



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

ALDO ANDRÉ DÍAZ SALAZAR

ANÁLISE DE INSTRUMENTOS MUSICAIS ATRAVÉS DO EXPOENTE HURST DE
BANDA HARMÔNICA - ESTUDO COMPARATIVO DA QUENA E DE OUTROS
INSTRUMENTOS DE SOPRO

ANALYSIS OF MUSICAL INSTRUMENTS VIA THE HARMONIC BAND HURST
EXPONENT - COMPARATIVE STUDY OF THE QUENA AND OTHER WIND
INSTRUMENTS

CAMPINAS

2015

ALDO ANDRÉ DÍAZ SALAZAR

ANÁLISE DE INSTRUMENTOS MUSICAIS ATRAVÉS DO EXPOENTE HURST DE
BANDA HARMÔNICA - ESTUDO COMPARATIVO DA QUENA E DE OUTROS
INSTRUMENTOS DE SOPRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Automação.

Orientador: PROF. DR. RAFAEL SANTOS MENDES

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ALDO ANDRÉ DÍAZ SALAZAR, E ORIENTADA PELO PROF. DR. RAFAEL SANTOS MENDES.

CAMPINAS

2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 160186/2013-7

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

D543a Díaz Salazar, Aldo André, 1986-
Análise de instrumentos musicais através do Expoente Hurst de Banda Harmônica - estudo comparativo da quena e de outros instrumentos de sopro / Aldo André Díaz Salazar. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Rafael Santos Mendes.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1.
Instrumentos de sopro
. 2. Processamento digital de sinais. 3. Transformada wavelet. 4.
Processamento de dados - Fractais. 5. Dimensão fractal. I. Mendes, Rafael Santos, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analysis of musical instruments via the Harmonic Band Hurst Exponent - comparative study of the quena and other wind instruments

Palavras-chave em inglês:

Wind instruments

Digital signal processing

Wavelet transform

Fractals - Data processing

Fractal dimension

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Rafael Santos Mendes [Orientador]

Paulo Roberto Gardel Kurka

Max Henrique Machado Costa

Data de defesa: 25-09-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Aldo André Díaz Salazar

Data da Defesa: 25 de setembro de 2015

Título da Tese: “Análise de instrumentos musicais através do Exponente Hurst de Banda Harmônica - Estudo comparativo da quena e de outros instrumentos de sopro.”

Prof. Dr. Rafael Santos Mendes (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka (FEM/UNICAMP)

Prof. Dr. Max Henrique Machado Costa (FEEC/UNICAMP)

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Julgadora, consta no processo de vida acadêmica do aluno.

*Dedico esta dissertação
aos meus pais Carlos e Elisa,
meus irmãos Carlos e Milagros,
minha sobrinha Valeria,
meus tios Segundo e Esperanza
e à minha namorada Jalusa,
fontes de amor na minha vida.
“Muchas Gracias”.*

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, Amigo e Companheiro fiel.

Aos meus pais Carlos e Elisa, pelo carinho e inspiração.

Ao Prof. Dr. Rafael Santos Mendes, pela oportunidade de realizar esta apaixonante investigação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento na realização deste projeto.

Aos membros da banca, Prof. Paulo Kurka, Prof. Max Costa e Prof. Romis Attux por suas valiosas contribuições nesta pesquisa.

Aos meus professores, Prof. Dr. Max Costa, Prof. Dr. Cândido Santos, Prof. Dr. Renato Lopes, Prof. Dr. Pedro Peres e Prof. Dr. Paulo Valente por seus ensinamentos e exemplar vida acadêmica.

Aos meus queridos irmãos Jorge, Ruth e Roger pelo aconselhamento e cuidados na minha vida.

Aos meus colegas do laboratório LCA: Rodrigo, Elías, Roberto, Mariana, Ivan, Wallace, Raphael, Lino, Paul, Jan, Suellen e Raquel pela amizade e tempo compartilhado.

A minha família brasileira da IBBG, pela acolhida e condução na minha caminhada.

A Jalusa, por tanto amor.

*“To be born ignorant is nobody’s fault, but to remain is everybody’s responsibility.”
(Abraham Laboriel, Músico profesional)*

RESUMO

A análise de conteúdo e informação musical apresenta benefícios em diversas aplicações como o reconhecimento de música, compactação de informação, transcrição automática de instrumentos musicais, entre outros. Em consequência, o estudo de mecanismos eficazes de descrição sonora que facilitem a análise de áudio tornou-se relevante nas pesquisas atuais. Este estudo teve como objetivo a análise comparativa de instrumentos de sopro baseada no Expoente Hurst de Banda Harmônica, atributo de descrição sonora que caracteriza um sinal de som baseado na energia contida nas bandas laterais dos harmônicos. Nosso trabalho é focado na análise da flauta andina quena por meio de comparações com a flauta doce e a escaleta, outros dois instrumentos da mesma família.

Primeiramente, criou-se um banco de dados de sons dos instrumentos. As bandas laterais dos harmônicos destes sons foram decompostos mediante a Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT) baseada no modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico. Por último, estimou-se o Expoente Hurst de Band Harmônica a partir da regressão linear da energia dos coeficientes da decomposição HBWT. Em relação à análise dos dados, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, que constitui um método quantitativo da estatística descritiva.

Como resultado obteve-se um conjunto reduzido de parâmetros para a descrição dos sinais em análise, o que representou uma vantagem na descrição sucinta de sinais musicais e extração de informação dos instrumentos tais como a quantidade total de harmônicos, a descrição do decaimento $1/f$ e uma aproximação da envoltória espectral do sinal. A partir da comparação do conjunto de parâmetros obtido, encontrou-se maior semelhança de características espectrais entre a quena e a flauta doce do que entre a quena e a escaleta.

Verificou-se que o Expoente Hurst de Banda Harmônica é um atributo útil na descrição sonora fornecendo informação diferenciada dos instrumentos musicais baseada nas características espectrais das bandas laterais dos harmônicos. Em trabalhos futuros, visa-se analisar outras famílias de instrumentos melódicos para o desenvolvimento de aplicações em síntese digital e o projeto de ferramentas de composição musical que possam ser aproveitadas por músicos, compositores e demais interessados na área.

Palavras-chaves: Instrumentos de sopro; Processamento digital de sinais; Transformada wavelet; Processamento de dados - Fractais; Dimensão fractal.

ABSTRACT

The content and music information analysis presents benefits in a diversity of applications as music recognition, compression of information, automatic musical instruments transcription, among others. As a consequence, the study of effective sound description mechanisms that facilitate the audio analysis has become important in current research. This study aimed at the comparative analysis of wind instruments based on the Harmonic Band Hurst Exponent, a sound description feature describing sound signals based on the energy contained in the sidebands of harmonics. Our work is focused on the analysis of Andean quena flute through comparisons with the recorder and the melodica, two instruments of the same family.

First, we created a musical instrument sound database. The sidebands of sounds' harmonics were decomposed by the Harmonic Band Wavelet Transform (HBWT) which is based on the pseudo-periodic $1/f$ noise model. Finally, the Harmonic Band Hurst Exponent was estimated from the linear regression of the energy of the HBWT decomposition coefficients. Regarding the data analysis, it was used the Pearson's correlation coefficient, a method of descriptive statistics.

As a result we obtained a reduced set of parameters for the description of analyzed sound signals, which represented an advantage towards the summarized description of musical signals and the extraction of information from the instruments such as the total number of harmonics, the description of the $1/f$ decay and an approximation to the spectral envelope. From the comparison between the parameters we obtained, it was found greater similarity of spectral characteristics in the quena and the recorder than between the quena and the melodica.

It was verified that the Harmonic Band Hurst Exponent is a useful sound description feature that provided distinguished information of the musical instruments based on the spectral characteristics of the sidebands of harmonics. In future work, we aim to analyze other families of melodic instruments for the development of applications in digital synthesis and the design of tools for music composition that can serve musicians, composers and other stakeholders in this area.

Keywords: Wind instruments; Digital signal processing; Wavelet transform; Fractals - Data processing; Fractal dimension.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Quena peruana de madeira. (a) Vista anterior. (b) Vista posterior. | 28 |
| Figura 2 – Flauta doce soprano. | 28 |
| Figura 3 – Escaleta. | 29 |
| Figura 4 – Divisão do plano tempo-frequência da Transformada Wavelet Discreta ordinária. A taxa de amostragem divide-se por dois a cada escala. | 31 |
| Figura 5 – Diagrama dos espaços de aproximação V_j e subespaços W_j | 31 |
| Figura 6 – Diagrama de implementação da Transformada Wavelet Discreta (DWT) com dois níveis de escala e a transformada inversa (IDWT). | 33 |
| Figura 7 – Resposta em frequência de um par de filtros QMF do tipo Daubechies de ordem 11 (DAUBECHIES, 1992). | 33 |
| Figura 8 – Forma espectral do decaimento $1/ f - f_k $ das bandas ruidosas entre os harmônicos f_k , com k o índice do harmônico. | 35 |
| Figura 9 – Seis primeiros harmônicos da nota A4 na quena ($f_0 = 444.6$ Hz). | 35 |
| Figura 10 – Espectro da Transformada Wavelet Discreta DWT com seis níveis. | 37 |
| Figura 11 – Espectro de um sinal de ruído $1/f$. Observa-se o decaimento exponencial característico. | 37 |
| Figura 12 – Divisão do plano tempo-frequência da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. Esta divisão é uma versão periódica da Fig. 4. O número de períodos corresponde ao número de de filtros passa-faixa (isto é, o número de canais MDCT) que capturam as bandas laterais denotadas por p | 38 |
| Figura 13 – Estrutura de implementação da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Bloco de análise. (b) Bloco de síntese. | 39 |
| Figura 14 – Três primeiros harmônicos de um som de quena de frequência $f_0 = 444$ Hz ($P = 99$) alinhados com os canais $p = 1, \dots, 6$ da MDCT. | 41 |
| Figura 15 – Estrutura da análise e extração do Expoente Hurst de Banda Harmônica. | 44 |
| Figura 16 – Registro de frequências dos instrumentos da análise onde observa-se o solapamento entre eles. | 45 |
| Figura 17 – Detecção da frequência f_0 na quena. | 47 |
| Figura 18 – Estrutura da análise da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Banco MDCT de P canais e blocos de dizimação. (b) Bancos wavelet DWT. | 47 |
| Figura 19 – Decomposição pela MDCT do segundo harmônico na saída dos canais $p = 3$ e $p = 4$ para um sinal da quena com $f_0 = 444$ Hz ($P = 99$ canais). | 48 |
| Figura 20 – Decomposição de um harmônico em sub-bandas pela HBWT. | 49 |
| Figura 21 – Fluxograma para o cálculo da transformada DWT. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Estrutura da síntese da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Bancos wavelet IDWT. (b) Blocos de expansão P e banco IMDCT. | 51 |
| Figura 23 – Fluxograma para o cálculo da Inversa da Transformada Wavelet. A função $min(a,b)$ retorna o menor dos valores e $cpr(.)$ o comprimento do vetor. | 52 |
| Figura 24 – Forma de onda do sinal C5 na quena. | 55 |
| Figura 25 – Espectro do sinal C5 na quena. | 55 |
| Figura 26 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da quena com seis níveis de análise wavelet. | 56 |
| Figura 27 – Regressão linear na quena com ajuste para os níveis 2, 3 e 4. | 56 |
| Figura 28 – Estimativa do parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados. | 57 |
| Figura 29 – Forma de onda do sinal C5 na flauta doce. | 58 |
| Figura 30 – Espectro do sinal C5 na flauta doce. | 60 |
| Figura 31 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da flauta doce com seis níveis de análise wavelet. | 60 |
| Figura 32 – Regressão linear na flauta doce com ajuste para os níveis 2, 3 e 4. | 61 |
| Figura 33 – Estimativa dos parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados. | 63 |
| Figura 34 – Forma de onda do sinal C5 na escaleta. | 63 |
| Figura 35 – Espectro do sinal C5 na escaleta. | 64 |
| Figura 36 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da escaleta com seis níveis de análise wavelet. | 64 |
| Figura 37 – Regressão linear na escaleta com ajuste para os níveis 2, 3 e 4. | 65 |
| Figura 38 – Estimativa do parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados. | 67 |
| Figura 39 – Análise das notas C5, D5, E5, F5 e G5 na quena e na flauta doce. (a) Espectro de potência da quena. (b) Espectro de potência da flauta doce. | 69 |
| Figura 40 – Análise das notas C5, D5, E5, F5 e G5 na quena e na flauta doce. Em magenta: Expoente Hurst de Banda Harmônica. Em Cinza: Coeficiente de correlação. (a) Expoente Hurst da quena. (b) Expoente Hurst da flauta doce. | 70 |
| Figura 41 – Análise das notas G4, B4, C5, D5 e E5 na quena e na escaleta. (a) Espectro de potência da quena. (b) Espectro de potência da escaleta. | 72 |
| Figura 42 – Análise das notas G4, B4, C5, D5 e E5 na quena e na escaleta. Em magenta: Expoente Hurst de Banda Harmônica. Em Cinza: Coeficiente de correlação. (a) Expoente Hurst da quena. (b) Expoente Hurst da escaleta. | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Características dos estudos sobre análise de instrumentos de sopro entre os anos de 2005 a 2013. | 19 |
| Tabela 2 – Características do banco de dados. | 45 |
| Tabela 3 – Banco de dados de som. | 46 |
| Tabela 4 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica - Quena C5 com 4 níveis DWT. | 59 |
| Tabela 5 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica- Flauta doce C5 com 4 níveis DWT. | 62 |
| Tabela 6 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica - Escaleta C5 com 4 níveis DWT. | 66 |

LISTA DE PSEUDOCÓDIGOS

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | <i>Transformada Cosseno Discreta Modificada</i> | 49 |
| 4.2 | <i>Inversa Transformada Cosseno Discreta Modificada</i> | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 16 |
| 1.1 | Objetivo | 18 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 18 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.2 | Trabalhos relacionados | 18 |
| 1.2.1 | Modelagem física | 21 |
| 1.2.2 | Modelagem temporal e espectral | 21 |
| 1.2.3 | Modelagem fractal | 22 |
| 1.3 | Proposta | 23 |
| 1.4 | Justificativa | 23 |
| 1.4.1 | Representação fractal de sinais musicais | 23 |
| 1.4.2 | Análise de multirresolução | 24 |
| 1.4.3 | Sistemas Multi-taxa e bancos de filtros | 25 |
| 1.5 | Estrutura da dissertação | 25 |
| 2 | Instrumentos musicais de sopro | 26 |
| 2.1 | Instrumentos de sopro | 26 |
| 2.1.1 | Características do padrão sonoro | 26 |
| 2.2 | Quena | 27 |
| 2.2.0.1 | Características físicas | 27 |
| 2.3 | Flauta doce | 27 |
| 2.4 | Escaleta | 28 |
| 2.5 | Conclusão | 29 |
| 3 | Fundamentos teóricos | 30 |
| 3.1 | Transformada Wavelet | 30 |
| 3.2 | Expoente Hurst | 34 |
| 3.3 | Modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico | 34 |
| 3.4 | Transformada Wavelet e o ruído $1/f$ | 36 |
| 3.5 | Transformada Wavelet de Banda Harmônica | 37 |
| 3.5.1 | Transformada Cosseno Discreta Modificada | 40 |
| 3.5.2 | Expoente Hurst de Banda Harmônica | 41 |
| 4 | Metodologia | 43 |
| 4.1 | Banco de dados | 43 |
| 4.2 | Cálculo do período médio P | 45 |
| 4.3 | Decomposição de sinais | 46 |
| 4.3.1 | Implementação MDCT | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2 | Implementação DWT | 48 |
| 4.4 | Cálculo do Expoente Hurst de Banda Harmônica | 49 |
| 4.5 | Reconstrução de sinais | 51 |
| 4.5.1 | Implementação IDWT | 52 |
| 4.5.2 | Implementação IMDCT | 52 |
| 5 | Análise e interpretação dos resultados | 54 |
| 5.1 | Análise da quena | 54 |
| 5.2 | Análise da flauta doce | 58 |
| 5.3 | Análise da escaleta | 61 |
| 5.4 | Análise comparativa | 67 |
| 5.4.1 | Quena e flauta doce | 67 |
| 5.4.2 | Quena e escaleta | 69 |
| 5.5 | Conclusões | 71 |
| 6 | Conclusões | 74 |
| | Referências | 76 |

1 INTRODUÇÃO

A análise de sinais de áudio é a base da maior parte de pesquisas relacionadas com a área de *Som e Computação Musical* (SERRA *et al.*, 2013). Uma das linhas de investigação da análise de áudio foca-se no desenvolvimento de modelos paramétricos de representação de sinais apropriados para aplicações como codificação de áudio perceptiva, compressão, transformações, efeitos digitais e síntese de instrumentos musicais. A análise tempo/frequência é um elemento comum nos algoritmos contemporâneos de análise/síntese de sinais de áudio. Os principais temas de pesquisa nesta área compreendem as transformadas de valores reais e complexos (BRITANAK, 2011) e os bancos de filtros (EVANGELISTA *et al.*, 2013), bem como a sua adaptação temporal e espectral para as características do sinal de entrada.

A maioria dos sinais de áudio disponíveis podem ser decompostos em sinais de natureza muito diversa. Em sinais de instrumentos musicais, o som é produto da contribuição de um dispositivo de ressonância (e.g. tubo ou corda) e da fonte de ruído característico do mecanismo de execução, por exemplo o ruído do arco no caso do violino, viola e violoncelo ou o ruído de sopro no caso de instrumentos como o clarinete e a flauta. A capacidade de modificar (e.g. amplificar ou atenuar) independentemente as fontes sonoras a partir do sinal original possibilitam novas aplicações referentes à codificação de fonte eficiente e serviços interativos. No caso do sinal de som ser a única fonte disponível, é importante contar com representações adequadas de seus diversos componentes. Essas representações devem ser capazes de revelar as características individuais das diferentes fontes possibilitando o acesso a suas características únicas, por exemplo, o timbre e modulações.

O objeto de observação foram os instrumentos de sopro com especial atenção na flauta andina *quena*, instrumento fundamental na música das culturas andinas na América do Sul pouco estudado do ponto de vista da análise de sinais. A caracterização e análise do componente ruidoso do sinal foi baseado no Expoente Hurst de Banda Harmônica, um parâmetro associado à energia das bandas laterais ruidosas dos harmônicos no espectro de frequência e utilizado comumente para estudar sinais de ruído do tipo fractal (SU; WU, 2007).

Na análise, estudaram-se outros dois instrumentos de sopro a título de comparação: a flauta doce e a escaleta. Para representação dos sinais musicais, implementou-se a técnica denominada de Transformada Wavelet de Banda Harmônica ou HBWT (do inglês *Harmonic Banda Wavelet Transform*) que foi desenvolvida por Polotti e Evangelista (2007). O método HBWT está baseado no *modelo de ruído 1/f pseudo-periódico*, o qual forneceu um método apropriado para a representação do componente determinístico (sinal do ressonador) e estocástico (ruído) do sinal dos instrumentos. Da evidência experimental, encontrou-se que o componente constituído pelo ruído (componente estocástico) apresenta características fractais, ou de ruído do tipo

$1/f$, as quais conferem uma característica particularmente distintiva no timbre dos instrumentos musicais e que foi abordada neste estudo desde a perspectiva da análise comparativa entre instrumentos.

Com foco na análise de som estudaram-se as flutuações do ruído $1/f$ como atributo de descrição de som em sinais de instrumentos musicais. A etapa de síntese foi implementada principalmente para a reconstrução isolada dos componentes estocástico (harmônicos) e determinístico (sinais de sub-banda $1/f$). No entanto, a síntese favoreceu também o desenvolvimento de aplicações em transformações sonoras e efeitos digitais como o *pitch-shifting* e a *cross-synthesis*, as quais não foram desenvolvidas no contexto deste trabalho. Contudo, resultados relativos a estes aspectos são apresentados em Díaz e Mendes (2015).

A análise em frequência durante o regime estável do som dos instrumentos musicais quena, flauta doce e escaleta mostrou que além dos componentes harmônicos, a constituição do espectro sonoro está conformado por bandas laterais inter-harmônicas ruidosas com característica espectral $1/|f - f_k|^1$, onde f_k é a frequência do k -ésimo harmônico, as quais são muito importantes na qualidade perceptiva do som.

No presente estudo, o som é produzido pelo instrumento aerófono quena e comparado com outros dois instrumentos da mesma família, um deles mais próximo (flauta doce) e o outro mais diferenciado (escaleta). Em princípio, o espectro sonoro é diferente em cada instrumento, inclusive entre notas distintas executadas em um mesmo instrumento. Para superar este desafio, focou-se a análise no componente de ruído de banda lateral inter-harmônico conhecido na literatura como ruído $1/f$.

A partir da análise espectral do ruído $1/f$, propõe-se a extração do atributo denominado de *Expoente Hurst de Banda Harmônica* que caracteriza a energia do ruído de banda lateral. O Expoente Hurst é uma medida da fractalidade em sinais que trouxe bons resultados em estudos de análise de instrumentos musicais (ZLATINTSI; MARAGOS, 2013; GUNASEKARAN; REVATHY, 2008; DAS; DAS, 2006). Porém o *Expoente Hurst de Banda Harmônica* é uma extensão periódica sintonizada para o estudo do ruído das bandas laterais dos harmônicos em sinais musicais e cuja ferramenta principal de análise é a Transformada Wavelet de Banda Harmônica proposta por Polotti e Evangelista (2007).

No decorrer do estudo concluiu-se que o Expoente Hurst de Banda Harmônica permite obter informações distintivas das características do timbre dos instrumentos tais como a quantidade de harmônicos presentes e seu comportamento de decaimento espectral $1/f$ que favoreceram a análise comparativa. Discutiram-se os resultados da comparação entre instrumentos, encontrando-se maior similitude de características entre a quena e a flauta doce do que entre a quena e a escaleta. Por meio desta abordagem, retomou-se um caminho de pesquisa interessante em análise de som destacando trabalhos prospectivos na área de análise/síntese sonora

¹ A partir do texto em diante, utiliza-se a notação simplificada $1/f$ para designar o comportamento espectral $1/|f - f_k|$.

baseada na característica de ruído espectral $1/f$.

