large registers, resembling random walks (Solomos, 1996, p. 49). As Luque (2009, p. 79) asserts, in *Mikka*, *N'Shimma*, and *Mikka "S"*, Xenakis generated stochastic synthesis curves in a graphic plot to define the pitches and *glissandi*'s durations, mapping the horizontal axis is time and vertical axis into a grid of quarter tone pitch values.

Mikka "S", for solo violin, is a work of around four minutes, which is dedicated to Mica Salabert. The *glissando* is a preponderant instrumental technique in this piece, consisting of two basic types: long and slow *glissandi* with overlapping entrances, resulting in a two-voice texture; and short, cut-off disconnected gestures by upward strokes at the heel (*au talon*) of the bow. An important role between continuity and discontinuity textures is linked to the structure of this work. Continuous contact between the bow and strings is maintained in the first 60 measures (with a duration around 2'40''), with tempo unity of half note equal (or faster) to 54. The last 16 measures, on the other hand (Ca. 1'20''), mostly consist of brief and disconnected *glissandi*, interleaved with sustained pitches (Squibbs, 1996, p. 243).

The analysis presented here consists of two procedures: a) the first that uses the material from the music score, we define as "symbolic analysis", and b) the second, that uses an audio recording of the piece, we define "audio analysis". In the first, we plotted pitch, duration, and intensity information in two graphics: 1) a plot of the duration (X-axis) and pitch (Y-axis), and 2) a plot of the duration (X-axis) and intensity (Y-axis). Additionally, these two graphics were compared to an audio-feature extraction of the roughness evolution in time, from an audio recording of *Mikka "S"*.

² The term critical band was introduced by Fletcher in the 1940s and refers to basilar membrane area that vibrates in resonance to an incoming sine wave (Vassilakis, 2005, p. 122).

3.1. Analytical hypothesis

Our hypothesis is that when listening to *Mikka "S"*, one can identify the presence of different levels of roughness produced by the interaction of the 2 voices performed by the violinist, also in the discontinuous gestures of *glissandi* played *au talon*. We will search to identify which excerpts of the work can produce higher and lower roughness sensations, relating them with the intervals written in the score. After finding those regions with prominent roughness values, we will seek to propose a formal segmentation of the piece based on the information collected by the analysis methods utilized.

3.2. Symbolic analysis

For the analysis of the score, we first plotted the information of pitch and duration of the notes in the score in a 2-dimension graphic having the durations in the X-axis and pitches in the Y-axis. The unity of the durations are the measures and their subdivisions, and the unity of the pitches are pitch-class numbers, with middle C = 60 (quarter tones are defined in *midicents*, e.g. C4 a quarter tone higher = 60,5). Then, similarly, we plotted the intensities information (Y-axis) also in function of time (X-axis). To define a scale of intensities, these specific values from 0 to 90 were chosen, corresponding to dynamics notation (from *ppp* to *ffff*): silence = 0, *ppp* = 10, *pp* = 20, *p* = 30, *mp* = 40, *mf* = 50, *f* = 60, *ff* = 70, *fff* = 80, and *ffff* = 90. Figure 1 shows the resulting graphics.

Observing the higher part of Figure 1³, the durations X pitches graphic, one can visualise the behaviour of the pitches in both voices and their *glissandi* in time. From measure 1 to 19, voice 1 and voice 2 maintain a distance approximately of an interval of a sixth, except for measures 11 and 12 when the interval decreases and approximates to a second interval. Measures 19 to 21 have only one voice descending to a lower register (around G3). In measures 22 to 27 the voices behave similarly to the beginning of the piece in terms of intervals; however, the movement of the voices increases. From measure 30 to 47, voice 2 remains in A4 pitch (69), while voice 1 moves below and above this pitch. From measure 36 to 40, voice 1 performs a continuous *glissando* from F4 a quarter tone higher to A4, continuously approximating to the unison that is achieved in the second beat of measure 40. This unison quickly ends with a descending *glissando* in voice 1.

In measure 47 a new design begins. Voice 1 performs *glissandi* in higher regions (from B5 to E5, measures 47 to 53, and from E4 a quarter tone higher to C#6 a quarter tone higher), while voice 2 moves to a lower register, between G3 and D4). Then, in measure 54 an extremely high descending *glissando* begins in voice 4, from E7 achieving C#5 at the end of measure 60. In the same excerpt, voice 1 performs a *glissando* from measure 55 to the end of measure 60, beginning in A#6 and descending until E5. It is very important to highlight that both *glissandi* cross each other, resulting in a very intricate passage. Then, from measure 61 to 76, the piece evolves to a single voice, mostly in *ffff*, with the presence of several fast and discontinuous *glissandi au talon*, sometimes separated by long notes, such as in measures 66, 67, 68, 69, 72, 74 and 75. It's a different part of the piece in terms of character, possibly composed using a different process. Here, we can infer that Xenakis developed aleatory curves obtained with Brownian movements.

In terms of dynamics over time, which can be observed in the lower part of Figure 1, most of the time the dynamics of the two voices evolve similarly. We find differences in measures 25 and 26 where voice 2 is maintained in *fff*, while voice 1 decreases from *fff* to *p*. From measures 47 to 53 there are also differences. In measures 47 and 48, voice 1 dynamics increases from *p* to *fff*, and voice 2 remains in *fff*. In measures 50 to 52, a "canon" of dynamics is observed: voice 2 increases from *p* to *fff* from the middle of measure 50 to the beginning of measure 51. The same behaviour in voice 1 is found in voice 1 from the second beat of measure 51 to the beginning of measure 52. At the middle of measure 52, both voices return to *p*.

³ The data used to elaborate the graphic is available at https://gitlab.com/micael_antunes/mikka_s_roughness/.

Based on the behaviour of the voices, we deduced 4 musical textures, leading to 4 segments of the piece. Segment A (bars 0 – 26) exhibits a texture of oscillatory patterns in both voices. The major characteristic of segment B (bars 26 – 47) is the static note of the voice 2. Segment C (47 – 61) displays an expansion of the register and complex behaviour of the 2 voices in texture. Finally segment D presents only one voice (Voice 1) in the musical texture. The formal subdivision of *Mikka* “S” in four sections is presented in Figure 2

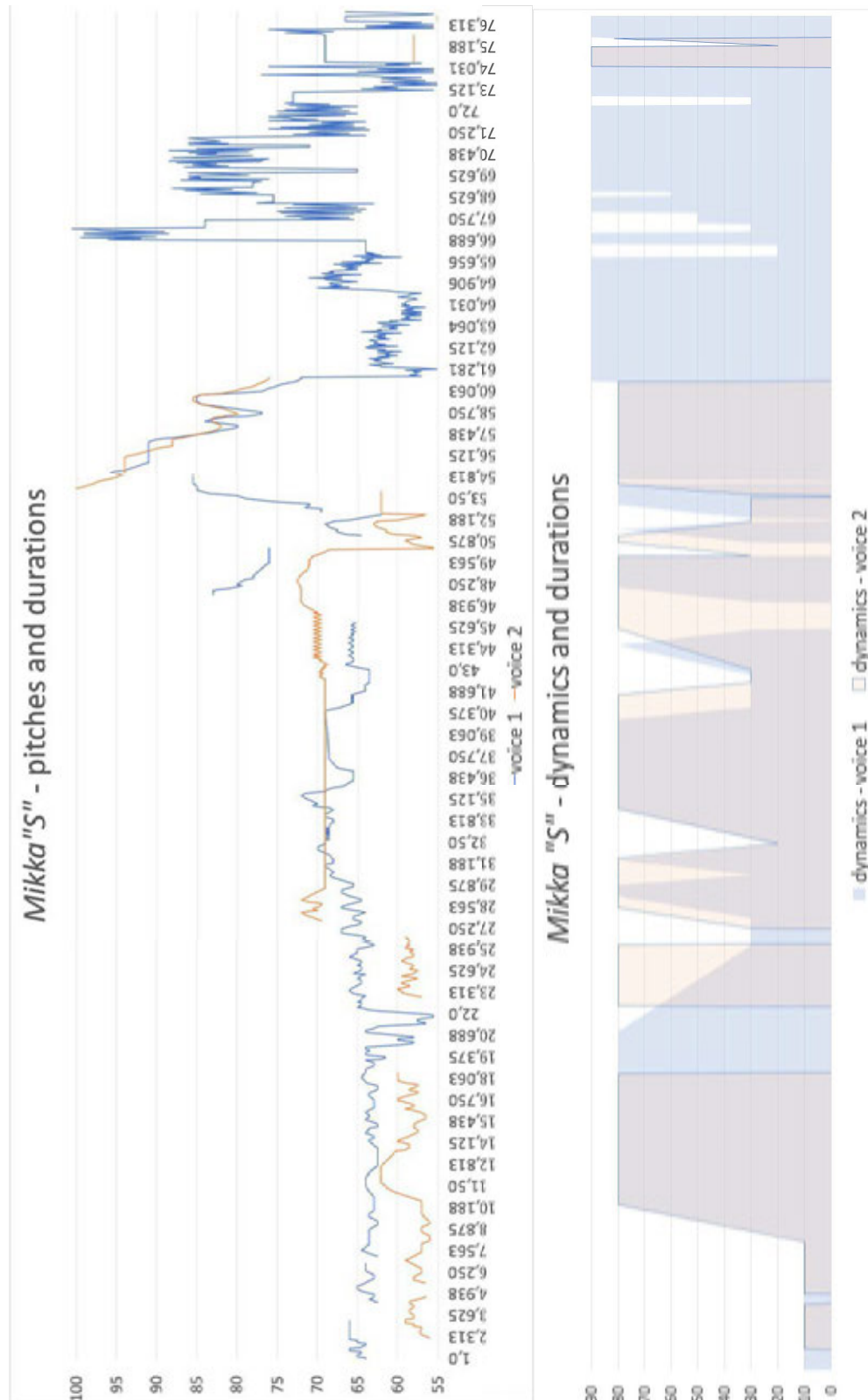


Figure 1: Mikka “S” graphics of pitches, intensities, and durations.

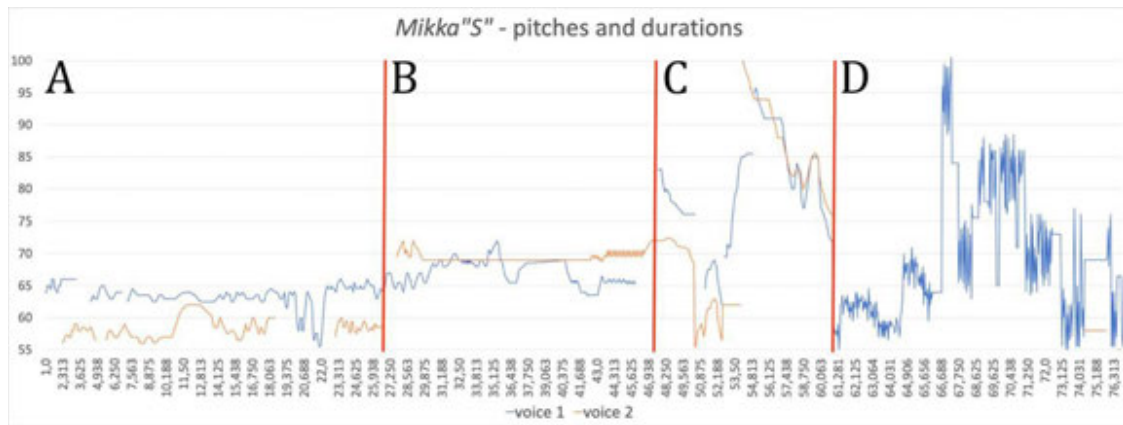


Figure 3: Mikka "S" segmentation in four sections (A, B, C, and D).

3. Audio-feature analysis

We choose the recording of the Arditti String Quartet, from the album *Iannis Xenakis: Chamber music 1955 – 1990*, recorded in 2016. Based on the score segmentation, we performed the segmentation from audio, as follow in Table 1:

Segments	A	B	C	D
Bar	0 - 26	26 - 47	47 - 61	61 - 77
Recording Time	0:00.000 - 1:17.067	1:17.067 - 2:23.352	2:23.352 - 2:57.250	2:57.250- 4:20.573

Table 1: Score and audio segments of Mikka "S".

To perform the analysis from audio, we used Python⁴ and Jupyter⁵ environment and the code is available on a Gitlab repository⁶. To extract the spectral information from audio, we used the reassigned spectrogram module from librosa⁷, with a window size of 8192 samples and a hop size of 1024 samples. Then we used a librosa peak picking algorithm to select the frequency and amplitude values of each time window and calculate the roughness with the Vassilakis model (Eq 1), as implemented by Antunes; Feulo; Manzolli, 2021. The result of the roughness calculation in Mikka "S" for the 4 segments is displayed in Figure 3

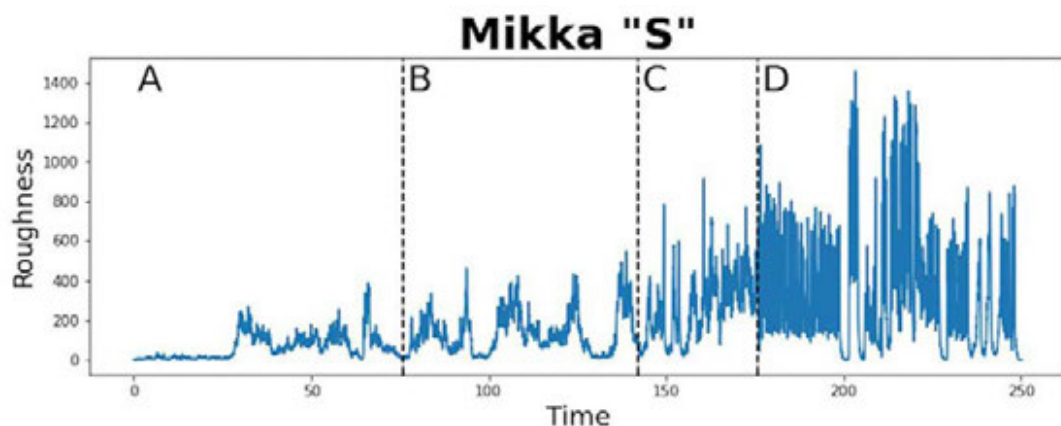


Figure 3: Roughness calculation in Mikka "S".

⁴ <https://www.python.org/>

⁵ <https://jupyter.org/>

⁶ https://gitlab.com/micael_antunes/mikka_s_roughness

⁷ <https://librosa.org/>

We notice that the roughness exhibits an accumulation behaviour through time. Both the intensity and the variation rate increase through time. To understand the role of roughness in the composition, we present an analysis with both symbolic and audio data in the next topic.

4. Outcomes and discussion

Due to the role of the roughness in the relationship between voices, we assume as a focus to investigate the roughness characteristics in the polyphonic texture of the piece. So, we selected the first 3 segments of the piece to analyse. In Figure 4 we present the symbolic information of the score considering the pitches and their respective dynamics in the function of the bars, at the top of the figure, and their respective roughness, in the function of the recording time (in bars, above, and seconds, below).

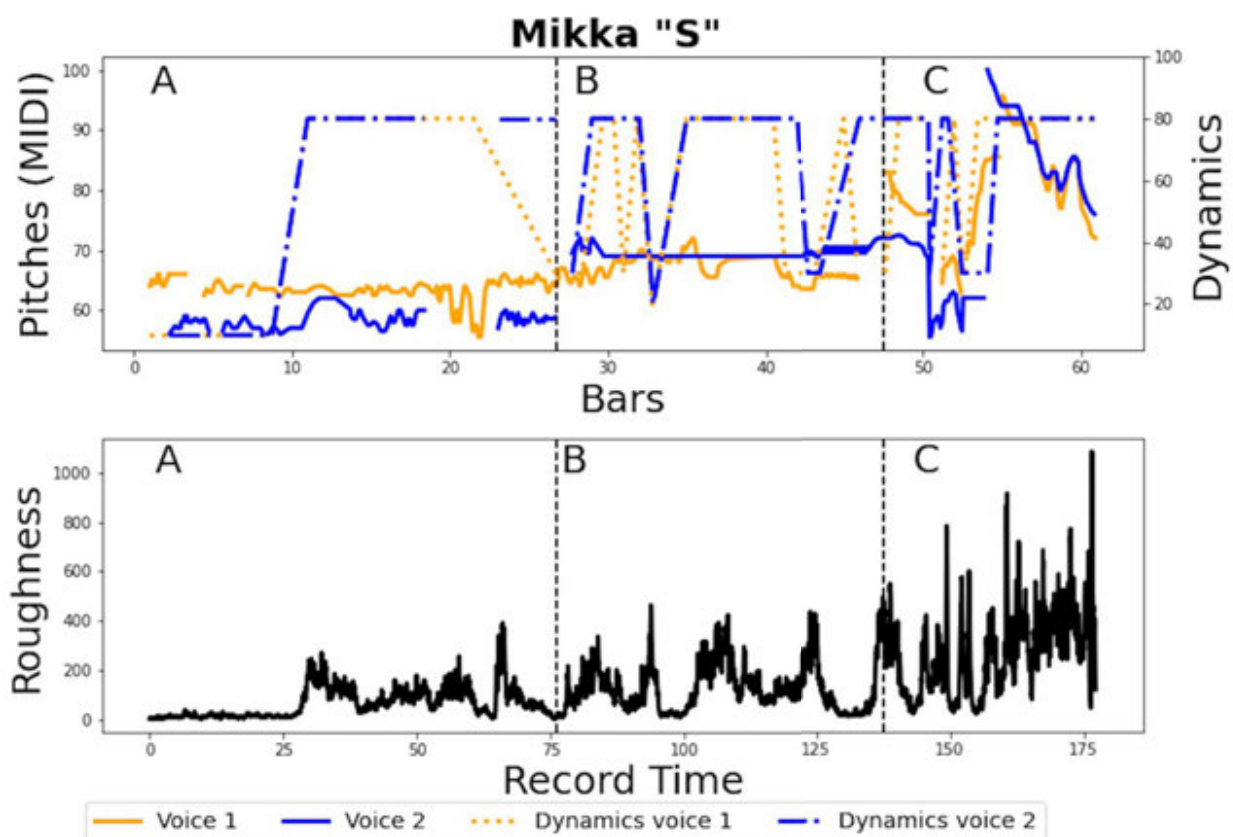


Figure 4: Pitches, dynamics, and roughness in *Mikka "S"*.

By observing Figure 4, we notice an overall tendency of the pitches, starting from lower frequencies in segment A until achieving higher frequencies in segment C. We also observe an increasing profile of the roughness in time, through the 3 segments. A complex pattern of dynamics is observed through time.

To investigate types of textural behaviour in these segments, we selected 3 excerpts from the piece aiming to analyse with more focus, due to the characteristics of the 2 voices' interactions. The first segment is from measure 0 to 18, the second is from measure 25 to 42 and the third is from measure 48 to 60. Those segments and their analysis are presented in Figure 5.

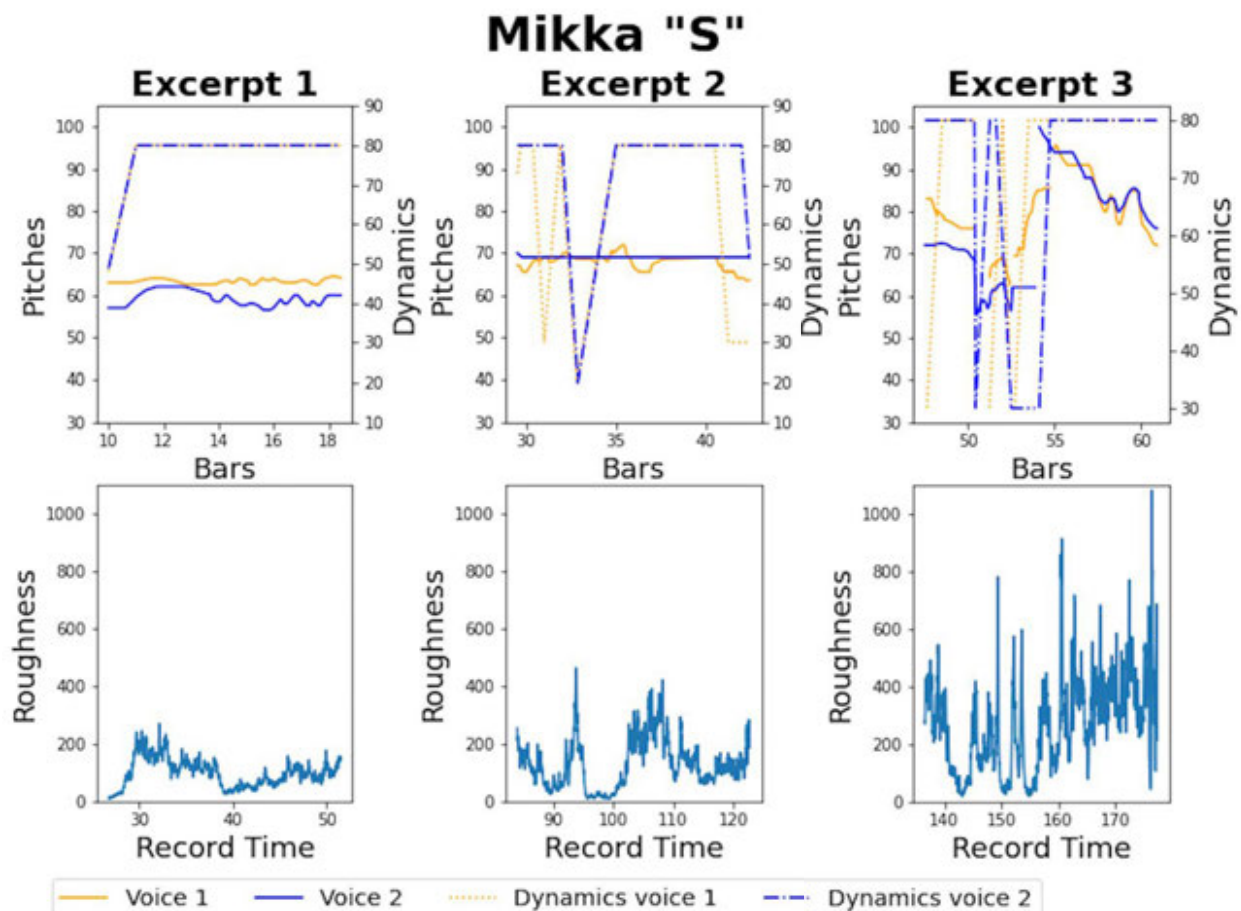


Figure 5: Symbolic and audio data in three excerpts of Mikka "S".

By observing the score from the data collected, we notice that the main focus of the musical texture is the interaction between the 2 voices through the manipulation of the very short intervals between the voices. We notice that excerpt 1 does not exhibit differences in dynamics. Consequently we see that the roughness levels are a consequence of the very short intervals of the 2 voices.

In excerpt 2 a texture is explored by using a static note surrounded by the pitches of the voice 1. The dynamics display very different values in both voices with some contrasts. In terms of roughness, we observed a very rich exploration of the roughness, with several contrasts, like that observed from 90 to 100 seconds of the recording.

Excerpt 3 exhibits the moment of higher polyphonic complexity of the piece. The 2 voices have their interactions with a huge variety of melodic profiles. From bar 4 to 60, a moment of the highly intricate profile of the 2 voices is observed. We also notice that the dynamics dramatically change through the excerpt, with high contrasts, like those of bars from 6 to 54. Due to the complexity of the music excerpt, we notice that the roughness exhibits a very complex profile, with the highest values of the 3 excerpts.

5. Conclusion

By observing the roughness profile of the piece, we notice a general tendency of the musical texture to increase the roughness in time. To achieve this state, we highlight 3 main compositional strategies: the first is to explore the roughness changes by using the difference of distances of notes with no changes in dynamics, like in excerpt one. The second consists in exploring the balance of dynamics in the two voices, like in the initial moment of excerpt 2. And the last one is a consequence of the exploration of polyphonic complexity.

These strategies lead to 2 main perceptual characteristics in roughness exploration. The first with the exploration of slow changes in time, with very subtle changes in time, which is mainly explored in excerpts 1 and 2. And the second, very abruptly changes and very fast variation of roughness in time, like in excerpt 2.

We may affirm that the dynamic extracted from the score and the perceived dynamic from the recording in time is not linear. It means that the execution of the notated dynamic of the score through time changes in the function of its context. Specifically, in *Mikka "S"*, we notice a continuous increase in the dynamic intensity as a performance strategy. So, it is also at the source of the increase in the roughness profile of the piece.

We understand the multidimensionality of the roughness perception opens the possibility of a broad exploration of the musical material. In this sense, we confirm the interest of Xenakis in complex sound phenomena. Although roughness is defined through traditional acoustic and psychoacoustic theories, its dynamical behaviour is dependent on multiple variables and can be controlled and manipulated in time. *Mikka "S"* and other works by Xenakis of this period are the results of his research in new microsound structures by applying synthesis and sonification methods based on complexity, multidimensionality, and inter-relation of parameters. Moreover, the evolution in time of those phenomena is controlled by Xenakis through multiple factors, such as the polyphony behaviour, intensities, instrumental techniques, modes of attack, registers, and the different types of glissandi employed in the work. Finally, the instrumental techniques employed in the compositional process of *Mikka "S"* can be also thought of as a complex system with multiple relations, opening the possibility to the rise of emergent sonorities and psychoacoustic phenomena such as roughness.

Acknowledgments

Danilo Rossetti would like to thank the Muscom Research Group – Computer-aided Composition, Analysis, and Performance – (UFMT/CNPq). Micael Antunes has its doctoral research financed by FAPESP, grant number 2019/09734-3. Jônatas Manzolli is supported by the CNPq research fellowship grant 304431/2018-4

References

- Antunes, M., Guilherme F., Manzolli, J. (2021). "A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Study Case in Ligeti's Continuum for Harpsichord (1968)." In *Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Computer Music*, 77–84. Pernambuco.
- Delalande, F. (1997). "*Il faut être constamment un immigré*" *Entretiens avec Xenakis*. Paris Buchet/Castel.
- Gibson, B. (1994). *Préface*. In: Xenakis, I. *Kéleütha Écrits*. Paris: L'Arche, 7-12.
- Helmholtz, H. (1954). *On the Sensations of Tone*. New York: Dover.
- Luque, S. (2009). The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis. *Leonardo Music Journal* 19, 77-84.
- Plomp, R., Levelt, W. (1965). "Tonal Consonance and Critical Bandwidth." *The Journal of the Acoustical Society of America* 38 (4): 548–60.
- Rossetti, D., Antunes, M., Manzolli, J. (2020). Compositional Procedures in Electronic Music and the Emergence of Time Continuum. *Organised Sound* 25(2), 156-167.
- Rossetti, D. and Manzolli, J. 2019. Analysis of Granular Acousmatic Music from the Concepts of Sound Flux and Emergence. *Organised Sound* 24(2): 205–16.
- Schoenberg, A. (1983). *Theory of Harmony*. Berkeley: University of California Press.
- Solomos, M. (1996). *Iannis Xenakis*. P.O. Editions. hal-01202402.
- Squibbs, R. (1996). *An Analytical Approach to the Music of Iannis Xenakis: Studies of Recent Works*. Ph.D. Dissertation, Yale University, New Haven.

- Vassilakis, P. (2005). Auditory Roughness as Means of Musical Expression. In: Kendall, R. & Savage, W. (Eds). *Selected Reports in Ethnomusicology: Perspectives in Systematic Musicology*. Los Angeles: Department of Ethnomusicology, University of California, 119-144.
- Vassilakis, P (2001). *Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance*. Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles.
- Xenakis, I. (1992). *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*. New York: Pendragon Press.
- Xenakis, I. (1994). *Kéleütha Écrits*. Paris: L'Arche.

2.7 A Psychoacoustic-Based Methodology for Sound Mass Music Analysis

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; FEULO, G.; QUEIROS, M.; MANZOLLI, J. *A Psychoacoustic-Based Methodology for Sound Mass Music Analysis*. Em: ARAMAKI, M. et al. (Eds.). *Music in the AI Era. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 267–281.

O objetivo principal deste artigo é apresentar uma metodologia para a análise musical de composições que exploram o conceito de *massas sonoras*. Essa metodologia emprega técnicas de análise de áudio em conjunto com diversas fontes musicológicas, como textos de Ligeti e entrevistas com o compositor, além de teoria musical, análise musical e psicoacústica. A principal contribuição desse artigo é uma discussão analítica do primeiro movimento da obra *Ten pieces for Wind Quintet* (1968) de György Ligeti. Esta discussão é contextualizada do ponto de vista dos seus processos composicionais, atributos semânticos e informações da partitura, servindo como fundamentação para a análise da gravação.

O Papel do Artigo no Desenvolvimento da Tese

No âmbito desta pesquisa, este artigo representa uma contribuição substancial ao enfrentar o desafio da análise musical de composições que utilizam *massas sonoras*, explorando algumas questões essenciais: 1 - a consolidação de descritores de áudio que se alinham de maneira coerente com o estudo da música de *massas sonoras*; 2 - a discussão de um fluxo de trabalho de análise que seja coerente com a complexidade do uso de descritores no contexto musicológico; e 3 - a solidificação de uma estratégia de análise de áudio fundamentada em conceitos musicológicos do campo da composição musical.

Questões de Pesquisa

As indagações que motivam este artigo permeiam três pontos cruciais:

- 1 - Qual abordagem é mais adequada para realizar uma análise musical que esteja em sintonia com os conceitos de composição que inspiraram as criações de Gyorgy Ligeti?
- 2 - De que maneira é possível combinar as diversas fontes musicológicas, criando uma coesão entre os diversos materiais no âmbito da análise musical?