1.1 Objetivo

Nesta seção expõe-se os objetivos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo geral

- Propor um parâmetro de descrição de sinais musicais denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica* baseado na codificação da Transformada Wavelet de Banda Harmônica.
- Analisar e comparar as características do som da quena com o som dos instrumentos flauta doce e escaleta com base no Expoente Hurst de Banda Harmônica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um método para extração do Expoente Hurst de Banda Harmônica.
- Recuperar informação do som dos instrumentos de sopro a partir das bandas laterais dos harmônicos.
- Verificar a possibilidade de modelar matematicamente a categoria de instrumentos mencionados utilizando o Expoente Hurst de Banda Harmônica como medida.
- Contribuir com o estudo da flauta andina quena por meio da análise e síntese de som.
- Estabelecer critérios de comparação objetivos entre o som da quena, flauta doce e escaleta apoiados no Expoente Hurst de Banda Harmônica.

1.2 Trabalhos relacionados

Um dos grandes desafios da pesquisa em análise de instrumentos musicais consiste em determinar o conjunto ótimo de atributos que favoreçam a reconstrução fidedigna (síntese) do som dos instrumentos musicais. Assim, o intuito principal dos métodos de análise é a reconstrução do som a partir do menor número de parâmetros relevantes. Entretanto, dada a complexidade do fenômeno físico sonoro, existem métodos aperfeiçoados por tipo ou família de instrumentos. Especificamente, nos métodos de *análise/síntese de som* (síntese mediante análise), baseados na modelagem e processamento do sinal, a etapa da análise é fundamental para a representação estruturada do som e posterior etapa de síntese. Este trabalho foca-se na *análise de instrumentos de sopro* com ênfase no *estudo da quena*, instrumento popular na música

andina tradicional na América do Sul e utilizando o modelo de representação de sinais da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. Para esclarecimento, não foram observados na literatura estudos que tratam sobre a Transformada Wavelet de Banda Harmônica em instrumentos de sopro andinos como a quena. Com motivo de ilustrar as técnicas do estado da arte, mostra-se na Tabela 1 o resumo dos últimos estudos em análise da quena e outros instrumentos de sopro afins nos anos de 2005 a 2013.

Tabela 1 – Características dos estudos sobre análise de instrumentos de sopro entre os anos de 2005 a 2013.

| Autoria | Dados | Método | Atributos | Principais resultados |
|---|-----------------------------------|--|------------------------------------|--|
| Zlatintsi e Maragos (2013) U. Técnica Nacional de Atenas, Grécia | Flauta, clarinete, fagote, trompa | Cobertura morfológica fractal | Dimensão Fractal Multiescala (MDF) | Redução 32% da taxa de erro em reconhecimento de instrumentos |
| Ramamurthy e Raghavan (2013) Arris, Índia | Flauta indiana de bambu | Modelagem fonte-filtro | Execução do instrumento (4) | Modelagem de 4 dinâmicas de execução |
| Glover <i>et al.</i> (2012) U. Nacional da Irlanda, Irlanda | Não relatado | Síntese espectral (SMS) + Transitórios | Espectrais, temporais (6) | Biblioteca livre de síntese (6 parâmetros) |
| Özaslan <i>et al.</i> (2012) Conselho Superior de Investigações Científicas, Espanha | Flauta turca Ney | Estimação da frequência | Taxa de vibrato e <i>kaydırma</i> | Caracterização de 327 articulações do tipo vibrato e <i>kaydırma</i> |

Continua na página seguinte

Tabela 1 – Continuação da página anterior

| Autoria | Dados | Método | Atributos | Principais resultados |
|--|---------------------------------|--|--|---|
| Agapito <i>et al.</i> (2011) Instituto Politécnico Nacional, México | Quena boliviana | Transformada Discreta de Fourier (DFT) | Físicos, pressão sonora | Parametrização física e avaliação espectral da quena |
| Gunasekaran e Revathy (2008) U. de Kerala, Índia | Flauta indiana, shehnai, surnai | Segmentação fractal | Temporais, espectrais, perceptuais, harmônicos | Taxas altas em reconhecimento de instrumentos indianos: 89.7% na gravação solo, 82.8% em duetos |
| Llimpe <i>et al.</i> (2007) Pontifícia U. Católica do Peru, Peru | Quena peruana | Modelagem física | Dimensões físicas | Correção do comprimento e tamanho dos orifícios tonais da quena |
| Das e Das (2006) Instituto Indiano de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Índia | Flauta transversal, saxofone | Segmentação fractal Transformada Discreta de Fourier (DFT) | Dimensão Fractal D | Valores D menores na flauta indicam uma menor quantidade de harmônicos |
| Bader (2005) U. de Hamburgo, Alemanha | Flauta transversal | Modelo não-linear de turbulência | Físicos (viscosidade) | Modelagem de turbulência explica adequadamente a geração do som sustentado nas flautas |

Fonte: (do autor, 2015)

Segundo o método de modelagem proposto para representação do sinal, as técnicas descritas na Tabela 1 podem ser classificadas em três grandes grupos: modelagem física, modelagem temporal/espectral e modelagem fractal. A seguir apresenta-se um resumo das técnicas indicando o método, instrumentos musicais avaliados e principais resultados obtidos por cada uma delas.

1.2.1 Modelagem física

O estudo de Agapito *et al.* (2011) é um dos tratados mais recentes sobre a quena. Trata-se de um estudo de caracterização dos parâmetros físicos do instrumento como comprimento, dimensão dos orifícios tonais, embocadura, afinação, forma e diâmetro do tubo. Um dos resultados mais interessantes mostrou, a partir da análise da pressão sonora e frequência das notas, que o ruído característico presente no espectro de frequência está associado com as flutuações da pressão sonora, as quais são necessárias para a produção das notas da quena.

Llimpe *et al.* (2007) contribuíram com um estudo da quena peruana desde o ponto de vista do equacionamento matemático para o cálculo de parâmetros de fabricação, como diâmetro do orifício de sopro, localização dos orifícios tonais e correção das medidas da cavidade tubular principal. O estudo aporta parâmetros experimentais de construção da quena que contribuem a padronizar e melhorar o processo de fabricação de instrumentos musicais de precisão.

Bader (2005) contribuiu com a explicação do mecanismo de geração do som sustentado na flauta transversa e instrumentos da família de sopro. Modela-se o comportamento turbulento do fluxo de ar no interior da cavidade tubular da flauta. Comparado com o modelo de Navier-Stokes, o modelo de turbulência teve melhor desempenho na explicação de resultados experimentais sobre o processo de geração do som sustentado em instrumentos de sopro. Da quantidade total de ar produzido no sopro, demonstrou-se que somente 3.5% é aproveitado no instrumento e o restante é disperso fora.

1.2.2 Modelagem temporal e espectral

Glover *et al.* (2012) utilizaram o método da Síntese por Modelagem Espectral conhecido como SMS (do inglês *Spectral Modeling Synthesis*) proposto por Serra e Smith (1990). Seis atributos baseados no modelo do sinal são trabalhados, distorção harmônica, taxa de ruído e transitórios, envoltória espectral, transposição, escalamento no tempo e processamento de transitórios. Embora não sejam discutidas as aplicações em instrumentos específicos, o estudo produziu como ferramenta interessante um software para processamento de som em tempo real chamado *Metamorph*.

No trabalho de Ramamurthy e Raghavan (2013) apresenta-se o estudo da flauta indiana de bambu. Considerou-se quatro classes de atributos multidimensionais associados à execução do instrumento, grau de fechamento dos orifícios tonais, efeito da frequência das notas

no som para registros diferentes, classes de dedilhado e ângulo da embocadura. Na modelagem foi utilizada a síntese fonte-filtro com sinal de excitação dente de serra de Valimaki (2005) obtendo a representação adequada das dinâmicas associadas aos quatro atributos da flauta indiana propostos.

Özaslan *et al.* (2012) focaram-se na análise da flauta Ney da Turquia. Dois adornos executados na música tradicional turca *Makam* são estudados: vibrato e *kaydırma*². Mediante análise das variações na frequência fundamental propuseram dois atributos, taxa de vibrato e taxa de *kaydırma*. Um total de 327 adornos presentes na música *Makam* foram bem caracterizados.

1.2.3 Modelagem fractal

Mais recentemente, algumas técnicas inspiradas na teoria dos fractais de Mandelbrot (1983), obtiveram melhoras importantes em aplicações de análise e classificação de instrumentos musicais. Por exemplo, Zlatintsi e Maragos (2013) propuseram a análise de som mediante o atributo denominado *Dimensão Fractal Multiescala*, que associa a informação musical ao grau de turbulência do sinal medido pela Dimensão Fractal D de Minkowski-Bouligand (FALCONER, 2007; MARAGOS, 1994). Na extração do atributo, utilizou-se a técnica do cobrimento morfológico (MARAGOS, 1991; MARAGOS, 1994). Vários instrumentos nas famílias de cordas, sopro, metais e percussão foram analisados conseguindo uma redução de 32% da taxa de erro em reconhecimento de instrumentos musicais. Este resultado superou o do atributo *Mel Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), que é uma das ferramentas com melhor desempenho na descrição de sinais de áudio (ERONEN, 2001).

Em Gunasekaran e Revathy (2008), são comparados dois tipos de segmentação de sinais musicais, a segmentação baseada na energia local do sinal e a segmentação pelo método da Dimensão Fractal D (MARAGOS; POTAMIANOS, 1999). De cada segmentação foram extraídos os mesmos atributos temporais, espectrais e perceptuais, todos eles baseados nos atributos de áudio de baixo nível do padrão MPEG-7 (KIM *et al.*, 2005). Os atributos extraídos da segmentação fractal obtiveram melhores resultados em reconhecimento de instrumentos em comparação com aqueles obtidos pela técnica de segmentação de energia local.

Das e Das (2006) fizeram um estudo comparativo de diferentes instrumentos musicais com base na análise espectral e o parâmetro Dimensão Fractal D , uma medida da característica espectral $1/f$ dos sinais musicais. Encontrou-se que valores altos de D estão associados a uma quantidade maior de harmônicos presentes no som e viceversa. Por exemplo, no caso da flauta transversal, o valor menor de D indicou menor quantidade de harmônicos em comparação com o violino.

² A *kaydırma* é um tipo de articulação empregada para ligar duas notas por meio de um deslizamento (ÖZASLAN *et al.*, 2012).

1.3 Proposta

Este trabalho está delimitado pela análise do som dos instrumentos musicais de sopro com ênfase no estudo da quena como elemento central na música das culturas andinas da América do Sul porém pouco estudada desde a abordagem da análise sonora. Desde esta perspectiva, estudam-se os componentes espectrais do som da quena a fim de extrair características únicas que favoreçam a descrição e comparação com outros dois instrumentos de sopro, a flauta doce e a escaleta. Como principal resultado desta pesquisa, propõe-se um novo parâmetro de descrição sonora denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica*. O Expoente Hurst de Banda Harmônica, sintetiza de forma compacta informações relevantes do sinal como a quantidade de harmônicos e suas características. O som estudado apresenta as seguintes três características:

- **Tonal:** É uma característica do som dos instrumentos musicais como a quena, do canto e da voz entonada na fala. A tonalidade define a característica do sinal relacionada com a periodicidade temporal. Os sinais dos instrumentos musicais são na prática quase-periódicos, isto é, contêm pequenas flutuações presentes em cada período. Exclui-se sons não-harmônicos, por exemplo os sons de impacto ou dos instrumentos de percussão como o xilofone e marimba.
- **Monofônico:** Contêm uma única voz ou nota musical executada por vez.
- **Altura estável:** Apresenta uma frequência definida produzida na região sustentada do som. Excluem-se articulações do tipo *vibrato* ou *glissando* as quais não formam parte da região sustentada e originam variações na frequência do sinal.

Para análise serão utilizadas amostras de sinais dos instrumentos de sopro quena, flauta doce e escaleta. Os resultados deste trabalho focam-se nas três principais fontes sonoras mencionadas, podendo-se estender no futuro a metodologia proposta para o estudo e resgate de outros instrumentos andinos como a zamponña, antara e quenacho.

1.4 Justificativa

1.4.1 Representação fractal de sinais musicais

Na área de som e computação musical, um dos principais interesses é o desenvolvimento de representações musicais simples e úteis que sirvam de assistência no processo criativo de composição. As representações remetem-se à simplicidade no sentido do seu funcionamento intuitivo e à utilidade como ferramentas de importância na percepção musical. No documento de diretrizes da pesquisa em informação musical de Serra *et al.* (2013), relatam-se três objetivos

específicos da área de representação musical diretamente relacionados com os objetivos deste estudo:

- Investigar parâmetros e representações musicalmente mais relevantes;
- Desenvolvimento de representações mais flexíveis e gerais;
- Determinar a representação mais apropriada para cada aplicação.

Recentemente, um grupo de técnicas baseadas em modelos de representação fractal do som têm conseguido bons resultados na análise e descrição de sinais de instrumentos musicais para aplicações de reconhecimento e classificação (ZLATINTSI; MARAGOS, 2013; GUNASEKARAN; REVATHY, 2008; DAS; DAS, 2006). Estas técnicas utilizam um método denominado Contagem de Caixas ou *Box-counting* para extração do atributo *Dimensão Fractal* e caracterização do som musical. Porém, o método da Transformada Wavelet de Banda Harmônica proposto por Polotti (2003) apresentou uma vantagem comparativa frente a outros modelos por ter um design aprimorado para as características específicas dos sinais dos instrumentos musicais e também pela quantidade reduzida de parâmetros que resulta da análise.

1.4.2 Análise de multirresolução

Dentro do ouvido interno, a cóclea é o principal organismo de tratamento de informação sonora conhecida também como *órgão da audição*. O estímulo sonoro recebido no pavilhão da orelha externa produz vibrações no interior da cóclea. A cóclea encarrega-se da transdução das vibrações da membrana basilar interna em impulsos elétricos que são logo transmitidos através do Sistema Nervoso Central até o cérebro para sua interpretação. A membrana basilar caracteriza-se por ser estreita e rígida na origem (região basal) e larga e suave no extremo final (região apical). As particularidades anatômicas da membrana basilar outorgam-lhe uma qualidade física conhecida como *tonotopia* ou seletividade de frequência ao longo do seu comprimento. Frequências altas produzem vibrações maiores na região basal da membrana enquanto que as frequências baixas geram maior vibração na região apical. Esta característica permite estabelecer uma analogia entre o atividade coclear e a análise de tempo-frequência wavelet (análise de multirresolução). Matematicamente, o funcionamento de tonotopia coclear é interpretado na operação da Transformada Wavelet na análise acústica do som em oitavas de frequência (DAUBECHIES, 1992). Considerando que *a arte do engenheiro é imitar a natureza* (STRANG; NGUYEN, 1996), a imitação biológica do órgão da audição obtida a partir da Transformada Wavelet aponta aos métodos de análise de som baseados nesta ferramenta matemática apresentarem vantagens competitivas maiores em aplicações de codificação e compressão de áudio em comparação com outros métodos, baseados por exemplo na Transformada de Fourier.

1.4.3 Sistemas Multi-taxa e bancos de filtros

Em técnicas de Processamento de Sinais, o conhecimento em detalhe das características do sinal de interesse é essencial na eleição do método de estudo. Do ponto de vista da técnica, os métodos mais apropriados para análise de som aprimoram-se com base no conhecimento do comportamento do sinal. Este trabalho progride a partir da característica pseudo-periódica do som dos instrumentos musicais de sopro. A pseudoperiodicidade consiste no fato dos sinais apresentarem uma forma de onda periódica com um motivo temporal repetindo-se a intervalos constantes, porém com pequenas variações ou microflutuações na forma de onda de período em período. Do ponto de vista da análise em frequência, uma maneira de tratar a pseudo-periodicidade implica em uma forma de espectro caracterizada por picos harmônicos da frequência fundamental mais componentes ruidosas que caracterizam a não-harmonicidade. Para aproveitamento da característica pseudoperiódica do sinal musical, a análise de som foca-se na teoria de filtragem multicanal dos Bancos de Filtros e Sistemas Multi-taxa. Por meio destas técnicas, consegue-se decompor um sinal de som em seus componentes harmônicos e de ruído por canais separados para aprimorar o tratamento posterior.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação começa expondo no Capítulo 2 a descrição e características principais dos instrumentos musicais a serem estudados, a quena, flauta doce e escaleta. No Capítulo 3, apresentam-se os principais conceitos para entendimento da metodologia proposta. São abordados principalmente os conceitos da Transformada Wavelet Discreta (DWT), o modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico, a Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT), a Transformada Cosseno Discreta Modificada (MDCT) e o atributo proposto denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica*. No Capítulo 4 apresentam-se as diretrizes de resolução do problema de caracterização e comparação do som da quena com base no *Expoente Hurst de Banda Harmônica*. São detalhados a extração do banco de dados de som, o projeto do banco de filtros MDCT e DWT, o projeto das etapas de análise e síntese da Transformada Wavelet de Banda Harmônica HBWT e o cálculo do *Expoente Hurst de Banda Harmônica*. No Capítulo 5, são apresentados os resultados alcançados na caracterização da quena e a análise comparativa com o som da flauta doce e escaleta em termos do *Expoente Hurst de Banda Harmônica*. No Capítulo 6, são expostas as conclusões e trabalhos futuros.

2 INSTRUMENTOS MUSICAIS DE SOPRO

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos e definições a serem trabalhados no estudo dos instrumentos musicais de sopro quena, flauta doce e escaleta.

2.1 Instrumentos de sopro

Um instrumento de sopro é um instrumento musical conformado por um ressonador dentro do qual vibra uma coluna de ar (entra em ressonância) com o sopro providenciado pelo músico executante sobre uma embocadura no final do ressonador. O ressonador é usualmente um tubo. Como na maioria dos instrumentos baseados em ressonância da coluna de ar, o espectro destes instrumentos é predominantemente harmônico. O instrumento foco da análise é a quena. Adicionalmente, os instrumentos flauta doce e escaleta são aproveitados na comparação¹.

2.1.1 Características do padrão sonoro

As características do padrão sonoro de um instrumento dependem de vários fatores tais como sua constituição física, mecanismo de acionamento, articulação, frequência das notas nas diferentes oitavas, intensidade e duração das mesmas. A abordagem deste estudo foca-se na análise dos componentes de frequência ou espectrais. É importante observar que é na fase de *sustentação* do sinal que se torna mais apropriado falar em análise espectral. No regime espectral, o som de um instrumento musical está constituído pelos seguintes três componentes:

1. **Frequência fundamental:** É a frequência mais baixa produzida pela forma de onda de um instrumento musical tal que as frequências dominantes ou harmônicos podem ser expressos como múltiplos desta frequência. A frequência fundamental é a principal responsável na percepção da *altura* do som. A frequência fundamental é o primeiro harmônico do espectro denotado por f_0 . As vezes denota-se também por f_1 , sendo que o subíndice indica o harmônico de primeira ordem.
2. **Harmônicos:** São os múltiplos inteiros da frequência fundamental. Denotam-se por f_k , onde k é o índice do harmônico ($f_2 = 2f_0, f_3 = 3f_0, f_4 = 4f_0, \dots$).
3. **Ruído:** O ruído característico é inerente ao mecanismo de produção do instrumento. Ele representa um componente importante dentro de todo o conjunto sonoro e sua contribuição conforma a característica natural do instrumento. No caso dos instrumentos de corda

¹ Um detalhe em comum entre a quena, flauta doce e escaleta é que os três são instrumentos musicais de uso didático nas escolas para o ensino e aprendizado musical.

como o violino, o ruído do arco pode ser percebido sempre. No caso dos instrumentos de sopro como a quena, o ruído de sopro é sempre distinguível. Como tem-se demonstrado nos experimentos com síntese eletrônica de som, os instrumentos não podem ser emulados satisfatoriamente somente com o espectro dos harmônicos (MEYER, 2009).

2.2 Quena

A *quena* é um instrumento aerófono do tipo flauta, oriundo das culturas pre-incas que ocuparam o território do antigo Peru. Flautas antecessoras, cuja antiguidade calcula-se em 2500 anos a.C., foram achadas no interior de um complexo arquitetônico na *Cidade Sagrada de Caral-Supe*, localizada a 182 km ao norte de Lima, Peru². De acordo com a categorização de instrumentos musicais de Hornbostel e Sachs (1961), a quena corresponde ao código 421.111.12: instrumento de sopro, com sopro em aresta ou flauta, sem canal de insuflação, longitudinal, isolado, aberto e com orifícios.

2.2.0.1 Características físicas

A quena é constituída por um tubo de diâmetro interno menor que 20 milímetros com um comprimento que varia entre 37 a 40 centímetros. A afinação mais popular é a de *Sol maior*, composta pelo conjunto de notas musicais *sol, lá, si, dó, re, mi e fá suspenido* ou equivalentemente em cifras *G4, A4, B4, C5, D5, E5, F#5* das notas correspondentes à escala temperada equalizada ($A4 = 440 \text{ Hz}$)³. Sete orifícios tonais distribuídos ao longo do tubo controlam a produção das notas, seis dispostos na direção do extremo da embocadura e um orifício posterior, situado em direção oposta para controle da oitava (Fig. 1). Sobre o material de fabricação, hoje em dia utiliza-se principalmente madeira ou cana (bambu). Antigamente, as quenens pertencentes às culturas pré-incas do Peru foram fabricadas de metal, cana, barro, osso de veado ou de pelicano (SHADY *et al.*, 2000). A diferença de outro tipo de flautas, o carácter distintivo da quena é sua embocadura, a qual não apresenta canal de insuflação (sem bico) e tem forma de unha ou letra *U*. Existem também outras embocaduras menos utilizadas em forma de letra *V* e quadrangulares.

2.3 Flauta doce

A flauta doce é um instrumento de sopro descendente de uma família muito antiga de instrumentos denominados *flautas de duto interno*. A diferença da quena, a flauta doce apresenta um duto ou canal de insuflação que forma parte do tubo ressonador. A flauta doce

² SHADY, R. *et al.* Las flautas de Caral-Supe: aproximaciones al estudio acústico-arqueológico del conjunto de flautas más antiguo de América. **Boletín del Museo de Arqueología y Antropología de la UNMSM**, v. 3, n. 11, p. 2–9, 2000.

³ SUITS, B. **Physics of music - notes**. 1998. Disponível em: <<http://www.phy.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

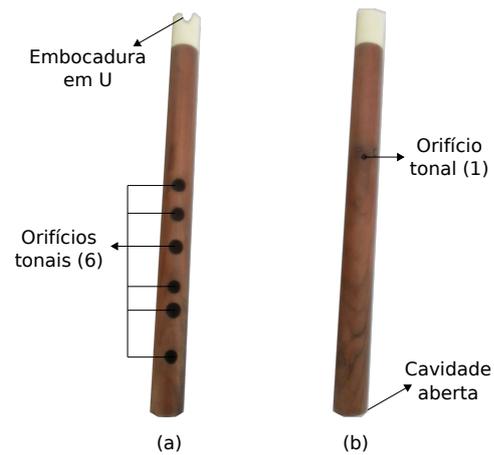


Figura 1 – Quena peruana de madeira. (a) Vista anterior. (b) Vista posterior.

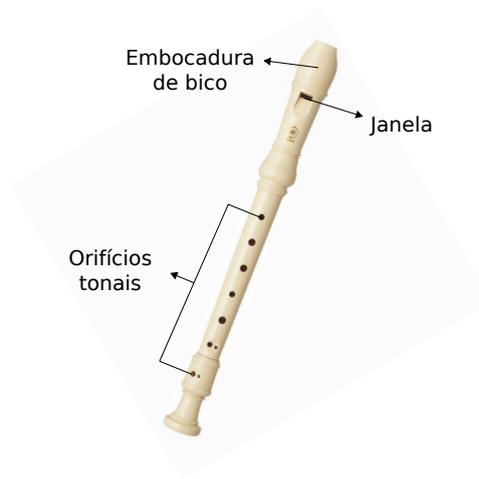


Figura 2 – Flauta doce soprano.

corresponde ao código 421.221.12 da classificação de Hornbostel-Sachs: instrumento de sopro, flauta, com duto (canal de insuflação), duto interno (dentro do tubo), aberto e com orifícios. Existem vários tipos de flautas, a flauta alto, a flauta soprano, a flauta baixo, flautim e outros tipos. Vamos nos ater ao tipo de flauta doce soprano, a mais popular.

2.4 Escaleta

A escaleta, também conhecida como melódica, é um instrumento aerófono de palhetas livres. A escaleta corresponde ao código 412.132 da classificação de Hornbostel e Sachs (1961): aerófono, idiofônico de interrupção ou de palheta, conjunto de palhetas livres vibrantes e sem orifícios. Um instrumento idiofônico é aquele que produz som por vibração própria, sem cordas ou membranas. No caso da escaleta, o ar sofre interrupções periódicas pela vibração das palhetas accionadas, motivo pelo qual é considerado um instrumento idiofônico de interrupção.



Figura 3 – Escaleta.

2.5 Conclusão

Foram apresentadas as principais características do padrão sonoro da quena e outros dos instrumentos musicais da categoria de sopro, a flauta doce e a escaleta. A flauta doce é um instrumento que apresenta maior semelhança na classificação com a quena, enquanto a escaleta é mais diferenciada pelo sistema de palhetas livres. Essas semelhanças e diferenças são aproveitadas para estabelecer a comparação da flauta doce e escaleta com a quena e avaliar o impacto desta escolha na metodologia e resultados desenvolvidos nos capítulos 4 e 5, respectivamente. No próximo capítulo, detalham-se os conceitos teóricos mais importantes que favorecem a compreensão do método proposto.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo elabora-se uma revisão resumida dos principais conceitos e resultados teóricos que envolvem a Transformada Wavelet de Banda Harmônica e o modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico, duas ferramentas de suporte na representação de sinais musicais. O desenvolvimento teórico completo dos conceitos expostos encontra-se fora do alcance deste trabalho. Para tal finalidade, sugere-se a revisão das obras independentes de Polotti (2003), Wornell (1993), Vaidyanathan (1993), Daubechies (1992), Malvar (1992). A partir da Transformada Wavelet de Banda Harmônica propõe-se no próximo capítulo uma metodologia para descrição e análise do som da quena e outros instrumentos musicais de sopro.

3.1 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet Discreta ou DWT (do inglês *Discrete Wavelet Transform*) é uma ferramenta amplamente utilizada em análise e processamento de áudio. Duas características que justificam sua aplicação sua *invariância à escala*, característica compartilhada pelos sinais fractais (e.g. sinais dos instrumentos musicais) e a *reconstrução perfeita* que favorece a síntese de sinais sem distorção criada na transformação.

A transformada WT fornece uma representação bidimensional *tempo-escala* de sinais que resulta ser uma evolução da análise puramente em frequência da Transformada de Fourier. Dado que o tempo e a escala (frequência) são variáveis conjugadas, a DWT obedece ao princípio da incerteza ou limite de Gabor da Eq. 3.1 (PAPOULIS, 1962).

$$\Delta\omega \cdot \Delta t \geq 0.5 \quad (3.1)$$

De acordo como este princípio, não é possível obter arbitrariamente e em simultâneo resoluções altas de frequência ($\Delta\omega$) e de tempo (Δt).

A Transformada Wavelet atua de forma análoga a um microscópio, focando-se em fenômenos de tempo cada vez menores à medida que diminui-se a escala. O conceito de escala é muito importante na teoria wavelet e está intrinsecamente relacionado com os sistemas de percepção auditiva e visual humanos. O escalamento wavelet está representado por operações de contração e expansão no domínio da função. Este tipo de análise wavelet é denominado de multi-resolução e tem como particularidade que o produto $\Delta\omega \cdot \Delta t$ é invariante à escala e ao deslocamento no tempo. O plano tempo-frequência é subdividido de forma logarítmica no eixo de frequência e de tempo em escalas diferentes imitando as bandas logarítmicas de frequência da cóclea dentro do Sistema Auditivo Periférico. Como aprecia-se na representação da Fig. 4, nas frequências baixas obtêm-se maior detalhe de localização com uma aproximação mais grosseira

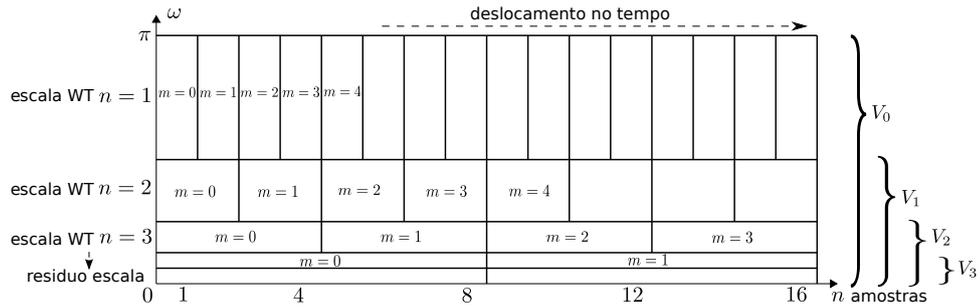


Figura 4 – Divisão do plano tempo-frequência da Transformada Wavelet Discreta ordinária. A taxa de amostragem divide-se por dois a cada escala.

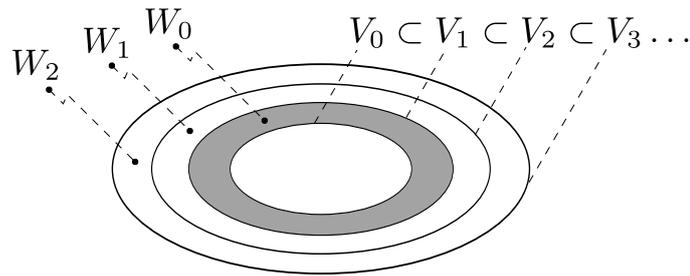


Figura 5 – Diagrama dos espaços de aproximação V_j e subespaços W_j .

de tempo, no entanto nas frequências altas obtêm-se maior detalhe de localização temporal em detrimento da resolução em frequência.

Uma função qualquer $x(t) \in L^2$ pode ser expressa por uma base apropriada de funções do seguinte tipo:

$$x(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{j_0}(k) \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{j=0}^{\infty} d_j(k) \psi_{j,k}(t), \quad (3.2)$$

Nesta fórmula, j_0 define uma escala de aproximação “mais grosseira” cujo espaço é descrito pelas funções $\phi_{j_0,k}(t)$. Para cada valor j , as funções $\psi_{j_0,k}(t)$ descrevem diferentes níveis de detalhe do sinal. Maiores valores de j correspondem a maiores graus de resolução. Os coeficientes $c_{j_0,k}$ e $d_{j,k}$ são chamados de *Transformada Wavelet Discreta* (DWT) do sinal $x(t)$.

Sendo V_j o espaço descrito pelo conjunto de funções:

$$\phi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}, \quad (3.3)$$

uma maneira interessante de descrever um sinal é por meio de um subespaço *diferença* entre dois sub-espacos consecutivos V_j e V_{j+1} (ver Fig. 5). Seja W_j este espaço, descrito pelo seguinte conjunto de funções, chamadas de wavelets:

$$\psi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.4)$$

Por conveniência, impõe-se que este conjunto seja ortogonal ao conjunto de funções da expressão 3.3, isto é:

$$\int \phi(2^j t - k_1) \psi(2^j t - k_2) dt = 0 \quad (3.5)$$

para todos os valores inteiros de j , k_1 e k_2 .

As funções de base $\phi(t)$ e $\psi(t)$ satisfazem as seguintes condições:

$$\phi(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} h(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad (3.6)$$

$$\psi(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} g(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad (3.7)$$

A partir desta e das condições anteriores de ortogonalidade e da definição dos subespaços *diferença*, é possível mostrar que os coeficientes g devem ser:

$$g(n) = (-1)^n h(1 - n) \quad (3.8)$$

No caso em que o número de coeficientes h é finito, e par (igual a N) pode-se ter:

$$g(n) = (-1)^n h(N - 1 - n) \quad (3.9)$$

A partir da ortogonalidade e das equações fundamentais 3.6 e 3.7 é possível mostrar que:

$$c_j(k) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} h(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (3.10)$$

$$d_j(k) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} g(m - 2k) c_{j+1}(m), \quad (3.11)$$

onde $c_j(k)$ e $d_j(k)$ são os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta.

Portanto é possível ver os coeficientes da aproximação de nível j como o resultado de uma filtragem realizada sobre os coeficientes de aproximação do nível $j + 1$ seguida de uma dizimação conforme a árvore de decomposição da Fig. 6.

Computacionalmente, a análise wavelet calcula-se sobre um número finito de níveis de escala (ver Fig. 6). Em cada escala, o componente de sinal residual corresponde à banda passa-baixa residual. Dado que a largura de banda do componente residual reduz-se à metade em cada escala, é possível também reduzir a taxa de amostragem em fator de 2. Este último comportamento é conhecido como *amostragem crítica* e pertence ao tipo de análise denominado

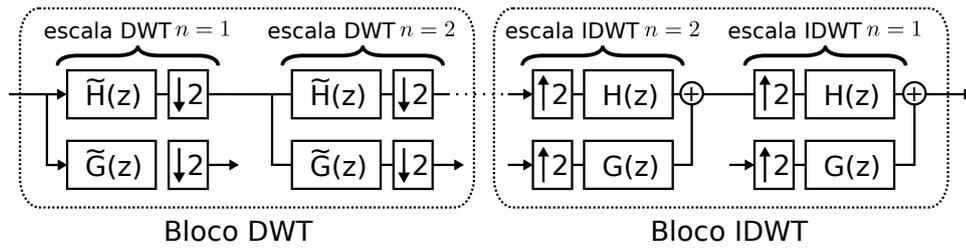


Figura 6 – Diagrama de implementação da Transformada Wavelet Discreta (DWT) com dois níveis de escala e a transformada inversa (IDWT).

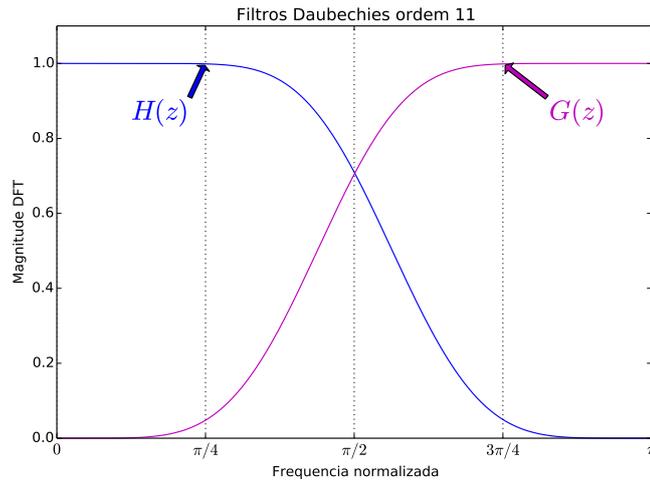


Figura 7 – Resposta em frequência de um par de filtros QMF do tipo Daubechies de ordem 11 (DAUBECHIES, 1992).

análise multi-taxa (os coeficientes wavelet em cada escala obtêm-se com taxas diferentes). Na geração wavelet mais comum ou diádica utiliza-se um par de filtros Espelho em Quadratura ou QMF (do inglês *Quadrature Mirror Filters*) denominados $H(z)$ e $G(z)$ (ver Fig. 7). Ambos filtros constituem um sistema de *reconstrução perfeita* com $\hat{x}(k) = cx(k - k_0)$ para $c \neq 0$, onde $x(k)$ é o sinal de entrada, $\hat{x}(k)$ o sinal reconstruído, c uma constante não nula e k_0 é um atraso. A característica de reconstrução perfeita implica que após a expansão wavelet é sempre possível recuperar integralmente o sinal original. Um dos requisitos para obter a reconstrução perfeita é satisfazer a condição de complementariedade em potência da Eq. 3.12 (VAIDYANATHAN, 1993):

$$|H(\omega)|^2 + |G(\omega)|^2 = 1, \quad \text{para todo } \omega \quad (3.12)$$

O filtro $G(\omega)$ implementa a projeção do sinal nos espaços W_n (espaço de detalhes) nas diferentes escalas n , enquanto o filtro $H(\omega)$ implementa a projeção do sinal nos espaços V_n (espaço de aproximação).

3.2 Expoente Hurst

O Expoente Hurst, denotado por H , é uma medida do grau de autossimilaridade de um sinal. Um processo aleatório $x(t)$ para $-\infty < t < +\infty$ é dito *estatisticamente autossimilar* se suas estatísticas são invariantes a dilatações e compressões da forma de onda no tempo. De forma intuitiva, este é o nexó com as propriedades da análise de multi-resolução da Transformada Wavelet. Especificamente, um processo aleatório $x(t)$ é estatisticamente autossimilar com Expoente de Hurst H , para $0 < H < 1$ e $H \in \mathbb{R}$, se para qualquer real $a > 0$ obedece à relação de escalamento (WORNELL, 1993):

$$x(t) \stackrel{E}{=} a^{-H} x(at), \quad (3.13)$$

onde $\stackrel{E}{=}$ denota identidade no sentido estatístico.

3.3 Modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico

Define-se periodicidade para um sinal $f(t)$ no tempo t se $\forall t, \exists T \in t : f(t) = f(t + T)$. Então diz-se que $f(t)$ é periódica com período T . Em termos de Fourier, isso significa que o espectro apresenta picos harmônicos separados a intervalos constantes de frequência (Fig. 8). Uma característica dos sinais dos instrumentos musicais melódicos é a *pseudo-periodicidade* o que remete-se à repetição apenas aproximadamente constante do período T . A pseudo-periodicidade dos sinais musicais foi anteriormente estudada nos trabalhos de Serra e Smith (1990) e posteriormente acrescentada em Polotti (2003), quem formalizou o *modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico* para a representação deste tipo de sinais presentes na música. O modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico foi criado com base na evidência experimental de que os harmônicos dos sinais de som apresentam um comportamento aproximadamente de ruído $1/f$. De modo resumido, os sinais de ruído $1/f$ pseudo-periódicos são sinais cujo espectro de potência apresenta picos harmônicos com bandas laterais de comportamento $1/|f - f_k|$, onde f_k é a frequência do k -ésimo harmônico conforme ilustrado na Fig. 8.

O espectro dos sinais dos instrumentos musicais como a quena, flauta doce e escaleta caracteriza-se pela presença de picos de frequência correspondentes às parciais, cuja forma está condicionada por flutuações estocásticas em torno do comportamento puramente harmônico (ver Fig. 9). Estas flutuações são intrínsecas ao som dos instrumentos musicais e trazem uma contribuição importante na percepção do timbre (MEYER, 2009). Em Polotti (2003), demonstra-se que as flutuações presentes nas bandas laterais dos harmônicos apresentam um comportamento aproximadamente de ruído $1/f$. Esta similaridade pode ser observada pela comparação das Figs. 8 e 9.

O ruído $1/f$ é um processo aleatório estatisticamente autossimilar definido geralmente como um processo cujo espectro de potência médio obedece a uma lei de potência do

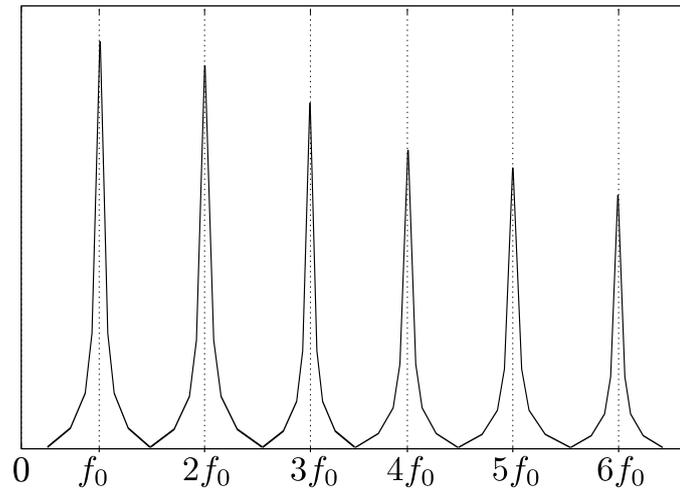


Figura 8 – Forma espectral do decaimento $1/|f - f_k|$ das bandas ruidosas entre os harmônicos f_k , com k o índice do harmônico.

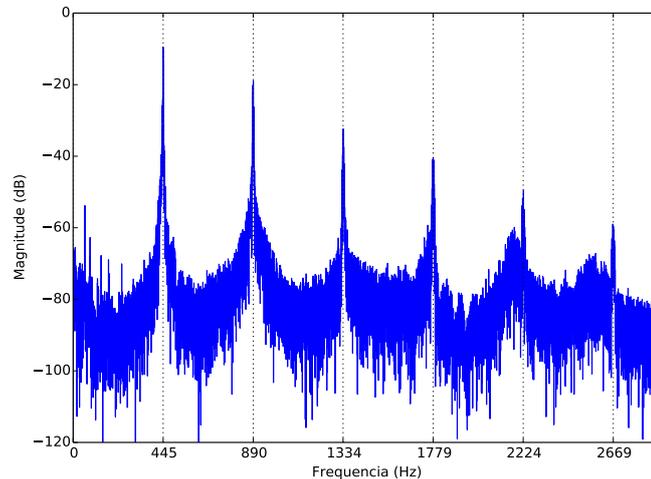


Figura 9 – Seis primeiros harmônicos da nota A4 na quena ($f_0 = 444.6$ Hz).

tipo (WORNELL, 1993):

$$\bar{S}(\omega) \sim \frac{c}{|\omega|^\gamma}, \quad (3.14)$$

onde ω é a frequência, $c \neq 0$ é uma constante não nula, e γ é um parâmetro denominado expoente espectral. A um nível intuitivo pode-se considerar domínio do tempo ao ruído $1/f$ como um processo não estacionário cujos incrementos são estacionários, o que corresponde a dizer no domínio da frequência que o ruído $1/f$ é um processo estocástico que resulta estacionário quando filtrado por meio de um filtro passa-faixa ideal. A caracterização e definição mais detalhada do ruído $1/f$ no domínio da frequência encontra-se em Polotti (2003).

Curiosamente, existe uma relação simples entre o Expoente Hurst H e expoente

espectral γ (WORNELL, 1993):

$$\gamma = 2H + 1 \quad (3.15)$$

O comportamento $1/f$ dos sinais de som dos instrumentos musicais é modelado na prática (POLOTTI, 2003) como ruído fracionário Browniano ou fBm (do inglês *fractional Brownian motion*). O ruído fBm fornece um modelo útil na construção de sinais do tipo $1/f$ (WORNELL, 1993; MANDELBROT, 1983). O ruído fBm apresenta expoente espectral $1 < \gamma < 3$ que corresponde a um valor de Expoente Hurst de $0 < H < 1$ (WORNELL, 1993). Teoricamente, a dimensão fractal D de um processo fBm (dimensão de Hausdorff-Besicovitch) é uma outra medida da autossimilaridade e está relacionada com o Exponente Hurst H mediante a Eq. 3.16 (WORNELL, 1993).

$$D = 2 - H \quad (3.16)$$

3.4 Transformada Wavelet e o ruído $1/f$

As wavelets diádicas compartilham características similares de invariância à escala com sinais $1/f$. A wavelet diádica caracteriza-se por ter funções wavelet similares nas diferentes escalas (invariância à escala) originando uma divisão do eixo de frequência em oitavas (ver Fig. 10). Por outro lado, os sinais de ruído $1/f$ apresentam espectro com decaimento exponencial cuja energia de oitava em oitava é constante. Este comportamento é denominado *fractal* (ver Fig. 11). Relacionando ambas características, é possível modelar o espectro de sinais $1/f$ mediante a superposição wavelet apropriada. O fator de escalamento das bandas wavelet, isto é, a inclinação $1/f$ será determinada pela energia dos coeficientes da decomposição wavelet.

Em Polotti (2003), demonstra-se que o espectro médio de um sinal de ruído $1/f$ convencional sintetizado mediante um banco de filtros wavelet é:

$$\bar{S}_N(\omega) = \sigma^2 \sum_{n=1}^N 2^{n\gamma} |\Psi_{n,0}(\omega)|^2 + 2^{N\gamma} |\Phi_{N,0}(\omega)|^2, \quad (3.17)$$

onde $\Psi_{n,0}(\omega)$ é a Transformada de Fourier da função wavelet, $\Phi_{N,0}(\omega)$ é a Transformada de Fourier da função de escala, γ é o parâmetro que controla a inclinação do espectro $1/f$ e σ é o parâmetro que controla a energia total. Dado que $|\Psi_{n,0}(\omega)|^2$ e $|\Phi_{N,0}(\omega)|^2$ são invariantes ao deslocamento no tempo, o subíndice m é colocado em zero arbitrariamente. Como se observa na Fig. 10, o espectro da Eq. 3.17 representa uma aproximação da curva $1/f$ por escalas wavelet. A energia de cada escala é controlada somente pelos parâmetros σ e γ mediante o fator $\sigma^2 2^{n\gamma}$. No caso da extensão periódica do modelo de ruído $1/f$ (Eq. 3.18), a informação das bandas laterais dos harmônicos armazena-se na energia dos coeficientes da decomposição wavelet. O

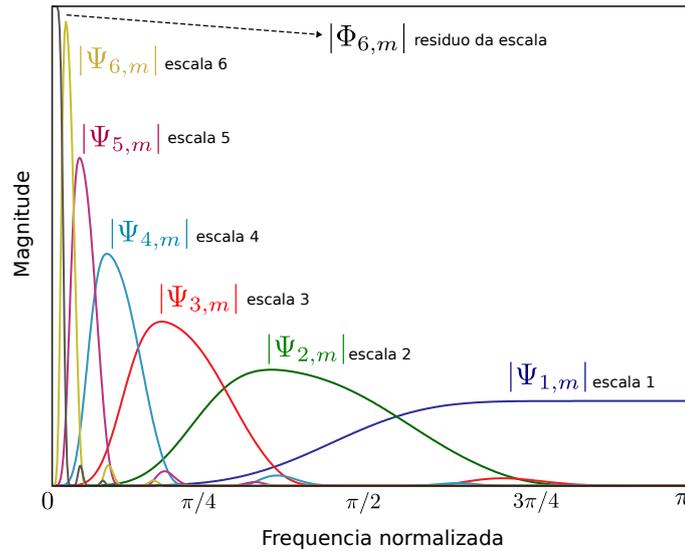


Figura 10 – Espectro da Transformada Wavelet Discreta DWT com seis níveis.