- 3 - Como os descritores de áudio, previamente empregados no contexto da música de *massas sonoras*, podem ser integrados de forma sinérgica para proporcionar uma visualização do processo de desenvolvimento formal de uma composição?

Essas questões são fundamentais para a construção de um método analítico. Esse método não apenas respeita a complexidade da composição em questão, mas também fornece uma leitura integrada do material musical. Sendo assim, essa abordagem pode motivar discussões e metodologias para novas análises musicais.

Metodologia

A fundamentação teórica deste artigo combina diversas fontes para construir uma base para a realização da análise musical. Assim como em trabalhos anteriores, as *massas sonoras* neste artigo são consolidadas a partir de definições musicológicas propostas por (NOBLE, 2018; NOBLE; MCADAMS, 2020). O objetivo é evidenciar o viés psicoacústico dessas definições, proporcionando uma base metodológica para a análise de áudio neste contexto. Exploramos os textos de György Ligeti que discutem seu processo composicional baseados nos conceitos de *permeabilidade e timbre em movimento* (LIGETI, 2017), bem como entrevistas com o compositor (MICHEL, 1995). Essa abordagem visa aprofundar a compreensão dos processos criativos subjacentes a obras analisadas, criando assim uma coerência que sustenta interpretação musicológica. No contexto da análise de áudio, esse trabalho consolida metodologias de áudio desenvolvidas para a análise da música de *massas sonoras* nesta pesquisa (ANTUNES; BOTECHIA et al., 2021; ANTUNES; FEULO; MANZOLLI, 2021). Finalmente, este trabalho dialoga com análises anteriores das *Ten Pieces for Wind Quintet* como proposta por (VITALE, 2008). Essa integração busca não apenas auxiliar na compreensão formal da obra, mas também estabelecer um diálogo que contribui para ancorar o ponto de vista interpretativo necessário para a análise musical.

Como *corpus* analítico utilizamos a versão da peça executada pelo *London Winds* no álbum *Ligeti Edition 7: Chamber Music*, gravada em 1998. A extração de características foi realizada utilizando *Python* e o ambiente *Jupyter*. *loudness* (Eq. 1.4), *irregularidade espectral* (Equação 1.11) e *entropia espectral* (Equação 1.12) foram calculados a partir do espectrograma de magnitude obtido usando *Librosa* (MCFEE et al., 2015), com um tamanho de janela de 4096 amostras e um tamanho de salto de 1024 amostras. O descritor de *roughness* foi obtido a partir do espectrograma reatribuído (FULOP; FITZ, 2006) com os mesmos parâmetros descritos

anteriormente, visando uma maior precisão dos valores de frequência e amplitude (ver Seção 2.5 e artigo (ANTUNES; FEULO; MANZOLLI, 2021)).

A abordagem musicológica adotada neste estudo segue o acúmulo de conhecimento dos trabalhos anteriores, detalhada na seção de metodologia deste artigo e na Seção 1.2.2 desta tese. Além de explorar o contexto musicológico das obras de Ligeti e seus textos composicionais, este estudo adotou uma abordagem interdisciplinar, contando com a colaboração de pesquisadores do Grupo de Computação Musical da Universidade de São Paulo (Compmus-Usp). Durante sua elaboração, foram realizadas extensas discussões sobre as representações gráficas a serem geradas, buscando coerência entre as representações do áudio e os conceitos propostos por Ligeti. Essas discussões também serviram para fundamentar as interpretações musicais descritas na análise musical.

Resultados e implicações

Os resultados específicos deste artigo incluem criar representações de áudio conectadas aos conceitos de György Ligeti, sendo o conceito de *timbre em movimento* representado pelos descritores de *loudness* e *rugosidade*, e o conceito de *permeabilidade* representado pelos descritores de *irregularidade espectral* e *entropia espectral*. Desta forma, o artigo apresenta representações ao longo do tempo e gráficos de dispersão, permitindo uma análise da composição a partir de duas perspectivas distintas: sua evolução temporal e as características psicoacústicas em cada segmento da obra.

Este artigo, sendo o mais recente e concluindo esta etapa de pesquisa, oferece uma contribuição fundamental para os próximos passos na análise musical com descritores de áudio. Ao mesmo tempo, consolida as propostas anteriores dos artigos desenvolvidos ao longo desta tese. Sua primeira grande contribuição reside na capacidade de refletir sobre um *fluxo de trabalho* que integra diversas fontes musicológicas com outros descritores de áudio. Além disso, proporciona uma discussão sobre como criar um ambiente musicológico para a análise musical, estabelecendo uma triangulação entre os conceitos de *massas sonoras*, os princípios composicionais de Ligeti e os descritores de áudio.

Em suma, este artigo representa uma contribuição significativa para a análise musical de composições que exploram o conceito de *massas sonoras*, fornecendo uma metodologia coesa e uma discussão analítica da obra *Ten pieces for Wind Quintet* de György Ligeti. Suas contribuições incluem gerar representações de áudio conectadas aos conceitos de Ligeti, bem como a abertura de novos caminhos para futuras explorações no campo da análise musical.

A psychoacoustic-based methodology for sound mass music analysis^{*}

Micael Antunes¹[0000–0002–0551–388X], Guilherme Feulo do Espirito Santo²[0000–0002–6275–169X], Jônatas Manzolli¹[0000–0003–4257–7118], and Marcelo Queiroz²[0000–0001–6687–3865]

¹ Interdisciplinary Nucleus for Sound Communication/ Arts institute, University of Campinas, Campinas, SP, Brazil
 micael.antunes@nics.unicamp.br

² Computer Science Department, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

Abstract. A *sound mass* is a specific state of the musical texture corresponding to a large number of sound events concentrated within a short time and/or frequency interval. Conceptually, it is associated with the work of György Ligeti, Krzysztof Penderecki, and Iannis Xenakis, among others. Recent studies have investigated *sound masses* via perceptual models, such as *Gestalt* models of perception and *auditory scene analysis*, and also from a more acoustic and psychoacoustic perspective obtained through audio recordings. The main goal of this paper is to propose a methodology for the musical analysis of *sound mass* music through audio recordings combined with other research sources from music theory, musical analysis and psychoacoustics. We apply this method in the analysis of a recording of the first movement of Ligeti’s *Ten Pieces for Wind Quintet* (1968), and explore relationships between the obtained audio descriptors and Ligeti’s concepts of *timbre of movement* and *permeability*, in order to reveal Ligeti’s strategies when dealing with musical texture and *sound masses*.

Keywords: Sound Mass Music · Musical Analysis · Psychoacoustics.

1 Introduction

This paper introduces a computer aided musical analysis methodology anchored on audio descriptors. Specifically, psychoacoustic models are applied to study *sound mass* composition. *Sound mass* composition emerges in the context of discussions about perception and 20th century serial music [22]. Noticeably, these discussions were part of the *Darmstädter Ferienkurse*, where composers attended classes and lectures on psychoacoustics, phonetics, information theory, and sound synthesis [6]. Some well-known examples of *sound mass* compositions are the large number of attacks in Ligeti’s *Continuum* (1968), the micropolyphony and

^{*} Micael Antunes is supported by FAPESP Grant 2019/09734-3 and 2021/11880-8. Jônatas Manzolli is supported by CNPq Grant 304431/2018-4 and 429620/2018-7. Marcelo Queiroz is supported by CNPq Grant 307389/2019-7.

cluster techniques in his *Chamber Concerto* (1961), and the mass created by *glissandi* and extended techniques of the string orchestra in Xenakis' *Aroua* (1971).

The central idea in *sound mass* composition is to emphasize perceptual features of sound, by exploring the continuum of time and frequency domains to produce sound textures with a high level of fusion and inner movement. Perception of *sound masses* is often linked with the limits of sound integration by the ear [22] and *microtime* perception [4]. *Sound mass* music is also associated with Huron's perceptual principles of *minimum masking*, *pitch proximity* and *limited density*, which are anchored in the *critical bandwidth* psychoacoustic model [20, 30].

Previous works have studied Ligeti's *sound mass* composition from a perceptual perspective, mainly through the *symbolic analysis* of the score. Clendinning explored such a perceptual approach in the study of Ligeti's compositional techniques such as *pattern-meccanico* [11] and *micropolyphony* [10]. Cambouropoulos [9] used *Gestalt* theory to investigate links between Ligeti's techniques and their perceptual outcomes, an approach already explored by Ferraz [16]. More recently, Douglas et al. [14] investigated *Continuum* (1968) within the context of Bregman's *auditory scene analysis* [7].

Methodologies anchored in audio descriptors with a psychoacoustic approach, which emerged in the context of computational and systematic musicology [26, 42, 24], have also been used to study Ligeti's works [24, 3, 2]. To get a broader view of musical analysis, the present study seeks to integrate several sources, such as musicological texts, psychoacoustic knowledge, symbolic information from the score, and audio descriptor representations. In this paper, we propose a methodology for musical analysis [42] focused on perceptual concepts that motivate *sound mass* music composition, associating them with descriptors derived from audio recordings. Specifically, we study Ligeti's viewpoint on *sound mass* composition through the concept of *timbre of movement* [22], associating it with *loudness* [15] and *roughness* [37]. Due to the correlation between spectral information and the perception of pitches and individual voices [20], we also investigate the use of *spectral entropy* [29] and *spectral irregularity* [8], associating them with Ligeti's concept of *permeability* [22, 3, 2, 4]. We present an musical analysis of the first movement of Ligeti's *Ten Pieces for Wind Quintet* (1968), using score-based information alongside the audio signal of a particular performance of this piece. We also derive representations based on audio descriptors that allow us to discuss Ligeti's compositional strategies and their perceptual aspects, as well as the formal development of the piece from the viewpoints of *timbre of movement* and *permeability*.

In Section 2, we lay out the theoretical background for this study, starting with an exposition of the concepts of *timbre of movement* and *permeability*. Then, we give an overview of the first movement of the *Ten Pieces for Wind Quintet*, followed by a review of the audio descriptors used in this work. In Section 3, we outline the analytical methodology proposed, and in Section 4 we present and discuss the results of our study. Finally, in Section 5, we present our conclusions.

2 Theoretical background

2.1 Ligeti's concepts of *Timbre of Movement* and *Permeability*

Two relevant György Ligeti's concepts associated with *sound mass* music composition are *timbre of movement*, which is linked with his knowledge of electronic music and psychoacoustics, and *permeability*, related to his point of view on the perception of pitches within a polyphonic texture.

The concept of *timbre of movement*³ refers to the achievement of fusion in musical texture by mixing a large number of sound events [22, p. 169]. Ligeti associates this concept with his collaboration with Gottfried Michael Koenig in the electronic studio of the Westdeutscher Rundfunk (WDR) in Cologne [22]. Regarding the relationship between Ligeti's concepts and electroacoustic technology, Sabbe [34, p. 1091] says that, "electronic technology makes it possible to work at the limit of discrete perception, between the discrete and the continuous, in this field of transition where rhythm turns into timbre". To him, the possibility of playing with the listener's perception is an important feature of sound synthesis that will impact Ligeti's compositional strategies.

To Ligeti, the most meaningful knowledge acquired in the studio was the observation that sound samples or synthesis components merge into a single texture when the number of sounds surpasses a certain threshold of our perception. This occurs when our auditory system can no longer discern the individual components of a musical texture, leading our attention to the global features and inner movements of *sound masses* [22, p. 169]. Ligeti used this concept of *timbre of movement* in his instrumental compositions with the *micropolyphony* technique [10], which allows achieving dense textures by overlapping a large number of melodies with short notes.

The concept of *permeability* refers to a state in which we are unable to distinguish pitches and individual voices. According to Ligeti: "*The loss of sensitivity to intervals is at the source of a state that could be called permeability*" [22, p. 123].

To Ligeti, the concept of permeability is linked to the perception of the interval in its musical context. Thus, he says that the contrapuntal technique of Giovanni Pierluigi da Palestrina (1525-1594) is the best example of impermeability. The reasoning is that in Palestrina's counterpoint there is a small degree of freedom for changing notes without causing perceptual changes in the musical texture [22, p. 124]. Following his argument, he says that the large number of voices in Johann Sebastian Bach's Brandenburg Concertos (1685-1750) corresponds to a more permeable musical texture [22, p. 124]. Regarding this logic, the music of sound masses thus exhibits a high level of permeability.

The concept of permeability is mainly associated with the use of *tone clusters* in his works, such as *Lux Aeterna* (1966). According to Ligeti, the tone cluster "*is somewhere between sound and noise and consists of several voices stratified and*

³ In the original, Ligeti uses *timbre du mouvement* in French and *Bewegungsfarbe* in German [22, p. 169].

interwoven in semitones, which thereby give up their individuality and become completely dissolved into the resultant overriding complex” [23, p. 165].

2.2 First movement of the Ten Pieces for Wind Quintet

Ten Pieces for Wind Quintet was composed in 1968, and dedicated to the Wind Quintet of the Royal Stockholm Philharmonic Orchestra. Each movement was conceived as a *micro concerto* with *tutti* odd movements and *solo* even movements, each solo being dedicated to one of the performers [39]. We choose as analytical corpus, for all feature extraction and section division, the version of the piece performed by *London Winds* in the album *Ligeti Edition 7: Chamber Music*, recorded in 1998.

Previous studies about the *Ten pieces*⁴ may be considered from two points of view:

1. the *semantic* point of view, by exploring the relationship between Ligeti’s discourse and his music [18];
2. the *symbolic* point of view, by examining the musical organization through the score information [39].

Of course, these two points of view are interrelated and this division in the sequel is done only for didactic purposes.

The semantic level - Floros and Bernhardt draw attention to the semantic aspect of György Ligeti’s music. [18, p. 51]. In this context, it is Ligeti himself who builds the connections between sound and meaning through the idea of *gestures*. We can examine this question in the composer’s creative drafts, texts and interviews. According to Ligeti:

I had made a list of all these types of “gestures” - I can’t remember the exact number, there must have been about thirty of them. The ten movements of this composition were developed from these types, but the distribution of types changed from movement to movement. [28, p. 198].

One of these documented *gestures* is important to the understanding of the first movement of *Ten pieces*: the *cystoscopy*. Ligeti uses the word, which consists of an uncomfortable medical procedure, to refer to the ninth of the *Ten pieces* [18, p. 51]. This movement consists of only one musical texture, with a high-register cluster played in fortissimo by the trio of piccolo flute, oboe and clarinet, affording the emergence of phenomena such as roughness, beats and differential tones. This excerpt is remarkably similar to the musical texture of bars 16-22 of the first movement, allowing us to infer that this excerpt is a unique musical gesture. This information, combined with an analysis of the score, will allow us to understand the formal development of the piece and its possible segmentation.

⁴ From this point onwards this abbreviation will be used instead of *Ten Pieces for Wind Quintet*.

Table 1. Score segmentation for the *Ten pieces* and respective recording times.

	Section 1	Section 2	Appendix
Score bar	1 - 16	16-22	22-25
Record Time	0:00.000 - 1:32.367	1:32.367 - 1:58.390	1:58.390 - 2:17.04

The symbolic level - Vitale [39] presents a thorough score-based analysis of this work, and highlights the gradual processes appearing in the piece, based on micropolyphonic strategies to generate the musical texture, where the musical material is articulated with slow modifications in pitch, timbre, density, and rhythm [39, p. 2]. Using pitch register and dynamics as criteria, this author proposes a division of the score of the first movement of the *Ten Pieces for Wind Quintet* (1968) in two main sections (Section 1: measures 1 - 16; Section 2: measures 16 - 22) followed by an appendix (measures 22 - 25). The segmentation and segment recording times are displayed in Table 1. Figure 1 provides a piano-roll-like visualization of the score, clarifying the reasoning for this segmentation. Section 1 is marked by medium-low register pitches between C2 and C3, with complex rhythm and dynamics. Section 2 starts with a unison that becomes a high-pitched cluster with very intense dynamics, linked with the *cystoscopy* gesture, and the appendix consists only of a minor second in pianissimo. The proposed segmentation is also clearly visible in the recording, for instance in the CQT representation of Figure 2.

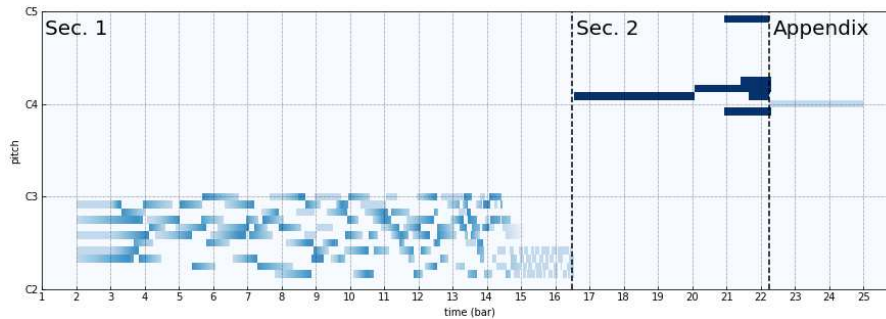


Fig. 1. Symbolic information from the score of *Ten pieces*. Pitches are represented in the vertical axis and bars are shown in the horizontal axis. Color intensity represents the integrated dynamics for the pitches. The dashed lines represent the proposed segmentation. Sec. 2 is associated with *cystoscopy* gesture

2.3 Audio descriptors

The use of audio descriptors in the context of musical analysis is a multidisciplinary task [42] which admits a multiplicity of approaches depending on the

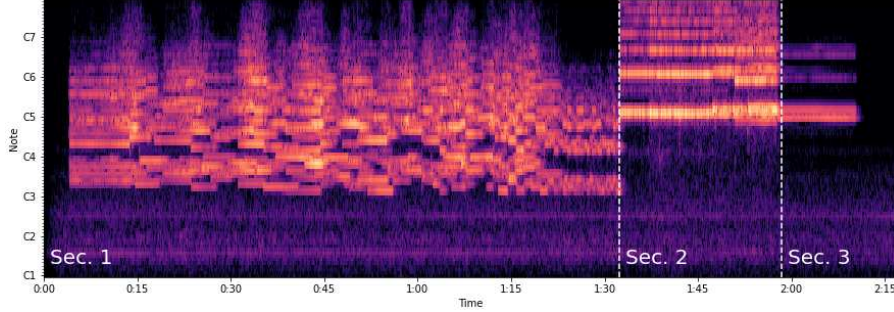


Fig. 2. CQT representation from the audio of *Ten pieces*. Pitches are represented in the vertical axis and recording time is represented by the horizontal axis. The dashed lines represent the proposed segmentation.

context in which it is applied [24, 26, 42]. In this work, we design the analytical methodology anchored in audio descriptors for two main reasons: 1. audio descriptors provide a perspective (in our case, a perceptual perspective) on the musical sound data, allowing a better understanding of the musical composition [26]; 2. graphical representations of audio descriptors guide the listening throughout the analysis and facilitates the observation of related perceptual concepts [12]. As detailed in Section 3, we associate the concepts of *timbre of movement* and *permeability* with four audio descriptors: *loudness*, *roughness*, *spectral irregularity* and *spectral entropy*.

Loudness - *Loudness* is a psychoacoustic measure of sound intensity, usually associated with the perception of *dynamics* [4] in musical analysis. The total *loudness* of a time frame (segment of an audio signal) is based on Zwicker’s *critical bandwidth* model [43, 8]. The specific *loudness* of each *Bark*⁵ band can be computed by a simplification of the original equation [31] as

$$\text{Loudness} = \sum_{z=1}^N E(z)^{0.23},$$

where $E(z)$ is the energy in the z -th *bark* band for the time frame considered.

Roughness - According to Vassilakis [37], *roughness* is a perceptual feature related with the sense of very fast amplitude variations in the sound and it is partially conditioned by both the sound stimulus and the properties of the basilar membrane. The *roughness* value of a time frame is based on an approximation, proposed in [36], of the Plomp & Levelt experimental dissonance curve⁶ [32]. For complex sounds, the *roughness* value can be computed using a formulation by Vassilakis, which embodies the physical and psychoacoustic mechanisms involved

⁵ *Bark* is the unit of Zwicker’s *critical bandwidth* model [43].

⁶ For a full revision on *roughness* curves, see [37].

in its perception, as

$$\text{Roughness} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N \frac{(a_i * a_j)^{0.1}}{2} \left(\frac{2a_j}{a_i + a_j} \right)^{3.11} \left(e^{\frac{0.84|f_j - f_i|}{0.0207f_i + 18.96}} - e^{\frac{1.38|f_j - f_i|}{0.0207f_i + 18.96}} \right),$$

where f_i is the i -th partial of the sound and a_i its corresponding amplitude.

Spectral Irregularity - The *spectral irregularity* feature used in this work was proposed by Krimphoff et al. [21] as a measure of the noise content of the spectrum [8, p. 60]. It is usually computed for each time frame in the magnitude spectrum as

$$\text{Irregularity} = \sum_{k=2}^{N-1} \left| a_k - \frac{a_{k-1} + a_k + a_{k+1}}{3} \right|,$$

where a_k is the value in the k -th magnitude coefficient and N is the total number of frequency bins in the spectrum.

A low *irregularity* value denotes a spectrum whose energy is concentrated in few frequency bins, associated with distinguishable components in the sound. In contrast, a high *irregularity* value implies a more regular energy distribution across all frequencies, associated with a more noisy content [8].

Spectral Entropy - *Spectral entropy* is an audio feature used for estimating signal information and complexity in the Time-Frequency Plane [17]. Higher *entropy* values are usually associated with higher spectral activity along all frequencies, and lower values are related to a concentration of spectral energy on few components.

The *Spectral Entropy* descriptor is derived from Shannon's information theory equation through an analogy between signal energy densities and probability densities [40], as

$$\text{Entropy} = - \sum_{k=1}^N P(E_k) \ln(P(E_k)),$$

where $P(E_k)$ denotes the relative frequency of the energy present in the k -th bin.

3 Methodology

In order to shed light on the musicological dimensions of this study, we disclose the methodological description in three steps: 1 - The description of the whole workflow; 2 - The significance of the audio descriptors we choose for the musical analysis; 3 - The technical parameters we use to the audio analysis.

The musical analysis methodology presented here is an interdisciplinary task [13], that seeks to integrate various musicological sources [26], such as theoretical and aesthetic texts, interviews, symbolic information from the score, and audio descriptor representations. We should emphasize that the authors' interpretation, anchored in the musicological information available, is a key element of the musical analysis, as different scholars may produce different interpretations

of the same piece [1]. Thus, the criteria for choosing the audio descriptors and the graphic representations derived from them are anchored in the congruence between the perceptual features to be highlighted, Ligeti's creative process, and the musicological body of knowledge.

3.1 The workflow

The workflow comprises three main tasks: 1 - Musicological research, whose results have already been exposed in sections 1 and 2; 2 - Audio analysis; and 3 - Musicological validation. The workflow substeps are detailed as follows:

1. Musicological research and review of literature

- (a) Review of texts about Ligeti and his compositional processes on *Ten pieces* (Interviews, theoretical and historiographical texts)
- (b) Music theory, Audio descriptors and Psychoacoustic references
- (c) Compilation of previous analyses of the *Ten Pieces*

2. Audio analysis

- (a) Choice of the audio descriptors anchored in the musicological findings of step (1)
- (b) Manual segmentation of the audio signal according to musicological research outcomes
- (c) Computation of the selected time-varying audio descriptors, their corresponding graphical representations, mean and standard deviation values, as well as scatter plots to illustrate their correlations

3. Musicological evaluation/ validation

- (a) Musicological analysis of the piece to establish the relationships between musical content of the different sections and the obtained descriptor values
- (b) Musicological validation through the assessment of the results of audio analysis vis-à-vis the musicological context.

3.2 The musicological significance of the chosen audio descriptors

Sound mass music, as already pointed, is intrinsically related to the perceptual outcome of the musical events [30, 14, 4]. Therefore, any musical analysis focused only on the score would not provide all relevant information for the understanding of *sound mass* features [4]. It is our aim to devise an appropriate approach to *sound mass* music analysis, based on information extracted from a musical performance through derived audio features. In order to do that, we propose a methodology for *sound mass* music analysis using audio descriptors and psychoacoustic features associated with Ligeti's musical concepts, aligned with score-based information.

The concept of *timbre of movement* is associated with the dynamic perception of the global behavior of musical texture and its *microtime* manifestation [33, 2]. The *loudness* descriptor is used as a measure for *global perceptual dynamics* [4]

and the *roughness* descriptor was used to describe the *microtime behavior* of *sound masses* [2, 37].

According to the principles of *minimum masking* and *limited density* [20], the higher the level of spectral information in the auditory nerves, the lower our ability to perceive musical pitches and intervals. Therefore, the concept of *permeability* is represented by the *textural information level* of the *sound mass*, associated with *spectral entropy* [5], and the *noise content*, associated with *spectral irregularity* [8].

3.3 Technical audio analysis parameters

Feature extraction was done using Python⁷ and the Jupyter⁸ environment. *Loudness*, *irregularity* and *entropy* were computed from the magnitude spectrogram obtained using Librosa [27], with a window size of 4096 samples and hop length of 1024 samples. The *roughness* descriptor was obtained from the reassigned spectrogram [19] (with the same parameters described above), as it depends on precise frequency and amplitude values. All the code used to extract and plot the audio features is available at a Gitlab repository⁹.

4 Results and Discussion

Figure 3 corresponds to the graphical representations of the descriptors obtained from the audio analysis as functions of time. Each different color represents one of the three sections of the score: blue is the first section, orange the second section and green the appendix. Mean and standard deviation values for each descriptor and section are presented in Table 2. The analysis was conducted in 2 stages: first we explore the characteristics associated with *timbre of movement*, followed by the behavior associated with *permeability*.

Timbre of movement - According to the methodology proposed (Section 3), the psychoacoustic descriptors of *loudness* and *roughness* are associated with the concept of *timbre of movement*. Each section of the piece displays a different behavior in terms of this concept.

The first section displays a somewhat regular fluctuation of *loudness* values (blue line in the upper left corner of Figure 3). Within the same section, *roughness* (blue line in the upper right corner of Figure 3) displays low values with low variation. The corresponding statistics can be seen in Table 2.

In evident contrast with the first section, the second section of the piece displays the highest values of *loudness*. We highlight that, although the standard deviation values for these two sections are not very different, by inspection of the *loudness* curve, we can see that the first section has an oscillatory behavior while the second section displays an ascending pattern. Also, in the second section we observe the highest values of *roughness* with a complex oscillatory pattern, with

⁷ <https://www.python.org/>

⁸ <https://jupyter.org/>

⁹ <https://gitlab.com/Feulo/ligetis-wind-quintet-analysis>

spikes that go upwards towards the end of this section. Finally, the appendix presents low values and low variation for both *loudness* and *roughness*.

Table 2. Mean and standard deviation values for *Loudness*, *Roughness*, *Irregularity*, *Entropy* on each section.

Section	<i>Loudness</i>	<i>Roughness</i>	<i>Irregularity</i>	<i>Entropy</i>
1	41.87 ± 14.49	9.96 ± 5.86	63.54 ± 40.72	0.42 ± 0.13
2	66.36 ± 12.52	103.12 ± 62.44	171.63 ± 58.37	0.74 ± 0.15
3	13.36 ± 5.29	0.55 ± 0.56	9.98 ± 6.58	0.10 ± 0.03

Permeability - Ligeti's concept of *permeability* is linked to the audio descriptors of *spectral irregularity* and *spectral entropy*. By observing the two curves at the lower half of Figure 3, we can also observe a distinct profile within each one of the sections of the piece.

In the first section, a regular fluctuation of the values is observed in both descriptors, but *entropy* displays a lower range of variation relative to the mean ($\sigma/\mu = 0.64$ for *irregularity* and $\sigma/\mu = 0.31$ for *entropy*, according to the values in Table 2). In the second section, we can observe an ascending pattern in both features, similarly to what was observed for *loudness* and *roughness*, with increasing spikes in the *spectral entropy* profile. The same observation can be made here for the relative variation of both features, with $\sigma/\mu = 0.34$ for *irregularity* and $\sigma/\mu = 0.20$ for *entropy*. Finally, the appendix displays once again the lowest values in both descriptors, as observed with *loudness* and *roughness*, with smaller relative *entropy* variation ($\sigma/\mu = 0.30$) with respect to irregularity ($\sigma/\mu = 0.66$).

By observing all descriptors taken together, we see that the three sections of the piece have very different behaviors from the perspective of their perceptual features. The psychoacoustic difference between the sections is illustrated in the first plot of Figure 4, which represents the relationship between *loudness* and *roughness*, and in the correspondence between *spectral irregularity* and *spectral entropy*, shown in the second plot of Figure 4. In both graphs, the spatial placement of the three section clusters, as well as their geometrical arrangement, make the exploration of *timbre of movement* and *permeability* relatively explicit, allowing us to observe a link between the formal division of the composition and the different perceptual feature aspects of the sound material.

It is interesting to observe that, with respect to the first section, we see the blue cluster lying horizontally on the scatter plot, where the large variations in *loudness* emphasize the global dynamic perception. In contrast, the second section (orange) corresponds to a highly scattered cluster in both *roughness* and *loudness* axes, but concentrating on high values of *loudness*, thus bringing the *microtime* behavior (variation of *roughness*) to the forefront.