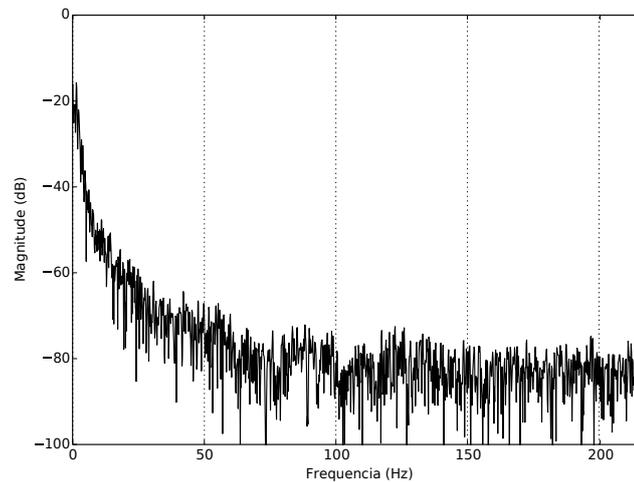


Figura 11 – Espectro de um sinal de ruído $1/f$. Observa-se o decaimento exponencial característico.

valor da energia das bandas laterais será utilizado como proposta de descrição de sinais musicais mediante o parâmetro denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica* descrito no capítulo seguinte.

3.5 Transformada Wavelet de Banda Harmônica

A Transformada Wavelet de Banda Harmônica ou HBWT (do inglês *Harmonic Band Wavelet Transform*) é uma versão periódica em frequência da Transformada Wavelet comum (ver Fig. 12). Na representação wavelet habitual, as escalas wavelet maiores (correspondentes às frequências baixas) representam as mudanças suaves em relação ao valor médio do sinal (zero no caso de áudio) e as escalas wavelet menores (frequências altas) representam

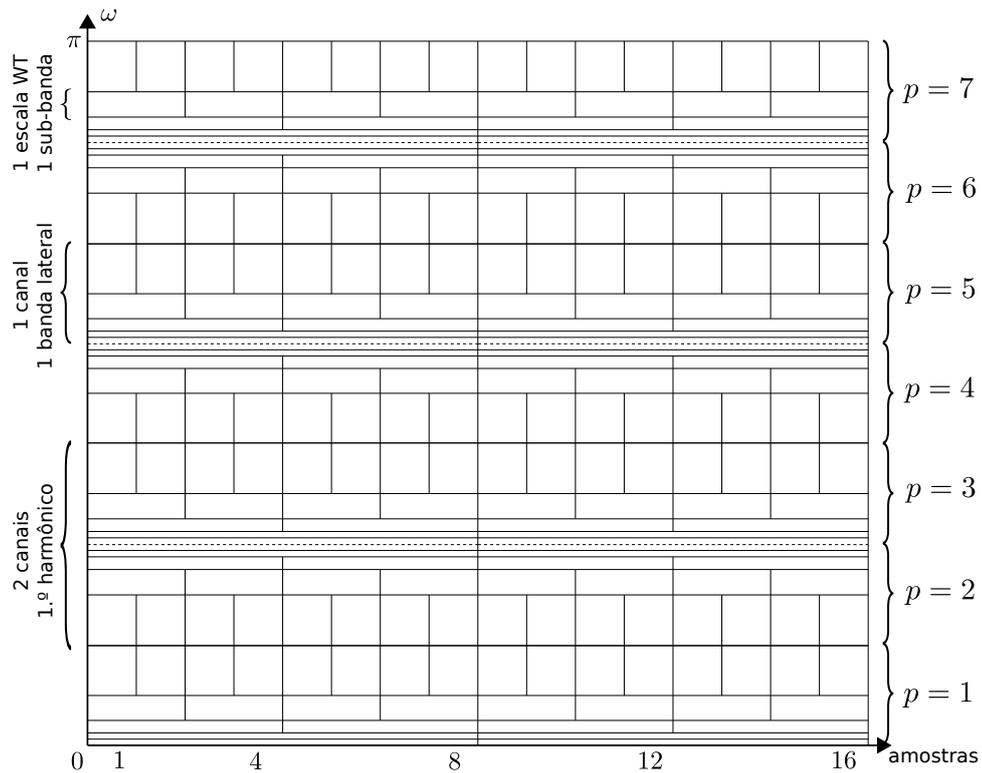


Figura 12 – Divisão do plano tempo-frequência da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. Esta divisão é uma versão periódica da Fig. 4. O número de períodos corresponde ao número de de filtros passa-faixa (isto é, o número de canais MDCT) que capturam as bandas laterais denotadas por p .

as mudanças em relação às médias locais segundo a escala correspondente. Na representação HBWT, as escalas maiores correspondem às formas de onda média dos harmônicos e as escalas menores, mais afastadas dos harmônicos, contêm a informação correspondente às flutuações em relação à forma de onda média da escala correspondente.

A transformada HBWT está sintonizada com o período médio do sinal. Graças a esta adaptação, aprimora-se a resolução em oitavas da Transformada Wavelet diádica original para o processamento de sinais musicais. O som é representado em dois componentes, o componente *determinístico* e o *estocástico*. O componente determinístico representa o comportamento puramente harmônico do sinal e outorga o *timbre global* do som. O componente estocástico representa o ruído do sinal, isto é, as microflutuações respeito do comportamento puramente periódico (componente determinístico) que inclui o ruído produzido pelo sistema físico de excitação do instrumento. A HWBT caracteriza-se especialmente pela representação fidedigna do componente sonoro cujo espectro recai fora do suporte de frequência dos harmônicos. A ideia principal do método HBWT é que as microflutuações respeito do comportamento puramente determinístico podem-se reconstruir a partir do espectro de potência.

O ponto de partida da HBWT é a evidência experimental de que o espectro de frequência dos instrumentos musicais que apresentam altura definida, como o caso da quena e

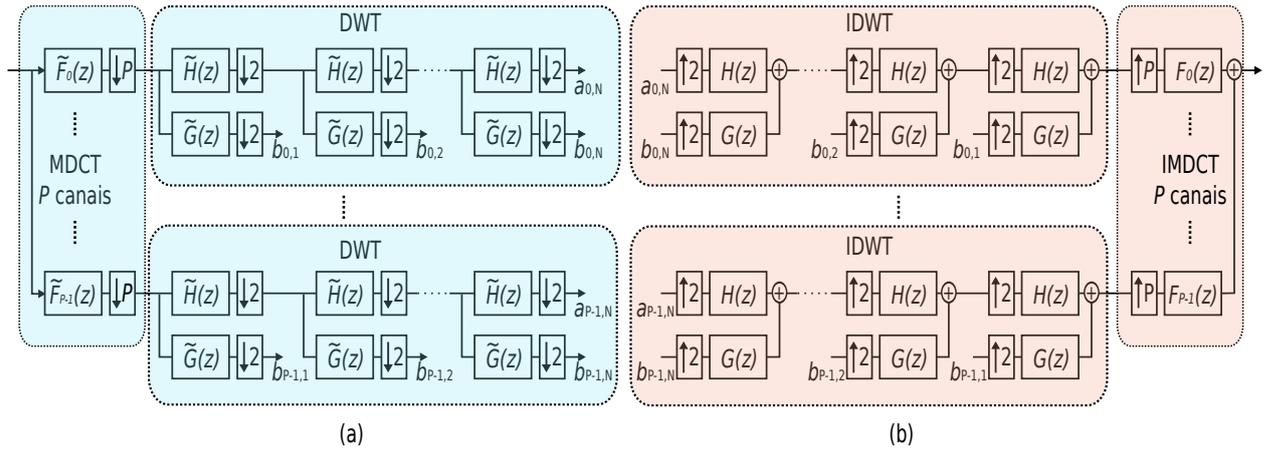


Figura 13 – Estrutura de implementação da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Bloco de análise. (b) Bloco de síntese.

os instrumentos de sopro, está conformado por picos de parciais harmônicos cujas bandas laterais tem comportamento do tipo $1/f$ aproximadamente. Partindo deste pressuposto, define-se o método de análise/síntese baseado na Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT).

A estrutura de análise da HBWT implementou-se por meio de um banco de filtros MDCT com P canais seguido de P bancos da Transformada Wavelet Discreta DWT (ver Fig. 13a). Os benefícios de usar a MDCT, além de sua rápida e eficiente implementação computacional, são conseguir a *sintonização da análise DWT aos harmônicos do sinal* e também aproveitar sua característica de *reconstrução perfeita*. O número de canais P da MDCT está sintonizado com o período médio do sinal de som em número de amostras. Cada filtro do banco MDCT é do tipo passa-faixa e separa uma banda lateral do harmônico. As saídas do banco foram dizi-madas em fator P dado que a largura de banda dos sinais é π/P . Em seguida, as saídas foram decompostas pelos bancos wavelet DWT. Na Fig. 12, os coeficientes da decomposição HBWT no deslocamento multi-taxa m são representados pelas caixas em preto de canal em canal (bandas laterais p) e de escala wavelet em escala wavelet (sub-bandas n). A reconstrução do sinal implementou-se na etapa de síntese pelos blocos das transformadas inversas IDWT (reconstrução das sub-bandas) e IMDCT (reconstrução das bandas laterais) que formam em conjunto um sistema de reconstrução perfeita (ver Fig. 13b).

Os resultados obtidos na síntese do modelo de ruído $1/f$ mediante a DWT tradicional (Eq. 3.17), estendem-se para o modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico mediante a HBWT. Assim, o espectro médio de um sinal $1/f$ pseudo-periódico resultante da síntese HBWT é:

$$\bar{S}_N(\omega) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sigma_p^2 |G_{p,0}(\omega)|^2 \left(\sum_{n=1}^N 2^{n\gamma_p} |\Psi_{n,0}(P\omega)|^2 + 2^{N\gamma_p} |\Phi_{N,0}(P\omega)|^2 \right), \quad (3.18)$$

onde $G_{p,0}(\omega)$ é a resposta em frequência do p -ésimo filtro do banco de filtros de P canais,

$\Psi_{n,0}(P\omega)$ é a Transformada de Fourier da versão sobre-amostrada da função wavelet na escala n e $\Phi_{N,0}(P\omega)$ é a Transformada de Fourier da versão sobre-amostrada da função de escala residual. Cada banda lateral é caracterizada pelos parâmetros σ_p e γ_p da Eq. 3.18, que é uma versão periódica da Eq. 3.17. O primeiro parâmetro σ_p controla a energia da banda lateral e o segundo parâmetro γ_p controla a energia de cada sub-banda p , o que define a forma da inclinação $1/f$. Por meio desta representação simplificada do espectro dos sinais musicais desenvolveu-se um descritor de som denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica* (vide seção 3.5.2), baseado no modelo do ruído $1/f$ pseudo-periódico de Polotti (2003) e que caracteriza a energia das sub-bandas ruidosas do sinal.

3.5.1 Transformada Cosseno Discreta Modificada

A Transformada Cosseno Discreta Modificada ou MDCT (do inglês *Modified Discrete Cosine Transform*) é uma versão modificada da Transformada Cosseno Discreta ou DCT (do inglês *Discrete Cosine Transform*). A modificação é realizada, geralmente, na fase das componentes cossenoidais de acordo com a teoria de Cancelamento de Superposição no Domínio do Tempo ou TDAC (do inglês *Time-Domaining Aliasing Cancellation*). A transformada MDCT está conformada por um banco de filtros do tipo cosseno modulado. Os filtros MDCT são do tipo passa-faixa, denotados por $\tilde{F}_p(z)$ ($p = 0, \dots, P-1$ é o índice do canal) e têm a função de decompor as bandas laterais do harmônico correspondente. O nexa da MDCT com o sinal acontece através do período médio P . Os canais MDCT sintonizam-se com a frequência dos harmônicos $f_k = k/T_P$ Hz, onde $k = 1, 2, \dots, \lfloor (P-1)/2 \rfloor$ é o índice do harmônico, $T_P = P/f_s$ é o período médio do sinal (em segundos), P o número de canais MDCT igual ao período médio do sinal (em número de amostras) e $f_s = 44.1$ kHz a taxa de amostragem. Assim, o k -ésimo harmônico é decomposto em duas bandas laterais representadas pelo par de filtros correspondentes aos canais $p = 2k-1$ (banda lateral esquerda) e $p = 2k$ (banda lateral direita). Na Fig. 14, observa-se a sintonização dos canais $p = 1, 2, \dots, 6$ da MDCT com os três primeiros harmônicos para um sinal de quena com período médio $P = 99$ amostras e frequência fundamental $f_0 = 444$ Hz. Por sua vez, as saídas do banco MDCT são dizimadas em fator P sem ocasionar distorção por superposição (*aliasing*), dada a largura de banda dos sinais ser igual à metade da frequência fundamental, isto é $\Delta\omega = \omega_0/2 = \pi/T_P$ radianos ou, equivalentemente $\Delta f = 1/2T_P$ Hz¹. O banco de filtros MDCT implementa-se mediante bases cosseno modulado tipo IV (MALVAR, 1992).

$$g_{p,r}(k) = g_{p,0}(k-rP) \quad p = 0, \dots, P-1 \quad r \in \mathbb{Z} \quad (3.19)$$

$$g_{p,0}(k) = w(k) \cos \left[\left(k + \frac{P+1}{2} \right) \left(p + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{P} \right] \quad (3.20)$$

¹ A largura de banda determina-se pela queda de -3 dB do lóbulo principal da resposta em frequência do filtro.

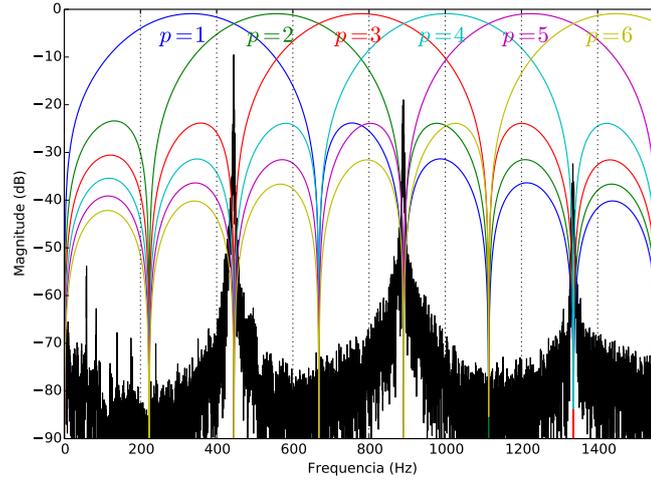


Figura 14 – Três primeiros harmônicos de um som de quena de frequência $f_0 = 444$ Hz ($P = 99$) alinhados com os canais $p = 1, \dots, 6$ da MDCT.

A janela senoidal $w(k)$ satisfaz as condições de simetria requeridas (NGUYEN; KOILPILLAI, 1996).

$$w(k) = \sin \left[\left(k + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{2P} \right] \quad (3.21)$$

$$w(k) = w(2P - k - 1) \quad \text{para } k = 0, \dots, 2P - 1 \quad (3.22)$$

$$w^2(k) + w^2(P - k - 1) = 2 \quad \text{para } k = 0, \dots, P - 1 \quad (3.23)$$

$$w(k) = 0 \quad \text{para } k < 0, k > 2P - 1 \quad (3.24)$$

3.5.2 Expoente Hurst de Banda Harmônica

A principal vantagem do modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico é que somente dois parâmetros por harmônico σ_p^2 e γ_p são necessários para descrever o comportamento completo de um sinal de áudio. Estes parâmetros controlam a amplitude e inclinação da curva $1/f$ das bandas laterais ruidosas dos harmônicos no espectro de potência.

Define-se a Transformada Wavelet de Banda Harmônica de Tempo Discreto ou DT-HBWT (do inglês *Discrete-time Harmonic Band Wavelet Transform*) como (POLOTTI, 2003):

$$\xi_{n,m,p}(k) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \psi_{n,m}(r) g_{p,r}(k) \quad (3.25)$$

$$\zeta_{N,m,p}(k) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \Phi_{N,m}(r) g_{p,r}(k), \quad (3.26)$$

onde $n = 1, 2, \dots, N$; $m \in \mathbb{Z}$; $p = 0, 1, \dots, P - 1$; $\psi_{n,m}$ e $\varphi_{N,m}$ são as versões de tempo discreto das funções wavelet e de escala ordinárias, respectivamente; $g_{p,r}$ são as funções de base MDCT da Eq. 3.20.

Assim, um sinal $x(k) \in l_2$ pode-se expandir na DT-HBWT de acordo a formulação seguinte:

$$x(k) = \sum_{p=1}^P \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=-\infty}^{+\infty} b_{p,n}(m) \xi_{n,m,p}(k) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_{p,N}(m) \zeta_{N,m,p}(k) \right), \quad (3.27)$$

onde $b_{p,n}(m)$ e $a_{p,N}(m)$ são ambos os coeficientes DT-HBWT de banda harmônica da expansão e de escala residuais na escala N , respectivamente.

Na *Proposição 3.4* em Polotti (2003) encontra-se o resultado das variâncias dos coeficientes da expansão DT-HBWT que decorre da energia do espectro médio do sinal $1/f$ pseudo-periódico sintético da Eq. 3.18:

$$\text{Var}\{b_{p,n}(m)\} = \sigma_p^2 2^{n\gamma_p} \quad (3.28)$$

Ao considerar o logaritmo binário da energia de cada sub-banda n em cada banda lateral p encontra-se uma relação linear para o parâmetro espectral γ_p correspondente:

$$\log_2(\text{Var}\{b_{p,n}(m)\}) = \gamma_p n + \text{const}, \quad (3.29)$$

onde $k = \lfloor \frac{p+1}{2} \rfloor$ é o k -ésimo harmônico e $b_{p,n}(m)$ são as sequências de análise das diferentes sub-bandas n da HBWT.

Extendendo o conceito do Expoente Hurst da Eq. 3.15, define-se o *Expoente Hurst de Banda Harmônica* ou H_p como medida da autossimilaridade da banda lateral harmônica p e relacionada com o parâmetro γ_p mediante a Eq. 3.30.

$$\gamma_p = 2H_p + 1 \quad (3.30)$$

Recapitulando, em sinais de áudio modelados por ruído fraccionário Browniano fBm (ruído $1/f$) o Expoente Hurst de Banda Harmônica encontra-se no intervalo $0 < H < 1$ correspondente a $1 < \gamma < 3$.

De modo análogo, define-se a *Dimensão Fractal de Banda Harmônica* D_p como extensão da Dimensão Fractal da Eq. 3.16:

$$D_p = 2 - H_p, \quad (3.31)$$

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas metodologia e os procedimentos referentes ao estudo comparativo da quena e outros dois instrumentos de sopro, a flauta doce e a escaleta. A proposta deste trabalho é o estudo e comparação do som da quena usando como critério de análise o *Expoente Hurst de Banda Harmônica*, como parâmetro de descrição sonora apresentado neste trabalho. Na comparação, estudou-se primeiro a flauta doce como instrumento com maior similaridade com a quena dentro da família de instrumentos sopro, e logo a escaleta como segundo instrumento de menor similaridade com a quena.

A base do método proposto é a técnica de decomposição de sinais musicais denominada Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT) proposta por Polotti (2003). Neste método, os sinais de som foram decompostos por meio da Transformada Wavelet de Banda Harmônica e em seguida foi computado o valor do Expoente Hurst de Banda Harmônica, denotado por H_p , a partir da regressão linear dos coeficientes da decomposição HBWT. Conforme detalhado na seção 3.5.2, este atributo representa a taxa de decaimento fractal do espectro do sinal e constitui um parâmetro relevante para caracterização do timbre musical. Na Fig. 15 aprecia-se o diagrama de blocos do método proposto e os procedimentos de cada etapa detalham-se a continuação.

4.1 Banco de dados

O procedimento iniciou-se com a criação do banco de dados de som. O banco de dados foi registrado a partir de uma sessão de gravação no estúdio musical do Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS), localizado na Universidade Estadual de Campinas em Campinas, Brasil. Como requerimento técnico para o registro das amostras utilizou-se o formato de gravação padrão denominado *Compact Disc Digital Audio* (CDDA) ou *Áudio Digital de Disco Compacto*. O formato CDDA utiliza 2 canais de áudio com taxa de amostragem 44.1 kHz e 16 bits de resolução. Para a análise as amostras convertem-se em formato de mono-canal.

Foram realizadas gravações em três instrumentos aerófonos a quena, a flauta doce soprano e a escaleta. Na execução, o músico instrumentista empregou a técnica de sopro convencional da flauta transversa de concerto com o objetivo de manter um mesmo estilo de sopro em cada tomada. É pouco provável obter uma técnica idêntica de cada vez devido às individualidades causadas pelo fator humano. No caso da quena e flautas sem canal de insuflação, o som depende em grande parte da maneira exata em que o jato produzido nos lábios do músico golpeia o fio da embocadura (FLETCHER, 1974). No caso da flauta doce e escaleta, apesar de apresentarem canal de insuflação, o que poderia reduzir o efeito anterior, é difícil para o músico produzir a mesma pressão de ar em cada sopro. É importante observar que um dos objetivos

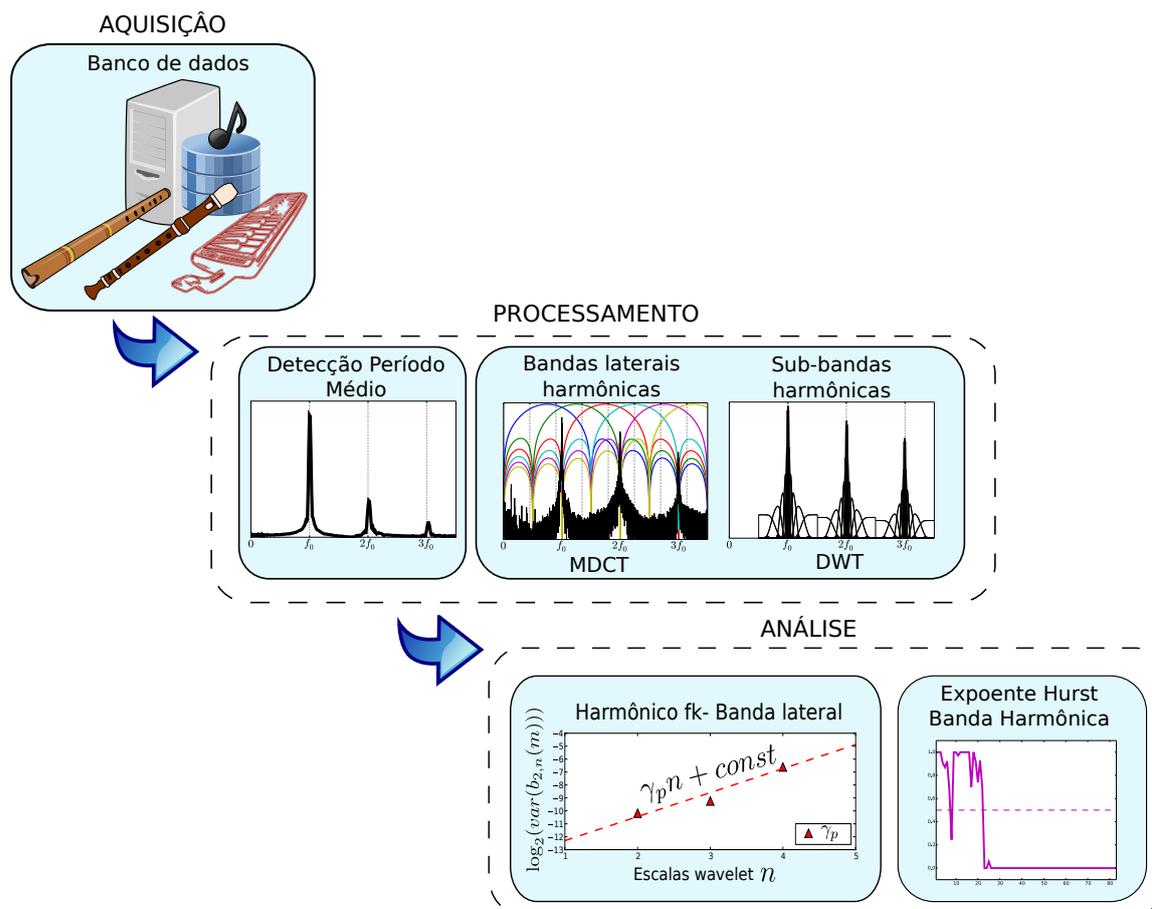


Figura 15 – Estrutura da análise e extração do Expoente Hurst de Banda Harmônica.

deste estudo visa preservar as flutuações de uma execução dos instrumentos *humanamente natural* na criação do banco de sons. Desta maneira, nas amostras não se descartam estas variáveis geradas pelo fator humano, pelo contrário elas impactam positivamente outorgando expressão e *naturalidade* ao som. Embora obviamente a indicação “mezzo-forte” não seja absolutamente precisa, podendo haver variações de intensidade em sinais produzidos por diferente músicos, assumiu-se neste trabalho que do ponto de vista perceptivo, esta indicação é suficiente para caracterizar uma classe de sinais. Os resultados de análise devem, de modo geral, ser válidos para qualquer sinal que seja percebido como pertencente à mesma classe.

Gravou-se nota por nota em cada instrumento (áudio monofônico). As notas foram produzidas com intensidade *mezzo-forte* e sem articulações associadas que não formam parte do tom estável (e.g. vibrato ou glissando). Gerou-se um banco com 27 sons em total contendo 8 sons de quena, 9 de flauta doce e 10 de escaleta. O registro de frequências é apresentado na Fig. 16 e as características do banco de dados nas Tabelas 2 e 3.

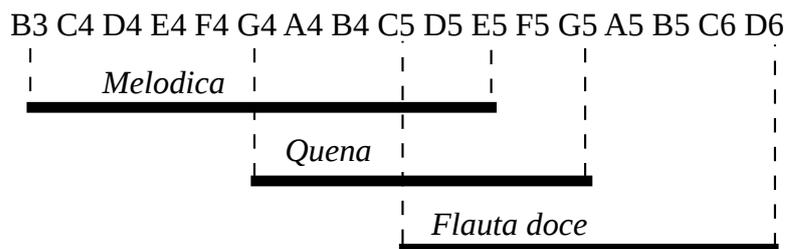


Figura 16 – Registro de frequências dos instrumentos da análise onde observa-se o solapamento entre eles.

Tabela 2 – Características do banco de dados.

| Banco de dados | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Dados | Instrumentos aerófonos |
| Instrumentos | Quena, flauta doce soprano, escaleta |
| Canal de insuflação | Flauta doce, escaleta |
| Técnica | Sopro convencional |
| Duração (s) | 1.0 |
| Intensidade | Mezzo-forte |
| Articulações | Não |
| Formato | Áudio digital CDDA |
| Codificação | LPCM |
| Canal | Monoaural |
| Taxa amostragem | 44100 Hertz |
| Resolução | 16 bits |

Fonte: (do autor, 2015)

4.2 Cálculo do período médio P

A detecção da frequência fundamental f_0 desenvolve-se por busca heurística no domínio da frequência. Dado que é um passo de pré-processamento importante em muitas técnicas de processamento de áudio, existem diversos métodos na literatura para a extração da frequência fundamental f_0 (GERHARD, 2003), entretanto está fora do propósito deste trabalho aprofundar nestas abordagens.

Em instrumentos de sopro, dado um sinal de entrada $x(k)$, o primeiro pico harmônico de menor frequência no espectro determina o valor da frequência fundamental. Calcula-se primeiro o espectro do sinal mediante a Transformada Rápida de Fourier ou FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*). Para computar uma resolução do espectro apropriada, o número de pontos práticos da FFT escolheu-se como a potência de dois maior ao tamanho do vetor do sinal de entrada $x(k)$. No caso da quena, a frequência fundamental é o harmônico que apresenta a maior energia do espectro (ver Fig. 17). Desta maneira, para obter a frequência fundamental f_0 , calculou-se por busca simples a posição correspondente ao maior valor da FFT. Logo, o período

Tabela 3 – Banco de dados de som.

| Índice | Arquivo | Instrumento | Nota | Frequência | Período médio P |
|--------|-----------------|-------------|------------------|------------|-------------------|
| 0 | mA-B3-1.wav | Escaleta | B3 | 248.99 | 177 |
| 1 | mA-B4-1.wav | Escaleta | B4 | 499.32 | 88 |
| 2 | mA-C4-1.wav | Escaleta | C4 | 263.12 | 168 |
| 3 | mA-C5-1.wav | Escaleta | C5 | 525.56 | 84 |
| 4 | mA-D4-1.wav | Escaleta | D4 | 296.09 | 149 |
| 5 | mA-D5-1.wav | Escaleta | D5 | 588.14 | 75 |
| 6 | mA-E4-1.wav | Escaleta | E4 | 333.1 | 132 |
| 7 | mA-E5-1.wav | Escaleta | E5 | 660.82 | 67 |
| 8 | mA-F4-1.wav | Escaleta | F4 | 349.93 | 126 |
| 9 | mA-G4-1.wav | Escaleta | G4 | 394.34 | 112 |
| 10 | qC-A4-1-tu.wav | Quena | A4 | 441.44 | 100 |
| 11 | qC-B4-1-tu.wav | Quena | B4 | 499.32 | 88 |
| 12 | qC-C5-2-tu.wav | Quena | C5 | 529.6 | 83 |
| 13 | qC-D5-2-tu.wav | Quena | D5 | 594.87 | 74 |
| 14 | qC-E5-1-tu.wav | Quena | E5 | 662.17 | 67 |
| 15 | qC-Fs5-1-tu.wav | Quena | F [#] 5 | 739.55 | 60 |
| 16 | qC-G4-1-tu.wav | Quena | G4 | 393.67 | 112 |
| 17 | qC-G5-1-tu.wav | Quena | G5 | 779.93 | 57 |
| 18 | rA-A5-1.wav | Flauta doce | A5 | 888.27 | 50 |
| 19 | rA-B5-1.wav | Flauta doce | B5 | 1013.44 | 44 |
| 20 | rA-C5-1.wav | Flauta doce | C5 | 526.23 | 84 |
| 21 | rA-C6-1.wav | Flauta doce | C6 | 1090.15 | 40 |
| 22 | rA-D5-1.wav | Flauta doce | D5 | 593.53 | 74 |
| 23 | rA-D6-1.wav | Flauta doce | D6 | 1226.76 | 36 |
| 24 | rA-E5-1.wav | Flauta doce | E5 | 667.55 | 66 |
| 25 | rA-F5-1.wav | Flauta doce | F5 | 717.35 | 61 |
| 26 | rA-G5-1.wav | Flauta doce | G5 | 796.75 | 55 |

Fonte: (do autor, 2015)

médio em número de amostras, denotado por P , calculou-se de acordo à Eq. 4.1.

$$P = \frac{f_s}{f_0}, \quad (4.1)$$

onde $f_s = 44100$ Hz é a taxa fixa de amostragem.

4.3 Decomposição de sinais

A decomposição dos sinais é implementada mediante a etapa de análise da Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT). Na Fig. 18 mostra-se o diagrama de blocos constituinte da análise HBWT. Como descreveu-se na seção 3.5, a HBWT está conformada

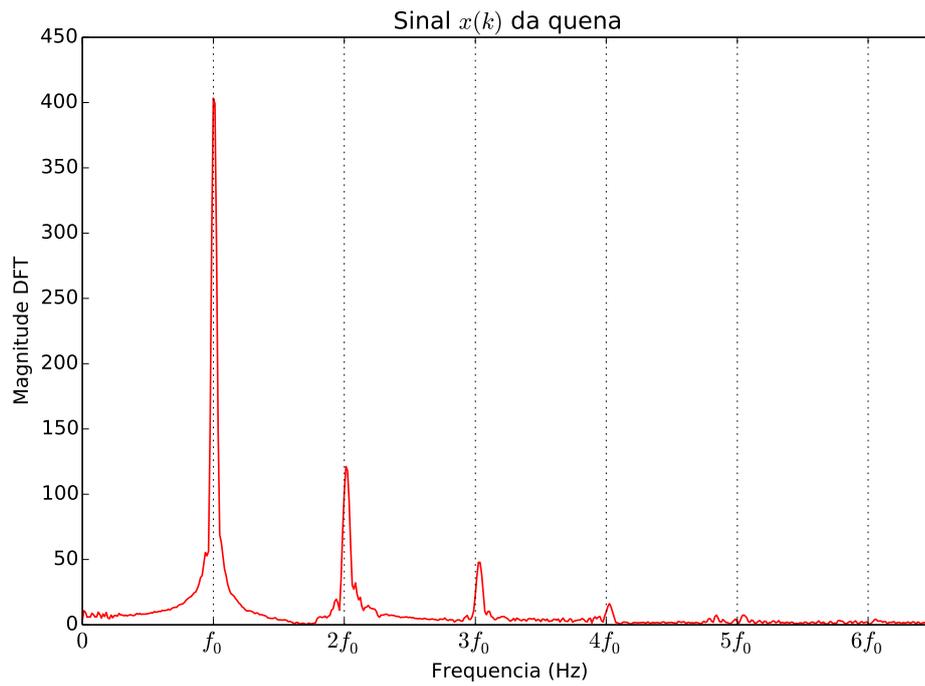


Figura 17 – Detecção da frequência f_0 na quena.

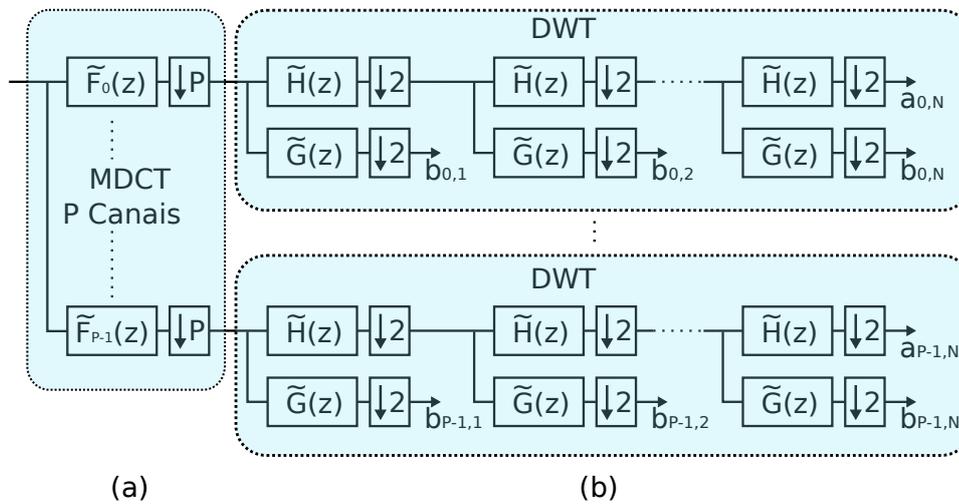


Figura 18 – Estrutura da análise da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Banco MDCT de P canais e blocos de dizimação. (b) Bancos wavelet DWT.

pelo banco de filtros cosseno modulado MDCT e o banco de filtros da Transformada Wavelet Discreta DWT. O procedimento da etapa de análise HBWT envolve os passos seguintes.

Passo 1

Decomposição do sinal de entrada $x(k)$ implementada pelo banco de filtros da MDCT com P canais.

Passo 2

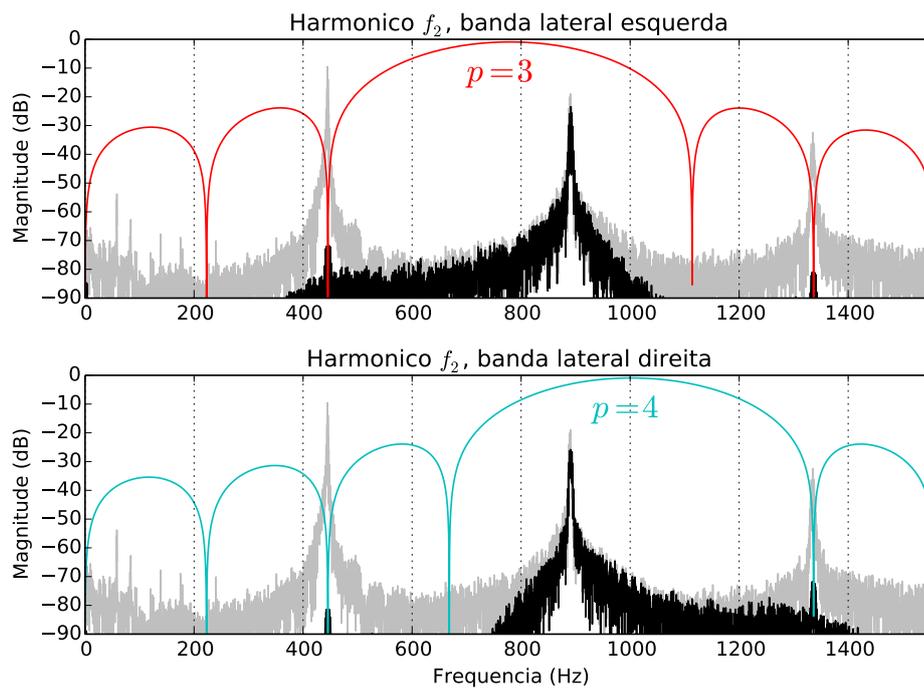


Figura 19 – Decomposição pela MDCT do segundo harmônico na saída dos canais $p = 3$ e $p = 4$ para um sinal da quena com $f_0 = 444$ Hz ($P = 99$ canais).

Dizimação de fator P na saída dos canais da MDCT. A dizimação sem causar aliasing é possível, dado que os filtros $\tilde{F}_p(z)$ têm largura de banda $\Delta\omega = \pi/P$ (Fig. 18a).

Passo 3

Decomposição wavelet DWT na saída dos P blocos dizimadores (Fig. 18b).

4.3.1 Implementação MDCT

Conforme descrito na seção 3.5.1, o procedimento para o cálculo da MDCT (passo 1) e do bloco de dizimadores (passo 2) apresenta-se no pseudocódigo 4.1. Os filtros $\tilde{F}_p(z)$ da MDCT decompõem as bandas laterais dos harmônicos. A decomposição observa-se na Fig. 19, onde o segundo harmônico f_2 de um sinal da quena é decomposto nos canais $p = 1$ (banda lateral esquerda) e $p = 2$ (banda lateral direita). As saídas do banco são posteriormente dizimadas por um banco de dizimadores de fator P .

4.3.2 Implementação DWT

Conforme descrito na seção 3.1, apresenta-se no fluxograma da Fig. 21 a implementação da Transformada Wavelet Discreta (DWT). As bandas laterais obtidas na etapa prévia resultam em sinais do tipo $1/f$ aproximadamente. Cada banda é decomposta em sub-bandas pelos bancos DWT (Fig. 20). Acordo as sugestões descritas em Polotti (2003), os filtros $\tilde{H}(z)$ e $\tilde{G}(z)$ são do tipo Daubechies de ordem 11. Como resultado, decompõem-se as bandas laterais

Pseudocódigo 4.1 Transformada Cosseno Discreta Modificada

```

1: function MDCT( $x, P$ )
2:    $k = [0 : 2P - 1, 0]$  ▷ vetor coluna  $2P \times 1$ 
3:    $w = \sin((k + 0.5) \times \pi / 2 / P)$  ▷ janela seno
4:   for  $p = 0$  downto  $P - 1$  do
5:     for  $k = 0$  downto  $2P - 1$  do
6:        $\tilde{F}[k, p] = \cos((2k + P + 1)(2p + 1) \times \pi / 4 / P)$ 
7:        $mdct[:, p] = \sqrt{2/P} \times w \cdot \tilde{F}[:, p]$  ▷ matriz  $2P \times P$ 
8:   for  $p = 0$  downto  $P - 1$  do
9:      $x_p[:, p] = x * mdct[:, p]$  ▷ convolução
10:     $x_p[:, p] = x_p[:, p] \downarrow P$  ▷ dizimação
11:  return  $x_p$  ▷ matriz de sinais filtrados

```

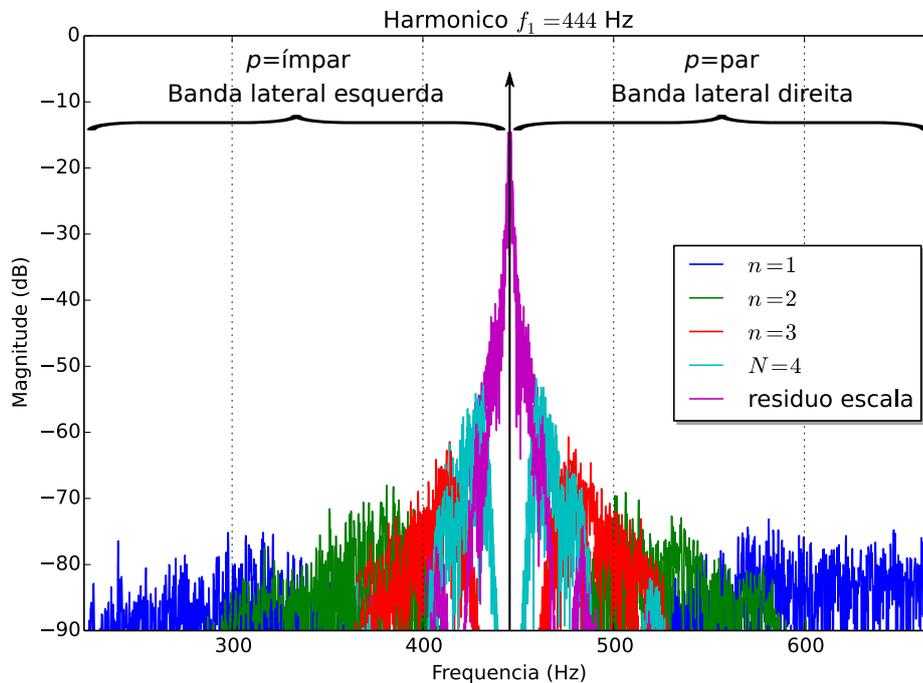


Figura 20 – Decomposição de um harmônico em sub-bandas pela HBWT.

dos harmônicos em coeficientes $a_{p,N}$ (aproximação) e $b_{p,n}$ (detalhes), sendo n e N o índice e o número total de níveis da DWT, respectivamente.

4.4 Cálculo do Expoente Hurst de Banda Harmônica

Com base nos resultados da análise HBWT, calculam-se os valores do Expoente de Hurst de Banda Harmônica H_p da seguinte maneira. Cada sub-banda HBWT é uma aproximação por trechos de uma curva espectral $1/f$ (ver Fig. 20). Conforme com os resultados teóricos descritos em Polotti (2003), encontra-se uma relação direta entre o Expoente de Hurst de Banda Harmônica H_p e o declive logarítmico da função densidade espectral de potência wavelet dos

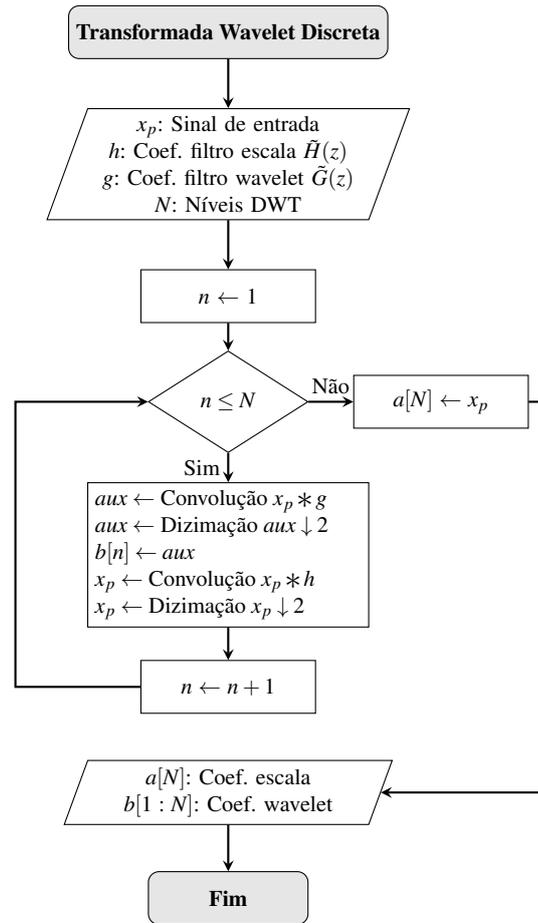


Figura 21 – Fluxograma para o cálculo da transformada DWT.

sinais $1/f$ das bandas harmônicas. Conforme detalhou-se na seção 3.5.2, os sinais de áudio tratados neste trabalho são do tipo *movimento Browniano fracionário* ou fBm (do inglês *fractional Brownian motion*), com Expoente Hurst Hurst de Banda Harmônica H_p e cujas bandas laterais harmônicas são caracterizadas por uma função de densidade espectral proporcional a $1/f^\gamma$. Ao considerar o logaritmo da energia de cada sub-banda wavelet n para cada banda lateral harmônica p , calcula-se o valor do componente espectral γ_p como a inclinação da reta da Eq. 3.29. Pela correspondência da Eq. 3.30 obtém-se a estimativa do parâmetro $H_p = (\gamma_p - 1)/2$, onde índice de canal p representa a banda lateral do harmônico f_k correspondente, com $k = \lfloor \frac{p+1}{2} \rfloor$. No caso de processos fBm, os parâmetros de Hurst recaem no intervalo $0 < H < 1$, correspondente a $1 < \gamma < 3$.