In terms of *permeability*, we can observe in Figure 4 that the *spectral irregularity* and *spectral entropy* fluctuations in all sections are highly correlated, producing a log-like, quasi-diagonal shape in the scatter plot, which correspond

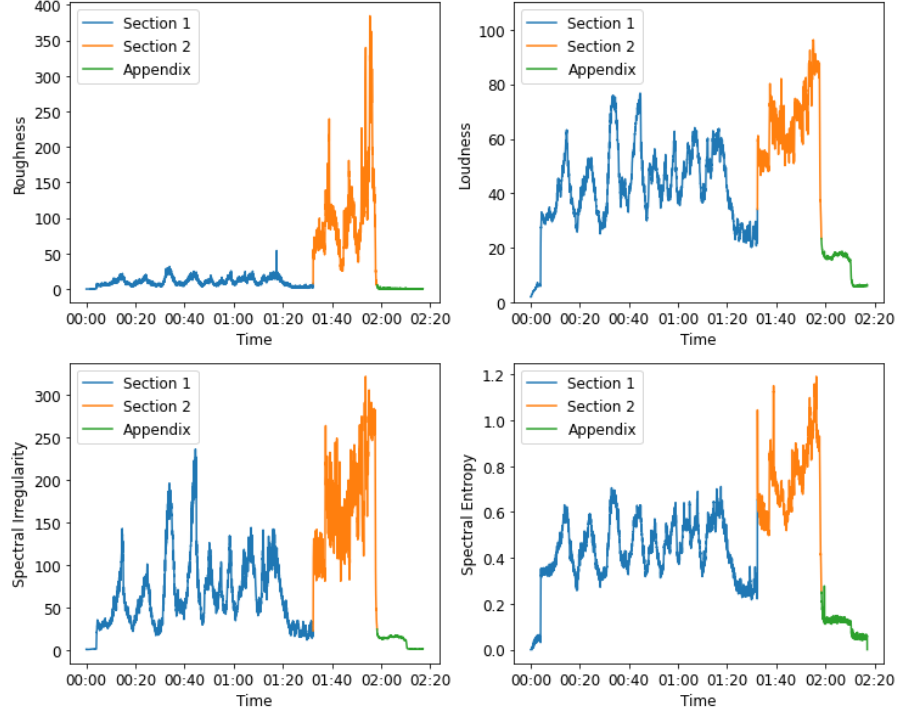


Fig. 3. *Roughness* (upper left), *Loudness* (upper right), *Spectral Irregularity* (lower left) and *Spectral Entropy* (lower right) for the 3 sections of the piece.

to constant changes of pitch perception in the musical texture. This might be associated with the harmonic technique of *blurring* [9, p. 122], used by Ligeti to manipulate the musical texture. Especially in the second section (orange), the higher values of *loudness* and the large variation of the spectral descriptors obliterate the perception of individual events, turning our attention to the mass behavior of the composition.

Thus, to summarize the analytical outcomes, as illustrated in Table 3: Section 1 has a focus on the global behavior of the musical texture in terms of *timbre of movement*, with a high variation of *permeability*. This is interpreted as a sound mass with different levels of global intensity that affords different levels of pitch perception. Section 2 emphasizes *timbre of movement* with a focus on the *microtime* behavior, while at the same time reaching the highest levels of *permeability*. This is interpreted as a sound mass which allows a very stable perception of dynamics and pitches, affording several psychoacoustic effects, like roughness, beats and differential tones. The appendix displays a low level of activity in terms of both *timbre of movement* and *permeability* which is interpreted as a stable musical texture without movement or direction.

12 Antunes et al.

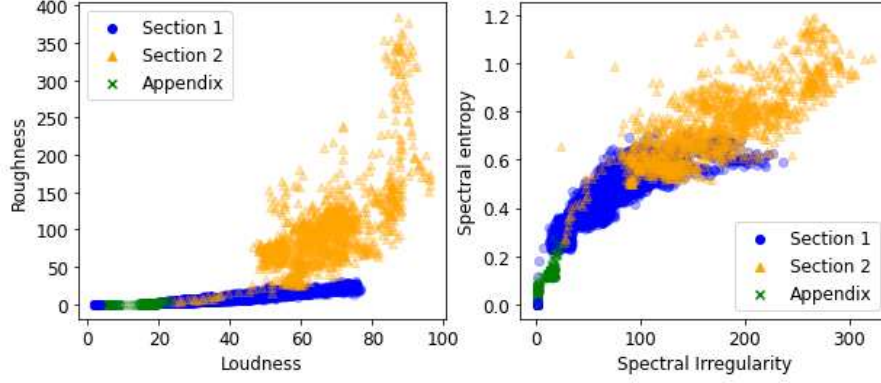


Fig. 4. Scatter plot with the *loudness* (x-axis) and *roughness* (y-axis) values (left). Scatter plot with the *spectral irregularity* (x-axis) and *spectral entropy* (y-axis) values (right).

Table 3. Summary of the analytical outcomes.

Concept	Section 1	Section 2	Section 3
Timbre of movement	Emphasis on global behavior	Emphasis on microtime features	Low activity
Permeability	High variation	Highest values	Low activity

By confronting the audio descriptor representations with the score contents we may notice that particular polyphonic strategies were used to achieve different perceptual features. In the first segment, the chromatic texture is composed of several changes in dynamics and the complexity of polymetric rhythms into a medium-low-pitch register. In the second segment, the texture is composed of a simple rhythmic metric and a narrowband pitch organisation in a high-pitched register.

By looking at the audio features and the score information, we may infer that Ligeti draws on distinct polyphonic strategies in order to achieve different sound mass sensorial qualities. The sensorial singularity of the sound masses may be one of the sources of Ligeti’s notion of *gesture*. Finally, it is interesting to notice that the low level of all descriptors in the third part could be the reason why Vitale [39] described this section as an appendix of the piece.

5 Conclusion

In this paper we presented a methodology for the musical analysis of *sound mass* compositions, based on audio descriptors associated with Ligeti’s concepts of *timbre of movement* and *permeability*. Our approach sought to get a broader understanding of the *Ten pieces* by combining an analysis of the piece’s audio

recording with the score and musicological information, thus joining three levels of information: the symbolic, the semantic and the audio representation. In terms of the musicological interest in audio analysis techniques focused on *sound mass* composition, the proposed method reinforces the idea that the perceptual features associated with the performance of a musical work bring important elements that help understanding the formal development of a work, without reducing the importance of symbolic analyses based on the musical score. By analyzing the psychoacoustic features of each section of this particular piece, we may argue that the most important perceptual characteristics of the work do not depend heavily on specific choice of pitches, rhythms or harmonies, but are highly anchored on the perceptual qualities of the *sound masses*. Also, audio descriptors could expand the *gradual process* approach [38], enriching the symbolic analysis with performative characteristics of the piece.

Future work may focus on investigating other timbre-related psychoacoustic descriptors in the context of the proposed analysis, to verify whether they contribute to a better understanding of the perception of similarity of *sound masses* [25]. The study of other audio descriptors in the context of *sound mass music* could also foment applications in the field of creative processes, particularly in computer-aided composition and musical modeling. Exploration of perceptual features of a musical work through comparative analysis of different recordings of the same piece is also an interesting avenue for future work. It would be useful to investigate how the interpretative choices in different performances could reveal the invariant properties of a musical work [41], as expressed in the score.

Finally, musical analysis with audio descriptors might help in empirical studies with musical excerpts [14], offering exploratory ways to represent perception attributes of non-expert listeners. If, on the one hand, it is difficult to derive general assumptions about sound semantics through the musical analysis of a single work, on the other hand, this approach applied to a broader corpus could provide insights into the investigation of the link between timbre semantics [35] and the sensorial level of hearing.

References

1. Anthony Pople: Modeling Musical Structure. In: Clarke, E.F., Cook, N. (eds.) Empirical musicology: aims, methods, prospects, pp. 127 – 156. Oxford University Press, Oxford ; New York (2004)
2. Antunes, M., Feulo, G., Manzolli, J.: A perceptual approach to Ligeti’s Continuum with a Roughness descriptor. In: Livro de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia. pp. 18–19. Évora (2020)
3. Antunes, M., Manzolli, J.: A psychoacoustical approach to Ligeti’s concept of permeability. In: Livro de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia. pp. 20–21. Évora (2020)
4. Antunes, M., Rossetti, D., Manzolli, J.: Emerging structures within micro-time of Ligeti’s Continuum. In: Proceedings of the 2021 International Computer Music Conference. pp. 271–274. Santiago, Chile (2021)

5. Baraniuk, R.G., Flandrin, P., Janssen, A.J., Michel, O.J.: Measuring time-frequency information content using the rényi entropies. *IEEE Transactions on Information theory* **47**(4), 1391–1409 (2001)
6. Borio, G., Danuser, H.: Die Internationalen Ferienkurse für Neue Musik Darmstadt 1946-1966. Concert program, lectures, masterclasses, tutors. In: *Geschichte und Dokumentation in vier Bänden.*, vol. 3. Rombach (1997)
7. Bregman, A.S.: *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound.* MIT press (1994)
8. Bullock, J.: *Implementing audio feature extraction in live electronic music.* Ph.D. thesis, Birmingham City University (2008)
9. Cambouropoulos, E., Tsougras, C.: Auditory Streams in Ligeti's Continuum: A Theoretical and Perceptual Approach. *Journal of interdisciplinary music studies* **3**(1-2), 119–137 (2009)
10. Clendinning, J.P.: *Contrapuntal techniques in the music of Gyorgy Ligeti.* Ph.D. thesis, Yale University (1990)
11. Clendinning, J.P.: The Pattern-Meccanico Compositions of György Ligeti. *Perspectives of New Music* **31**(1), 192 (1993). <https://doi.org/10.2307/833050>
12. Couprie, P.: Graphical representation: an analytical and publication tool for electroacoustic music. *Organised Sound* **9**(1), 109–113 (2004)
13. Couprie, P.: Quelques propos sur les outils et les méthodes audionumériques en musicologie. L'interdisciplinarité comme rupture épistémologique. *Revue musicale OICRM* **6**(2), 25–44 (2020). <https://doi.org/10.7202/1068384ar>
14. Douglas, C., Noble, J., McAdams, S.: Auditory Scene Analysis and the Perception of Sound Mass in Ligeti's Continuum. *Music Perception* **33**, 287–305 (2016). <https://doi.org/10.1525/mp.2016.33.3.287>
15. Fastl, H., Zwicker, E.: *Psychoacoustics: facts and models.* No. 22 in Springer series in information sciences, Springer, Berlin ; New York, 3rd. ed edn. (2007)
16. Ferraz, S.: Análise e Percepção Textural: Peça VII, de 10 peças para Gyorgy Ligeti. *Cadernos de Estudos: Análise Musical* **3**, 68–79 (1990)
17. Figueiredo, N.S.: *Efficient adaptive multiresolution representation of music signals.* Master dissertation, University of São Paulo (2020)
18. Floros, C.: György Ligeti: beyond avant-garde and postmodernism. *PL Academic Research*, Frankfurt am Main (2014)
19. Fulop, S.A., Fitz, K.: Algorithms for computing the time-corrected instantaneous frequency (reassigned) spectrogram, with applications. *The Journal of the Acoustical Society of America* **119**(1), 360–371 (2006)
20. Huron, D.: Tone and voice: A derivation of the rules of voice-leading from perceptual principles. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* **19**(1), 1–64 (2001)
21. Krimphoff, J., McAdams, S., Winsberg, S.: Caractérisation du timbre des sons complexes.II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique. *Le Journal de Physique IV* **04**(C5), C5–625–C5–628 (May 1994). <https://doi.org/10.1051/jp4:19945134>
22. Ligeti, G.: *Neuf essais sur la musique.* Éditions Contrechamps, Genève – Suisse (2010)
23. Ligeti, G., Bernard, J.W., Ligeti, G.: States, Events, Transformations. *Perspectives of New Music* **31**(1), 164 (1993). <https://doi.org/10.2307/833047>
24. Malloch, S.N.: *Timbre and Technology.* PhD Thesis, The University of Edinburgh, Edinburgh (1997)
25. McAdams, S.: Timbre as a structuring force in music. In: *Timbre: Acoustics, perception, and cognition*, pp. 211–243. Springer (2019)

26. McAdams, S., Depalle, P., Clarke, E.: Analyzing musical sound. In: *Empirical musicology: Aims, methods, prospects*, pp. 157–196. Oxford University Press, New York (2004), publisher: Oxford University Press Oxford
27. McFee, B., Raffel, C., Liang, D., Ellis, D., McVicar, M., Battenberg, E., Nieto, O.: librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python. In: *14th Python in Science Conference*. pp. 18–24. Austin, Texas (2015). <https://doi.org/10.25080/Majora-7b98e3ed-003>
28. Michel, P.: György Ligeti. Minerve, Paris (1995)
29. Misra, H., Ikbāl, S., Bourlard, H., Hermansky, H.: Spectral entropy based feature for robust asr. In: *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. vol. 1, pp. I–193 (2004). <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1325955>
30. Noble, J., McAdams, S.: Sound mass, auditory perception, and ‘post-tone’ music. *Journal of New Music Research* **49**(3), 231–251 (May 2020). <https://doi.org/10.1080/09298215.2020.1749673>
31. Peeters, G.: A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *CUIDADO IST Project Report* **54**(0), 1–25 (2004)
32. Plomp, R., Levelt, W.J.M.: Tonal consonance and critical bandwidth. *The journal of the Acoustical Society of America* **38**(4), 548–560 (1965), publisher: Acoustical Society of America
33. Roads, C.: *Microsound*. MIT Press, Cambridge, Mass (2001)
34. Sabbe, H.: György Ligeti. In: Donin, N., Feneyrou, L. (eds.) *Théories de la composition musicale au XXe siècle*, vol. 2. Symétrie, Lyon (2013)
35. Saitis, C., Weinzierl, S.: The semantics of timbre. In: Siedenburg, K., Saitis, C., McAdams, S., Popper, A.N., Fay, R.R. (eds.) *Timbre: Acoustics, perception, and cognition*, pp. 119–149. Springer, Switzerland (2019)
36. Sethares, W.A.: *Tuning, timbre, spectrum, scale*. Springer Science & Business Media, Berlin (1998)
37. Vassilakis, P.N.: *Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance*. PhD Thesis, University of California, Los Angeles, California (2001)
38. Vitale, C.: A gradação nas peças 5 e 6 das Dez peças para quinteto de sopros de György Ligeti. In: *Anais do I Encontro Internacional de Teoria e Análise Musical*. pp. 1 – 8. São Paulo, Brasil (2009)
39. Vitale, C.H.: *Dez peças para quinteto de sopros de György Ligeti: a gradação como uma ferramenta para a construção do discurso musical*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (2008)
40. Williams, W.J., Brown, M.L., Hero III, A.O.: Uncertainty, information, and time-frequency distributions. In: *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations II*. vol. 1566, pp. 144–156. International Society for Optics and Photonics (1991)
41. Ystad, S., Aramaki, M., Kronland-Martinet, R.: Timbre from sound synthesis and high-level control perspectives. In: Siedenburg, K., Saitis, C., McAdams, S., Popper, A.N., Fay, R.R. (eds.) *Timbre: Acoustics, Perception, and Cognition*, pp. 361–389. Springer (2019)
42. Zattra, L.: Analysis and analyses of electroacoustic music. In: *Proceedings of the Sound and Music Computing 2005*. p. 10. Salerno, Italy (2005)
43. Zwicker, E., Flottorp, G., Stevens, S.S.: Critical Band Width in Loudness Summation. *The Journal of the Acoustical Society of America* **29**(5), 548–557 (May 1957). <https://doi.org/10.1121/1.1908963>

2.8 Discussões

2.8.1 Contribuições para a análise de música instrumental e electroacustica

Como já destacado, a trajetória dos artigos pode ser categorizada em dois tipos: os artigos de conferência, que destacam marcos mais específicos da pesquisa, e o artigo publicado na revista *Musica Hodie* e o capítulo de livro na *Music in AI era — Lecture Notes in Computer Science*, que consolidam e discutem os resultados e metodologias desenvolvidos nesta pesquisa. Iniciaremos nossas discussões explorando o conteúdo desses artigos, lançando luz sobre o desenvolvimento contínuo dessa jornada de investigação.

O artigo da *Musica Hodie* representa a consolidação de uma metodologia de pesquisa centrada na música acusmática. Notavelmente, caracterizou-se pelo envolvimento direto dos autores como compositores e analistas, conferindo ao material musicológico uma perspectiva particular. Nesse cenário, a pesquisa relatou diretamente os pontos de vista dos compositores em relação aos seus processos criativos. Esta imersão no universo composicional marcou o primeiro passo na elaboração de uma metodologia de análise onde a perspectiva criativa do compositor serve como âncora para uma *análise musical*, apoiada por descritores de áudio e enriquecida pelo viés perceptivo, delineando um caminho na interseção entre a composição musical e a análise.

A opção de iniciar esta pesquisa com análises de composições acusmáticas, uma escolha intuitiva dada a relevância da análise de áudio nesse contexto, possibilitou uma investigação das representações de áudio disponíveis e da literatura relacionada a este recorte musicológico. Este ponto de partida permitiu uma imersão aprofundada no desenvolvimento de uma abordagem analítica do áudio de peças acusmáticas, destacando-se pela sua estreita conexão com a noção de *textura musical* e *massas sonoras* ancoradas em fenômenos psicoacústicos. Dessa forma, a contribuição desta tese para a análise da música acusmática reside no avanço das representações de áudio dedicadas à análise de texturas em composições eletroacústicas. Esta abrange diversos aspectos da textura, incluindo percepção de *dinâmica*, *densidade*, *fusão* e exploração da *percepção microtemporal*.

A abordagem textural da música eletroacústica abre caminhos para sua integração futura em análises que considerem a espacialização, conforme explorado no contexto da síntese granular (ROSSETTI; MANZOLLI, 2020). Sendo assim, é necessário um aprofundamento da

discussão do espaço no contexto da textura musical, pois existe uma interconexão vital entre a noção de sala, as trajetórias espaciais na música eletroacústica, e as questões fundamentais de *emergência* no contexto das *massas sonoras*.

Após a definição de um conjunto fundamental de ferramentas e literatura, derivado da exploração das músicas acusmáticas relacionadas às *massas sonoras*, a pesquisa avançou para a análise de gravações de música instrumental, metodologia essa descrita e consolidada no capítulo publicado em *LNCS*. Esse deslocamento apresenta desafios únicos. Na análise da música eletroacústica nesta pesquisa, houve a já citada limitação imposta pela impossibilidade de se considerar diversas configurações de difusão e espacialização. Por outro lado, na análise da música instrumental, os aspectos relacionados às escolhas de produção musical, que incluem desde as decisões de interpretação musical até a microfonação, mixagem e masterização, não são satisfatoriamente contemplados pela análise do áudio. No entanto, o aspecto fascinante da análise de áudio da música instrumental reside na capacidade de captar aspectos da composição musical em seu momento de atualização durante a performance.

Nesse contexto da música instrumental, a tarefa de análise torna-se um desafio complexo. Isso se deve à multiplicidade de informações disponíveis, que vão, neste contexto, desde textos musicológicos sobre Ligeti até entrevistas e escritos produzidos pelo próprio compositor. Além disso, tínhamos à disposição a partitura e análises prévias das *Ten Pieces for Wind Quintet*. O desafio central foi a constituição de uma metodologia que integrasse efetivamente essas diversas fontes com a análise de áudio. Este esforço culminou em uma abordagem analítica tríplice, focando em atributos semânticos, informação da partitura e análise do áudio. Essa integração permitiu a constituição de uma metodologia de trabalho que suportasse o ponto de vista interpretativo necessário ao processo analítico.

Ao examinar a partitura, a análise de áudio é aprimorada pela fusão de dados provenientes deste documento musical. Isso possibilita a criação de representações simbólicas posteriormente combinadas com o áudio. Além disso, as diversas fontes musicológicas contribuem para a formação de um arcabouço conceitual que serve de fundamento para a realização e validação da análise musical. Portanto, o artigo *A Psychoacoustic-Based Methodology for Sound Mass Music Analysis* deixa como contribuição a capacidade de integrar representações *midi* com representações *cqt*, combinadas com descritores de áudio para constituir um ponto de vista mais abrangente sobre o comportamento das *massas sonoras*. Além disso, as fontes musicológicas tiveram 2 papéis: 1 - permitir uma melhor

compreensão da forma musical a partir de escritos de Ligeti e 2 - ajudar a ancorar a interpretação dos conceitos composicionais expostos pelo compositor.

Esta abordagem consolidou certas práticas observadas em todos os artigos publicados durante esta pesquisa, enquanto ressaltou a complexidade e a extensão da análise necessária para explorar as diversas camadas de informação presentes nas gravações de músicas instrumentais. Essa estratégia integrada proporciona uma compreensão mais abrangente e holística das obras, abrindo novas possibilidades para futuras análises musicais.

Ao refletir sobre as abordagens propostas para as análises no contexto da música acusmática e instrumental nessa pesquisa, percebe-se a importância da flexibilidade metodológica na estratégia de análise musical para se adequar a contextos específicos. Enquanto o primeiro caso se assemelha a uma espécie de análise musical escrita em primeira pessoa, o segundo enfrenta o desafio de explorar o universo composicional a partir de diversas fontes musicológicas. Ambas as perspectivas enriquecem o campo da análise musical, demonstrando como as ferramentas de análise de áudio podem ser integradas em abordagens flexíveis e adaptáveis, proporcionando, ao mesmo tempo, uma base para a discussão de processos composicionais ancorados em modelos perceptivos.

2.8.2 Sobre a característica *work-in-progress* na trajetória de publicações

Devido à dinâmica das publicações, que ocasionalmente apresentam o trabalho em seu *working progress*, gostaríamos de discutir aspectos de obras analisadas em mais de um artigo, comparando assim elementos das diferentes publicações. Comentaremos, portanto, as análises das composições *Asperezas* (2018) e *Continuum* (1968).

As duas análises de *Asperezas* revelam nuances distintas na compreensão da peça devido aos diferentes descritores utilizados em cada análise. Ambas as análises compartilham uma base comum, incluindo a segmentação e a perspectiva da fusão através dos *coeficientes bark*. Na primeira análise (Sec. 2.2), onde foram empregados descritores de *bandas críticas*, *loudness* e *BSTD*, houve uma ênfase em elementos específicos do som relacionados aos conceitos de *volume* e *intensidade*. A segunda análise (Sec. 2.3) incorporou os descritores de *fluxo espectral* e *sharpness*, acrescentando representações complementares à análise anterior. Dessa forma, foi capaz de discutir fenômenos ligados à *microtemporalidade* e *densidade*. Vale ressaltar que, das representações apresentadas, a inclusão do *fluxo espectral* trouxe uma camada relevante de informação, notadamente pela falta de correlação com os outros

descritores, cujos perfis de curva no tempo são altamente correlacionados. Portanto, ao examinarmos ambas as análises, fica evidente uma continuidade natural entre suas representações de áudio, estratégias de segmentação e perspectivas interpretativas.

Ao comparar as análises do *Continuum*, gostaríamos de discutir aspectos ligados a escolhas nos critérios de segmentação e na análise de fenômenos microtemporais. Observa-se uma variação na abordagem da segmentação entre as duas análises. Enquanto a primeira (Sec. 2.4) propõe uma divisão em 10 partes (de *a* a *j*), a segunda (Sec. 2.5) adota uma segmentação em 6 partes (de *a* a *f*). A diferença na segmentação ocorre porque, no primeiro artigo, a segmentação foi realizada com um algoritmo de segmentação automática baseado em *MFCC*, enquanto, no segundo, a segmentação foi conduzida com base no descritor de *rugosidade*. Refletindo sobre os resultados alcançados nas duas análises, chegamos à conclusão de que a segmentação com base nas curvas de *rugosidade* é mais adequada para esse contexto, uma vez que evidencia a importância de características relevantes para a percepção das *massas sonoras* no *Continuum*. Este exemplo demonstra que a escolha de critérios de segmentação, bem como das representações sonoras que fornecem os dados necessários para a segmentação, são decisões relevantes para a análise musical. Também ilustra como esse conjunto de escolhas é influenciado pela natureza da música e pelas escolhas interpretativas dos analistas.

No que diz respeito à análise dos fenômenos microtemporais, a segunda publicação (2.5) surge como uma resposta técnica para questões exploradas no primeiro artigo (2.4). A primeira análise lança luz sobre os fenômenos microtemporais por meio do descritor de *flatness*, associado à informação de ruído. Mesmo que haja algum grau de correlação entre o ruído no espectro e os fenômenos microtemporais, essa abordagem não alcança um nível de precisão desejável. Sendo assim, a segunda análise enriquece as discussões ao incorporar a medida psicoacústica da *rugosidade*, fornecendo uma representação mais adequada aos fenômenos microtemporais. Essa evolução metodológica destaca a importância de abordagens complementares na análise musical, a adaptação e criação de ferramentas segundo as necessidades específicas da obra, e evidencia um certo caráter *exploratório* da análise musical.

2.8.3 Sobre a representação de fenômenos microtemporais

A narrativa da percepção de fenômenos ligados a batimentos e *rugosidade*, conforme descrita nos artigos, tem origens na exploração explícita do modelo de *rugosidade* na peça *Asperezas*. Além disso, ao deparar-se com a fundamentação teórica e os processos

composicionais da música de *massas sonoras*, tornou-se evidente a relevância desse parâmetro a ser discutido e abordado nas análises. Sendo assim, começou-se a busca por descritores de áudio capazes de representar esses fenômenos.

Inicialmente, a abordagem dessa questão foi realizada por meio do descritor de *fluxo espectral* (Sec. 2.3), uma escolha ancorada na lógica de que variações nas componentes do espectro sonoro em um curto espaço de tempo podem intensificar a percepção de fenômenos como batimentos e *rugosidade*. Posteriormente, a representação desses fenômenos se baseou no descritor de *flatness* (Sec. 2.4), que, como já discutido, foi motivada pela hipótese de que estes emergem do conteúdo ruidoso do espectro sonoro.

Finalmente, chegamos à implementação do modelo de *rugosidade* que, ao fornecer uma medida relacionada às bandas críticas, demonstrou coerência com a abordagem da música de *massas sonoras*. Essa medida não apenas serve para a detecção de fenômenos microtemporais, mas também fornece informações sobre a concentração de energia nas *bandas críticas*, um aspecto de extrema relevância para a representação das *massas*. O passo subsequente foi o uso do descritor de *rugosidade* em estudos posteriores, notadamente nas análises do *Continuum*, na obra *Mikka 'S* e na *Ten pieces for wind quintet*.

Entretanto, é importante mais uma vez notar as limitações do modelo de *rugosidade*, especialmente quando aplicado à análise de música instrumental. As discussões realizadas nos artigos destacaram essas limitações e abordaram desafios específicos relacionados à implementação desse descritor em contextos musicais mais amplos. Essa reflexão crítica contribui para um entendimento mais aprofundado das potencialidades e limitações da abordagem da *rugosidade* na análise musical.

Se toda coincidência
Tende a que se entenda
E toda lenda
Quer chegar aqui
A ciência não se aprende
A ciência apreende
A ciência em si
Se toda estrela cadente
Cai pra fazer sentido
E todo mito
Quer ter carne aqui
A ciência não se ensina
A ciência insemina
A ciência em si

(A ciência em si - Arnaldo Antunes e
Gilberto Gil)

Capítulo 3

Composição Musical

3.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar aplicações artísticas do conceito de *massas sonoras*. Para isso, discutirá 2 composições realizadas no contexto dessa tese: *Rarefações* (2020), para caixa e eletrônica em tempo real, e *Gestos: Uma homenagem a Jaques Morelenbaum* (2022), para violoncelo e eletrônica em tempo real. Através de relatos composicionais, pretendemos investigar as possibilidades expressivas e estéticas oferecidas pelo uso das *massas sonoras*, assim como discutir o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a criação musical neste contexto.

Evidenciaremos como os conceitos de compositores previamente abordados nesta tese contribuíram significativamente para a constituição de um processo composicional. Ligeti servirá como fonte de inspiração enquanto exploramos suas técnicas de composição de massas sonoras e como seus conceitos influenciaram diretamente a abordagem da textura nas composições. A presença de Xenakis é evidenciada na utilização de modelos estocásticos, na composição da partitura e no planejamento das interações, bem como na concepção da organização das massas sonoras por meio de variados recursos instrumentais. Além disso, será discutida a influência de Varèse e sua concepção de *novos instrumentos*, que inspira a exploração da música de *massas sonoras*, bem como motiva o desenvolvimento da luteria digital no contexto da composição contemporânea.

Este capítulo tem como propósito abordar as composições por meio de três perspectivas: os processos criativos, os elementos da composição e o design de interações. Optamos por uma abordagem mais flexível, adaptando o discurso acadêmico da tese para

explorar os processos criativos através de uma linguagem ocasionalmente pessoal. Essa escolha nos permite realizar uma reflexão mais profunda e detalhada sobre como o conceito de *massas sonoras* influenciaram os meus processos criativos.

Do ponto de vista conceitual, evidenciaremos através desses relatos como elementos musicológicos, provenientes de nossas análises musicais, influenciaram a composição dessas obras. A construção de um campo semântico unificado para guiar o processo criativo, a escrita da partitura e o design de interações se mostram como elementos cruciais para nossa prática composicional. Do ponto de vista técnico, demonstramos como as ferramentas de análise de áudio são empregadas no contexto da composição. Além disso, apresentaremos o desenvolvimento de um instrumento interativo para a criação de *massas sonoras* em tempo real.

A peça *Rarefações* é descrita neste estudo através do artigo *Criação e Performance na Elaboração Colaborativa à Distância de Rarefações* (2020) na seção 3.2. Inicialmente, serão contextualizadas as bases criativas da composição, a partir do texto *The Liberation of Sound* de Varèse, que inspirou a concepção de *massas sonoras* e estimulou discussões sobre luteria digital. Além disso, será explorada a noção de colaboração artística, com base no conceito de músicopesquisador de Ray (2010) e na dinâmica entre compositor e intérprete, discutida por Devenish e James (2019). Os elementos da composição serão analisados em relação às noções já expostas nessa tese, ancoradas na psicoacústica, descritores de áudio e na concepção de *massas sonoras*. Neste contexto, descreveremos um primeiro passo na construção de um instrumento para a criação de *massas sonoras* em tempo real. Por fim, será abordada a montagem da performance, o caráter colaborativo entre compositor e intérprete, as estratégias para a colaboração em meio ao distanciamento social, o *setup* e o resultado sonoro da composição, com descrições embasadas em representações do áudio.

Na seção 3.3 será apresentado o relato composicional da obra *Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum*. Este relato será fundamentado na motivação criativa ancorada em questões relativas à criação musical no contexto da cultura brasileira. Além disso, será detalhado o processo composicional, delineando como a inspiração em uma performance de Jaques Morelenbaum, seções de improvisação e computação assistida por computador formaram a base para a criação da peça. Será discutida também a concepção de gestos e como esta criou um ambiente conceitual unificado para a composição dos diversos elementos da peça, abrangendo desde o processo criativo até a concepção da partitura e o design de interações. Um foco especial será dedicado à descrição do instrumento implementado em *Max*,

denominado *TEIA*, que visa a criação de massas sonoras em tempo real. Por fim, será apresentada uma descrição da composição textural em *Gestos*, destacando suas características e refletindo sobre contribuições para o campo da composição musical.

3.2 Criação e Performance na Elaboração Colaborativa a Distância de Rarefações (2020)

Esta seção se dedica à apresentação do artigo ANTUNES, M.; MISINA, G.; MANZOLLI, J. *Criação e Performance na Elaboração Colaborativa a Distância de Rarefações* (2020). Em: DOS SANTOS, R. DE C. D.; CARNEIRO, M.; ROSSETTI, D. (Eds.). *Pesquisa em arte, mídias e tecnologia: textos selecionados*. Rio Branco, Acre: Stricto Sensu Editora, 2021. p. 61–72.

O objetivo deste artigo é fornecer um relato dos processos composicionais envolvidos na criação colaborativa à distância de *Rarefações* (2020), uma obra para caixa-clara e eletrônica em tempo real ¹. Tomando como ponto de partida a perspectiva de Edgard Varèse sobre *novos instrumentos* e a música de *massas sonoras*, examinamos as estratégias adotadas para enfrentar o desafio de compor e realizar uma performance de música mista em um contexto de isolamento social, resultando em uma apresentação audiovisual da obra. Sendo assim, detalhamos os processos criativos e desafios da peça, cuja estreia ocorreu durante o congresso online *Anppom XXX*, em 10 de Dezembro de 2020.

O contexto deste relato composicional

Utilizando o texto *The Liberation of Sound* de Edgard Varèse (VARÈSE; WEN-CHUNG, 1966) como ponto de partida e inspirados pela ideia de *novos instrumentos*, este relato composicional se fundamenta em duas motivações principais. Em primeiro lugar, contextualizaremos a noção de *massas sonoras*, conforme proposto por Varèse. Para o compositor, essa ideia de *novos instrumentos* não apenas viabilizaria a criação, mas também o manejo de *massas sonoras*, permitindo a geração de comportamentos de atração, repulsão e penetração (Varèse; Wen-Chung, 1966). Em segundo lugar, exploramos a noção de *novos instrumentos* como um estímulo para discutir o papel da luteria digital na composição contemporânea. Nesse contexto, a criação musical em diálogo com o áudio digital frequentemente requer uma abordagem de construção de instrumentos, onde os compositores são desafiados a desenvolver suas próprias ferramentas para expressar sua visão artística. Este relato composicional ainda dialoga com pesquisas acadêmicas na área de psicoacústica

¹O vídeo da composição em formato de score following está disponível no canal do YouTube *Descompasso*, no link: <https://www.youtube.com/watch?v=1LzbW3hdNBg> Acesso em: 10 Mar. 2024.

(FASTL; ZWICKER, 2007), descritores de áudio (BULLOCK, 2008) e estudos na área de performance (MISINA; TRALDI, 2017; TOKESHI, 2003).

Rarefações e a música de *massas sonoras*

Rarefações explora a fronteira entre a percepção de sons individuais e a de *massas sonoras*, onde as texturas sonoras atuam em limiares da percepção auditiva a partir de fenômenos psicoacústicos. O título da obra é uma metáfora que faz alusão à evolução dos padrões de *massas sonoras* ao longo do tempo da peça, partindo de texturas densas e intensas para padrões rítmicos mais rarefeitos e irregulares ao final. A peça foi composta a partir de uma paleta sonora diversa que envolve a diversidade de modos de ataque da caixa-clara, a exploração de gestos rítmicos e o uso de processamento sonoro digital em tempo real.

O design de interações na composição foi concebido com base em dois elementos centrais: um descritor de *loudness* e a utilização de *pitch shifters*. Enquanto o segundo elemento foi responsável pela composição das *massas sonoras*, o primeiro teve como principal propósito o controle em tempo real dessas massas ².

O uso do descritor de *loudness* permitiu medir a intensidade do sinal proveniente da caixa em tempo real. Esses valores de *loudness* obtidos foram utilizados para processar o sinal de entrada da caixa, realizar a mixagem e controlar a espacialização. Essa implementação permitiu um mecanismo de responsividade entre a entrada do som da caixa e a composição das *massas sonoras*. Essa responsividade era ponderada utilizando cadeias de Markov. Isso permitiu a criação de *massas sonoras* com diversas qualidades e densidades ao longo da composição.

Em paralelo, empregamos a noção de *massas sonoras* como estratégia central para o processamento do áudio, ancorada no modelo psicoacústico de bandas críticas proposto por Zwicker, Flottorp e Stevens (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957). Este modelo preconiza que, quanto maior a densidade espectral em uma banda crítica, menor é nossa capacidade de resolução de frequência e percepção de alturas musicais. Além disso, há uma maior incidência de fenômenos psicoacústicos, como batimentos, *rugosidades*, mascaramentos e sons diferenciais. Com base nesse entendimento, optamos por utilizar diversos *pitch shifters* com valores de frequências muito próximos entre si, saturando a energia espectral em regiões imediatas das bandas críticas. Essa saturação resultou na formação das *massas sonoras* que formam a composição.

²Pacth disponível no link: https://gitlab.com/micael_antunes/patch_rarefacoes Acesso em: 10 Mar. 2024.

A estrutura do relato composicional

A narrativa da colaboração artística entre compositor e intérprete é construída em torno de três elementos de interação distintos. Inicialmente, explorou-se a definição do instrumental e do *setup* da eletrônica. Uma condição primordial foi a disponibilidade dos equipamentos e instrumentos no domicílio do intérprete, levando à escolha de um *setup* simplificado: uma única caixa-clara, cujo som seria captado por dois microfones, fornecendo o sinal de entrada para o processamento da eletrônica em tempo real durante a execução.

O segundo elemento abordou a pesquisa de repertório e a seleção da notação adequada para descrever os diversos modos de ataque propostos para a obra. Compositor e intérprete compartilharam exemplos de obras para caixa-clara solo, visando compreender as potencialidades do instrumento e os diferentes tipos de notações utilizadas. Destaca-se a obra *trommel-suite* (1979), de Siegfried Fink (1928–2006), que serviu de referência para a notação adotada na peça. Essa baseou uma notação que orientou o intérprete quanto às áreas da percussão, diferenciando as regiões da pele de ataque da caixa-clara e as combinações entre baqueta, pele e aro do instrumento.

Por fim, o terceiro aspecto compreendeu a elaboração de maquetes sonoras e a troca de gravações, ambos enfrentados em meio aos desafios decorrentes do distanciamento entre os colaboradores e das restrições impostas pelo isolamento social. A impossibilidade de realizar experimentações com a eletrônica em tempo real, comum no contexto da música mista, exigiu a criação de maquetes sonoras como alternativa. Essas maquetes, construídas a partir da troca de gravações, forneceram a base essencial para a criação do design de interações da obra.

A montagem da performance

Rarefações se materializou em um vídeo, configurando um caso singular de performance de música mista, originado pela contingência do isolamento social. A consolidação da obra em mídia audiovisual assume uma relevância particular, uma vez que sua poética reside na apreciação dos gestos do instrumentista diante do resultado sonoro engendrado pelo processamento computacional. O formato audiovisual permitiu evitar diversas contingências inerentes às execuções em tempo real, demandando à versão final da obra escolhas que vão além do *metiê* usual do compositor e intérprete.

A preparação da gravação em vídeo, as decisões de montagem do *setup* e a edição de áudio e vídeo convergiram para uma experiência dinâmica de aprendizado e colaboração entre os artistas. Nesse contexto, é pertinente refletir sobre como a elaboração de obras artísticas,

sobretudo em ambientes digitais, requer uma abertura às demandas dos dispositivos tecnológicos e uma compreensão da criação como um processo contínuo de aprendizagem. Além disso, a colaboração entre compositor e intérprete evidencia o potencial de enriquecimento do processo criativo, fomentando a emergência de um produto artístico que transcende as ações individuais. Nesse sentido, a elaboração de textos e relatos sobre os processos criativos e colaborativos assume um papel crucial na promoção da discussão entre criadores em diversos contextos, visando uma abordagem flexível e compartilhada na resolução de desafios técnicos e estéticos.

CRIAÇÃO E PERFORMANCE NA ELABORAÇÃO COLABORATIVA À DISTÂNCIA DE *RAREFAÇÕES* (2020)

Micael Antunes¹, Guilherme Misina¹ e Jônatas Manzolli¹

1. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

RESUMO

O presente texto apresenta um breve relato e reflexão dos processos composicionais envolvidos na criação colaborativa à distância de *Rarefações* (2020), para caixa-clara e eletrônica em tempo real. A partir do ponto de vista de Edgard Varèse, sobre *novos instrumentos* e uma música de *massas sonoras*, descrevemos as estratégias relacionadas ao desafio de compor e realizar uma performance de música mista em um ambiente de isolamento social, tendo como produto uma obra audiovisual.

Palavras-chave: Música mista, Performance musical, Música de massas sonoras, Psicoacústica e Criação colaborativa.

ABSTRACT

This paper presents a brief report and reflection on the creative processes involved in the distance collaborative creation of *Rarefações* (2020), for snare drum and live electronics. From the point of view of Edgard Varèse, about ideas for *new instruments* and *sound mass* music, we describe the challenge of composing and performing a live electronic music performance in an environment of social isolation, having as a product an audiovisual work.

Keywords: Live-electronic music, Musical performance, Sound mass music, Psychoacoustics e Audiovisual production.

1. INTRODUÇÃO

O compositor Edgard Varèse (1883-1965) sonhou com a possibilidade de desenvolvimento de *novos instrumentos* que permitissem a criação da música tal como ele a imaginava (VARÈSE; WEN-CHUNG, 1966). Para Varèse, esses novos instrumentos permitiriam a composição e manejo de *massas sonoras*, criando comportamentos de atração, repulsão e penetração (VARÈSE; WEN-CHUNG, 1966). O nosso ponto de vista é que, o atual contexto da maleabilidade dos dispositivos digitais, por conta dos conhecimentos de programação disseminados entre os artistas, e a busca por novos suportes para ancorar visões estéticas, problemas técnicos ou práticos, tornam possível o sonho de Varèse. A

criação de instrumentos digitais já faz parte da rotina e da prática de muitos compositores, intérpretes e artistas sonoros. Enfim, o pensamento de Varèse é central para nosso trabalho, tanto pela sua ideia de *novos instrumentos*, quanto pela sua imaginação de uma música de *massa sonoras*.

Apresentamos de maneira sucinta o relato sobre a criação colaborativa de *Rarefações* (2020) para caixa-clara e eletrônica em tempo real. A peça foi estreada no congresso online Anppom XXX. O vídeo da obra está disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=ILzbW3hdNBg>. A obra foi estreada na versão em vídeo e virtual por conta do isolamento social provocado pela pandemia do novo coronavírus. Refletimos como os dois artistas-criadores desenvolveram estratégias composicionais e interpretativas. O processo criativo buscou conciliar as suas visões estéticas com questões de ordem práticas ligadas à limitação de recursos e à luteria digital.

Rarefações é uma composição textural que explora o material sonoro no limite entre a percepção de sons individuais e a das *massas sonoras*. Entende-se como *massa sonoras* um caso específico de textura musical (FERRAZ, 1990) que ocorre a partir da exploração de um grande número de eventos sonoros em curtos espaços temporais e espectrais, visando explorar limiares da percepção de sons individuais (NOBLE; MCADAMS, 2020).

O processo de composição de *Rarefações* foi elaborado a partir da diversidade de modos de ataque da caixa-clara, da exploração de diversos gestos rítmicos e do uso de processamento sonoro digital em tempo real. O título da obra traduz a ideia de como os padrões de *massas sonoras* evoluem no tempo do decorrer da obra. *Rarefações* se inicia com *massas sonoras* densas e intensas que, no final da obra, convergem em *padrões rítmicos* rarefeitos e irregulares. O processo composicional dialoga com pesquisas acadêmicas na área de *psicoacústica* (FASTL; ZWICKER, 2007), *descritores de áudio* (BULLOCK, 2008) e estudos na área de *performance* (MISINA; TRALDI, 2017; TOKESHI, 2003). A seguir, apresentamos o processo de colaboração artística (tópico 2), elementos da composição (tópico 3) e da montagem da performance (tópico 4). No tópico 5 apresentamos nossas conclusões e reflexão sobre o nosso processo criativo.

2. COLABORAÇÃO ARTÍSTICA

A colaboração entre compositores e intérpretes é amplamente presente na história da música (PALOPOLI, 2015; PRESGRAVE, 2016; RAY, 2010), tendo sido reforçada no

contexto acadêmico pela ideia de *músico pesquisador* (RAY, 2010). Segundo Devenish e James (2019, p. 1), a colaboração entre compositor e intérprete foi um aspecto chave no desenvolvimento do repertório para percussão solo desde os anos de 1950. Essa colaboração é particularmente importante, uma vez que o instrumental da percussão abrange uma altíssima gama de possibilidades, o que leva, às vezes, o compositor a direcionar a sua escrita a um percussionista em particular e ao instrumental que está à disposição. Exemplos de peças icônicas que foram fruto de colaboração entre compositor e intérprete são a obra *King of Denmark* (1964), composta por Morton Feldman (1926-1987) com a colaboração de Max Neuhaus (1939-2009) e a obra *Psappha* (1975), de Iannis Xenakis (1922-2001) realizada com o percussionista Sylvio Gualda (1939 -).

Rarefações faz parte desse contexto de colaboração entre compositor e intérprete visando à composição de uma obra para percussão solo. As etapas executadas durante a colaboração são descritas a seguir. Ressaltamos que essas etapas não foram organizadas de forma claramente distintas.

A primeira etapa se concentrou na decisão do instrumental e do *setup* da eletrônica. A primeira condição que se impôs para realizar essas escolhas foi a disponibilidade dos equipamentos e instrumentos no domicílio do intérprete. Desse modo, escolheu-se o *setup* mais simples possível: uma única caixa-clara, cujo som seria captado por dois microfones adequados e suficientes para produzir o sinal de entrada para o tratamento da eletrônica em tempo real de execução.

A segunda etapa focou a pesquisa de repertório e a escolha da notação adequada para descrever todos os modos de ataque desejados para a obra. Nessa etapa, compositor e intérprete compartilharam exemplos de obras para caixa-clara solo, visando entender as possibilidades do instrumento e os tipos de notações utilizadas. Dentre as obras pesquisadas, destacamos *trommel-suite* (1979), de Siegfried Fink (1928 - 2006), que serviu de referência para a notação da peça. Adotamos um tipo de notação que orienta o intérprete quanto às regiões de toque para diferenciar regiões da pele de ataque da caixa-clara e combinações entre baqueta e pele/aro do instrumento.

Outro aspecto da colaboração foi a elaboração do *patch* em *Pure Data* (linguagem de programação focada em aplicações em áudio e multimídia) para o processamento sonoro da obra. A palavra *patch* é comumente utilizada para se referenciar a programas de processamento de áudio elaborados em programas como Pure Data e Max/MSP. As dificuldades a serem vencidas estavam relacionadas ao distanciamento entre os co-criadores,

o seu isolamento. O distanciamento social impossibilitou a experimentação direta do tratamento ao vivo, como feito usualmente no contexto da *música mista*. Por isso, trabalhou-se na elaboração de *maquetes sonoras*, que foram realizadas a partir da troca de gravações e permitiram experimentações para a criação da eletrônica. A noção de *maquetes sonoras* é usada neste contexto como excertos sonoros gerados pelo instrumentista com o objetivo de servir de material de experimentação para a criação da eletrônica. Essa noção foi incorporada em nossa prática composicional a partir das aulas do prof. Mikhail Malt no curso do Programa de Pós Graduação da Unicamp - Tópicos Especiais em Música e Tecnologia no segundo semestre de 2018 na Universidade de Campinas. Além disso, foram realizados remotamente diversos *workshops* para que o processamento em tempo real fosse devidamente incorporado ao processo criativo e para que houvesse oportunidade de realizar também correções no *patch* e adequações no *setup* de percussão.

3. ELEMENTOS DA COMPOSIÇÃO

Em *Rarefações*, a principal estratégia da eletrônica foi utilizar o sinal de áudio do microfone da caixa como controle do processamento computacional, a partir *descritores de áudio* (BULLOCK, 2008). *Descritores de áudio* consistem em uma série de algoritmos que permitem a representação digital do áudio a partir de modelos acústicos, psicoacústicos ou musicais (BULLOCK 2008). Os *descritores* utilizados para tratar o som da caixa são ancorados em modelos psicoacústicos (FASTL; ZWICKER, 2007). No caso específico dessa obra, a opção foi o descritor de *loudness*, que modela a nossa percepção subjetiva de intensidade sonora (MONTEIRO, 2012). Tendo em vista que o computador reage ao som de entrada, entendemos que a nossa abordagem dialoga com a noção de *design de escuta de máquina* (ROWE, 1992). Essa noção é relacionada com representação digital do áudio possibilitada pelos descritores de áudio e reforçada pelo viés perceptivo do modelo psicoacústico de loudness (ROWE 1992). Assim, esse modelo *psicoacústico* serviu de suporte para construção do processo de interação durante a execução da obra. Ressaltamos que não utilizamos nenhum som pré-gravado, pois a nossa intenção foi produzir distorções e desproporções entre o som de entrada e o som processado pelo computador. Ou seja, a amplitude sonora produzida pelo gesto do intérprete não resulta, necessariamente, na dinâmica do som final.

Ressaltamos que junto com o processamento da dinâmica, há um processo de espacialização que produz uma segunda camada de respostas do computador. Dado o jogo complexo estabelecido entre o som acústico de entrada e o som processado, a caixa-clara ampliada via processo tecnológico de *Rarefações* se torna um *instrumento aumentado* (BEVILACQUA et al., 2006).

Para o tratamento computacional do som da caixa-clara, implementamos dois tipos de processamentos, expostos no fluxograma da figura 1.

Processamento da Dinâmica: atrelado à intensidade do sinal da caixa, estimado a partir do descritor de *loudness* (MOORE; GLASBERG; BAER, 1997), que consiste em um modelo *psicoacústico* que estima a percepção subjetiva de *intensidade*. Desse modo, os valores de *loudness* foram utilizados para processar o sinal de entrada da caixa, a mixagem e a espacialização. Esse mecanismo foi implementado com o objetivo de permitir o controle da dinâmica entre a entrada do sinal da caixa e o processamento sonoro do computador. Como discutido anteriormente, visando a manipulação da dinâmica do som da caixa-clara e permitindo a mixagem do som de entrada com o som da resposta do computador.

Utilizamos como estratégia para a construção do processamento do áudio a noção de *massas sonoras* (apresentada no início do artigo) ancorada no modelo psicoacústico de *bandas críticas* (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957). Este modelo fornece uma simulação do comportamento da orelha interna a partir de uma série de filtros auditivos dispostos em *bandas bark* (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957). O modelo preconiza que, quanto maior a densidade espectral em uma determinada *banda crítica*, menor a nossa capacidade de resolução de frequência e percepção de alturas musicais. Também é maior a presença de fenômenos psicoacústicos como *batimentos*, *rugosidades*, *mascamamento* e *sons diferenciais* (ANTUNES, 2018; ANTUNES et al., 2021; FASTL; ZWICKER, 2007). Desse modo, utilizamos como principal processamento sonoro o uso de diversos *pitch shifters* com valores de frequências muito próximas umas das outras. Dessa forma, o processamento saturou a energia espectral em regiões imediatas das *bandas críticas*. Ou seja, essa saturação gerou as *massas sonoras* nas quais ancoramos o nosso processo composicional.

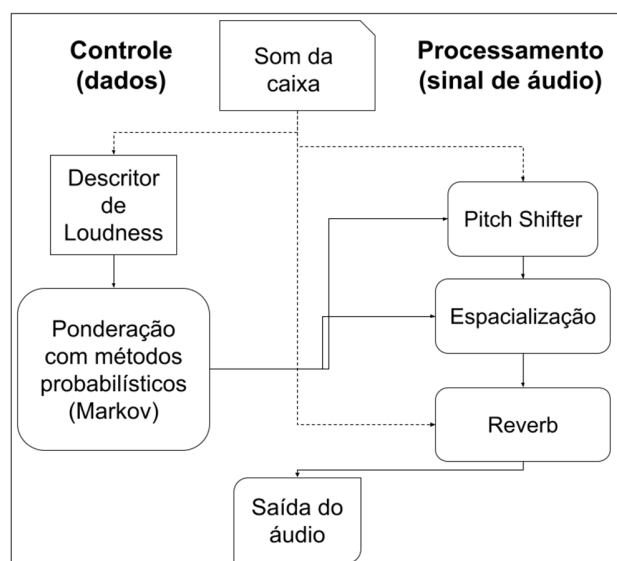


Figura 1. Fluxo do processamento de áudio no *patch* de *Rarefações*.

Processamento Estocástico: implementado com *cadeias de Markov* (AMES, 1989; JONES, 1989), teve como objetivo alterar os valores dos níveis do descritor de *loudness*, como descrito na seção anterior. Essa implementação viabilizou que um intérprete computacional controlasse os parâmetros da resposta da eletrônica em tempo real no decorrer da peça. Esse procedimento possibilitou a manipulação da densidade das *massas sonoras* ao mesmo tempo que manteve um certo nível de variedade proporcionado pela distribuição de probabilidades das *cadeias de Markov*.

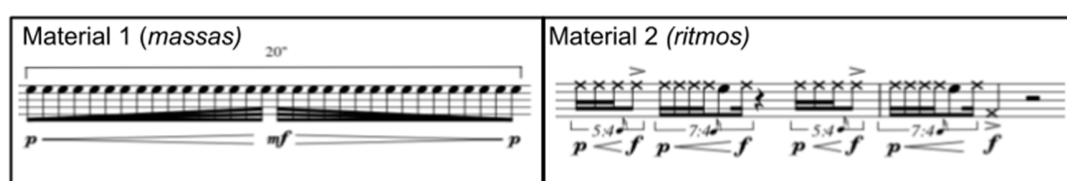


Figura 2. Materiais composicionais de *Rarefações*.

As probabilidades das *cadeias de Markov* também foram utilizadas para sequenciar pequenos trechos pré-compostos na partitura final executada pelo percussionista. O material pré-composicional consistia em pequenos trechos musicais com características distintas, como ilustrado na figura 2: o primeiro consiste em gestos muito longos e contínuos, referenciados como *massas*; o segundo consiste em um material mais rítmico, com uma grande variedade de modos de ataque e irregularidades métricas, referenciados como *ritmos*. Esses trechos foram indexados de modo a associar a cada um deles um estado da cadeia markoviana, conforme o fluxograma da figura 3. O primeiro nível da cadeia é exposto

na tabela 1 que descreve as probabilidades para escolha do material 1 (*massas*). Cada uma da sequência de estados da cadeia ou segmentos da partitura representa aproximadamente 1 minuto da peça.

Tabela 1. Probabilidades para o agenciamento do material 1 (*massas*) de *Rarefações*.

Segmento	A	B	C	D	E	F
Probabilidade de escolha do material 1	100%	80%	60%	40%	20%	0%

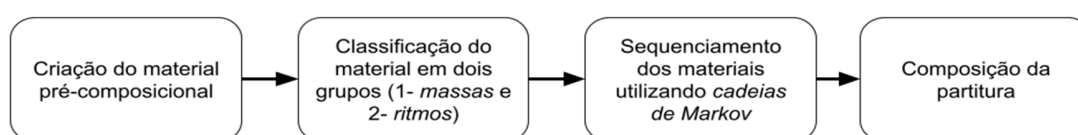


Figura 3. Fluxograma do processo de criação da partitura.

4. MONTAGEM DA PERFORMANCE

Como mencionado no início deste texto, a estreia da obra esteve atrelada às limitações de recursos para sua execução e ao distanciamento social por conta da pandemia do novo coronavírus. O principal aspecto influenciado pelo isolamento social foi a escolha do *setup* instrumental. Estávamos limitados aos instrumentos que o intérprete tinha à disposição, pois o mesmo não possuía acesso a outros espaços físicos. Além disso, o local utilizado para a gravação também não se encaixava nos moldes ideais. Trata-se de um espaço doméstico e desprovido de qualquer preparo acústico profissional. Isto foi um fator importante a ser ponderado, considerando a alta amplitude sonora provocada quando o intérprete toca a caixa-clara, especialmente em *Rarefações*, que gera grandes variações de dinâmica. Para melhorar a resposta acústica da sala, lançamos mão do uso de colchões, cobertores e travesseiros para diminuir a reverberação e aumentar a absorção do som durante a gravação de vídeo. Todos esses procedimentos, possibilitaram uma melhor qualidade do áudio gravado. Na figura 4 mostramos o *setup* utilizado para a gravação de *Rarefações*, mostrando as nossas escolhas sobre o posicionamento dos dispositivos. Utilizamos para a captação dois microfones dinâmicos: um na pele de ataque e outro na pele de resposta. Para controle dos níveis de volume de entrada, utilizamos uma mesa de som, que também fazia interface com o computador, onde o áudio foi processado. O vídeo foi

captado em uma câmera à frente do intérprete. Vale lembrar que se trata apenas de uma opção de posicionamento, que foi escolhida para permitir ao intérprete o controle de parâmetros do áudio e acesso ao *patch*, dado que a mesa de som e o computador estavam ao seu lado.

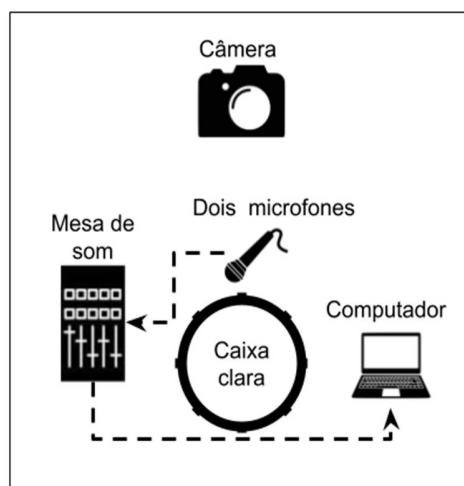


Figura 4. Setup para a realização de *Rarefações* (2020). A linha tracejada representa o fluxo do sinal de áudio.

O isolamento social, entretanto, não foi o único desafio encontrado pelo intérprete no processo de estudo, execução e gravação da obra. *Rarefações* é uma obra de *música mista* que utiliza equipamentos eletrônicos e digitais, demandando um conhecimento prévio sobre o correto manuseio de *softwares* específicos. Assim, o intérprete recebeu treinamento direto do compositor e dedicou-se a dominar os procedimentos técnicos necessários para realizar a gravação da obra. Finalmente, a peça foi gravada pelo intérprete no seu ambiente doméstico. Foram geradas duas trilhas sonoras distintas: uma com o som original da caixa-clara e outra com o som processado gerado pelo computador durante a performance. A versão final da peça foi consolidada em um vídeo.

O resultado sonoro da combinação entre o processamento do *loudness* e o controle estocástico da *cadeia de Markov* pode ser observado a partir das texturas e da diversidade de *massas sonoras* geradas durante a performance da obra. Em certos momentos, as sonoridades resultantes alimentam uma ambiguidade entre a percepção das fontes sonoras (caixa-clara e eletrônica). Em outros momentos, é criada uma completa desproporção entre o gesto instrumental e o resultado sonoro do processamento de áudio.

Para representar o resultado da peça, apresentamos na figura 5 o gráfico de dois descritores de áudio: o de *loudness*, representando a percepção de intensidade sonora e o

bark coefficients para representar a energia sonora nas *bandas críticas* (BULLOCK, 2008). Segmentamos a peça a cada minuto, de acordo com a tabela 1. É interessante notar como as *massas sonoras* são representadas pela forma triangular do *loudness* acompanhado de mudanças graduais da energia nas *bandas críticas*, presentes principalmente nos segmentos de **A** a **C**. De outro modo, as texturas mais rítmicas da peça são representadas pelas grandes e concentradas oscilações de energia nos segmentos **D** a **F**.