A avaliação dos resultados do comportamento $1/f$ nos dados analisados é dada mediante análise do Coeficiente de Correlação de Pearson denotado por *corr*. O Coeficiente de Correlação de Pearson é uma medida da dependência linear entre duas variáveis, retornando um valor entre $-1 < corr < +1$, onde 1 indica correlação total positiva, 0 indica correlação nenhuma e -1 indica correlação total negativa. A correlação reflete a não-linearidade e direção da relação linear entre os dados. O coeficiente de Pearson calcula-se sobre os dados da regressão linear da Eq. 3.29. Para análise dos resultados, estabelece-se o seguinte critério de avaliação:

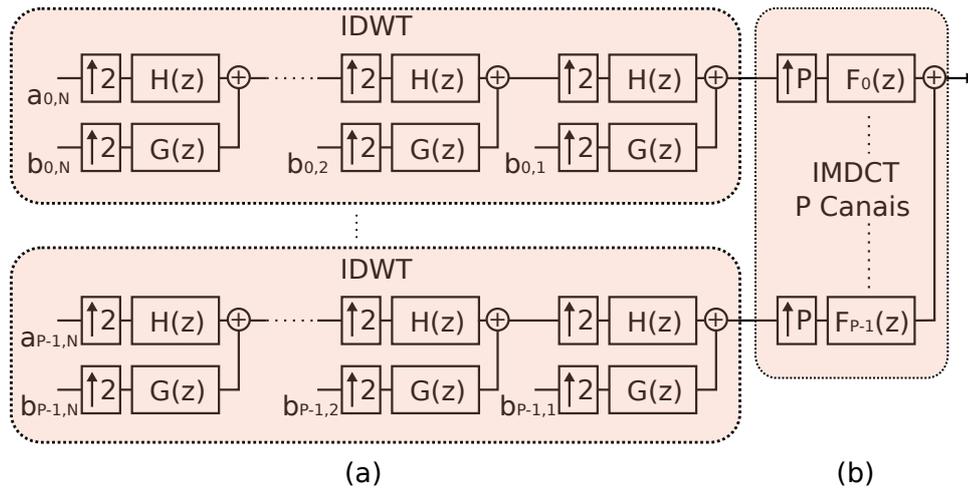


Figura 22 – Estrutura da síntese da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. (a) Bancos wavelet IDWT. (b) Blocos de expansão P e banco IMDCT.

- (a) Os dados cuja correlação de Pearson for maior ou igual a 80%, ou $corr \geq 0.8$, indicarão correlação alta com conseqüente preservação forte da característica $1/f$.
- (b) Caso contrário, os dados cuja correlação de Pearson for menor a 80%, ou $corr < 0.8$, indicarão correlação baixa e conseqüente perda proporcional da característica $1/f$.

4.5 Reconstrução de sinais

A reconstrução dos sinais é implementada mediante a etapa de síntese HBWT implementada pela Inversa da Transformada Wavelet de Banda Harmônica (IHBWT). Na Fig. 18 mostra-se o diagrama de blocos constituinte desta etapa. A IHBWT está conformada pelos blocos de síntese (transformadas inversas) dos bancos de filtros da MDCT e da DWT. Por construção, a transformada inversa IMDCT resulta ser igual à MDCT. O procedimento de etapa de síntese HBWT envolve os passos seguintes:

Passo 1

Reconstrução das bandas laterais por P bancos de síntese IDWT (Fig. 22a).

Passo 2

Expansão de fator P na saída dos bancos da IDWT. Devolve-se a largura de banda apropriada $\Delta\omega = \pi/P$ no espectro de frequência de cada banda lateral reconstruída.

Passo 3

Reconstrução do sinal $\hat{x}(l)$ implementada pelo banco da IMDCT com P canais (Fig. 22b).

4.5.1 Implementação IDWT

No fluxograma da Fig. 23 é apresentada a implementação da Inversa da Transformada Wavelet Discreta (IDWT) do passo 1.

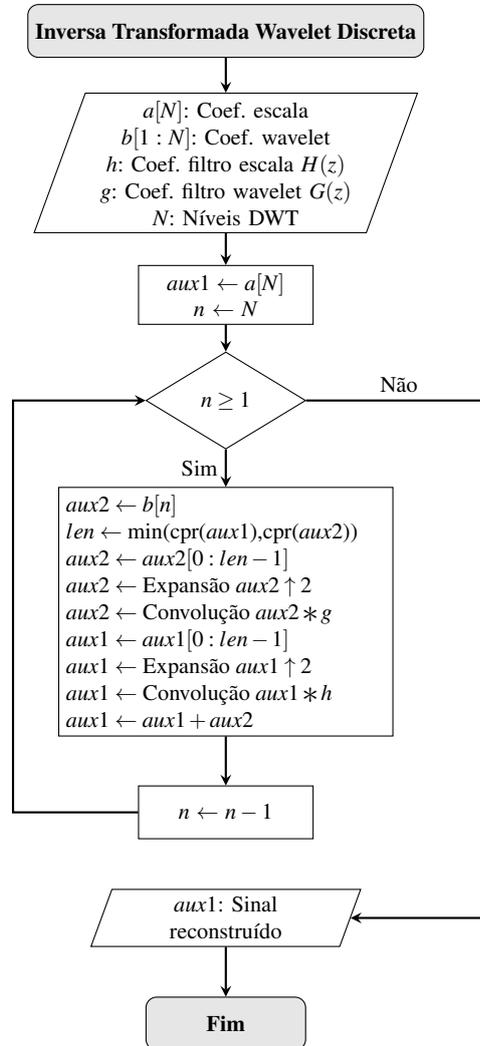


Figura 23 – Fluxograma para o cálculo da Inversa da Transformada Wavelet. A função $\min(a, b)$ retorna o menor dos valores e $\text{cpr}(\cdot)$ o comprimento do vetor.

4.5.2 Implementação IMDCT

O procedimento para o cálculo do bloco de expansores (passo 2) e da IMDCT (passo 3) apresenta-se no pseudocódigo 4.2. As saídas do banco IDWT são expandidas por um banco de expansores de fator P . Posteriormente, os filtros $F_p(z)$ da IMDCT reconstróem as bandas laterais dos harmônicos. O banco de filtros IMDCT opera selecionando a frequência apropriada das bandas laterais para cada canal.

5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, desenvolve-se o estudo preliminar das propriedades dos coeficientes wavelet derivados da análise HBWT das amostras de som em instrumentos musicais de sopro trazendo como novidade, o estudo da quena - um instrumento da cultura andina, nunca antes analisado na literatura com os parâmetros propostos neste estudo. Além da quena, os instrumentos avaliados serão a flauta doce soprano e a escaleta. Optou-se pela comparação da quena (principal contribuição trazida por este estudo) com os instrumentos de sopro flauta doce e escaleta (instrumentos de uso didático muito utilizados no ensino musical nas escolas) e que já foram investigados nos estudos de Fabre *et al.* (2012), Terrien *et al.* (2012), Bilbao (2009), Bader (2005), utilizando como ferramenta a análise/síntese de som proposta por Polotti (2003), demonstrando resultados consistentes, os quais justificam a adoção de tais instrumentos.

Além disto, as comparações podem ser estabelecidas por se tratarem de instrumentos que apresentam como característica semelhante a dinâmica na execução por sopro, sendo possível traçar estimativas comparativas nos aspectos de constituição harmônica e análise do componente estocástico de ruído $1/f$. No processo, identificam-se as séries de dados temporais (amostras do som) que poderiam ser modeladas corretamente pelo modelo pseudo-periódico $1/f$. O primeiro caso corresponde ao sinal da quena, mostrado na Fig. 24. O segundo caso corresponde ao sinal da flauta doce, mostrado na Fig. 29. O terceiro caso corresponde ao sinal da escaleta, mostrado na Fig. 34. Os sinais estudados correspondem à mesma nota musical C5 ($f = 523.25$ Hz) executada nos três instrumentos com duração de 1 segundo.

5.1 Análise da quena

Em relação à quena, na Fig. 24 demonstra-se a série temporal e o detalhe da forma de onda correspondente. Ao observar com detalhe o espectro de potência na Fig. 25, podem ser identificados até 12 harmônicos importantes, incluindo o primeiro harmônico ou frequência fundamental em $f_1 = 529.60$ Hz ($P = 83$).

A regressão linear dos coeficientes de decomposição $b_{p,n}(m)$, coeficientes da representação wavelet HBWT (vide seção 3.5), é implementada com seis níveis de escala wavelet conforme mostra-se na Fig. 26. No caso da frequência fundamental, observa-se que a variância dos coeficientes da decomposição wavelet de escala a escala obedece uma progressão geométrica consistente com um processo $1/f$ para o qual $\gamma_{1,L} = 2.68$ e $\gamma_{1,R} = 2.26$.

Observa-se também que, o primeiro nível de análise encontra-se acima da reta de

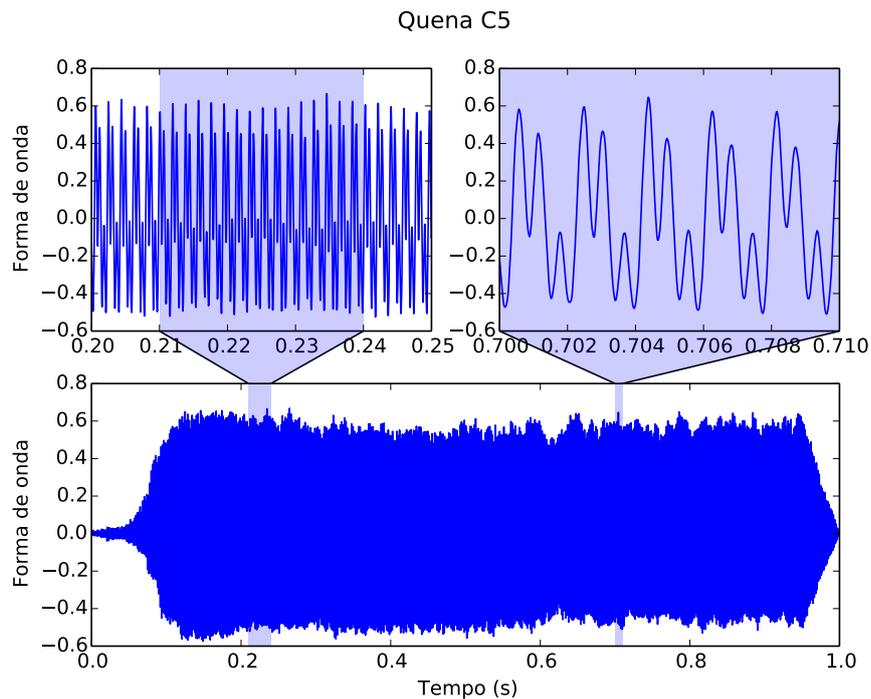


Figura 24 – Forma de onda do sinal C5 na quena.

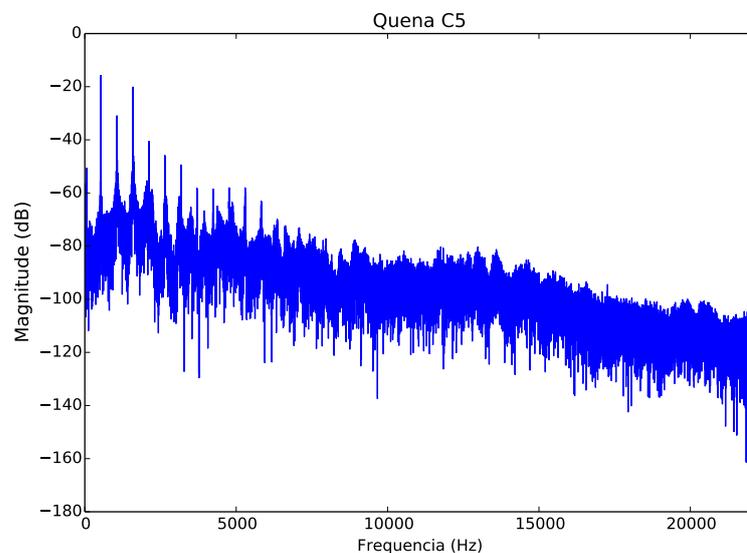


Figura 25 – Espectro do sinal C5 na quena.

tendência, o qual indica a presença de maior energia que a esperada pelo modelo. Este mesmo comportamento acontece no caso dos níveis 5 e 6. Conclui-se assim que, no caso da quena, o sinal é caracterizado corretamente nos níveis 2, 3 e 4 de análise. Calcula-se uma nova regressão considerando somente estes três níveis como referência para obter uma melhor aproximação do parâmetro espectral com novos $\gamma_{1,L} = 2.10$ e $\gamma_{1,R} = 1.85$ (ver Fig. 27). Consequentemente, o modelo pseudo-periódico $1/f$ deve também caracterizar corretamente o restante de harmônicos significativos no sinal. Assim, para avaliar o desempenho do modelo $1/f$, constrói-se uma

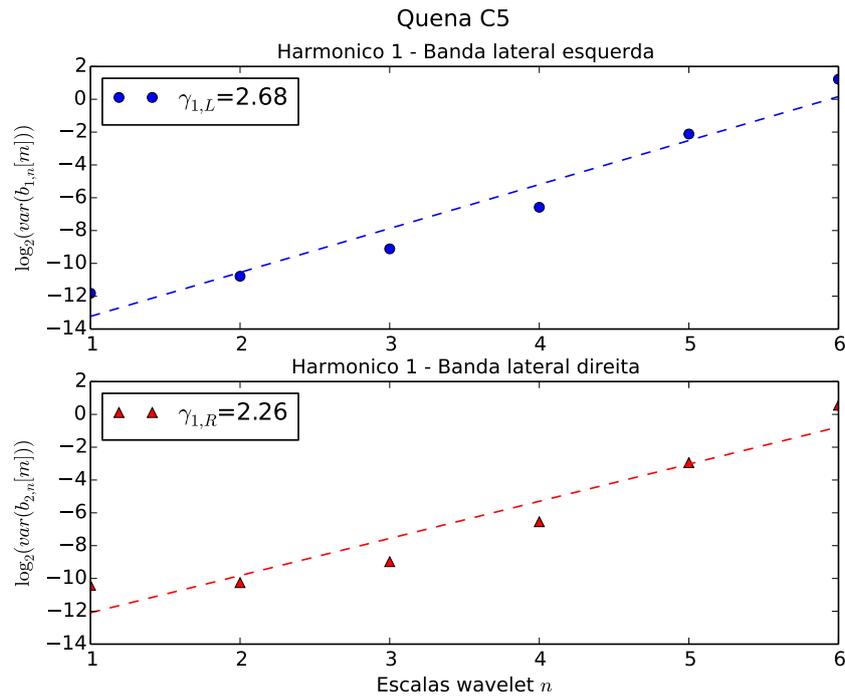


Figura 26 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da quena com seis níveis de análise wavelet.

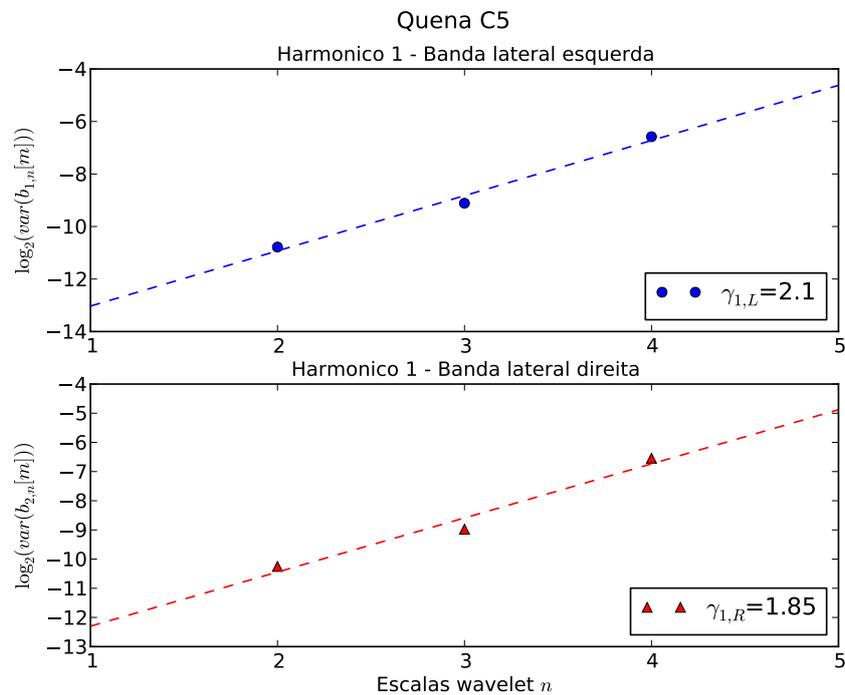


Figura 27 – Regressão linear na quena com ajuste para os níveis 2, 3 e 4.

estimativa do parâmetro espectral γ_p para cada canal p da MDCT, assim como os correspondentes valores do Exponente Hurst de Banda Harmônica (H_p) e a Dimensão Fractal de Banda Harmônica (D_p).

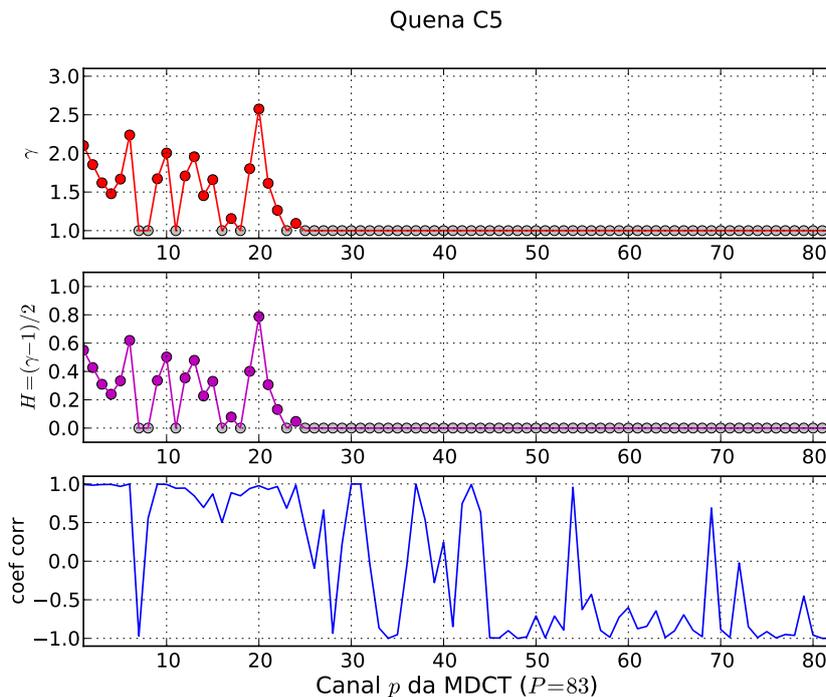


Figura 28 – Estimativa do parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados.

Neste estudo o parâmetro H_p é denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica* em relação à particular forma de extração proveniente da análise da Transformada Wavelet de Banda Harmônica. Valores atípicos obtidos na estimação dos parâmetros são descartados. Por exemplo, no caso do movimento Browniano fracionário (fBm), conhecido também como ruído $1/f$, o Expoente Hurst de Banda Harmônica tem interpretação quando encontra-se no domínio entre $0 < H_p < 1$. Neste caso, o descarte aplica-se para valores fora desse intervalo, onde aqueles valores H_p menores que 0 são fixados em 0 e os valores maiores a 1 fixados em 1. De forma similar, estima-se o valor para o parâmetro espectral ($1 < \gamma_p < 3$) e a Dimensão Fractal de Banda Harmônica ($1 < D_p < 2$). Os resultados observam-se na Fig. 28.