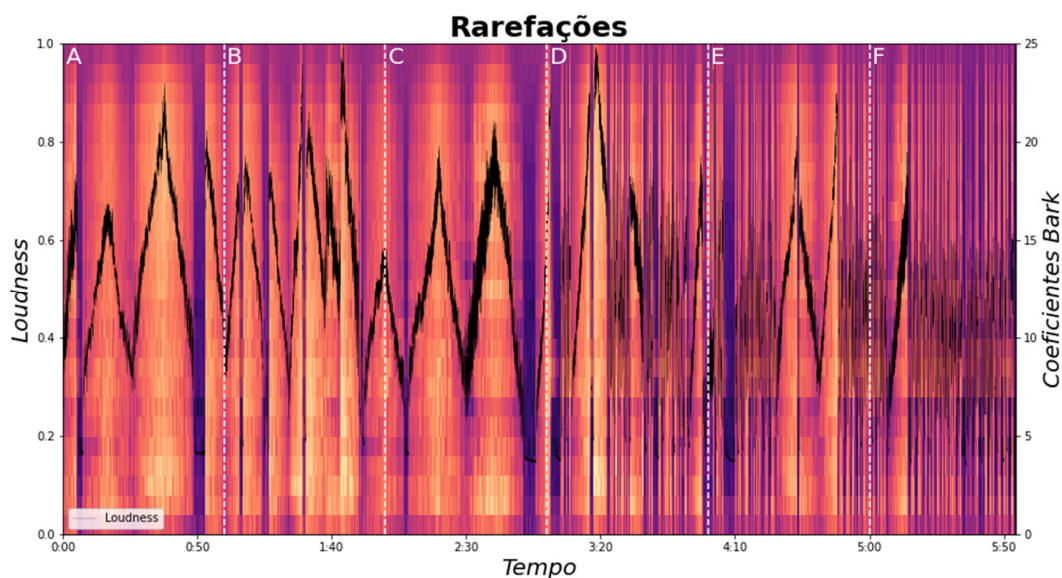


Figura 5. Descritores de *loudness* e *coeficientes bark* em função do tempo de *Rarefações*. As linhas tracejadas representam a segmentação a cada minuto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado de *Rarefações* (2020) se consolidou em um vídeo, o que estabelece um caso particular de *performance* de música mista, fruto da contingência do isolamento social. Desse modo, uma série de incertezas, típicas de execuções em tempo real foram suprimidas na sua versão final. Como isso, entendemos que a *performance* da peça não se resumiu às escolhas interpretativas de execução, mas também a todo o preparo da gravação em vídeo, às escolhas de montagem do *setup* de gravação e à edição de vídeo e de áudio. Neste caso, nos parece particularmente interessante a consolidação dessa obra em uma mídia audiovisual, dado que a poética da peça gira em torno da apreciação dos gestos do instrumentista ante o resultado sonoro produzido pelo processamento computacional. Assim, também consideramos de particular interesse refletir como, no caso da elaboração de obras

artísticas, todas as decisões técnicas causam impacto no resultado e na fruição da obra.

Nesse sentido, retomamos a ideia inicial do texto, onde comentamos que as projeções artísticas nos levam a buscar *novos instrumentos* para a realização das nossas criações. No trabalho aqui apresentado, o compositor e o intérprete são convidados a enfrentar essa novidade de maneira plena, inclusive se lançando ao aprendizado de novas ferramentas como, neste caso, edição de vídeo, programação e manejo de equipamentos de áudio. Nesse sentido, entendemos que o artista tem que estar aberto às necessidades de *design* dos dispositivos digitais e, ao mesmo tempo, compreender a elaboração da obra como um processo de aprendizagem.

A colaboração aqui apresentada demonstra um potencial de enriquecimento do processo criativo, pois os agentes envolvidos nesse processo trocaram conhecimentos, ideias e experiências, causando a *emergência* de um produto artístico que não seria possível com as suas ações individuais. Por isso também compreendemos como necessária a elaboração de textos e relatos sobre os processos criativos e colaborativos como meio de fomentar a discussão entre criadores em diversos contextos. Buscou-se aqui uma mudança de pensamento no qual renunciamos a estratégias fixas de criação para compartilhar soluções técnicas e estéticas.

Concluimos com a ideia inicial de Varèse sobre a criação de *massas sonoras*, que neste trabalho foi viabilizada a partir da *psicoacústica* e da luteria digital, aliadas ao uso de gestos instrumentais com uma grande densidade de ataques. Assumimos que é possível associar noções sonoras como densidade, rarefação e movimento aos modelos de *bandas críticas* e de *loudness*. Entendemos que essa solução não é única nem definitiva. Todavia, encontramos nessa estratégia uma boa ferramenta para o desenvolvimento de processos composicionais, que foram efetivos tanto no planejamento da obra quanto no design do processamento da eletrônica em tempo real. Do mesmo modo, o agenciamento do material a partir do uso das *cadeias de Markov* pode ser ampliado em futuras criações.

REFERÊNCIAS

AMES, Charles. The Markov Process as a Compositional Model: A Survey and Tutorial. **Leonardo**, v. 22, n. 2, p. 175–187, 1989.

ANTUNES, Micael. **Redução da dissonância sensorial em uma escala temperada utilizando timbres inarmônicos: uma abordagem experimental e aplicações artísticas.**

Dissertação de Mestrado. Mestrado em Música. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

ANTUNES, Micael. et al. Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos (pre-print). **Música Hodie**, v. 21, p. 1-36, 2021.

BEVILACQUA, Frédéric et al. **The augmented violin project: research, composition and performance report**. Proceedings of the 6th International Conference on New Interfaces for Musical Expression. **Anais...** In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW INTERFACES FOR MUSICAL EXPRESSION. Paris: 2006.

BULLOCK, James. **Implementing audio feature extraction in live electronic music**. Tese de Doutorado. Ph.D. em Música. Birmingham: Birmingham City University, 2008.

DEVENISH, Louise; JAMES, Stuart. Composer-Performer Collaboration In the Development of Kinabuhil Kamatayon For Percussion and Electronics. **Sound Scripts**, v. 6, n. 1, p. 9, 2019.

FASTL, Hugo; ZWICKER, Eberhard. **Psychoacoustics: facts and models**. 3rd. Ed. Berlin ; New York: Springer, 2007.

FERRAZ, Silvio. Análise e Percepção Textural: Peça VII, de 10 peças para Gyorgy Ligeti. **Cadernos de Estudos**, p. 68–79, 1990.

JONES, Kevin. Generative models in computer-assisted musical composition. **Contemporary Music Review**, v. 3, n. 1, p. 177–196, jan. 1989.

MISINA, Guilherme.; TRALDI, Cesar. **Técnicas estendidas e preparação instrumental no vibrafone: considerações e exemplificações**. Anais do I Congresso Brasileiro de Percussão. **Anais...** In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE PERCUSSÃO. Campinas: Editora da Unicamp, 2017.

MONTEIRO, Adriano. **Criação e Performance Musical no Contexto dos Instrumentos Musicais Digitais**. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Música. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.

MOORE, Brian; GLASBERG, Brian; BAER, Thomas. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 45, n. 4, p. 224–240, 1997.

NOBLE, Jason; MCADAMS, Stephen. Sound mass, auditory perception, and ‘post-tone’ music. **Journal of New Music Research**, v. 49, n. 3, p. 231–251.

PALOPOLI, Cibele. **Colaboração intérprete-compositor: o contato de Luciano Berio com intérpretes flautistas e a composição da Sequenza I, para flauta solo**. Anais do III Simpósio Brasileiro de Pós-Graduandos em Música. **Anais...** In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUANDOS EM MÚSICA. Rio de Janeiro: 2015.

PRESGRAVE, Fabio. Subjetividade e Interpretação da música contemporânea. In: PRESGRAVE, Fabio.; MENDES, Jean Joubert; NODA, Lucian. (Eds.). **Ensaio sobre a**

música dos Séculos XX e XXI. Natal, RN: EDUFRN, 2016. p. 59–75.

RAY, Sonia. **Colaborações compositor-performer no Século XXI: uma ideia de trajetória e algumas perspectivas.** Anais do XX Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música. **Anais...** In: XX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM MÚSICA. Florianópolis: 2010.

ROWE, Robert. Machine Listening and Composing with Cypher. **Computer Music Journal**, v. 16, n. 1, p. 43, 1992.

TOKESHI, Eliane. Técnica Expandida para Violino e as Variações Opcionais de Guerra Peixe: reflexão sobre parâmetros para interpretação musical. **Música Hodie**, v. 3, n. 1/2, 2003.

VARÈSE, Edgar; WEN-CHUNG, C. The liberation of sound. **Perspectives of new music**, p. 11–19, 1966.

ZWICKER, Eberhard; FLOTTORP, Georg; STEVENS, Stanley Smith. Critical Band Width in Loudness Summation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 29, n. 5, p. 548–557, 1957.

3.3 Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum

Dedicaremos essa seção da tese para expor e discutir aspectos de nossa composição *Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum*. A composição foi estreada em 10 de setembro de 2022 no Festival *Gaudeamus* (Utrecht, Holanda), com a performance da violoncelista Katharina Gross e minha participação na eletrônica em tempo real ³. Esta peça assume um caráter singular em meu portfólio composicional, pois representa para mim uma síntese das diversas influências que têm marcado minha jornada na música. Inspirada tanto pela música popular brasileira, com seus elementos sonoros, gestuais e performáticos, quanto pela prática composicional que dialoga com a herança da música experimental e de *massas sonoras*, esta peça reflete minha vontade criativa de fazer dialogar esses 2 mundos aparentemente distantes. Neste contexto, buscarei demonstrar como a noção de *gestos* permeia todo o processo criativo desta peça, desde a concepção dos elementos sonoros, passando pela escrita da partitura até o *design* de interações da eletrônica em tempo real. Ao entrelaçar essas influências, emerge uma trama sonora que, para mim, não só ecoa as inquietações presentes em minha música, mas também se conecta com características do contexto das expressões artísticas brasileiras, como será explorado a seguir.

Embora seja sempre desafiador descrever um processo composicional, acredito na riqueza de compartilhar minha perspectiva como compositor, indo além da mera narrativa de elementos da partitura ou da implementação do sistema para a eletrônica em tempo real. Isso me permite evidenciar a influência dos estudos musicológicos apresentados nesta tese em meu processo composicional, sem a necessidade de adotar um discurso mais formal ou científico. Portanto, em um primeiro momento, relato os aspectos criativos e conceituais desta composição. Depois, farei uma exposição mais técnica por meio de elementos da obra, evidenciando como o estudo da música de *massas sonoras* influenciou meu trabalho composicional.

3.3.1 A motivação criativa

A motivação desta composição é uma questão que permeia meu imaginário composicional, assim como a minha postura como ouvinte: *quem somos nós e como a música que produzimos nos representa?* Esta é uma pergunta que não consigo responder, mas que me traz à mente dois aspectos importantes: *ambiguidade e movimento*.

³O vídeo da performance pode ser acessado no link a seguir: <https://youtu.be/kQ3f0x3ajVA> Acesso em: 10 Mar. 2024.

A *ambiguidade* porque nossas vidas no Brasil, assim como nossa música, levantam questões sobre colonização e sincretismo (ROMÃO, 2018). A presença da ambiguidade no discurso parece ser uma abordagem habitual para facilitar uma flexibilidade conceitual que permite o trânsito entre diferentes meios culturais, políticos e religiosos. Acredito que esse sincretismo não é pacífico, mas permeado por vários conflitos que emergem na vida social e política até hoje. O *movimento*, porque, em minha opinião, a pluralidade na música e cultura brasileira é um sintoma desses conflitos complexos, o que leva ao surgimento de uma diversidade de soluções artísticas na música popular, música experimental e arte sonora.

O álbum *Slave Mass* (1977) de Hermeto Pascoal (1936-) , que incorpora em seu nome essa ideia de sincretismo, é um exemplo representativo de como essas características de *ambiguidade* e *movimento* interagem com a nossa forma de conceber nossa música. Em nossa visão, estes estão associados à criação de um ambiente sonoro exuberante e plural que faz dialogar de forma fluida as tradições dos gêneros musicais brasileiros, a prática da improvisação e os princípios da música experimental. É interessante notar que neste álbum existe até mesmo uma peça de música mista, a composição *Cannon* (1977), para flauta e sons eletrônicos.

Neste contexto, escolhi homenagear em minha composição o violoncelista Jaques Morelenbaum. Entendo que a performance do violoncelo no contexto da *MPB* com a musicalidade de Morelenbaum representa esse sincretismo que atravessa nossa cultura. Nesse sentido, as interpretações de Jaques nos inspiram em suas características dinâmicas na performance, com o movimento do corpo, suas contingências e adaptações em tempo real. Esse ponto de vista é motivado por um evento específico, a performance de Doralice (1945) ⁴ em conjunto com o *Cello Samba Trio* ⁵.

O que mais me chama atenção nas performances de Jaques é a sua versatilidade como músico, no sentido de que seu violoncelo assume vários papéis ao longo do concerto. Antes de mais nada, é relevante ressaltar que ele realiza as suas apresentações no *Cello Samba Trio* utilizando um violoncelo de 5 cordas. Assim, seu violoncelo pode assumir diversos papéis: às vezes é um baixo de acompanhamento, às vezes é solista, às vezes tem um papel mais textural, às vezes é mesmo um instrumento percussivo.

Sendo assim, *Gestos* visa articular no tempo gestos musicais da performance de Morelenbaum como as melodias líricas, o glissando com seus intervalos característicos da escala de blue note, o walking bass com melodias cromáticas, texturas com harmônicos naturais entre

⁴Composição de Antonio Almeida (1911-1999) e Dorival Caymmi (1914-2008).

⁵Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Fk6fF9EYF9A>>. Acesso em: 22 fev. 2024.

uma variedade de glissandos, além de elementos percussivos. A composição também explora a interação em tempo real, a partir de um instrumento interativo de *massas sonoras* chamado *TEIA*. Além disso, existe um banco de amostras sonoras que contem sons do violoncelo e sons gerados com instrumentos percussivos feitos dos frutos do *jatobá* e *urucum*.

Existe uma sinergia estreita entre a partitura e os elementos eletrônicos. Isso significa que os gestos de cada segmento da peça, tal como escritos na partitura, se conectam com um *design* específico de interação eletrônica. Portanto, visando proporcionar uma narrativa que auxilie o leitor a compreender meus processos composicionais, exponho a trajetória da seguinte maneira. Inicialmente, discorro sobre meu processo criativo, cuja compreensão não é crucial para a apreciação da composição, mas permite ao leitor entender a gênese de alguns elementos que serão posteriormente explorados na peça (Seção 3.3.2). Em seguida, descrevo elementos da partitura, focando na análise dos gestos que compõem a obra, suas características gerais e origens poéticas (Seção 3.3.3). Num terceiro momento, adentro no *design* de interações, apresentando a arquitetura geral da parte eletrônica (Seção 3.3.4). Descrevo, ainda, um patch *Max* dedicado à criação das *massas sonoras*, desenvolvido especificamente para esta composição (Seção 3.3.4). Por fim, farei uma descrição integrada dos elementos da partitura e como estes, em conjunto, compõem as diversas texturas da obra, elucidando a relação entre a escrita musical e a interação com a eletrônica (Seção 3.3.5).

3.3.2 O processo composicional

Minha prática e escuta musical diárias são permeadas por uma variedade de influências, com ênfase na música brasileira e nas abordagens composicionais do século XX, notadamente o serialismo, a música de *massas sonoras* e a música computacional. Essa diversidade reflete também minha formação musical, que teve início com o estudo da guitarra no contexto da música popular e se expandiu ao longo do tempo para o estudo da composição. Assim, emergiu como natural na composição de *Gestos* a integração entre improvisação, habilidade natural como guitarrista e estudante de música popular e jazz, e o emprego da composição assistida por computador (ASSAYAG et al., 1999).

Neste cenário, meu processo composicional foi uma experiência dinâmica, com um fluxo de retroalimentação entre atividades criativas que podem ser descritas em 3 pontos: 1) pequenas transcrições e anotações livres dos gestos de Jaques na performance de Doralice; 2) seções de improvisação na guitarra ou ao piano para emular, brincar e interagir com o

material gerado no passo 1; 3) em seguida, transcrever a minha própria improvisação e utilizá-la como entrada de modelos de composição assistida por computador programados por mim utilizando o software *Max* utilizando as bibliotecas *Bach* e o *Machine Learning Toolkit*. Os modelos empregados consistem, em sua maioria, de cadeias de Markov, onde as matrizes de transição (BELL, 2011) são concebidas por mim. Em outros momentos, tais matrizes são geradas a partir de algoritmos de aprendizagem automática da biblioteca *Machine Learning Toolkit*, tendo como entrada trechos de materiais dos meus rascunhos.

A modelização na composição ocorre em dois momentos distintos. O primeiro visa criar variações de elementos sonoros a partir de gestos específicos, estando intimamente ligado à prática da improvisação. A partir da escrita de pequenos fragmentos de gestos, que englobam características melódicas, rítmicas e dinâmicas, esses elementos são modelizados utilizando cadeias de Markov. Esse procedimento permite gerar uma quantidade de variações de um gesto a partir de um elemento inicial. O segundo, em um nível mais elevado, que envolve a estrutura musical da peça, onde as cadeias de Markov são utilizadas para modelizar a diversidade de gestos em cada seção. Assim, os fragmentos de partitura gerados no primeiro passo da composição são organizados de acordo com suas características gestuais e combinados com as cadeias de Markov para determinar a amplitude da variedade dos gestos durante os segmentos da composição.

3.3.3 A concepção dos gestos

A partir do processo criativo anteriormente descrito, chegamos à seleção de uma quantidade específica de gestos instrumentais que comporiam a obra. Esses gestos abrangem uma variedade de morfologias sonoras distintas, relacionadas a diversas possibilidades de recursos instrumentais. Com isso, buscamos criar um número definido de texturas variadas na composição, cada uma voltada para diferentes aspectos da performance de Jaques. Em certos momentos, a escolha dos gestos tem uma relação mais explícita e orgânica com o seu contexto original. Em outros casos, são selecionados gestos que aparecem esporadicamente nas performances usados como elementos para a construção de texturas musicais distantes do contexto original de *Doralice*. Dessa forma, podemos categorizar esses gestos em cinco grupos distintos: melodia, glissandos, microtonal, walking bass e percussivos.

A melodia atua como uma das âncoras da composição, e, embora não seja formada por citações, estabelece uma relação explícita com *Doralice*. Esta foi concebida em interação com as improvisações realizadas sobre essa música. A melodia assume um papel central na

peça, caracterizando-se por sua natureza lírica e sobressaindo-se nos momentos onde a textura musical é focada em *solos* ⁶ do violoncelo. A natureza lírica desta melodia decorre de sua origem na canção, na qual as características melódicas refletem a prosódia e as inflexões da voz falada. Também chamamos a atenção para outra característica típica da bossa nova, onde os elementos rítmicos, permeados por síncopas, se entrelaçam com perfis melódicos caracterizados por diferentes graus de variação ascendente e descendente entre picos e vales da melodia. Esses perfis melódicos são associados a progressões harmônicas, resultando em uma dinâmica que oscila entre sensações de tensão e relaxamento ao longo da composição. Assim, procuramos emular essas características de tensão e relaxamento das melodias, explorando figuras rítmicas inspiradas em síncopas e utilizando diversos graus de variação do registro melódico.



Figura 3.1: Notação do gesto *melodia*

Em *Gestos*, o *glissando* foi escolhido como um elemento de ligação entre a performance de Jaques Morelenbaum e a música de *massas sonoras*. Nas performances de Jaques, ele surge às vezes como efeitos sonoros, mas também faz parte das microarticulações de sua performance. Sendo assim, os microglissandos são quase onipresentes em suas interpretações e improvisações. No contexto das *massas sonoras*, o glissando é um gesto muito representativo. Em Ligeti, o glissando é o elemento sonoro central da composição da obra eletroacústica *Glissandi* (1957). Além disso, esse é um gesto muito característico da música de Iannis Xenakis, como pode ser visto na composição *Arousa* (1970). Isso se liga à noção de exploração do continuum no contexto das *massa sonoras*, como já discutido na Seção 1.3.1. Além disso, o glissando é a base de nossa implementação da eletrônica em tempo real, como será explicado posteriormente na Seção 3.3.4.

Os gestos microtonais são mais uma das manifestações que surgem episodicamente nas interpretações e improvisações de Jaques Morelenbaum, que empregamos como elemento para composição das texturas sonoras. Além disso, essa forma de gesto nos permite explorar um espaço de alturas que extrapola o temperamento igual de 12 alturas, adentrando em um

⁶Neste contexto, por solo queremos dizer momentos onde não há forte presença do som da eletrônica em tempo real em conjunto com o violoncelo.

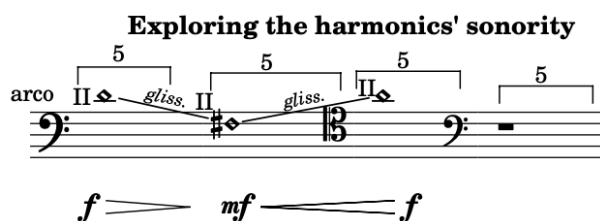


Figura 3.2: Notação do gesto *Glissando*

continuum de alturas maleável para a composição das *massas sonoras*. Adicionalmente, esses gestos estão associados a uma certa instabilidade rítmica, acrescentando uma dimensão que será útil para a construção das *massas sonoras*, como será explicitado na seção 3.3.5. Por fim, sendo este o gesto mais complexo da composição, ele também tem o objetivo de criar uma certa instabilidade em termos de ação da performance.

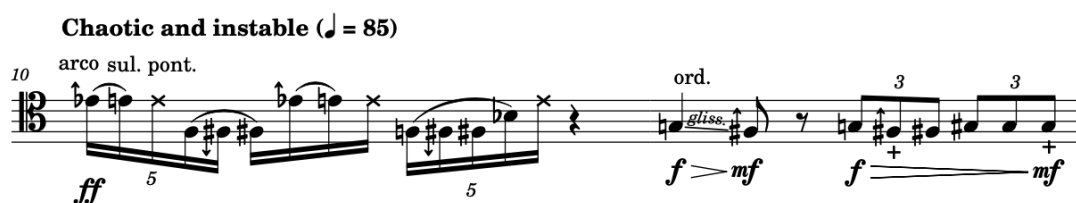


Figura 3.3: Notação do gesto *microtonal*

O walking bass é inspirado nos momentos da performance de Jacques em que ele atua como baixista. A direcionalidade é um aspecto crucial desse gesto, composto pela combinação de perfil melódico, dinâmica e características rítmicas. A emulação do baixo é realizada por meio do uso do registro grave do instrumento. Além disso, os saltos e movimentos cromáticos são características desse gesto, apresentados em movimentos de expansão ou contração do registro da melodia. Frequentemente, esses gestos cromáticos são combinados com acelerandos e desacelerandos, intensificando a sensação de direcionalidade. Ademais, ocasionalmente sugere-se textualmente que a execução desse gesto seja feita no estilo swing, uma característica comum em performances de jazz.



Figura 3.4: Notação do gesto *walking bass*

Um gesto de significativa relevância para mim nesse contexto são os recursos percussivos, os quais são frequentemente presentes nas performances de Jaques. Dessa forma, esses gestos foram categorizados em notações específicas que representam diversas técnicas de percussão do violoncelo, como ilustrados na Figura 3.5.

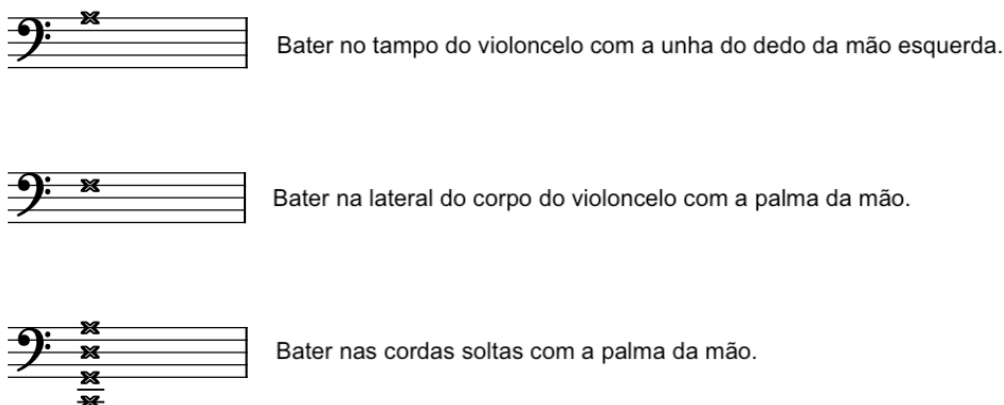


Figura 3.5: Diferentes recursos percussivos da composição

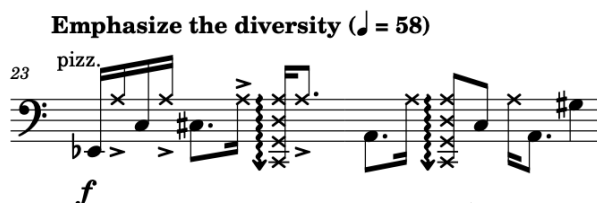


Figura 3.6: Notação do gesto *percussivo*

Os gestos percussivos têm uma característica especial, pois introduzem na composição uma série de morfologias sonoras que se contrapõem às características tonais dos demais gestos da peça. Além disso, conforme concebidos, associados a ritmos repetitivos utilizados associação com procedimentos de aumentação e diminuição, eles têm por objetivo criar elementos mais estáveis da composição, atuando no nível da memória com certa estabilidade e regularidade.

O conjunto de gestos oferece uma rica variedade de características, permitindo a composição de texturas distintas. Gestos como a melodia e o walking bass evocam uma memória próxima à música popular, refletindo sua origem na performance de Doralice. Por outro lado, os gestos glissando e microtonal, com suas peculiaridades temporais, possibilitam criar texturas mais densas e complexas, especialmente quando interagem com a eletrônica em tempo real. Enquanto isso, as figuras rítmicas assumem um caráter mais estável, atuando como âncoras

para a composição. Agora que delineamos as concepções dos gestos na partitura, exploraremos como essas ideias se integram à criação do patch da eletrônica.

3.3.4 A interação com os gestos

Nesta seção, abordaremos o *design* de interações ⁷. Inicialmente, detalharemos a arquitetura do patch. Após essa apresentação geral, concentraremos nossa atenção nos módulos de interação em tempo real e de síntese, devido à sua singularidade de implementação inspirada no conceito de *massas sonoras* e relevância no âmbito da composição.

A arquitetura do patch

A arquitetura do patch está dividida em 4 módulos distintos: o módulo de entrada, responsável por receber o sinal do violoncelo; o módulo de interação em tempo real; o módulo de síntese; e o módulo de saída. Esses módulos e o fluxo de suas conexões são ilustrados na Figura 3.7

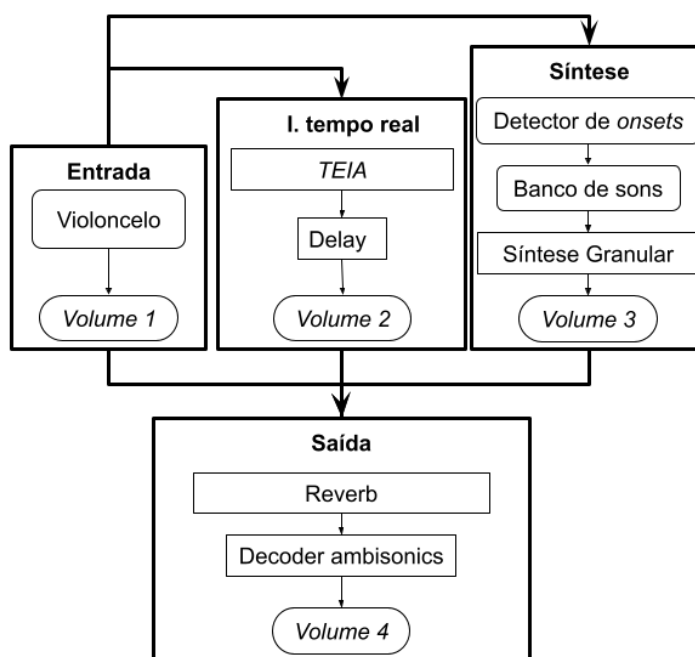


Figura 3.7: Estrutura modular do *patch* da eletrônica e seu fluxo de conexões.

O módulo de entrada recebe o som do violoncelo, o qual então passa por um controle de volume manipulado diretamente pelo performer da eletrônica. No módulo de *interação em*

⁷Pach disponível no link: https://gitlab.com/micael_antunes/teia.git Acesso em: 10 Mar. 2024.

tempo real, temos a *TEIA*, que é posteriormente submetida a um efeito de *delay*. Esse *delay*, integrante da biblioteca *HOA* do *Max*, tem o propósito de criar diversas configurações de difusão sonora no espaço *ambisonics*. No módulo de síntese, estão presentes os arquivos de som destinados a serem processados posteriormente pela síntese granular. Estes são direcionados à saída de áudio 3, também controlada pelo performer da eletrônica.

O módulo síntese

O módulo síntese consiste em dois elementos principais: o banco de sons e a síntese granular. O banco de sons abrange uma variedade de amostras sonoras obtidas a partir do som de instrumentos de percussão construídos com o *urucum* e dos frutos do *jatobá*, além de incluir samples sonoros do violoncelo gravados pela intérprete. Estes últimos são compostos por fragmentos da peça *Gestos*, juntamente com pequenos materiais sonoros que não fazem parte da partitura da composição.