Em particular, as parâmetros originários do Expoente Hurst H (ver Eq. 3.15) e a Dimensão Fractal D (ver Eq. 3.16) fornecem informação muito valiosa sujeita a interpretação, motivo pelo qual foram recentemente considerados descritores interessantes em aplicações de reconhecimento e classificação musical e de instrumentos (DAS; DAS, 2006; SU; WU, 2007). No caso do Expoente Hurst (H), quando encontra-se no intervalo $0.5 < H < 1$, implica uma série de tempo persistente, caracterizada por efeitos de memória de longo prazo (dependência de longa duração), ou seja, o sinal é cada vez mais parecido com amostras anteriores à medida em que transcorre o tempo. Quando $0 < H < 0.5$, diz-se que o sinal apresenta anti-persistência (dependência de curta duração), o que interpreta-se como o sinal tendo menor relação com as amostras anteriores no transcurso do tempo. O caso $H = 0.5$, implica um processo indepen-

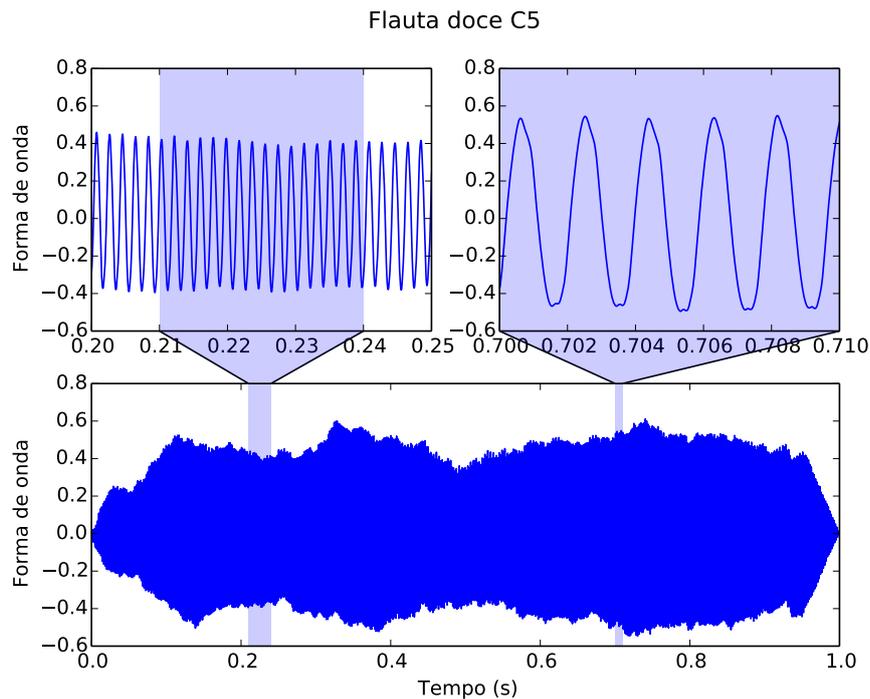


Figura 29 – Forma de onda do sinal C5 na flauta doce.

dente (movimento Browniano convencional). Se $H > 0.5$ a Dimensão Fractal (D) diminui, caso contrário se $H < 0.5$ a Dimensão Fractal aumenta.

A partir da análise do gráfico 28, determina-se que até os canais $p \leq 24$ contendo os 12 primeiros harmônicos, com $p = 24$ sendo o último valor de H_p estritamente maior que zero e com coeficiente de correlação maior ou igual a 0.8 (ver Tabela 4), o sinal da quena apresenta comportamento fractal bem caracterizado pelo modelo de ruído $1/f$. Fora desse intervalo, para os canais $p > 24$ o modelo falha, observa-se valores Hurst $H_p = 0$ constantes com o consequente decaimento do coeficiente de correlação. Verifica-se a partir desta análise o correto desempenho na modelagem adequada dos harmônicos mais relevantes do sinal da quena.

5.2 Análise da flauta doce

Com referência ao segundo caso, na Fig. 29 mostra-se a série temporal e o detalhe da forma de onda correspondente ao sinal da flauta doce. Observando o espectro de potência da Fig. 30, destacam-se 14 harmônicos importantes, incluindo a frequência fundamental em $f_1 = 526.23$ Hz ($P = 84$).

De acordo com a regressão linear com seis níveis de escala demonstrada na Fig. 31 (canais correspondentes à frequência fundamental), observa-se que as variâncias dos coeficientes wavelet, de escala em escala, obedecem uma progressão geométrica que é consistente com um processo $1/f$ com $\gamma_{1,L} = 2.71$ e $\gamma_{1,R} = 3.63$. O primeiro nível de análise, assim como quinto

Tabela 4 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica - Quena C5 com 4 níveis DWT.

| p | H_p | corr | p | H_p | corr | p | H_p | corr |
|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|
| 1 | 0.550 | 0.993 | 41 | -0.71 | -0.84 | 81 | -0.70 | -0.99 |
| 2 | 0.427 | 0.984 | 42 | -0.33 | 0.743 | 82 | -0.75 | -0.99 |
| 3 | 0.309 | 0.992 | 43 | -0.38 | 0.992 | | | |
| 4 | 0.239 | 0.994 | 44 | -0.44 | 0.633 | | | |
| 5 | 0.333 | 0.968 | 45 | -0.79 | -0.99 | | | |
| 6 | 0.619 | 0.999 | 46 | -0.79 | -0.99 | | | |
| 7 | -0.59 | -0.96 | 47 | -0.66 | -0.90 | | | |
| 8 | -0.43 | 0.557 | 48 | -0.70 | -0.99 | | | |
| 9 | 0.335 | 0.998 | 49 | -0.89 | -0.98 | | | |
| 10 | 0.502 | 0.993 | 50 | -0.63 | -0.70 | | | |
| 11 | -0.24 | 0.944 | 51 | -0.74 | -0.99 | | | |
| 12 | 0.354 | 0.946 | 52 | -0.58 | -0.71 | | | |
| 13 | 0.478 | 0.845 | 53 | -0.64 | -0.89 | | | |
| 14 | 0.226 | 0.695 | 54 | -0.45 | 0.957 | | | |
| 15 | 0.330 | 0.871 | 55 | -0.70 | -0.62 | | | |
| 16 | -0.15 | 0.502 | 56 | -0.53 | -0.42 | | | |
| 17 | 0.078 | 0.886 | 57 | -0.66 | -0.89 | | | |
| 18 | -0.10 | 0.846 | 58 | -0.70 | -0.98 | | | |
| 19 | 0.401 | 0.940 | 59 | -0.64 | -0.72 | | | |
| 20 | 0.787 | 0.977 | 60 | -0.58 | -0.60 | | | |
| 21 | 0.306 | 0.928 | 61 | -0.59 | -0.87 | | | |
| 22 | 0.131 | 0.967 | 62 | -0.73 | -0.84 | | | |
| 23 | -0.17 | 0.685 | 63 | -0.52 | -0.64 | | | |
| 24 | 0.047 | 0.984 | 64 | -0.74 | -0.98 | | | |
| 25 | -0.38 | 0.432 | 65 | -0.69 | -0.90 | | | |
| 26 | -0.52 | -0.09 | 66 | -0.63 | -0.69 | | | |
| 27 | -0.30 | 0.662 | 67 | -0.67 | -0.89 | | | |
| 28 | -0.58 | -0.93 | 68 | -0.76 | -0.97 | | | |
| 29 | -0.46 | 0.220 | 69 | -0.37 | 0.689 | | | |
| 30 | -0.20 | 0.999 | 70 | -0.68 | -0.88 | | | |
| 31 | -0.43 | 0.999 | 71 | -0.67 | -0.98 | | | |
| 32 | -0.50 | -0.03 | 72 | -0.50 | -0.02 | | | |
| 33 | -0.71 | -0.86 | 73 | -0.63 | -0.84 | | | |
| 34 | -0.58 | -0.99 | 74 | -0.67 | -0.98 | | | |
| 35 | -0.63 | -0.95 | 75 | -0.78 | -0.91 | | | |
| 36 | -0.50 | -0.06 | 76 | -0.70 | -0.99 | | | |
| 37 | -0.40 | 0.999 | 77 | -0.70 | -0.94 | | | |
| 38 | -0.41 | 0.533 | 78 | -0.66 | -0.96 | | | |
| 39 | -0.53 | -0.27 | 79 | -0.54 | -0.45 | | | |
| 40 | -0.47 | 0.246 | 80 | -0.73 | -0.95 | | | |

Fonte: (do autor, 2015)

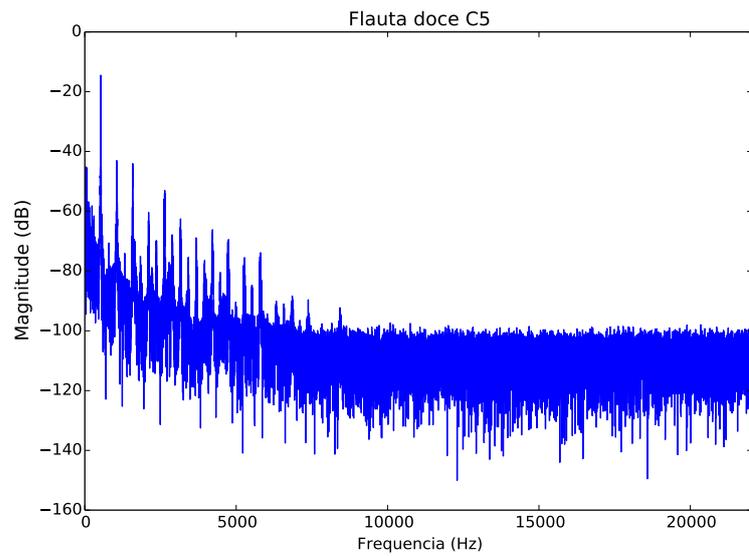


Figura 30 – Espectro do sinal C5 na flauta doce.

e o sexto nível, encontram-se acima da reta, igual ao caso da quena. Este níveis contém maior energia que não se ajustam com o modelo $1/f$. Desse modo, o sinal da flauta doce é corretamente caracterizado somente pelos níveis 2, 3 e 4. Uma nova regressão com ajuste aplica-se somente com estes três níveis e aproxima-se o parâmetro espectral com novos $\gamma_{1,L} = 3.01$ e $\gamma_{1,R} = 4.32$ (ver Fig. 32).

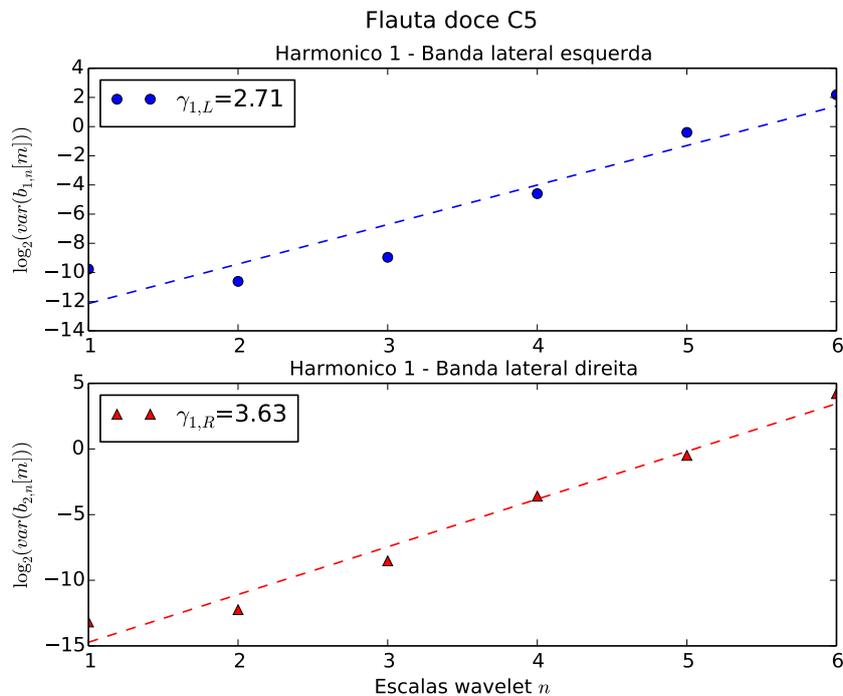


Figura 31 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da flauta doce com seis níveis de análise wavelet.

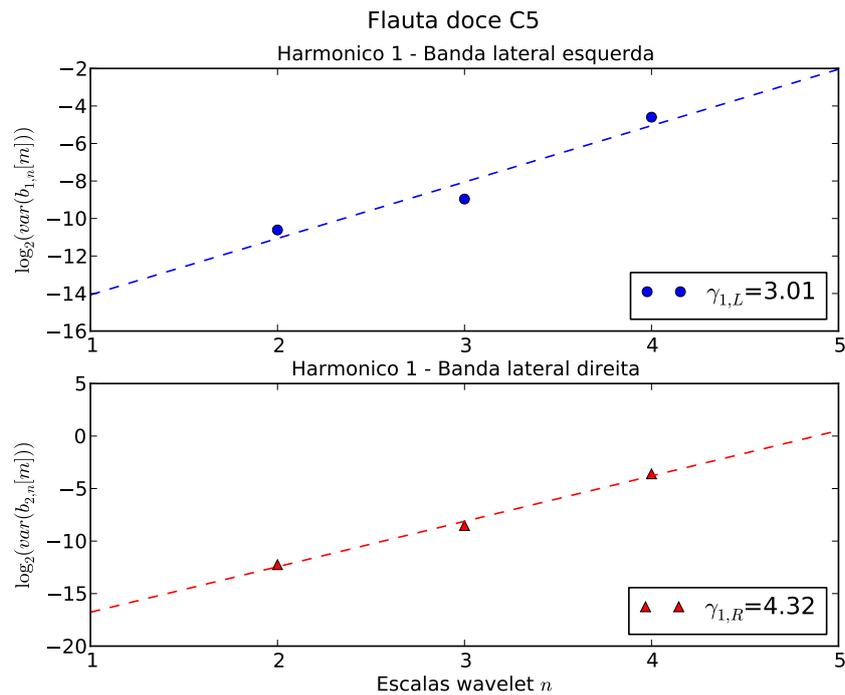


Figura 32 – Regressão linear na flauta doce com ajuste para os níveis 2, 3 e 4.

A estimativa do parâmetros γ_p , H_p e coeficiente de correlação por cada canal p da MDCT mostra-se na Fig. 33. A partir da análise da gráfica 33, conclui-se que o sinal da flauta doce apresenta característica fractal bem definida para os canais $p \leq 28$ que contem 14 harmônicos. Visualmente, comprove-se considerando o último ponto roxo onde $H_p > 0$ estritamente e o coeficiente de correlação ≥ 0.8 (até 80% de confiança na aproximação, coluna *corr* da Tabela 5). Fora do intervalo, para os canais $p > 28$ perde-se a correlação entre os coeficientes da análise e observa-se valores Hurst $H_p = 0$ constantes, o que em conjunto implica que o modelo $1/f$ não se adequa bem ao sinal. Assim, corrobora-se a eficiência do modelo para descrever os harmônicos mais relevantes do sinal da flauta doce.

5.3 Análise da escaleta

Referente ao terceiro caso, na Fig. 34 mostra-se a série temporal com o detalhe da forma de onda correspondente ao sinal da escaleta. A diferença dos dois sinais anteriores, a escaleta apresenta um conteúdo harmônico mais rico. Observando o espectro de potência da Fig. 35, notam-se 37 harmônicos, incluindo a frequência fundamental em $f_1 = 525.56$ Hz ($P = 84$).

De acordo com a regressão linear com seis níveis de escala mostrada na Fig. 36, na frequência fundamental ($p = 1, 2$), observa-se que as variâncias dos coeficientes wavelet de escala em escala obedecem uma progressão geométrica em concordância com o processo $1/f$ com $\gamma_{1,L} = 1.35$ e $\gamma_{1,R} = 2.48$. O primeiro, o quinto e o sexto níveis de análise encontram-se acima da reta, como nos dois casos anteriores, o que indica uma aproximação divergente com o

Tabela 5 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica- Flauta doce C5 com 4 níveis DWT.

| p | H_p | corr | p | H_p | corr | p | H_p | corr |
|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|
| 1 | 1.003 | 0.967 | 41 | -0.52 | -0.86 | 81 | -0.59 | -0.99 |
| 2 | 1.661 | 0.996 | 42 | -0.52 | -0.33 | 82 | -0.66 | -0.84 |
| 3 | 1.064 | 0.993 | 43 | -0.61 | -0.83 | 83 | -0.59 | -0.79 |
| 4 | 0.904 | 0.988 | 44 | -0.51 | -0.09 | | | |
| 5 | 0.868 | 0.990 | 45 | -0.48 | 0.330 | | | |
| 6 | 0.921 | 0.932 | 46 | -0.70 | -0.99 | | | |
| 7 | 0.670 | 0.933 | 47 | -0.58 | -0.90 | | | |
| 8 | 0.244 | 0.751 | 48 | -0.82 | -0.94 | | | |
| 9 | 1.305 | 0.998 | 49 | -0.66 | -0.99 | | | |
| 10 | 1.410 | 0.971 | 50 | -0.82 | -0.85 | | | |
| 11 | 0.970 | 0.969 | 51 | -0.73 | -0.99 | | | |
| 12 | 1.463 | 0.981 | 52 | -0.50 | -0.09 | | | |
| 13 | 1.263 | 0.994 | 53 | -0.73 | -0.88 | | | |
| 14 | 1.187 | 0.989 | 54 | -0.72 | -0.92 | | | |
| 15 | 1.225 | 0.998 | 55 | -0.41 | 0.834 | | | |
| 16 | 1.118 | 0.953 | 56 | -0.61 | -0.79 | | | |
| 17 | 0.698 | 0.999 | 57 | -0.66 | -0.66 | | | |
| 18 | 1.059 | 0.995 | 58 | -0.61 | -0.79 | | | |
| 19 | 0.920 | 0.999 | 59 | -0.63 | -0.78 | | | |
| 20 | 0.739 | 0.966 | 60 | -0.46 | 0.686 | | | |
| 21 | 0.926 | 0.981 | 61 | -0.47 | 0.208 | | | |
| 22 | 0.693 | 0.989 | 62 | -0.45 | 0.999 | | | |
| 23 | -0.10 | 0.999 | 63 | -0.47 | 0.960 | | | |
| 24 | -0.11 | 0.998 | 64 | -0.44 | 0.718 | | | |
| 25 | 0.056 | 0.990 | 65 | -0.70 | -0.99 | | | |
| 26 | -0.02 | 0.994 | 66 | -0.57 | -0.56 | | | |
| 27 | -0.09 | 0.994 | 67 | -0.73 | -0.82 | | | |
| 28 | 0.000 | 0.981 | 68 | -0.66 | -0.99 | | | |
| 29 | -0.69 | -0.79 | 69 | -0.53 | -0.90 | | | |
| 30 | -0.43 | 0.837 | 70 | -0.41 | 0.937 | | | |
| 31 | -0.56 | -0.23 | 71 | -0.64 | -0.72 | | | |
| 32 | -0.15 | 0.984 | 72 | -0.65 | -0.84 | | | |
| 33 | -0.55 | -0.77 | 73 | -0.42 | 0.530 | | | |
| 34 | -0.52 | -0.99 | 74 | -0.69 | -0.97 | | | |
| 35 | -0.57 | -0.41 | 75 | -0.64 | -0.78 | | | |
| 36 | -0.43 | 0.999 | 76 | -0.53 | -0.38 | | | |
| 37 | -0.42 | 0.787 | 77 | -0.61 | -0.87 | | | |
| 38 | -0.65 | -0.71 | 78 | -0.81 | -0.86 | | | |
| 39 | -0.52 | -0.16 | 79 | -0.61 | -0.97 | | | |
| 40 | -0.51 | -0.36 | 80 | -0.52 | -0.95 | | | |

Fonte: (do autor, 2015)

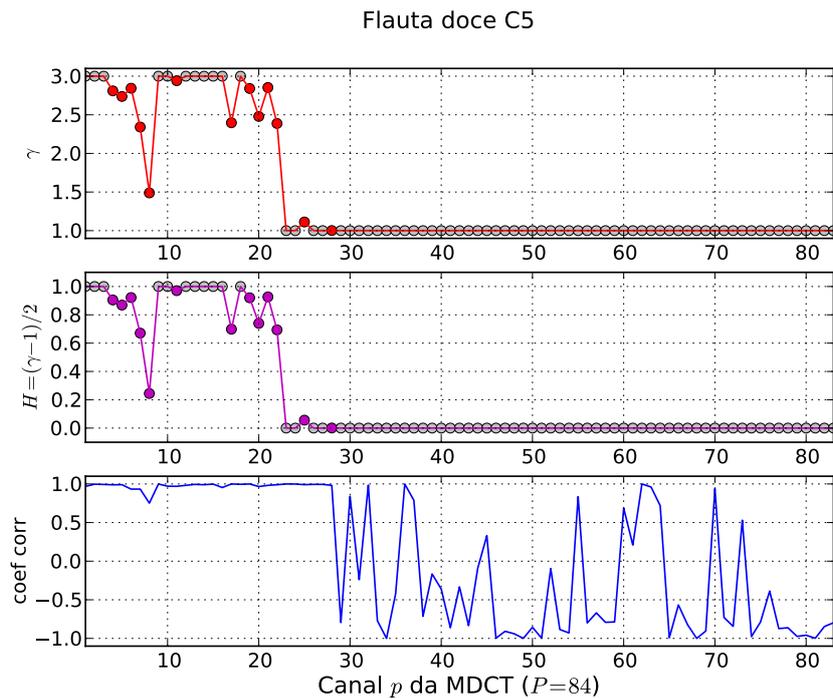


Figura 33 – Estimativa dos parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados.

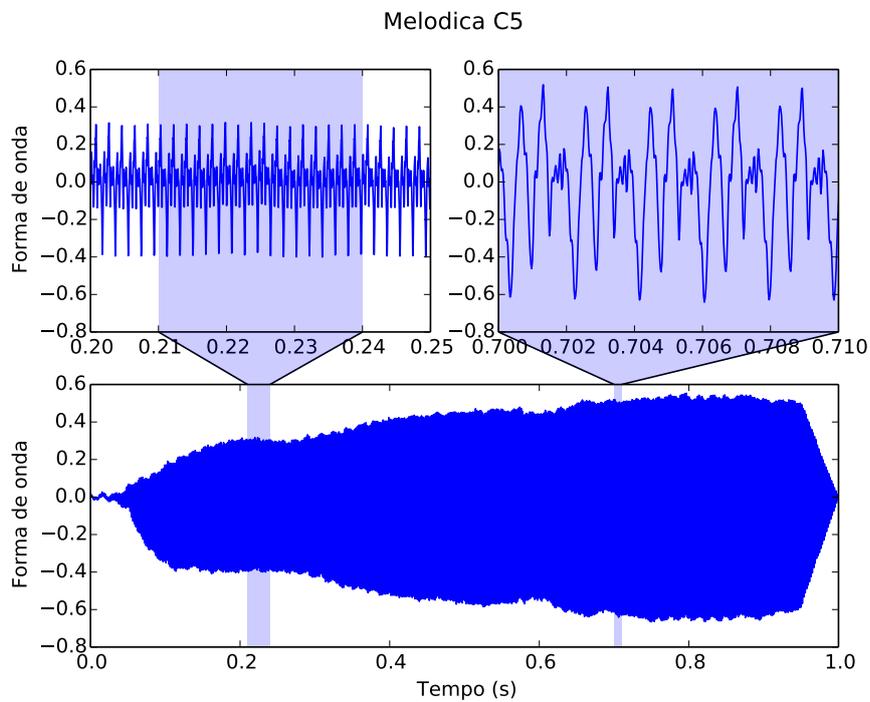


Figura 34 – Forma de onda do sinal C5 na escaleta.

modelo $1/f$. Em consequência, o sinal da escaleta, é corretamente caracterizado só pelos níveis internos 2, 3 e 4. Aplica-se a nova regressão linear para estes níveis para conseguir uma melhor

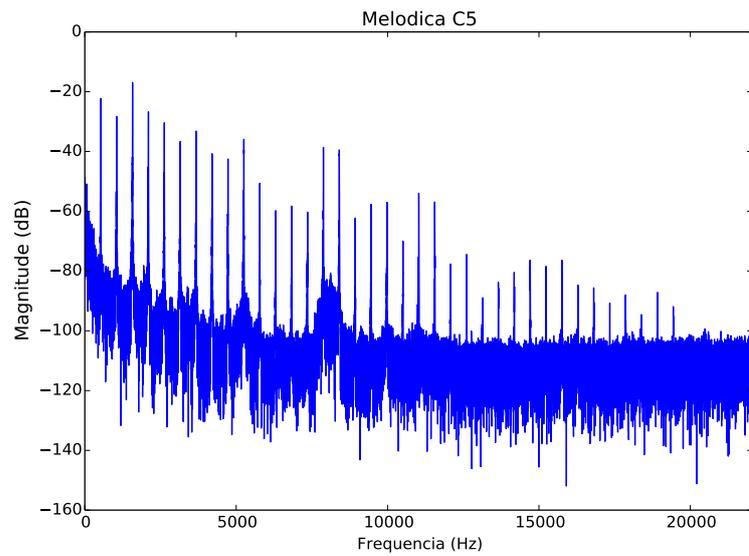


Figura 35 – Espectro do sinal C5 na escaleta.