A síntese granular foi desenvolvida com o propósito de criar cenas e paisagens sonoras a partir dos samples sonoros em tempo real. Utilizando a biblioteca *HOA* do *Max*, é possível associar texturas sonoras a diferentes configurações de difusão e localização no espaço *ambisonics*, permitindo assim a criação de experiências sonoras imersivas.

O banco de sons é organizado numericamente para possibilitar o acesso em tempo real no patch por meio de sorteios randômicos. Esses sorteios são desencadeados por um detector de *onset* conectado à entrada sonora. Dessa forma, a velocidade dos sorteios dos samples sonoros é diretamente proporcional ao número de ataques no violoncelo. Essa abordagem visa estabelecer uma responsividade entre a ação do violoncelo e as texturas sonoras resultantes.

A TEIA - Texturas Estocásticas com Interação Assistida

Em minha infância, uma vez sonhei que não conseguia chegar à minha caminha (que tinha grades e para mim significava um refúgio) porque todo o quarto estava cheio de uma teia finamente tecida, mas densa e extremamente emaranhada, semelhante às secreções com as quais os bichos-da-seda preenchem toda a sua caixa de criação enquanto se transformam em crisálidas. Além de mim, outras criaturas vivas e objetos estavam presos nessa imensa teia: traças e besouros de todos os tipos, que tentavam chegar à vela fraca que tremeluzia no quarto; e enormes travesseiros úmidos e sujos, cujo enchimento podre sobressaía pelas rasgaduras da capa. [...] A lembrança desse sonho de muito tempo atrás teve uma influência definitiva na música que escrevi no final da década de 1950. Os eventos naquele quarto coberto de teias foram transformados em

fantasias sonoras, que formaram o material inicial para composições. (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 164-165) ⁸

Durante a composição de *Gestos*, surgiu a ideia de aprofundar a implementação do instrumento interativo que me permitisse criar e manipular *massas sonoras* em tempo real. Essa ideia é consequência da peça *Rarefações*, na qual desenvolvi um instrumento para a geração das *massas sonoras* a partir do uso de uma série de *pitch shifters*. Em *Rarefações*, embora tenha obtido um resultado sonoro satisfatório para o contexto, duas coisas não me agradaram: 1 - a manipulação dos *pitch shifters* resultava em um efeito de *flanger* indesejado. 2 - não existia uma variedade de gestos ou comportamentos texturais que me permitissem criar uma grande variedade de texturas musicais. Foi então que surgiu a primeira concepção da *TEIA*.

O acrônimo *TEIA* — Texturas Estocásticas com Interação Assistida — faz referência a Ligeti e sua narrativa sobre o seu sonho durante a infância envolvendo uma teia, evento este que mais tarde ele narrou como uma metáfora para as suas composições musicais. Além disso, ela se inspira em um trabalho realizado em nossa pesquisa sobre a análise da composição *Aroua* (1970) de Xenakis. ⁹ De maneira geral, nossa análise demonstrou como Xenakis organiza sua composição em um número limitado de *massas sonoras*, com características psicoacústicas distintas. Essas massas são formadas por elementos menores que podem ser classificados a partir da noção de *gestos* ou *recursos instrumentais*. Surgiu então a ideia de desenvolver um instrumento que integrasse diferentes gestos sonoros. Além disso, esses gestos poderiam ser sobrepostos e combinados para formar *massas sonoras* com diversas características, qualidades e densidades. Dessa forma, introduzimos uma versão protótipo de um instrumento interativo dedicado à geração de *massas sonoras*, implementado em *Max*.

A *TEIA* tem uma implementação modular que permite a construção das *massas sonoras* a partir de 3 gestos principais: **1** - o *cluster*, **2** - o *glissando* e **3** - o *extremo*. Quanto às diferentes combinações, é possível acionar cada gesto com um número de 1 a 3 vozes.

⁸Tradução nossa do original: In my early childhood I once dreamt that I could not make my way to my little bed (which had bars and for me signified a haven) because the whole room was filled with a finely spun but dense and extremely tangled web, similar to the secretions with which silkworms fill their entire breeding box as they pupate. Besides myself, other living creatures and objects were caught in this immense web: moths and beetles of all sorts, which were trying to get to the weakly flickering candle in the room; and enormous damp, dirty pillows, whose rotten stuffing was bulging out through rips in the cover. [...] The memory of this dream from long ago had a definite influence upon the music that I wrote at the end of the 1950s. The events in that cobwebbed room were transformed into sonic fantasies, which formed the initial material for compositions. (LIGETI; BERNARD, J. W., 1993, p. 164-165)

⁹Esse estudo não faz parte dos artigos que compõem esta tese, pois foi publicado em forma de resumo no evento Euromac (ANTUNES; ROSSETTI; MANZOLLI, 2021a), e uma versão expandida desse artigo será publicada em uma oportunidade futura.

Isso proporciona um controle sobre a densidade das massas sonoras, variando de 1 a 9 vozes simultâneas, tal como ilustrado na Figura 3.8.

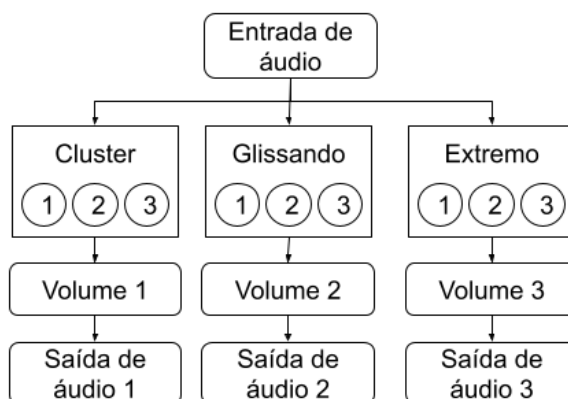


Figura 3.8: Implementação modular da *TEIA* para a construção de massas sonoras com os gestos principais: *cluster*, *glissando* e *extremo*. Cada gesto pode ser ativado com 1 a 3 vozes, permitindo um controle da densidade das *massas sonoras* de 1 a 9 vozes simultâneas.

Todos os gestos individuais são constituídos de um mesmo algoritmo implementado em *abstrações* em *Max*, como ilustrado no fluxograma da Figura 3.9. Sendo assim, as especificidades de cada gesto são determinadas pela variação de parâmetros do algoritmo. Essas abstrações recebem uma entrada de áudio direcionada para um objeto On/Off. Este objeto controla o fluxo de áudio e está conectado a um *pitch shifter*, responsável por alterar a frequência do sinal de entrada a partir de valores randômicos. Em seguida, o sinal de áudio é encaminhado para um *delay*, que introduz atrasos no sinal de áudio que também são determinados por valores randômicos. No final da cadeia de processamento, o áudio passa por um controle de volume aleatório, que ajusta a intensidade de cada voz individual, visando esculpir a textura em termos dinâmicos. Por fim, o sinal processado é conectado à saída de áudio.

Os valores randômicos são determinados através de um processo de acionamento desencadeado por um descritor de detecção de *onsets*. Isso implica que a velocidade das mudanças nos parâmetros aleatórios está diretamente relacionada aos ataques executados pelo violoncelo. No entanto, é importante destacar que os valores randômicos não são aplicados a todos os gestos, como será explicado a seguir. Sendo assim, os valores randômicos não são aplicados aos *delays* no caso do gesto *cluster*. Além disso, esses valores também não são utilizados no controle dos *pitch shifters* associado ao gesto *extremo*. Portanto, nestes casos são utilizados conjuntos de valores fixos.

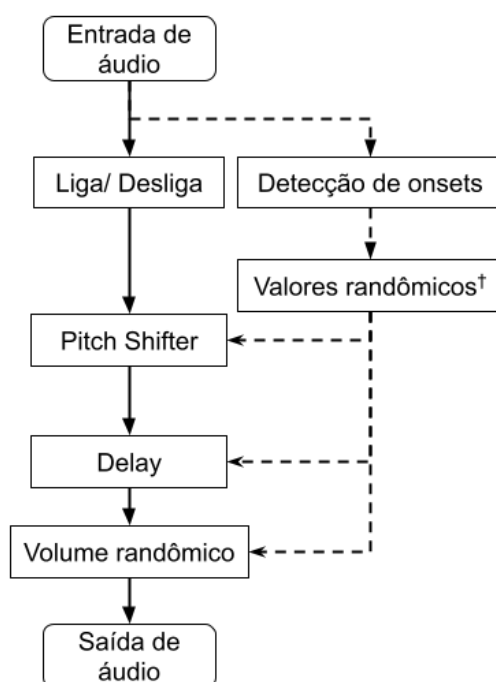


Figura 3.9: Fluxo de áudio geral aplicado nas abstrações de todos os gestos. [†] Os valores randômicos não são aplicados na implementação de todos os gestos.

O gesto *cluster* é definido por um valor de pitch shifter que abrange uma pequena faixa de variação, indo de -200 a 100 cents. Além disso, os valores de *delay* são fixos, variando entre 50 e 125 milissegundos de atraso. Uma particularidade deste gesto é a presença excepcional de 6 vozes no lugar de 3, distribuídas em três saídas de áudio distintas. Isso implica que as vozes nos *clusters* são sempre acionadas em pares, uma escolha que consideramos apropriada para evocar a sensação auditiva desejada por nós.

O gesto *glissando* é caracterizado por uma ampla variação nos valores de *pitch shifter*, abrangendo de -1300 a 400 cents. Estes valores estão sempre vinculados a uma rampa de 2 segundos que define os valores intermediários de transição das alturas, visando criar a sensação característica de glissando. Além disso, cada uma das três vozes do *glissando* é submetida a atrasos aleatórios no *delay*, em uma faixa que varia entre de 0 a 2 segundos.

O gesto *extremo* é caracterizado por valores fixos de *pitch shifter*, estabelecidos em 3500, 4000 e 5000 cents. No que diz respeito ao *delay*, seu comportamento é idêntico ao do glissando, com valores de atraso aleatórios variando entre 0 e 2 segundos. Essa configuração gera sons extremamente agudos, resultando em artefatos de áudio que podem ser percebidos como brilho ou *harshness*.

3.3.5 Composição textural em Gestos

Nesta seção, apresentamos uma visão geral da composição textural de *Gestos*, destacando os gestos presentes em cada uma das quatro seções da peça e o tipo de processamento interativo utilizado em cada uma delas. O objetivo principal da composição textural em *Gestos* é criar uma variedade de momentos sonoros distintos, com base em gestos específicos. A macroforma desta composição é construída a partir de diferentes variedades de gestos, interação com a eletrônica e complexidade rítmica. Essa abordagem também influencia a estrutura da peça, com a complexidade e a diversidade dos gestos moldando sua forma global.

Para facilitar a compreensão, dividimos a composição em quatro segmentos, referenciados como pentagramas da partitura presente no Apêndice B. São eles: segmento **A**: pentagramas 1 a 6; segmento **B**: pentagramas de 7-9; segmento **C**: pentagramas de 10-22; e segmento **D**: pentagramas de 23-32.

Tabela 3.1: Segmentação da composição por seção e pentagramas.

Segmento	A	B	C	D
Pentagramas	1-6	7-9	10-22	23-32

No segmento **A**, introduzimos quatro gestos distintos: *glissando*, *melodia* e *walking bass*. Nesta seção inicial, os gestos extremos da *TEIA* são acionados, juntamente com os glissandos do violoncelo, acompanhados por um crescendo sonoro na síntese granular. Sua característica é semelhante a uma paisagem sonora, onde os elementos se entrelaçam em uma textura fluida e horizontal e os componentes sonoros da obra são introduzidos.

No segmento **B**, concentramo-nos em um único gesto, a melodia, que marca o momento mais lírico da composição. Aqui, o violoncelo assume o centro da cena sonora apenas com um acréscimo de *reverb* para manter coesão com o timbre geral da obra. O resultado é uma textura focada na melodia única, permeada por uma certa dramaticidade na performance.

No segmento **C**, nos deparamos com três gestos: microtonais, percussivos e glissando. Aqui, atingimos o ápice da complexidade da composição, onde a *TEIA* é plenamente explorada em diferentes níveis de complexidade. Os gestos e vozes dialogam com a síntese granular, enquanto as figuras microtonais são acompanhadas por uma intrincada complexidade rítmica, derivada de sequências de quiálteras distintas. Essa interação gera uma instabilidade métrica intencional, buscando alimentar o caráter randômico do algoritmo da *TEIA* para a criação das *massas sonoras*.

Por fim, no segmento **D**, reunimos todos os gestos presentes nas seções anteriores da composição. Aqui, apesar da diversidade de gestos, uma figura rítmica quase onipresente atua como uma âncora, combinada com fragmentos da melodia, proporcionando uma sensação de continuidade na seção. Os tapes contêm fragmentos sonoros do violoncelo, integrando a textura com o som do instrumento e a interação com a *TEIA*. Ademais, a introdução de silêncios pontua o segmento **D**, conferindo uma desaceleração que prepara o fim da composição.

Observamos, portanto, uma gama de texturas com características distintas. O segmento **A** serve como uma introdução aos elementos sonoros da composição, caracterizada por uma textura de baixa atividade que lembra uma paisagem sonora. No segmento **B**, destaca-se a melodia sem processamento sonoro, enquanto no segmento **C** ocorre um aumento significativo na complexidade sonora ao construir as *massas sonoras*. Por fim, no segmento **D**, todos os elementos da peça dialogam em uma desaceleração textural que antecipa o desfecho da composição.

3.3.6 Discussões

No cerne deste relato composicional, destaco a profunda integração dos diversos processos que permeiam minha prática composicional. Como compositor, percebo essa integração ocorrendo em um nível mais elevado da composição, onde os diversos elementos convergem em âncoras conceituais, representados pelas *massas sonoras* e pela noção de *gestos sonoros*. Essa integração é evidenciada no plano composicional, onde a composição de gestos alinhada com noções composicionais como densidade, granularidade, direção e determinação permeia todas as etapas do processo criativo. Essa abordagem não é original no campo da composição e possui uma longa tradição, remontando ao serialismo, música de massas sonoras e computacional. No entanto, este relato me permite narrar uma solução particular em diálogo com esse contexto, a partir de uma interação entre minhas aspirações poéticas e o domínio tecnológico.

Ao examinar a arquitetura da eletrônica, identificam-se aspectos cruciais que impactam diretamente na performance. Um desses aspectos é o fluxo de controle de áudio. O intérprete da eletrônica possui o controle completo de cada entrada, seja do violoncelo, da interação em tempo real ou das gravações prévias. Isso implica que a mixagem em tempo real é uma parte integrante da performance. Essa característica está intimamente ligada à maleabilidade previamente mencionada da eletrônica. Essa flexibilidade proporciona uma

maior liberdade tanto para a violoncelista quanto para performer da eletrônica, permitindo uma adaptação dinâmica durante o concerto.

Este tipo de maleabilidade no design da eletrônica, além de refletir minha própria inclinação como compositor, também atende a exigências práticas inerentes à música mista. Um sistema mais aberto e adaptável se mostra coerente com um fluxo de trabalho com menos ensaios, como foi o caso deste projeto específico. Dessa forma, a estrutura modular do *patch* proporciona um ambiente de interação personalizável para diversas situações de performance. Essa abordagem, do meu ponto de vista, não apenas permite que o intérprete se sinta mais confortável ao executar a obra, mas também favorece uma interpretação mais fluída das estruturas musicais, algo essencial no contexto da performance ao vivo. Além disso, essa flexibilidade se revela particularmente vantajosa nesta criação que é inspirada na música popular, cuja performance é marcada pela maleabilidade e espontaneidade, encontrando, assim, uma sinergia com essa arquitetura flexível.

Neste contexto, gostaria de tecer alguns comentários sobre a execução da obra no festival *Gaudeamus 2022*, destacando tanto os pontos positivos do design da eletrônica quanto aspectos que demandam aprimoramento. Em relação à já comentada maleabilidade do *patch* para a performance, observa-se um aspecto favorável. A interação com a intérprete ocorreu de forma dinâmica, onde o patch foi operado por meio de um controlador MIDI e de *scripts* em *Max*, permitindo uma fluidez na performance. Portanto, considera-se essa flexibilidade como um aspecto positivo a ser mantido na elaboração de futuras partituras e no desenvolvimento de designs de interação.

Um aspecto que demanda atenção em futuras versões da performance é a captação do violoncelo. Na referida performance, utilizou-se apenas um microfone próximo às cordas do instrumento, resultando em uma falta de energia nos gestos percussivos, os quais não conseguiram alimentar a *TEIA* com a intensidade sonora necessária. Além disso, é necessário considerar que, mesmo com certo nível de maleabilidade, a composição das *massas sonoras* em interação com o sistema *TEIA* requer um tempo de ensaio mais prolongado para equilibrar os diferentes gestos. Para garantir o bom funcionamento da *TEIA*, é imprescindível uma entrada sonora de qualidade, que deve ser ajustada posteriormente para equilibrar o nível de saída dos gestos cluster, glissando e extremo, equilíbrio este que não pode ser alcançado apenas na interação em tempo real durante a performance.

No âmbito da música de *massas sonoras*, a *TEIA* introduz uma possibilidade da exploração de texturas sonoras para o design de interações na música mista, oferecendo uma flexibilidade que permite a criação de configurações sonoras variadas. Sua ampla gama de gestos possibilita a composição de texturas com distintas qualidades e combinações, enquanto sua interface permite ajustar a densidade conforme o número de vozes. Dessa maneira, ela se revela uma ferramenta particularmente importante para a elaboração de texturas complexas e densas, especialmente útil no contexto de formações instrumentais solo.

Para futuros desenvolvimentos, considero importante expandir a abordagem dos gestos na *TEIA*, incorporando novas ideias inspiradas na música de *massas sonoras* e no conceito de textura musical. Além disso, gostaria de aprimorar a responsividade do sistema em relação ao instrumento, explorando diferentes formas de mapeamentos associadas a diversos descritores de áudio. Por fim, dedico uma análise mais profunda à implementação de um algoritmo que facilite a calibração do sistema para as diferentes configurações de performance musical. Essas melhorias potenciais podem contribuir significativamente para uma versão mais genérica e maleável da *TEIA* que permitem que ela seja integrada em diferentes projetos musicais.

3.4 Conclusão

Ao considerar o contexto amplo da tese, entendo a importância das análises musicais em minha jornada como compositor. Assim, reitero que percebo como importante a construção de um arcabouço conceitual para orientar a atividade de composição. Isso não apenas me permite aprender com a partitura dos compositores, mas também com seu discurso sobre os processos criativos. Ao analisar retrospectivamente os elementos composicionais, percebo uma série de conceitos cruciais para minhas criações, permeadas por metáforas como gestos, asperezas, rarefações e densidades.

Este capítulo apresentou e discutiu 2 relatos de composição no contexto da música de *massas sonoras*. No relato composicional de *Rarefações*, nosso objetivo foi fornecer detalhes dos processos composicionais envolvidos na criação colaborativa à distância de uma obra para caixa-clara e eletrônica em tempo real. Inspirados pela perspectiva de Edgard Varèse sobre novos instrumentos e uma música de *massas sonoras*, examinamos as estratégias adotadas para enfrentar o desafio de compor e realizar uma performance de música mista em um contexto de isolamento social, resultando em uma apresentação audiovisual da obra. No relato composicional de *Gestos*, demonstro como a noção de gestos permeia todo o processo criativo desta peça, desde a concepção dos elementos sonoros, passando pela escrita da partitura até o *design* de interações da eletrônica em tempo real. Abordei questões poéticas presentes em minha música, as quais acredito serem também relevantes em outros domínios da criação sonora e musical brasileira. Também são abordados elementos do processo criativo, da composição da partitura, assim como da construção de um sistema interativo para a música de *massas sonoras* chamado *TEIA*. Podemos perceber neste contexto que *Gestos* apresenta uma ampliação dos elementos trabalhados em *Rarefações*. Para destacar isso, organizaremos nossas discussões em torno de três elementos: Concepção poética, Elementos da partitura e Design de interações.

3.4.1 Concepção poética

A metáfora das *rarefações* desempenhou um papel essencial na criação das texturas sonoras da primeira composição, estabelecendo uma conexão entre o resultado sonoro desejado, o planejamento da composição e sua implementação na eletrônica. A noção de *gestos* proporcionou uma visão unificada e articulada dos diferentes aspectos da composição

(instrumento e eletrônica) da segunda composição, além de auxiliar na organização do fluxo criativo, inspirado pelas performances de Jaques Morelenbaum. Destaca-se também a metáfora da *TEIA*, que sugere um emaranhado de linhas em várias direções, manipuladas em termos de densidade, quantidade e outros parâmetros, aspectos esses que servem de direção para a composição das massas sonoras. Essas observações convergem com o trabalho de Noble (NOBLE, 2018), que ressalta que compositores de *massas sonoras* empregam atributos semânticos em suas composições para mediar o processo criativo.

3.4.2 Elementos da partitura

A comparação entre as abordagens de gestos em *Rarefações* e *Gestos* revela uma similaridade e continuidade na concepção da composição das partituras. Em *Rarefações*, a quantidade de gestos utilizados para a concepção da partitura era limitada a apenas dois: o ritmo e a massa. A massa, formada por gestos de acelerandos e desacelerandos, era notada de forma cronometrada, enquanto os gestos rítmicos exploravam uma variedade de irregularidades métricas através do uso de quiálteras. Ambos os gestos eram formados por diferentes modos de ataque na caixa clara.

Por outro lado, em *Gestos*, a noção de gestos é amplamente explorada em cinco formas diferentes: melodia, glissando, walking bass, microtonal e percussivos. Essa ampliação na variedade de gestos permitiu a criação de uma textura musical mais complexa em comparação com *Rarefações*. A peça resultante foi organizada em diversas seções, cada uma com foco em um tipo particular de composição textural.

A análise comparativa do uso de modelos probabilísticos na criação das texturas revela abordagens distintas dos gestos ao longo das composições. Em *Rarefações*, um processo de interpolação é observado, onde a presença dos gestos de massa e rítmicos é gradualmente modulada de forma que, no início, predominem os gestos de massa, e no decorrer da composição, os gestos rítmicos ganhem destaque. Essa interpolação é agenciada por cadeias de Markov, que gerenciam a transição entre os gestos de forma probabilística, proporcionando uma transição gradual entre as diferentes texturas sonoras.

Em *Gestos*, os gestos também são organizados em cadeias de Markov para gerenciar a variedade textural presente em cada seção da composição. Mas de outro modo, essa abordagem permite uma manipulação modular dos gestos ao longo da peça, proporcionando o controle da composição textural com diferentes características. Portanto, ao analisar a abordagem de gestos

em ambas as composições, é evidente como a expansão na variedade e na utilização dos gestos em *Gestos* resultou em uma textura musical mais rica e complexa, oferecendo uma gama mais ampla de recursos para a exploração da textura sonora.

Em ambas as obras, o trabalho com os *gestos* se inicia com a seleção de recursos instrumentais, sendo posteriormente integrados na composição da partitura. Embora essa abordagem tenha me conduzido a soluções interessantes do ponto de vista criativo, me faz questionar a necessidade de desenvolver modelos composicionais que permitam uma maior variedade de transições e combinações entre os diferentes *gestos*. Atualmente, estou empenhado em investigar ativamente essa questão no contexto de minha prática composicional.

3.4.3 Design de interações

A discussão em torno do *design* de interações nas composições *Rarefações* e *Gestos* revela uma continuidade e expansão na concepção e implementação de um instrumento interativo para a criação de *massas sonoras* em tempo real. Em *Rarefações*, a abordagem envolveu a concepção de um instrumento que utilizava *pitch shifters* para gerar as *massas sonoras*, enquanto a responsividade entre o som da caixa e a eletrônica em tempo real foi estabelecida com base na utilização de um descritor de *loudness*. Além disso, as cadeias de Markov foram empregadas para criar ponderações entre o som de entrada e a eletrônica, proporcionando o manejo da variedade de texturas musicais.

Em *Gestos*, a abordagem para criação das *massas sonoras* foi expandida com a criação de um algoritmo geral implementado na *TEIA*, que permitiu a geração de uma variedade de gestos a partir da utilização de diferentes parametrizações. A organização da *TEIA* em três gestos — glissando, cluster e extremo — ampliou as possibilidades de criação textural. A responsividade entre a eletrônica em tempo real e a performance do violoncelo foi alcançada por meio de um detector de onsets, que controlava a mudança de estados nos módulos aleatórios do patch. Por fim, a *TEIA* introduziu controles manuais para a criação das *massas sonoras*, conferindo maior liberdade e controle para o *design* das interações. Isso pode ser realizado tanto por meio de *scripts* quanto em tempo real, utilizando interfaces e controladores. Essa abordagem oferece ao compositor uma gama mais ampla de possibilidades criativas e uma maior flexibilidade na manipulação das texturas sonoras.

Capítulo 4

Conclusões

A presente tese apresentou a contribuição de um compositor-pesquisador, que utilizando a análise musical e a composição como campos de estudo, procurou entender as relações estabelecidas no repertório do século XX entre processos criativos, modelos psicoacústicos e ferramentas tecnológicas para análise de áudio. O foco da pesquisa foi a textura musical, especialmente a noção de *massas sonoras*. Através da utilização de descritores de áudio como instrumentos analíticos e de modelos de percepção vindos da psicoacústica, foram apresentadas uma série de análises musicais dedicadas a esse contexto musicológico. Além disso, também foi explorado o percurso criativo do autor como compositor, ressaltando a influência das análises musicais realizadas em seu processo criativo. Essa abordagem interdisciplinar proporcionou uma compreensão mais profunda das interações entre técnicas de composição, percepção musical e análise musical assistida por computador.

Esse percurso foi realizado em diálogo com diversos compositores. Destaca-se Edgard Varèse, cuja ideia de *novos instrumentos* fomentou a reflexão sobre *massas sonoras*, além de fornecer insights sobre a luteria digital para o design de interações. Além disso, é significativa a influência da obra e do pensamento de György Ligeti neste estudo, cujos processos criativos são ligados a conceitos psicoacústicos, demonstrando sua habilidade em recriá-los e modificá-los para moldar um espaço conceitual para a composição. Similarmente, Iannis Xenakis emerge como outro compositor relevante, notadamente pelo uso de modelos estocásticos em sua composição. Isso permitiu a discussão sobre a modelagem das *massas sonoras* por meio do controle global da textura musical através de modelos estocásticos.

No Capítulo 2, concentramo-nos no desenvolvimento de ferramentas e na realização de um levantamento bibliográfico para a análise de peças eletroacústicas e instrumentais. No

contexto da música eletroacústica, na Seção 2.2, destacam-se duas contribuições essenciais para esta pesquisa: a revisão dos descritores de áudio como ferramenta analítica e uma aproximação das metodologias de análise de áudio existentes com o conceito de textura musical. Além disso, consolidamos estratégias de análise, abordando a observação de padrões texturais para compreender a forma musical, a realização da segmentação e a exploração da representação da fusão textural por meio de descritores de áudio. Na Seção 2.3, analisamos peças acusmáticas, focando nos fenômenos perceptuais da textura musical por meio de uma metodologia que associa medidas de áudio com fenômenos perceptivos emergentes. Por meio da utilização do conhecimento prévio em psicoacústica na composição musical, o estudo revelou a eficácia dos descritores de áudio na identificação das características musicais presentes nas composições dos autores. Também consolidamos práticas para a análise de áudio, as quais são integradas ao contexto da música instrumental em etapas subsequentes da pesquisa.

No contexto da análise de música instrumental, na Seção 2.4, uma análise foi conduzida sobre o *Continuum* (1968) de Gyorgy Ligeti, investigando a relação entre a execução da obra e os padrões emergentes de intensidade sonora e microtemporais. Essa análise introduziu os conceitos de *massas sonoras* e *timbre em movimento*, os quais foram articulados no *Continuum* por meio da técnica de *padrões* mecânicos, demonstrando como estes fazem emergir fenômenos psicoacústicos. Além disso, contribuiu para uma maior compreensão dos processos composicionais de Ligeti e delineou um método de análise musical no domínio do áudio, integrando informações sonoras com a análise da partitura. Na Seção 2.5, foi relatada a implementação e importância do descritor de *rugosidade*, tomando como estudo de caso uma análise da obra *Continuum* de György Ligeti (1968), demonstrando sua eficácia na captura de fenômenos microtemporais e oferecendo uma nova ferramenta para a representação das texturas musicais. Isso representou um avanço significativo na pesquisa, ampliando o conjunto de recursos disponíveis para análise musical. Na Seção 2.6, a análise da composição *Mikhael's* (1976) de Iannis Xenakis integrou a análise da *rugosidade* com informações da partitura, evidenciando como esta estratégia permite a descrição das texturas ao longo do tempo da obra. Esse avanço na integração de dados simbólicos da partitura com informações de áudio prepararam o terreno para uma reflexão sobre o fluxo de trabalho do analista musical a partir de suas diversas fontes musicológicas.

Na Seção 2.7, por fim, foi apresentada uma metodologia para a análise musical de composições que exploram o conceito de *massas sonoras*, com foco no primeiro movimento

de *Ten pieces for Wind Quintet* (1968) de György Ligeti. A análise destacou a consolidação de descritores de áudio alinhados com a música de *massas sonoras*, a discussão de um fluxo de trabalho de análise coerente com o contexto da análise de áudio e a geração de representações de áudio conectadas aos conceitos ligetianos, especialmente com os conceitos de *timbre em movimento* e *permeabilidade*. Esse trabalho estabeleceu uma base para futuras análises musicais com descritores de áudio, consolidando propostas anteriores e estabelecendo uma triangulação entre os conceitos de *massas sonoras*, os princípios composicionais de Ligeti e os descritores de áudio.

O Capítulo 3 apresentou e discutiu dois relatos de composição no contexto da música de *massas sonoras*. No relato composicional de *Rarefações* (2020) (Seção 3.2), detalharam-se os processos envolvidos na criação colaborativa à distância de uma obra para caixa-clara e eletrônica em tempo real, inspirados pela perspectiva de Edgard Varèse sobre *novos instrumentos*. No relato de *Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum* (2022) (Seção 3.3), explorou-se como a noção de *gestos* permeou todo o processo criativo, desde a concepção dos elementos sonoros até o *design* de interações da eletrônica em tempo real. Além disso, abordaram-se questões poéticas presentes na composição contextualizadas no ambiente da criação sonora brasileira. Também discutiu-se a construção do sistema interativo *TEIA*, originado do uso de *pitch shifters* para a criação de *massas sonoras* em *Rarefações* e expandido com a incorporação de diferentes gestos e possibilidades de controle interativo. Essas reflexões apontam para questões em aberto na prática composicional, fomentando discussões e aplicações no contexto de processos criativos.

Gostaríamos de ressaltar a contribuição desta tese para os domínios da composição, análise musical e psicoacústica musical. No âmbito da composição musical, este estudo oferece uma série de discussões que contextualizam práticas composicionais relacionadas à música serial, de *massas sonoras* e computacional. Além disso, explora a importância da criação de um campo semântico e conceitual para orientar a criação musical. Essa abordagem foi conduzida por meio de análises musicais, sobretudo com exemplos do pensamento e repertório de György Ligeti, e posteriormente por meio de relatos composicionais. Assim, esta tese abre espaço para que compositores possam refletir sobre seus processos criativos. Também merece destaque o papel da colaboração artística no campo da composição musical, um aspecto nem sempre evidenciado em textos de composição, mas que são onipresente na criação musical, especialmente no contexto da música mista e da criação com diferentes suportes tecnológicos.

Outra contribuição relevante para a composição emerge do desenvolvimento tecnológico proposto. Este se beneficia de um lado do conhecimento adquirido sobre música de massas sonoras e, de outro, do uso de descritores de áudio. No caso de *Rarefações* (2020), foram utilizados descritores de áudio para o *design* de interações em tempo real. Esta abordagem pode ser observada na utilização de um descritor de *loudness* bem como de um descritor de detecção de *onsets*. Ambos visam criar responsividade entre o sistema de interação em tempo real e a ação do intérprete. *Gestos* (2022) amplifica o trabalho composicional desenvolvido em *Rarefações*, a partir de uma interação criativa com o conceito de *massas sonoras* e o *design* de instrumentos para controle da textura em tempo real. Esta interação culminou na implementação da *TEIA*, que combina o uso de *pitch shifters* com a noção de *gestos* para a criação das *massas sonoras*. Assim, a contribuição para os compositores se manifesta em dois aspectos distintos. Em primeiro lugar, oferece uma ferramenta que pode ser reutilizada, replicada e expandida em diversos contextos musicais. Em segundo lugar, o relato composicional pode servir como inspiração e guia para auxiliar os compositores a conceber seus próprios *designs* de interação, conectados a diferentes possibilidades poéticas e estéticas.

Para o campo da análise musical, esta tese apresenta uma série de análises que contêm discussões e reflexões pertinentes ao campo da análise musical assistida por computador. Embora o ponto de vista analítico esteja majoritariamente vinculado ao campo da composição musical, o estudo suscita uma reflexão sobre o trabalho do analista em relação às diversas fontes musicológicas, como partituras, rascunhos, bibliografias e entrevistas, todas essas conectadas à análise de áudio. Essa reflexão sobre a prática analítica pode, portanto, abrir caminho para a incorporação desse tipo de abordagem em outros contextos musicológicos.

Acreditamos que a metodologia de análise apresentada neste estudo pode ser um recurso eficiente para investigar elementos das músicas de *massas sonoras* que não são passíveis de estudo apenas pela análise da partitura. Essas estratégias, apesar de não serem únicas ou definitivas, contêm aspectos essenciais que garantem um potencial de replicabilidade em trabalhos futuros. Primeiramente, o já citado alinhamento entre os conceitos musicológicos que cercam as *massas sonoras* e as definições dos descritores de áudio. Segundo, os descritores de áudio possibilitam a obtenção de medidas objetivas que facilitam comparações entre diferentes seções das obras, seja pela análise dos perfis temporais, seja pela observação de representações em gráficos de dispersão. Terceiro, essas medidas podem fornecer suporte ao analista na compreensão formal da obra a partir de sua gravação, principalmente auxiliando em tarefas

de segmentação com um enfoque perceptivo. Por fim, o uso de medidas objetivas na análise musical pode ser desejável, principalmente no contexto de modelagens computacionais com fins musicológicos e composicionais.

É pertinente notar que muitas das características investigadas nesse contexto, como intensidade, densidade, fusão, *rugosidade* e batimentos, não se limitam apenas às músicas de *massas sonoras*, mas são características gerais da textura musical. Assim, esta pesquisa abre possibilidades para futuras expansões e recontextualizações dessa abordagem em outros repertórios e contextos analíticos.

Finalmente, a união entre modelos psicoacústicos, análise de áudio e discussões sobre questões estéticas fornece subsídios para promover discussões e questões no contexto da psicoacústica musical e da musicologia empírica. O conjunto de descritores de áudio aqui apresentados foi selecionado visando representar aspectos perceptuais da textura musical a partir de uma abordagem musicológica. Portanto, a proposição de submeter esses descritores a testes empíricos representa um passo significativo na compreensão do papel da textura na percepção musical. Ao investigar a importância desses descritores em uma amostra mais ampla de ouvintes, podemos não apenas validar sua eficácia, mas também descobrir *insights* valiosos sobre como diferentes características das *massas sonoras* afetam a percepção e significação da forma musical. Da mesma forma, a implementação das propostas de segmentação discutidas proporciona uma oportunidade para realizar testes que investigam o papel dos descritores de áudio na segmentação formal de uma obra musical. Ao conduzir esses testes, é possível avaliar e calibrar esses descritores para a identificação de diferentes seções e estruturas presentes em uma composição. Mesmo que não seja um objetivo fundamental para o campo da análise musical e composição, vale salientar que a musicologia empírica experimenta um crescimento notável no contexto da investigação sobre orquestração, representações perceptuais do timbre e no contexto da percepção ecológica.

Em conclusão, este estudo oferece uma contribuição para a compreensão das interações entre composição, análise musical e psicoacústica no contexto de práticas século XX. Exploramos diversos repertórios, destacando a música de massas sonoras, e apresentamos estratégias analíticas e composicionais. Além disso, desenvolvemos ferramentas tecnológicas para facilitar tanto a análise quanto a criação musicais, ressaltando a importância da colaboração no contexto da pesquisa interdisciplinar em música. No campo da análise musical, contextualizamos medidas de áudio e propusemos uma metodologia para investigação da

música de massas sonoras. Sendo assim, acreditamos que a integração de modelos psicoacústicos, análise de áudio e discussões estéticas apresentadas nesta tese abrem novas perspectivas para futuras pesquisas e práticas musicais.

Referências bibliográficas

ANDERSON, C. Dynamic networks of sonic interactions: An interview with Agostino Di Scipio. **Computer Music Journal**, v. 29, n. 3, p. 11–28, 2005. Publisher: MIT Press.

ANTHONY POPLE. Modeling Musical Structure. In: CLARKE, E. F.; COOK, N. (Ed.). **Empirical musicology: aims, methods, prospects**. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2004. P. 127–156. ISBN 978-0-19-516749-8.

ANTUNES, M.; BOTECHIA, T.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. Análise musical de peças acusmáticas com suporte de descritores psicoacústicos. **Revista Música Hodie**, v. 21, 2021. ISSN 2317-6776. DOI: 10.5216/mh.v21.63565.

ANTUNES, M.; ESPIRITO SANTO, G. F. do; MANZOLLI, J.; QUEIROZ, M. A Psychoacoustic-Based Methodology for Sound Mass Music Analysis. In: ARAMAKI, M. et al. (Ed.). **Music in the AI Era**. Cham: Springer International Publishing, 2023. (Lecture Notes in Computer Science). P. 267–281. ISBN 978-3-031-35382-6.

ANTUNES, M.; FEULO, G.; MANZOLLI, J. A perceptual approach to Ligeti's Continuum with a Roughness descriptor. In: LIVRO de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia. Évora: [s.n.], 2020. P. 18–19.

ANTUNES, M.; FEULO, G.; MANZOLLI, J. A Roughness Model Implementation to Analyze Sound Mass Composition: A Study Case in Ligeti's Continuum for harpsichord (1968). In: PROCEEDINGS of the 18th brazilian symposium on computer music. Pernambuco: [s.n.], 2021. P. 77–84.

ANTUNES, M.; MANZOLLI, J. A psychoacoustical approach to Ligeti's concept of permeability. In: LIVRO de Resumos do II EINEM Encontro Internacional de Investigação de Estudantes em Música e Musicologia. Évora: [s.n.], 2020. P. 20–21.

ANTUNES, M.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. A computer-aided analysis of the Orchestration in Iannis Xenakis' Arousa. In: PROCEEDINGS of the 10th European Music Analysis Conference. Moscow: [s.n.], 2021. P. 555–556.

ANTUNES, M.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. A computer-based framework to analyze continuous and discontinuous textural works using psychoacoustic audio descriptors. Português. In: PROCEEDINGS of the 17º Brazilian Symposium on Computer Music Federal. São João del Rey: [s.n.], 2019. P. 4–11. ISBN 978-85-7669-490-8.

ANTUNES, M.; ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. Emerging structures within micro-time of Ligeti's Continuum. In: PROCEEDINGS of the 2021 International Computer Music Conference. Santiago, Chile: [s.n.], 2021. P. 271–274.

ASSAYAG, G. et al. Computer-assisted composition at IRCAM: From PatchWork to OpenMusic. **Computer music journal**, v. 23, n. 3, p. 59–72, 1999. Publisher: JSTOR. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3681240?casa_token=Rt2nUgn84MgAAAAA:RkZ6Uog2u9BfocPCtZV3YjiDuUnxVLH0m4GP4YtB4NYQT0IsCPS4ScItk83MNeW66rSW3faPyoaATbmtPX4KNkI7_RpHTG-9tSJUoU9RGtbM4XvLC0s>. Acesso em: 9 mar. 2024.

BELL, C. Algorithmic music composition using dynamic Markov chains and genetic algorithms. **Journal of Computing Sciences in Colleges**, v. 27, n. 2, p. 99–107, 2011. Publisher: Consortium for Computing Sciences in Colleges. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Chuck-Allison/publication/260146742_00P_the_rest_of_the_story/links/55de384908aeaa26af0f2446/00P-the-rest-of-the-story.pdf#page=108>. Acesso em: 9 mar. 2024.

BERNARD, C.; KRONLAND-MARTINET, R. et al. Tactile perception of auditory roughness. **JASA Express Letters**, v. 2, n. 12, 2022. Publisher: AIP Publishing. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/asa/jel/article/2/12/123201/2845752>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BERNARD, C.; MONNOYER, J.; WIERTLEWSKI, M.; YSTAD, S. Rhythm perception is shared between audio and haptics. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 4188, 2022. Publisher: Nature Publishing Group UK London. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-022-08152-w>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BERRY, W. **Structural functions in music**. New York: Dover, 1987. (Dover books on music, music history). ISBN 978-0-486-25384-8.

BOGDANOV, D. et al. Essentia: An audio analysis library for music information retrieval. In: **PROCEEDINGS of 14th Conference of the International Society for Music Information Retrieval (ISMIR)**. Curitiba: International Society for Music Information Retrieval (ISMIR), 2013. P. 493–498.

BORIO, G.; DANUSER, H. **Die Internationalen Ferienkurse für Neue Musik Darmstadt 1946-1966. Concert program, lectures, masterclasses, tutors. In: Geschichte und Dokumentation in vier Bänden**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 3. Disponível em: <https://www.issuu.com/internationales-musikinstitut/docs/darmstaedter_ferienkurse_1946-1966/75>. Acesso em: 25 nov. 2020.

BREGMAN, A. S. **Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound**. Cambridge: MIT press, 1994.

BULLOCK, J. **Implementing audio feature extraction in live electronic music**. 2008. Doctoral thesis – Birmingham City University, Birmingham.

BULLOCK, J. Libxtract: A lightweight library for audio feature extraction. en. In: **PROCEEDINGS of the 2007 International Computer Music Conference**. [S.l.: s.n.], 2007. P. 4.

CAMBOUROPOULOS, E.; TSOUGRAS, C. Auditory Streams in Ligeti's Continuum: A Theoretical and Perceptual Approach. **Journal of interdisciplinary music studies**, v. 3, n. 1-2, p. 119–137, 2009.

CELMA, O.; HERRERA, P.; SERRA, X. Bridging the Music Semantic Gap. In: PROCEEDINGS of the Workshop on Mastering the Gap, From Information Extraction to Semantic Representation, held in conjunction with the European Semantic Web Conference. Budva, [s.n.], 2006.

CLENDINNING, J. P. The Pattern-Meccanico Compositions of György Ligeti. en. **Perspectives of New Music**, v. 31, n. 1, p. 192, 1993. ISSN 00316016. DOI: 10.2307/833050. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/833050?origin=crossref>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

COOK, N. **Beyond the score: Music as performance**. [S.l.]: Oxford University Press, 2013.

COUPRIE, P. Quelques propos sur les outils et les méthodes audionumériques en musicologie. L'interdisciplinarité comme rupture épistémologique. fr. **Revue musicale OICRM**, v. 6, n. 2, p. 25–44, 2020. Publisher: Observatoire interdisciplinaire de création et recherche en musique (OICRM). ISSN 2368-7061. DOI: 10.7202/1068384ar. Disponível em: <<https://www.erudit.org/en/journals/rmo/1900-v1-n1-rmo05202/1068384ar/abstract/>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

DOUGLAS, C.; NOBLE, J.; MCADAMS, S. Auditory Scene Analysis and the Perception of Sound Mass in Ligeti's Continuum. en. **Music Perception: An Interdisciplinary Journal**, v. 33, n. 3, p. 287–305, 2016. ISSN 0730-7829, 1533-8312. DOI: 10.1525/mp.2016.33.3.287. Disponível em: <<http://mp.ucpress.edu/cgi/doi/10.1525/mp.2016.33.3.287>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

DROTT, E. Ligeti in Fluxus. en. **Journal of Musicology**, v. 21, n. 2, p. 201–240, abr. 2004. ISSN 0277-9269, 1533-8347. DOI: 10.1525/jm.2004.21.2.201. Disponível em: <<https://online.ucpress.edu/jm/article/21/2/201/63378/Ligeti-in-Fluxus>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

EIMERT, H. What is electronic music? **Die Reihe 1: Electronic Music**, Londres, Viena, Zürich, p. 38–44, 1955.

FERRAZ, S. Análise e Percepção Textural: Peça VII, de 10 peças para Gyorgy Ligeti. **Cadernos de Estudos: Análise Musical**, v. 3, p. 68–79, 1990.

FIGUEIREDO, N. S. **Efficient adaptive multiresolution representation of music signals**. 2020. Master dissertation – University of São Paulo.

FLOROS, C. **György Ligeti: beyond avant-garde and postmodernism**. Tradução: Ernest Bernhardt-Kabisch. Frankfurt am Main: PL Academic Research, 2014. ISBN 978-3-631-65499-6.

FULOP, S. A.; FITZ, K. Algorithms for computing the time-corrected instantaneous frequency (reassigned) spectrogram, with applications. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 119, n. 1, p. 360–371, 2006.

GREDDINGER, P. Serial Technique. **Die Reihe 1: Electronic Music**, Londres, Viena, Zürich, p. 38–44, 1955.

HAGAN, D. K. Textural Composition and its Space. en, p. 7, 2008.

HUMIEŹKA-JAKUBOWSKA, J. Music perception of avant garde: Musical structure and time, 2010.

KNOP, F. Making it home?: The natural sciences as a site of belonging in György Ligeti's music. In: GYÖRGY Ligeti's Cultural Identities. Abingdon: Routledge, 2017. P. 92–100.

KRIMPHOFF, J.; MCADAMS, S.; WINSBERG, S. Caractérisation du timbre des sons complexes.II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique. fr. **Le Journal de Physique IV**, v. 04, n. C5, p. c5-625–c5-628, mai. 1994. ISSN 1155-4339. DOI: 10.1051/jp4:19945134. Disponível em: <<http://www.edpsciences.org/10.1051/jp4:19945134>>. Acesso em: 1 abr. 2020.

LIGETI, G. **Neuf essais sur la musique**. Genebra: Éditions Contrechamps, 2017.

LIGETI, G.; BERNARD, J. W. States, Events, Transformations. en. **Perspectives of New Music**, v. 31, n. 1, p. 164, 1993. ISSN 00316016. DOI: 10.2307/833047. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/833047?origin=crossref>>. Acesso em: 13 out. 2020.

LYON, R. F.; KATSIAMIS, A. G.; DRAKAKIS, E. M. History and future of auditory filter models. In: PROCEEDINGS of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S.l.: s.n.], mai. 2010. P. 3809–3812. ISSN: 2158-1525. DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5537724.

MACKAY, J. On the perception of density and stratification in granular sonic textures: An exploratory study. en. **Interface**, v. 13, n. 4, p. 171–186, jan. 1984. ISSN 0303-3902. DOI: 10.1080/09298218408570451. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09298218408570451>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

MAIA, I. L.; SCHAUB, S. Analyzing Textural Progressions in Iannis Xenakis's Aroua (1971) for twelve strings – Some Preliminary Results. en. In: ANAIS do XXII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música. João Pessoa, PB: [s.n.], 2012. P. 8.

MALT, M.; JOURDAN, E. Le “BSTD” – Une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore. In: L'ANALYSE musicale aujourd'hui. Strasbourg: Delatour, 2009. P. 1–14.

MARX, W. Ligeti's musical style as expression of cultural trauma. In: GYÖRGY Ligeti's Cultural Identities. Abingdon: Routledge, 2017. P. 74–91.

MCADAMS, S. Timbre as a structuring force in music. In: TIMBRE: Acoustics, perception, and cognition. Berlin: Springer, 2019. P. 211–243.

MCADAMS, S.; DEPALLE, P.; CLARKE, E. Analyzing musical sound. In: EMPIRICAL musicology: Aims, methods, prospects. New York: Oxford University Press, 2004. Publisher: Oxford University Press Oxford. P. 157–196.

MCFEE, B. et al. librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python. en. In: 14TH Python in Science Conference. Austin, Texas: [s.n.], 2015. P. 18–24. DOI: 10.25080/Majora-7b98e3ed-003. Acesso em: 9 jun. 2020.

MERIC, R.; SOLOMOS, M. Audible Ecosystems and emergent sound structures in Di Scipio's music. Music philosophy helps musical analysis. In: MUSICAL STRUCTURE. [S.l.: s.n.], 2008. P. 122–123.

MEYER-EPPLER, W. Statistic and psychologic problems of sound. **Die Reihe**, v. 1, p. 55–61, 1955.

MICHEL, P. **György Ligeti**. Paris: Minerve, 1995.

MONTEIRO, A. C. **Criação e Performance Musical no Contexto dos Instrumentos Musicais Digitais**. 2012. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Música. – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MONTEIRO, A. C. Medidas de áudio com fundamentação neurofisiológica aplicadas para a segmentação automática de músicas feitas de sons não redutíveis ao conceito de nota musical, 2016. Publisher: [sn].

NOBLE, J. **PERCEPTUAL AND SEMANTIC DIMENSIONS OF SOUND MASS**. 2018. Doctroal thesis – Schulich School of Music McGill University, Montreal.

NOBLE, J.; MCADAMS, S. Sound mass, auditory perception, and ‘post-tone’ music. en. **Journal of New Music Research**, v. 49, n. 3, p. 231–251, mai. 2020. ISSN 0929-8215, 1744-5027. DOI: 10 . 1080 / 09298215 . 2020 . 1749673. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09298215.2020.1749673>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

PARNCUTT, R. **Harmony: A psychoacoustical approach**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. v. 19.

PEETERS, G. et al. The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. en. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 5, p. 2902–2916, 2011. ISSN 0001-4966. DOI: 10 . 1121/1 . 3642604. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3642604>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

PLOMP, R.; LEVELT, W. J. M. Tonal consonance and critical bandwidth. **The journal of the Acoustical Society of America**, v. 38, n. 4, p. 548–560, 1965. Publisher: Acoustical Society of America.

POUSSEUR, H.; BEHRMAN, D. The question of order in new music. **Perspectives of New Music**, p. 93–111, 1966. Publisher: JSTOR. DOI: 10 . 2307/832389.

ROADS, C. **Microsound**. Cambridge, Mass: MIT Press, 2001. ISBN 978-0-262-18215-7.

ROMÃO, T. L. C. SINCRETISMO RELIGIOSO COMO ESTRATÉGIA DE SOBREVIVÊNCIA TRANSNACIONAL E TRANSLACIONAL: DIVINDADES AFRICANAS E SANTOS CATÓLICOS EM TRADUÇÃO. pt. **Trabalhos em Linguística Aplicada**, v. 57, p. 353–381, abr. 2018. Publisher: UNICAMP. Programa de Pós-Graduação em Linguística Aplicada do Instituto de Estudos da Linguagem (IEL). ISSN 2175-764X. DOI: 10 . 1590 / 010318138651758358681. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/tla/a/BYNWpsPRxzMYh4gGCwH5Vk/>>. Acesso em: 5 mar. 2024.

ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. Analysis of Granular Acousmatic Music: Representation of sound flux and emergence. **Organised Sound**, v. 24, n. 2, p. 205–216, 2019. Publisher: Cambridge University Press.

ROSSETTI, D.; MANZOLLI, J. Studying the Perception of Sound in Space: Granular Sounds Spatialized in a High-Order Ambisonics System. **Opus**, v. 26, n. 2, p. 1–26, 2020.

ROSSETTI, D.; TEIXEIRA, W.; MANZOLLI, J. Emergent Timbre and Extended Techniques in Live-Electronic Music: An Analysis of Desdobramentos do Contínuo Performed by Audio Descriptors. **Revista Música Hodie**, v. 18, n. 1, 2018.

SCHRÖDER, J. H. Emergence and Emergency: Theoretical and Practical Considerations in Agostino Di Scipio's Works. **Contemporary Music Review**, v. 33, n. 1, p. 31–45, 2014. Publisher: Taylor & Francis.

SCIPIO, A. D. The Synthesis of Environmental Sound Textures by Iterated Nonlinear Functions, and its Ecological Relevance to Perceptual Modeling. **Journal of New Music Research**, v. 31, n. 2, p. 109–117, 2002. Publisher: Routledge _eprint: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1076/jnmr.31.2.109.8090>. ISSN 0929-8215. DOI: 10.1076/jnmr.31.2.109.8090. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/jnmr.31.2.109.8090>>. Acesso em: 3 set. 2020.

SETHARES, W. A. **Tuning, timbre, spectrum, scale**. 2nd ed. London: Springer, 2005. ISBN 978-1-85233-797-1.

SILVA, M. A. d. **Redução da dissonância sensorial em uma escala temperada utilizando timbres inarmônicos: uma abordagem experimental e aplicações artísticas**. Dez. 2018. text – Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.27.2019.tde-11032019-114249. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27158/tde-11032019-114249/>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

SIMURRA, I. **Contribuição ao problema da orquestração assistida por computador com suporte de descritores de áudio**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/296884888.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SMITH, J.; ABEL, J. Bark and ERB bilinear transforms. en. **IEEE Transactions on Speech and Audio Processing**, v. 7, n. 6, p. 697–708, 1999. ISSN 10636676. DOI: 10.1109/89.799695. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/799695/>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

SOLOMOS, M. **Iannis Xenakis**. [S.l.]: P.O. Editions, 1996. Disponível em: <<https://hal.science/hal-01202402>>.

STEINITZ, R. Music, Maths & Chaos. **The Musical Times**, v. 137, n. 1837, p. 14–20, 1996. Publisher: Musical Times Publications Ltd. ISSN 0027-4666. DOI: 10.2307/1003886. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/1003886>>. Acesso em: 8 jun. 2021.

STOCKHAUSEN, K. Musique dans l'espace. **Revue belge de Musicologie/Belgisch Tijdschrift voor Muziekwetenschap**, p. 76–82, 1959. Publisher: JSTOR.

STOCKHAUSEN, K. **Stockhausen sobre a música: palestras e entrevistas compiladas por Robin Maconie**. Edição: Robin Maconie. [S.l.]: Madras, 2009.

STOCKHAUSEN, K. Zur Situation des Metiers (Klangkpmposition). **Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik**, p. 45–61, 1963.

THIEDE, T. V.; KRAUSE, M. Perceptual Audio Quality Assessment using a Non-Linear Filter Bank. In. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59635239>>.

VARÈSE, E.; WEN-CHUNG, C. The liberation of sound. **Perspectives of new music**, v. 5, n. 1, p. 11–19, 1966. Publisher: JSTOR. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/832385?casa_token=PISzRSHUgc4AAAAA:JozyYJElFeBeuHQ20_MLCaOI05N9z97RONk4C9dkiYII_UeWewPZBRDtZDSUHAF01YiVMId12rf4W_P8zRlxke60w0txr20M2TFFwU1s4ANnZSitcEE>. Acesso em: 9 mar. 2024.

VASSILAKIS, P. N. **Perceptual and physical properties of amplitude fluctuation and their musical significance**. 2001. PhD Thesis – University of California, Los Angeles.

VITALE, C. H. **Dez peças para quinteto de sopros de György Ligeti: a gradação como uma ferramenta para a construção do discurso musical**. 2008. PhD Thesis – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

VON BÉKÉSY, G.; WEVER, E. G. **Experiments in hearing**. New York: McGraw-Hill, 1960. v. 8.

WILLIAMS, W. J.; BROWN, M. L.; HERO III, A. O. Uncertainty, information, and time-frequency distributions. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. **ADVANCED Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations II**. [S.l.: s.n.], 1991. v. 1566, p. 144–156.

XENAKIS, I. **Formalized music: thought and mathematics in composition**. [S.l.]: Pendragon Press, 1992.

XENAKIS, I. **Kéleütha Écrits**. Paris: L'Arche Éditeur, 1994.

XENAKIS, I.; BROWN, R. Concerning Time. **Perspectives of New Music**, p. 84–92, 1989.

ZWICKER, E.; FLOTTORP, G.; STEVENS, S. S. Critical Band Width in Loudness Summation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 29, n. 5, p. 548–557, mai. 1957. ISSN 0001-4966. DOI: 10.1121/1.1908963. Disponível em: <<https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.1908963>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

ZWICKER, E.; FASTL, H. **Psychoacoustics: facts and models**. 3rd. ed. Berlin ; New York: Springer, 2007. (Springer series in information sciences, 22). ISBN 978-3-540-23159-2.

Apêndice A

Partitura de *Rarefações* (2020)

RAREFAÇÕES

Micael Antunes
2020

<https://soundcloud.com/user-992571428/rarefacoes>

RAREFAÇÕES

For snare drum and live electronics

Rarefações (2020) for snare drum and live electronics is a textural composition that explores limits between the perception of individual sounds and sound masses starting with the rhythmic diversity and attack modes of the percussion in real-time interaction with the digital sound processing. Its name translates its behavior over time, which starts with dense and intense sound masses in direction to rarefied and discontinuous musical patterns.

The composition interacts with academic research in the field of psychoacoustics and audio descriptors, as well as studies in the area of performance. We introduce here the notion of machine listening design anchored in psychoacoustic models as a support for building interactivity in real-time audio processing. To that, we used the *PDescriptors* library implemented in the *PureData* software, developed in the Interdisciplinary Nucleus for Sound Studies of Campinas University (NICS-Unicamp).

The psychoacoustic model of critical bands is central to the sound result achieved (ZWICKER; FLOTTORP; STEVENS, 1957), which provides a model of the inner ear from auditory filters. This model states that the greater the stimulus in a given critical band, the lower our capacity for frequency resolution and the greater the presence of psychoacoustic phenomena such as beats, roughness, masking, and differential sounds (FASTL; ZWICKER, 2007). The live electronics performs the manipulation of several pitch shifters with parameters very close to each other, aiming to saturate regions of critical bands. The sound result is observed from the textures and diversity of sound masses.

The real-time sound processing implemented uses 2 types of control:

- 1 - Dynamic: linked to the input of the snare drum signal measured with a loudness descriptor, which is a model of subjective perception of intensity

(FLETCHER; MUNSON, 1933) and mapped in parameters of sound processing, mixing, and spatialization.

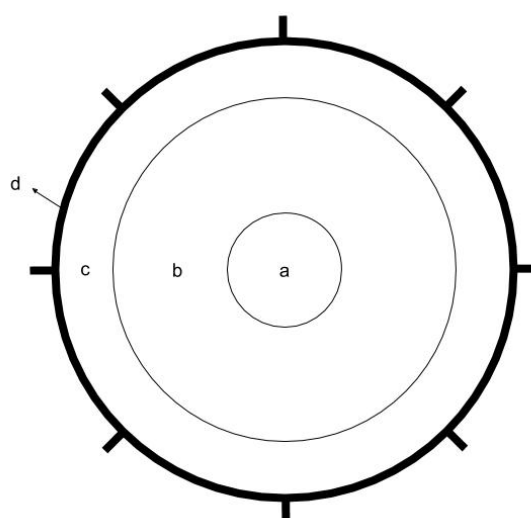
This mechanism aims to create a correlation between the signal input from the percussion and the sound processing, building the dynamic of the sound and performing the balance between the sound of the snare drum and the sound of electronics. At certain times, it fosters an ambiguity between the perception of the acoustical and electroacoustic sound sources.

2 - Stochastic: generated in real-time with Markov chains, changing the limits of the parameters mapped in the loudness descriptor.

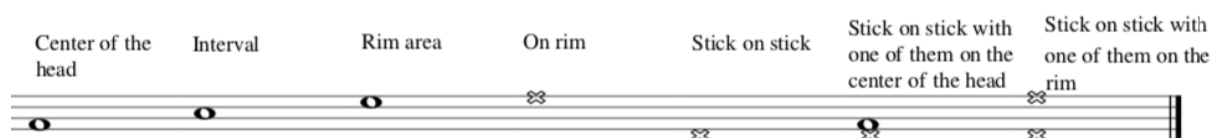
This control intended to perform an attenuation of the processing parameters in real-time during the piece, aiming the dilution of the sound masses, while maintaining a certain level of uncertainty provided by the probabilities of Markov chains.

Performance instructions

The notation of the piece represents different parts of the snare drum, as we can see in the figure below, inspired in the notation of the piece *Trommel Suite* (1978) of Siegfried Fink (1928- 2006). The positions in the snare drum are: a – center of the head; b- interval; c – rim area; and d- on the rim



The notation in the score will follow the schema of the figure below:



The patch of the piece needs to turn on at the beginning of the piece and will interact with the sound of the snare drum dynamically during the piece.

Duration

ca. 6'20''

Rarefações

for snare drum

212

Micael Antunes

where don't have time indication in seconds, ♩ = 75

snare on

5" 20"

mf ————— *f* *p* ————— *mf* ————— *p*

20"

p ————— *mf* ————— *p*

7" 5"

mf ————— *p* ————— *mf*

7"

mf ————— *p*

snare off 7" 5"

mf ————— *p* ————— *f*

7"

f ————— *mf*

5" 7"

f ————— *mf ff* ————— *mf*

snare on

7'' 7'' 213

pp *p* *pp*

20''

p *mf* *p*

20''

p *ff* *p*

5''

pp *ff*

mf 3:2 7:4 3:2 7:4

7''

pp *ff*

5''

ff *mf*

5''

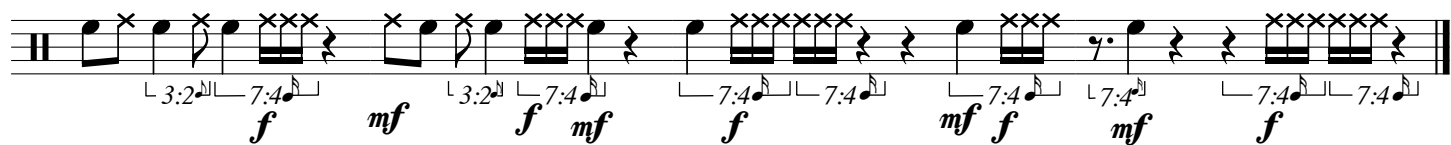
mf 3:2 7:4 *f* 7:4 3:2 7:4 3:2 *ff* *mf*

mf 3:2 5:4 *f* 7:4 *mf* 3:2 7:4 3:2 7:4

f 5:4 *mf* 3:2 5:4 3:2 7:4 *f*

This page contains eight staves of musical notation for a percussion instrument, likely a snare drum. The notation includes various rhythmic patterns, dynamics, and articulations.

- Staff 1:** Features two 5-measure patterns of repeated notes, followed by a 3:2 ratio pattern, a 5:4 ratio pattern, and a 7:4 ratio pattern. Dynamics include *p*, *ff*, *p*, *ff*, *f*, *mf*, and *f*. A measure number of 214 is indicated.
- Staff 2:** Features a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, and a 7:4 ratio pattern. Dynamics include *p*, *mf*, and *p*.
- Staff 3:** Features a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, and a 7-measure pattern. Dynamics include *p*, *mf*, *p*, *pp*, and *mf*.
- Staff 4:** Features a 7-measure pattern and a 7-measure pattern. Dynamics include *mf*, *p*, and *ff*.
- Staff 5:** Features a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, and a 7:4 ratio pattern. Dynamics include *mf*, *f*, *mf*, *f*, *mf*, and *f*.
- Staff 6:** Features a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, and a 7:4 ratio pattern. Dynamics include *f*, *mf*, and *p*.
- Staff 7:** Features a 7-measure pattern and a 3:2 ratio pattern. Dynamics include *p*, *f*, *mf*, *f*, and *mf*.
- Staff 8:** Features a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, a 3:2 ratio pattern, a 7:4 ratio pattern, and a 7:4 ratio pattern. Dynamics include *mf*, *f*, *mf*, *f*, *mf*, and *f*.



Apêndice B

Partitura de *Gestos: uma homenagem a Jaques Morelenbaum*

Gestos
a tribute to Jaques Morelenbaum

Micael Antunes
2022

Gestos

a tribute to Jaques Morelenbaum

Micael Antunes (2022)
For Katharina Gross and Aurélio Edler-Copes
for Cellomondo 3

A question motivates this composition: *who are we and how the music we produce represents ourselves?* It is a question I cannot answer, but that always brings to me two important aspects: *ambiguity and movement*.

The *ambiguity* because our lives in Brazil as our music leads to questions about colonization and syncretism. Hermeto Pascoal's Slave Mass album (1977), which embodies this idea of syncretism, is a representative example of these questions in our music. I think that this syncretism is not pacific but reflects several conflicts in social life and politics until today.

The *movement* because, in my view, the plurality in Brazilian culture and specific in Brazilian music is a symptom of these complex conflicts, which leads to the emergence of a diversity of artistic solutions in popular music, experimental music and sound art.

In this context, my composition is a tribute to the cellist Jacques Morelenbaum. I understand that the performance of the violoncello in our music with Morelenbaum's musicality is representative of this syncretism that crosses our culture.

Jaques Morelenbaum (1958 -) is a Brazilian cellist, composer, arranger, and producer, born in Rio de Janeiro. In my point of view, the versatility of Morelenbaum's performances can be understood under the idea of syncretism as a metaphor. The violoncello plays different roles in his performance. Sometimes, it is a discrete part of the musical texture; other times it is a soloist. It is possible to see the cello play the role of bass. Also, effects like harmonics with glissandos and textural sonorities appear during the performance.

Gestos also dialogues with my musicological interest in the concept of music as performance. In this sense, we see the music in its dynamic features in the performance, with the movement of the body, its contingencies, and real-time adaptations. This composition aims to articulate in time musical gestures of Morelenbaum's performance like the lyrical melodies, the glissando with its characteristic intervals of the blue note scale, the waking bass with chromatic melodies, and textures with natural harmonics between a variety of gestures. The composition also explores real-time interaction with live electronics, creating sound mass textures, which are mixed the sound samples from the violoncello with the sound of *jatobá* and *urucum*.

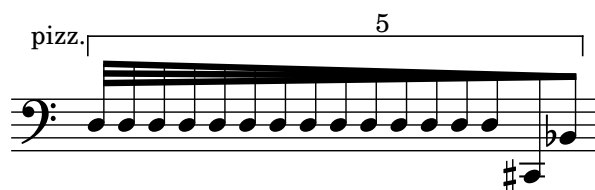
Performance Intructions



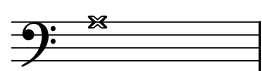
Glissandi with natural harmonics, with diamond notes indicating the position



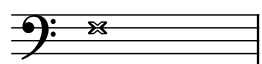
Arbitrary time duration in seconds



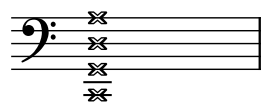
Rhythmic figure from A - "as fast as possible to" B - "as slow as is reasonable in the time indicated above the figure" in seconds. No rhythmic precision is required.



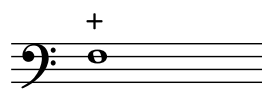
Hit the shoulder of the cello body with the nail of the left hand finger



Hit the chest of the cello body with the palm of the hand

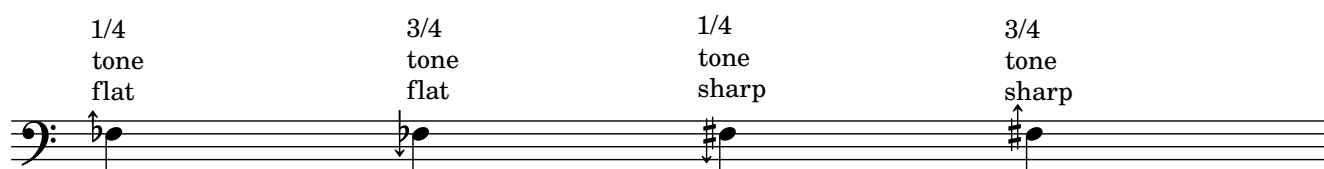


Hit the open strings with the palm of the hand



Left hand pizzicato

Quarter-tone notation

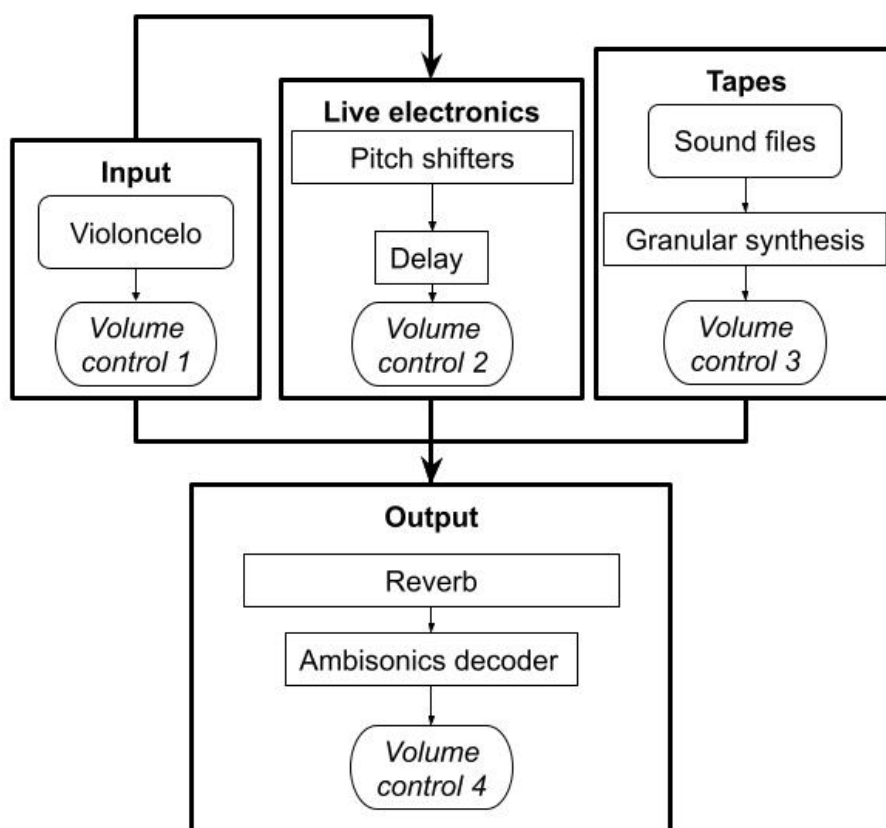


1

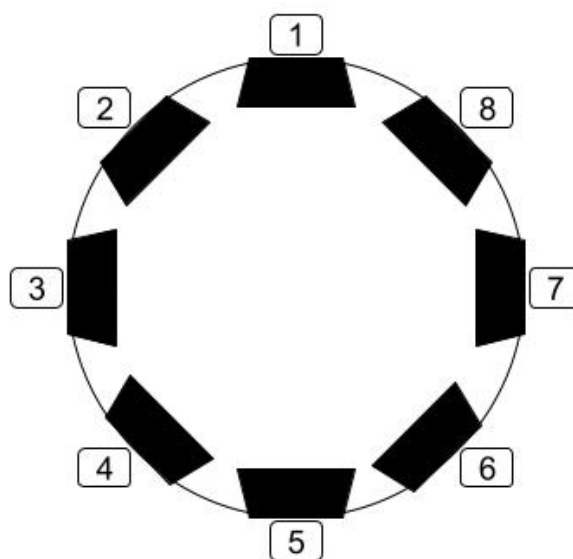
Number of the electronic event

max Level of mixture between cello and eletronics, taking the cello volume as a reference: min (minimum); med (medium); max (maximum)

Sound processing flux of the Max patch



Ambisonics loudspeakers position for 8 channels



1

Exploring the harmonics' sonority

2

3

Cantabile (♩ = 65)

Exploring the harmonies sonority

Cantabile (♩ = 65)

arco II *gliss.* II *gliss.* II 5

f *mf* *f* *mf* *sf*

4

5

Like a bass (♩ = 90)

2 Like a bass (♩ = 90)

The musical score is written on a single staff in bass clef. It begins with a whole rest, followed by a half note G2 marked 'pizz.'. This is followed by a sequence of eighth notes: A2 (marked '> gliss.'), G2, F2 (marked '> gliss.'), and E2. After a quarter rest, there is a half note D2, then a half note C2 marked 'arco'. This is followed by a triplet of eighth notes: B1, A1, and G1, all marked 'gliss.'. Then comes a triplet of eighth notes: F1, E1, and D1, also marked 'gliss.'. Finally, there is a quintuplet of eighth notes: C1, B1, A1, G1, and F1, marked 'gliss.'. The piece ends with a whole rest. Dynamics are indicated as *f* (forte) at the beginning, *mf* (mezzo-forte) in the middle, and *f* (forte) at the end. A tempo marking of ♩ = 90 is present.

6

7

8

9

Cantabile (♩ = 65)

Cantabile (♩ = 65)

The second system of the musical score continues the 'Cantabile' piece. It begins with a treble clef and a key signature of one flat (B-flat). The tempo is marked 'Cantabile' with a quarter note equal to 65 beats per minute. The first measure is marked *mf* (mezzo-forte) and contains a triplet of eighth notes. The second measure is marked *sf* (sforzando) and contains a triplet of eighth notes. The third measure is marked *gliss.* (glissando) and contains a triplet of eighth notes. The fourth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The fifth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The sixth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The seventh measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The eighth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The ninth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The tenth measure is marked *gliss.* and contains a triplet of eighth notes. The system ends with a double bar line.

10

Like a bass, with swing (♩ = 90)

4 pizz. *f*

The musical score for the bass line of 'The Sound of Silence' is shown. It begins with a four-measure rest, indicated by a '4' and a box. The first note is a quarter note G2, marked 'pizz.' (pizzicato) and '*f*' (forte). The melody continues with a half note A2, a quarter note B1, and a half note C2. The next measure contains a half note D2, a quarter note E2, and a half note F2. The third measure has a half note G2, a quarter note A2, and a half note B2. The fourth measure consists of a half note C3, a quarter note D3, and a half note E3. The fifth measure is a half note F3, a quarter note G3, and a half note A3. The sixth measure has a half note B3, a quarter note C4, and a half note D4. The seventh measure contains a half note E4, a quarter note F4, and a half note G4. The eighth measure is a half note A4, a quarter note B4, and a half note C5. The ninth measure has a half note D5, a quarter note E5, and a half note F5. The tenth measure consists of a half note G5, a quarter note A5, and a half note B5. The eleventh measure is a half note C6, a quarter note D6, and a half note E6. The twelfth measure has a half note F6, a quarter note G6, and a half note A6. The thirteenth measure contains a half note B6, a quarter note C7, and a half note D7. The fourteenth measure is a half note E7, a quarter note F7, and a half note G7. The fifteenth measure has a half note A7, a quarter note B7, and a half note C8. The sixteenth measure consists of a half note D8, a quarter note E8, and a half note F8. The seventeenth measure is a half note G8, a quarter note A8, and a half note B8. The eighteenth measure has a half note C9, a quarter note D9, and a half note E9. The nineteenth measure contains a half note F9, a quarter note G9, and a half note A9. The twentieth measure is a half note B9, a quarter note C10, and a half note D10. The twenty-first measure has a half note E10, a quarter note F10, and a half note G10. The twenty-second measure consists of a half note A10, a quarter note B10, and a half note C11. The twenty-third measure is a half note D11, a quarter note E11, and a half note F11. The twenty-fourth measure has a half note G11, a quarter note A11, and a half note B11. The twenty-fifth measure contains a half note C12, a quarter note D12, and a half note E12. The twenty-sixth measure is a half note F12, a quarter note G12, and a half note A12. The twenty-seventh measure has a half note B12, a quarter note C13, and a half note D13. The twenty-eighth measure consists of a half note E13, a quarter note F13, and a half note G13. The twenty-ninth measure is a half note A13, a quarter note B13, and a half note C14. The thirtieth measure has a half note D14, a quarter note E14, and a half note F14. The thirty-first measure contains a half note G14, a quarter note A14, and a half note B14. The thirty-second measure is a half note C15, a quarter note D15, and a half note E15. The thirty-third measure has a half note F15, a quarter note G15, and a half note A15. The thirty-fourth measure consists of a half note B15, a quarter note C16, and a half note D16. The thirty-fifth measure is a half note E16, a quarter note F16, and a half note G16. The thirty-sixth measure has a half note A16, a quarter note B16, and a half note C17. The thirty-seventh measure contains a half note D17, a quarter note E17, and a half note F17. The thirty-eighth measure is a half note G17, a quarter note A17, and a half note B17. The thirty-ninth measure has a half note C18, a quarter note D18, and a half note E18. The fortieth measure consists of a half note F18, a quarter note G18, and a half note A18. The forty-first measure is a half note B18, a quarter note C19, and a half note D19. The forty-second measure has a half note E19, a quarter note F19, and a half note G19. The forty-third measure contains a half note A19, a quarter note B19, and a half note C20. The forty-fourth measure is a half note D20, a quarter note E20, and a half note F20. The forty-fifth measure has a half note G20, a quarter note A20, and a half note B20. The forty-sixth measure consists of a half note C21, a quarter note D21, and a half note E21. The forty-seventh measure is a half note F21, a quarter note G21, and a half note A21. The forty-eighth measure has a half note B21, a quarter note C22, and a half note D22. The forty-ninth measure contains a half note E22, a quarter note F22, and a half note G22. The fiftieth measure is a half note A22, a quarter note B22, and a half note C23. The fifty-first measure has a half note D23, a quarter note E23, and a half note F23. The fifty-second measure consists of a half note G23, a quarter note A23, and a half note B23. The fifty-third measure is a half note C24, a quarter note D24, and a half note E24. The fifty-fourth measure has a half note F24, a quarter note G24, and a half note A24. The fifty-fifth measure contains a half note B24, a quarter note C25, and a half note D25. The fifty-sixth measure is a half note E25, a quarter note F25, and a half note G25. The fifty-seventh measure has a half note A25, a quarter note B25, and a half note C26. The fifty-eighth measure consists of a half note D26, a quarter note E26, and a half note F26. The fifty-ninth measure is a half note G26, a quarter note A26, and a half note B26. The sixtieth measure has a half note C27, a quarter note D27, and a half note E27. The sixty-first measure contains a half note F27, a quarter note G27, and a half note A27. The sixty-second measure is a half note B27, a quarter note C28, and a half note D28. The sixty-third measure has a half note E28, a quarter note F28, and a half note G28. The sixty-fourth measure consists of a half note A28, a quarter note B28, and a half note C29. The sixty-fifth measure is a half note D29, a quarter note E29, and a half note F29. The sixty-sixth measure has a half note G29, a quarter note A29, and a half note B29. The sixty-seventh measure contains a half note C30, a quarter note D30, and a half note E30. The sixty-eighth measure is a half note F30, a quarter note G30, and a half note A30. The sixty-ninth measure has a half note B30, a quarter note C31, and a half note D31. The seventieth measure consists of a half note E31, a quarter note F31, and a half note G31. The seventy-first measure is a half note A31, a quarter note B31, and a half note C32. The seventy-second measure has a half note D32, a quarter note E32, and a half note F32. The seventy-third measure contains a half note G32, a quarter note A32, and a half note B32. The seventy-fourth measure is a half note C33, a quarter note D33, and a half note E33. The seventy-fifth measure has a half note F33, a quarter note G33, and a half note A33. The seventy-sixth measure contains a half note B33, a quarter note C34, and a half note D34. The seventy-seventh measure is a half note E34, a quarter note F34, and a half note G34. The seventy-eighth measure has a half note A34, a quarter note B34, and a half note C35. The seventy-ninth measure consists of a half note D35, a quarter note E35, and a half note F35. The eightieth measure is a half note G35, a quarter note A35, and a half note B35. The eighty-first measure has a half note C36, a quarter note D36, and a half note E36. The eighty-second measure contains a half note F36, a quarter note G36, and a half note A36. The eighty-third measure is a half note B36, a quarter note C37, and a half note D37. The eighty-fourth measure has a half note E37, a quarter note F37, and a half note G37. The eighty-fifth measure consists of a half note A37, a quarter note B37, and a half note C38. The eighty-sixth measure is a half note D38, a quarter note E38, and a half note F38. The eighty-seventh measure has a half note G38, a quarter note A38, and a half note B38. The eighty-eighth measure contains a half note C39, a quarter note D39, and a half note E39. The eighty-ninth measure is a half note F39, a quarter note G39, and a half note A39. The ninetieth measure has a half note B39, a quarter note C40, and a half note D40. The hundredth measure consists of a half note E40, a quarter note F40, and a half note G40. The hundred and first measure is a half note A40, a quarter note B40, and a half note C41. The hundred and second measure has a half note D41, a quarter note E41, and a half note F41. The hundred and third measure contains a half note G41, a quarter note A41, and a half note B41. The hundred and fourth measure is a half note C42, a quarter note D42, and a half note E42. The hundred and fifth measure has a half note F42, a quarter note G42, and a half note A42. The hundred and sixth measure contains a half note B42, a quarter note C43, and a half note D43. The hundred and seventh measure is a half note E43, a quarter note F43, and a half note G43. The hundred and eighth measure has a half note A43, a quarter note B43, and a half note C44. The hundred and ninth measure consists of a half note D44, a quarter note E44, and a half note F44. The hundred and tenth measure is a half note G44, a quarter note A44, and a half note B44. The hundred and eleventh measure has a half note C45, a quarter note D45, and a half note E45. The hundred and twelfth measure contains a half note F45, a quarter note G45, and a half note A45. The hundred and thirteenth measure is a half note B45, a quarter note C46, and a half note D46. The hundred and fourteenth measure has a half note E46, a quarter note F46, and a half note G46. The hundred and fifteenth measure consists of a half note A46, a quarter note B46, and a half note C47. The hundred and sixteenth measure is a half note D47, a quarter note E47, and a half note F47. The hundred and seventeenth measure has a half note G47, a quarter note A47, and a half note B47. The hundred and eighteenth measure contains a half note C48, a quarter note D48, and a half note E48. The hundred and nineteenth measure is a half note F48, a quarter note G48, and a half note A48. The hundred and twentieth measure has a half note B48, a quarter note C49, and a half note D49. The hundred and twenty-first measure consists of a half note E49, a quarter note F49, and a half note G49. The hundred and twenty-second measure is a half note A49, a quarter note B49, and a half note C50. The hundred and twenty-third measure has a half note D50, a quarter note E50, and a half note F50. The hundred and twenty-fourth measure contains a half note G50, a quarter note A50, and a half note B50. The hundred and twenty-fifth measure is a half note C51, a quarter note D51, and a half note E51. The hundred and twenty-sixth measure has a half note F51, a quarter note G51, and a half note A51. The hundred and twenty-seventh measure contains a half note B51, a quarter note C52, and a half note D52. The hundred and twenty-eighth measure is a half note E52, a quarter note F52, and a half note G52. The hundred and twenty-ninth measure has a half note A52, a quarter note B52, and a half note C53. The hundred and thirtieth measure consists of a half note D53, a quarter note E53, and a half note F53. The hundred and thirty-first measure is a half note G53, a quarter note A53, and a half note B53. The hundred and thirty-second measure contains a half note C54, a quarter note D54, and a half note E54. The hundred and thirty-third measure is a half note F54, a quarter note G54, and a half note A54. The hundred and thirty-fourth measure contains a half note B54, a quarter note C55, and a half note D55. The hundred and thirty-fifth measure is a half note E55, a quarter note F55, and a half note G55. The hundred and thirty-sixth measure has a half note A55, a quarter note B55, and a half note C56. The hundred and thirty-seventh measure consists of a half note D56, a quarter note E56, and a half note F56. The hundred and thirty-eighth measure is a half note G56, a quarter note A56, and a half note B56. The hundred and thirty-ninth measure contains a half note C57, a quarter note D57, and a half note E57. The hundred and fortieth measure is a half note F57, a quarter note G57, and a half note A57. The hundred and forty-first measure has a half note B57, a quarter note C58, and a half note D58. The hundred and forty-second measure consists of a half note E58, a quarter note F58, and a half note G58. The hundred and forty-third measure is a half note A58, a quarter note B58, and a half note C59. The hundred and forty-fourth measure has a half note D59, a quarter note E59, and a half note F59. The hundred and forty-fifth measure contains a half note G59, a quarter note A59, and a half note B59. The hundred and forty-sixth measure is a half note C60, a quarter note D60, and a half note E60. The hundred and forty-seventh measure has a half note F60, a quarter note G60, and a half note A60. The hundred and forty-eighth measure contains a half note B60, a quarter note C61, and a half note D61. The hundred and forty-ninth measure is a half note E61, a quarter note F61, and a half note G61. The hundred and fiftieth measure has a half note A61, a quarter note B61, and a half note C62. The hundred and fifty-first measure consists of a half note D62, a quarter note E62, and a half note F62. The hundred and fifty-second measure is a half note G62, a quarter note A62, and a half note B62. The hundred and fifty-third measure contains a half note C63, a quarter note D

11

arco Cantabile (♩ = 85)

5 arco **Cantabile** ($\text{♩} = 85$)

The first system of the musical score is for the left hand, marked 'arco' and 'Cantabile' with a tempo of quarter note = 85. The key signature has one flat (B-flat) and the time signature is 5/4. The music begins with a whole rest, followed by a series of eighth and sixteenth notes. Dynamics include *sf* (sforzando), *f* (forte), and *mf* (mezzo-forte). There are slurs over several phrases and a triplet of eighth notes at the end of the system.

12

Like a bass

pizz. **Like a bass**

6 10 10 7

mf *f* *p*

Very dramatic (♩ = 85)

sul. pont.

7 arco

mf < *sfz* > *mf* — *ff* > *mf* *sf* *sf* *sf* > *mf*

14

8 ord. pizz. arco

mf < *f* *mf* *mf* < *f* > *mf* *sfz* > *p* *mf* < *f* > *mf* *sfz* > *p*

9

f *mf* — *f* — *mf* — *ff* > *f* *mf*

max
15

Chaotic and instable (♩ = 85)

10 arco sul. pont. ord.

ff *f* > *mf* *f* > *mf*

med
16

11 sul. pont. ord. sul. pont. ord.

ff *mf* *f*

min
17

12

mf *mf* — *f*

13 *mf* *f* *mf*

sul. pont. *ord.*

3 3 3 5 3

5

med
18

14 *p* *ff* *sffz* *mf*

sul. pont. *ord.*

3 3 5 5 3

5 5 3

min
19

15 *ff* *f* *sffz*

3 3 5 3

16 *f* *f* *mf* *mf*

sul. pont. *ord.*

5 5 5 5

17 *f* *mf* *f*

ord. *sul. pont.*

3 3 3 5

med
20

18 *mf* *f*

ord.

5 5 3 3

max
21

19 *ff* *f* *mf*

sul. pont. *ord.*

5 5 5 5 3 3 3 3

8 224

20 *f* 3 *ff* 5 5 *f*

sul. pont.

21 ord.

med
22

f 3

3

3

3

3

22

sul. pont.

ord

ff

f

23

Emphasize the diversity (♩ = 58)

[illegible]

24

Cantabile (♩ = 85)

25

Example 10 (continued)

26 **27** **28** **29**

5 $\text{♩} = 58$ $\text{♩} = 85$ arco *f*

30 **31** **32**

27 pizz. 5 $\text{♩} = 58$ 3 *mf* *mp* *f* *ff* *f* *ff* *mp* *f*

33

28 3 *f* *ff* *f* *ff* *gliss.* *ff* *ff*

34 **35**

29 5 *p* *f* 3

36 **37**

30 5 pizz. arco pizz. 3 *f* *p*

38

31 *f* 3 3 5 3 5

39

32 3 5 3 5

Detailed description of the musical score: The score is for a bass line, spanning measures 26 to 39. It is written in a single system with a key signature of one flat (B-flat) and a common time signature. The notation includes various musical elements: notes (quarter, eighth, sixteenth, and triplet), rests, accidentals (sharps, flats, naturals), and dynamic markings (mf, mp, f, ff, p). Performance instructions such as 'arco' (bowed), 'pizz.' (pizzicato), and 'gliss.' (glissando) are present. The score is divided into measures, with measure numbers 26 through 39 indicated. Some measures contain fingerings (e.g., 5, 3, 5) or articulation marks (e.g., accents, slurs). The overall structure is a continuous melodic and rhythmic line.