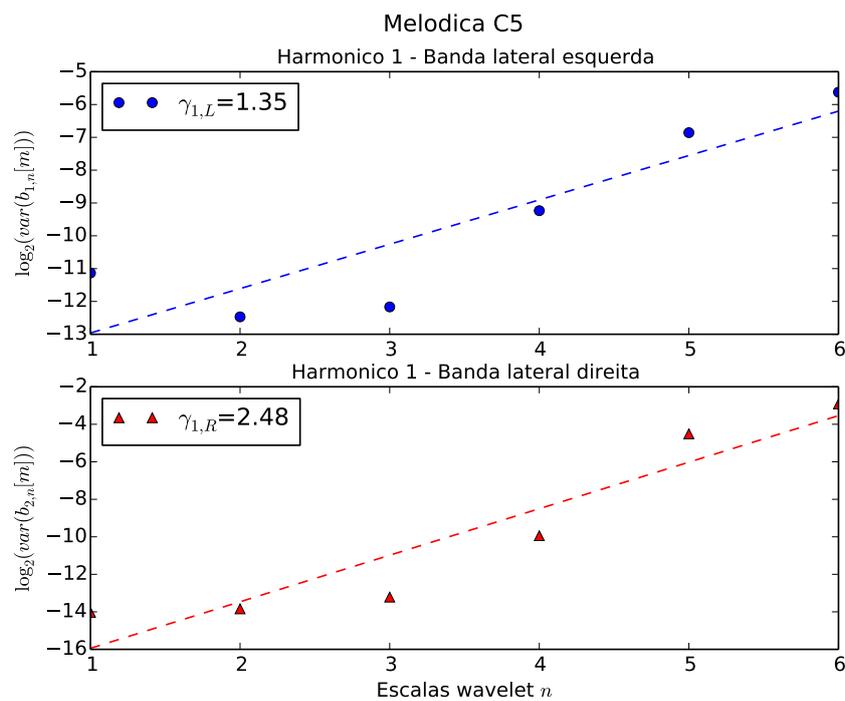


Figura 36 – Regressão linear dos coeficientes do sinal da escaleta com seis níveis de análise wavelet.

estimação do parâmetro espectral com novos $\gamma_{1,L} = 1.62$ e $\gamma_{1,R} = 1.95$ (ver Fig. 32).

Estimam-se os parâmetros γ_p , H_p e coeficiente de correlação por cada canal MDCT conforme mostra-se na Fig. 38. A partir da análise destes parâmetros, conclui-se que o sinal da escaleta apresenta característica fractal corretamente caracterizada nos canais $p \leq 71$ ou 36 harmônicos, os quais são determinados pelo índice do último de H_p cujo coeficiente de correlação é maior ou igual a 0.8 (ver Tabela 6). Fora daquele intervalo, para os canais $p \geq 72$

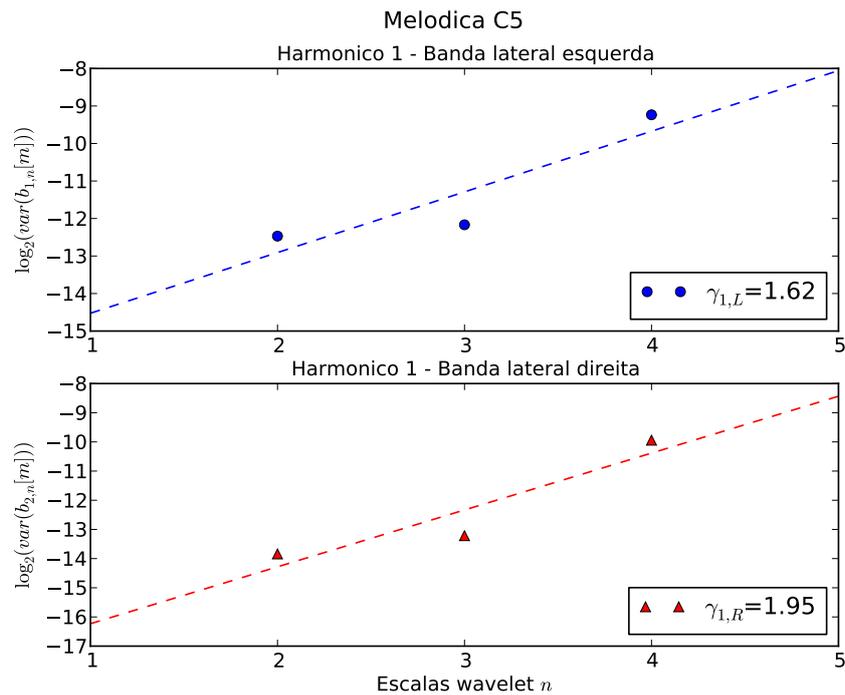


Figura 37 – Regressão linear na escaleta com ajuste para os níveis 2, 3 e 4.

perde-se a correlação entre os coeficientes da análise e os valores Hurst permanecem constantes em $H_p = 0$. Pode-se concluir que o modelo $1/f$ mantém um desempenho correto para os harmônicos mais relevantes do sinal da escaleta.

O estudo do número de níveis n em cada instrumento é fundamental para a avaliação do desempenho do modelo. Pelo anterior exposto conclui-se que, no caso de instrumentos de sopro como a quena, flauta doce e escaleta, são suficientes somente 4 níveis de análise para a caracterização correta dos harmônicos mais relevantes em cada sinal. Além disso, o número de níveis de análise varia dependendo do instrumento. Por exemplo, no caso de instrumentos como trompete, clarinete e cello são bem representados com 5 níveis, segundo a análise por regressão similar ao aqui exposto apresentado em Polotti (2003).

Os resultados deste estudo preliminar suportam a hipótese de que as bandas laterais no espectro de potência de sons harmônicos apresentam um comportamento aproximadamente $1/f$. Após análise por regressão linear, obteve-se uma correta aproximação do parâmetro de Hurst com coeficientes de correlação maiores a 0.8 para os harmônicos mais relevantes. A estimativa pode melhorar se o algoritmo de bootstrapping (regressão das variâncias dos coeficientes wavelet) é executado sobre um conjunto maior de dados, por exemplo, considerando amostras com duração maior a 1 segundo.

Tabela 6 – Estimativa do Expoente Hurst de Banda Harmônica - Escala C5 com 4 níveis DWT.

| p | H_p | corr | p | H_p | corr | p | H_p | corr |
|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------|
| 1 | 0.308 | 0.905 | 41 | 1.362 | 0.887 | 81 | -0.51 | -0.21 |
| 2 | 0.474 | 0.931 | 42 | 1.261 | 0.933 | 82 | -0.52 | -0.58 |
| 3 | 0.698 | 0.932 | 43 | 1.349 | 0.886 | 83 | -0.55 | -0.53 |
| 4 | 0.466 | 0.979 | 44 | 1.442 | 0.916 | | | |
| 5 | 1.307 | 0.999 | 45 | -0.14 | 0.965 | | | |
| 6 | 1.327 | 0.999 | 46 | -0.17 | 0.652 | | | |
| 7 | 0.814 | 0.966 | 47 | 0.757 | 0.892 | | | |
| 8 | 0.740 | 0.994 | 48 | 0.522 | 0.820 | | | |
| 9 | 1.207 | 0.962 | 49 | 0.038 | 0.915 | | | |
| 10 | 1.434 | 0.999 | 50 | 0.095 | 0.816 | | | |
| 11 | 1.394 | 0.962 | 51 | -0.13 | 0.795 | | | |
| 12 | 0.903 | 0.998 | 52 | -0.22 | 0.886 | | | |
| 13 | 0.950 | 0.943 | 53 | -0.02 | 0.825 | | | |
| 14 | 1.104 | 0.997 | 54 | 0.606 | 0.848 | | | |
| 15 | 0.902 | 0.898 | 55 | 0.488 | 0.908 | | | |
| 16 | 1.203 | 0.998 | 56 | 0.710 | 0.896 | | | |
| 17 | 0.905 | 0.971 | 57 | 0.533 | 0.939 | | | |
| 18 | 1.081 | 0.971 | 58 | 0.902 | 0.862 | | | |
| 19 | 1.105 | 0.977 | 59 | 0.650 | 0.813 | | | |
| 20 | 1.032 | 0.989 | 60 | 0.614 | 0.895 | | | |
| 21 | 0.170 | 0.914 | 61 | 0.340 | 0.920 | | | |
| 22 | 0.396 | 0.955 | 62 | 0.346 | 0.895 | | | |
| 23 | 0.267 | 0.964 | 63 | -0.08 | 0.841 | | | |
| 24 | 0.292 | 0.861 | 64 | -0.02 | 0.826 | | | |
| 25 | 0.150 | 0.921 | 65 | -0.16 | 0.928 | | | |
| 26 | 0.162 | 0.949 | 66 | 0.135 | 0.851 | | | |
| 27 | 0.663 | 0.873 | 67 | 0.027 | 0.802 | | | |
| 28 | 0.350 | 0.880 | 68 | -0.34 | 0.947 | | | |
| 29 | 0.815 | 0.965 | 69 | -0.17 | 0.954 | | | |
| 30 | 0.760 | 0.877 | 70 | -0.44 | 0.862 | | | |
| 31 | 0.894 | 0.843 | 71 | 0.433 | 0.916 | | | |
| 32 | 1.216 | 0.954 | 72 | -0.06 | 0.825 | | | |
| 33 | 0.393 | 0.815 | 73 | -0.11 | 0.728 | | | |
| 34 | 0.512 | 0.913 | 74 | -0.32 | 0.593 | | | |
| 35 | 0.981 | 0.870 | 75 | -0.72 | -0.89 | | | |
| 36 | 1.153 | 0.884 | 76 | -0.46 | 0.647 | | | |
| 37 | 0.803 | 0.981 | 77 | -0.38 | 0.998 | | | |
| 38 | 0.981 | 0.885 | 78 | -0.61 | -0.71 | | | |
| 39 | 0.577 | 0.849 | 79 | -0.55 | -0.73 | | | |
| 40 | 0.458 | 0.834 | 80 | -0.59 | -0.98 | | | |

Fonte: (do autor, 2015)

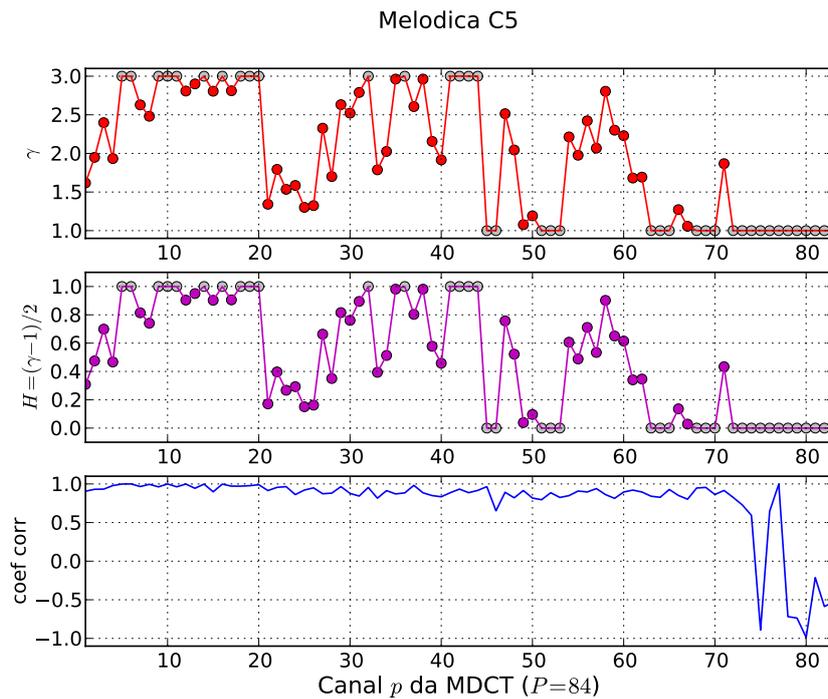


Figura 38 – Estimativa do parâmetro espectral (γ_p), Hurst de Banda Harmônica (H_p) e coeficiente de correlação por canal MDCT. Os pontos em cinza pertencem a valores normalizados.

5.4 Análise comparativa

Nesta seção, estabelece-se a comparação entre a quena, flauta doce e escaleta considerando como critério de análise o Expoente Hurst de Banda Harmônica (H_p). Diferentes amostras de notas musicais, no registro entre G4 e G5, são avaliadas para cada instrumento. As características dos sons estudados encontram-se detalhadas na Tabela 3. Em conformidade com a metodologia proposta é possível comparar amostras de som de maneira objetiva a partir de um número reduzido de parâmetros H_p . Estes parâmetros são extraídos a partir da análise das amostras, como mostrou-se na seção anterior, e contêm informação relevante sobre o conteúdo harmônico do sinal conforme estuda-se a continuação.

5.4.1 Quena e flauta doce

O primeiro grupo de instrumentos é constituído pela quena e a flauta doce soprano. Ambos instrumentos apresentam características estruturais tubulares similares com diferenças, principalmente, em material (madeira na quena e plástico na flauta doce), embocadura (duto com palheta na flauta doce) e número de buracos (6 na quena e 7 na flauta doce). O produto sonoro abarca um conjunto de notas entre C5 ($f = 523.25$ Hz) e G5 ($f = 783.99$ Hz). Este grupo de notas pertence ao intervalo comum a ambos instrumentos devido à tessitura distinta da flauta doce soprano, cuja nota mais grave é C5, em relação à quena, com nota mais grave em

A4 (ver Fig. 16). O resultado da estimação do Expoente Hurst é apresentado na Fig. 40.

A partir da análise do parâmetro Expoente Hurst de Banda Harmônica na quena, observa-se que a informação mais importante encontra-se nos canais até $p = 14$ ou $p = 24$ segundo o caso ($H_p > 0$ e coeficiente de correlação maior a 0.8). Isso implica a presença de 7 a 12 harmônicos importantes entre C5 e G5 no instrumento. Os canais com $p \leq 8$ apresentam um valor $H_p > 0.5$ o que indica dependência de longa duração para os quatro primeiros harmônicos e em concordância com o modelo $1/f$. Este é um resultado esperado, pois na quena, os harmônicos desde f_1 até f_4 (oito primeiros canais) são os mais dominantes, conforme corrobora-se no gráfico do espectro na Fig. 39a. Harmônicos com frequências a partir de f_5 em diante ($p \geq 9$) apresentam um valor de $H_p < 0.5$ que indica dependência de curta duração. Isto indica que, na medida que aumenta a frequência do harmônico diminui sua característica autossimilar, até chegar no caso dos canais maiores onde o espectro perde conteúdo harmônico e a consequente falha do modelo ($H_p \leq 0$).

Na flauta doce, determina-se que a informação do parâmetro Expoente Hurst de Banda Harmônica mais importante encontra-se nos canais até $p = 24$ e $p = 38$ ($H_p > 0$ e coeficiente de correlação maior a 0.8). Isso implica 12 a 19 harmônicos relevantes no intervalo de C5 e G5 na flauta doce. Aproximadamente, os canais $p \leq 20$ apresentam valor $H_p > 0.5$ o que indica dependência de longa duração para os dez primeiros harmônicos. Este resultado aproxima corretamente o comportamento harmônico da flauta doce soprano, cujos harmônicos de f_1 até f_{10} predominam no gráfico do espectro da Fig. 39b. Para harmônicos f_k com frequência maior a f_{10} , o Expoente Hurst diminui progressivamente apresentando valores $H_p < 0.5$. Observa-se a perda paulatina da dependência de longa duração a partir do canal $p > 20$ o que leva à conclusão que, a maior frequência do harmônico, perde-se pouco a pouco a característica fractal $1/f$, igual que no caso da quena.

Estabelecendo um comparativo com a quena, a flauta doce apresenta maior conteúdo harmônico. A perda da característica $1/f$, que começa quando $H_p < 0.5$, acontece a partir do harmônico f_5 no caso da quena e desde f_{11} na flauta doce. Uma característica similar na quena e flauta doce é a queda suave de H_p de harmônico em harmônico. Este resultado evidencia que a energia do sinal em ambos instrumentos diminui progressivamente na medida que aumenta a frequência dos harmônicos. Esta característica pode-se observar olhando no espectro de frequências da Figs. 39a e 39b, o que confirma positivamente esta análise. Desta maneira, o gráfico do Expoente Hurst de Banda Harmônica representaria, a grosso modo, uma aproximação do envoltório espectral do sinal (Ver Figs. 40a e 40b). Uma possível aplicação destes resultados na síntese consistiria em tentar semelhar o comportamento da quena a partir da adequação dos valores H_p obtidos na flauta doce.

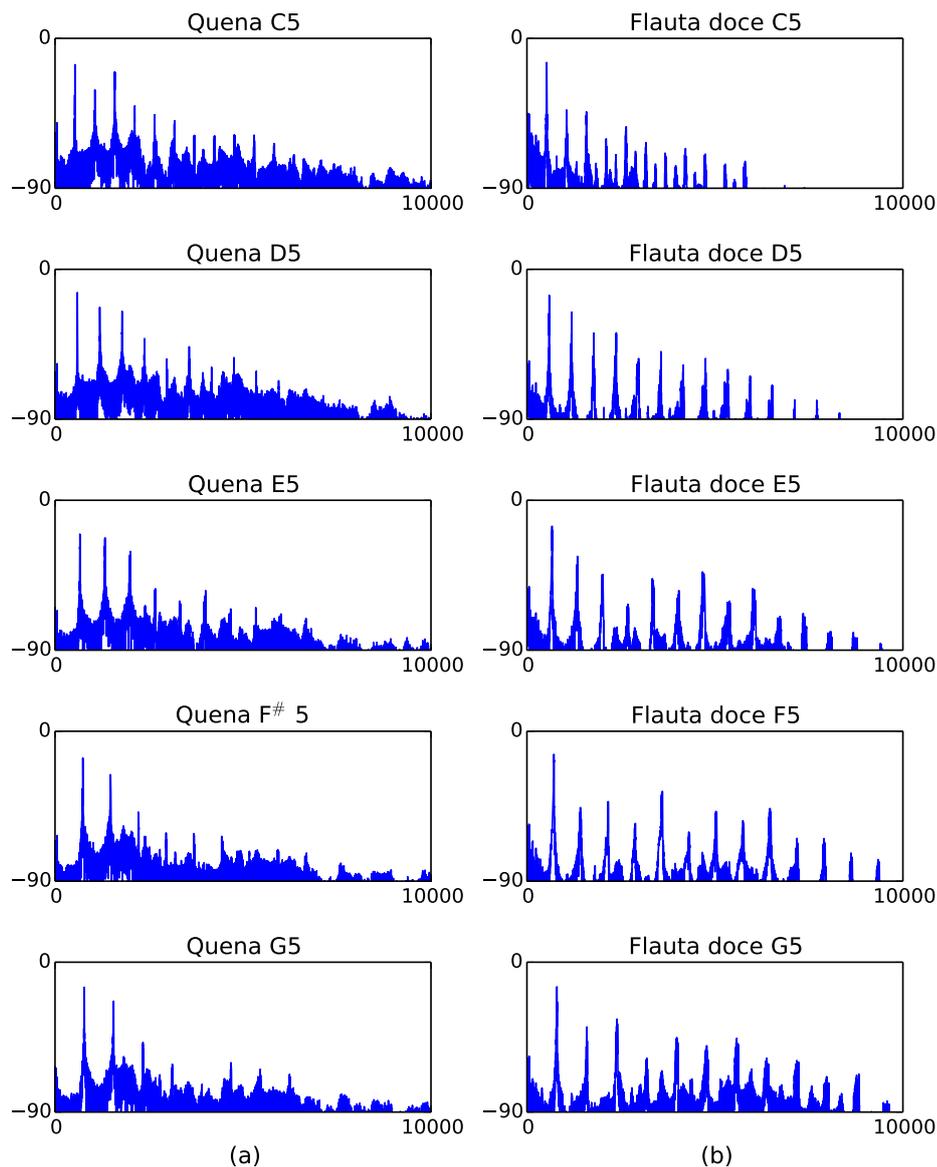


Figura 39 – Análise das notas C5, D5, E5, F5 e G5 na quena e na flauta doce. (a) Espectro de potência da quena. (b) Espectro de potência da flauta doce.

5.4.2 Quena e escaleta

O segundo grupo de instrumentos o conformam a quena e a escaleta. A pesar de ambos serem instrumentos de sopro, a escaleta tem menor semelhança com a quena e a flauta doce. A diferença radica principalmente no uso de palhetas livres com funcionamento semelhante à harmônica e o acordeão. A maior tessitura da escaleta favorece o estudo de maior quantidade de sons. Porém, para efeitos de comparação com a quena, neste estudo limita-se o registro da escaleta no intervalo entre B3 e E5 (ver Fig. 16). Assim, o conjunto sonoro estudado compreende o grupo entre G4 ($f = 392.00$ Hz) e E5 ($f = 659.25$ Hz). O resultado da estimação do Exponente Hurst em ambos instrumentos mostra-se na Fig. 42.

Na quena, observa-se que o parâmetro Exponente Hurst de Banda Harmônica H_p evi-

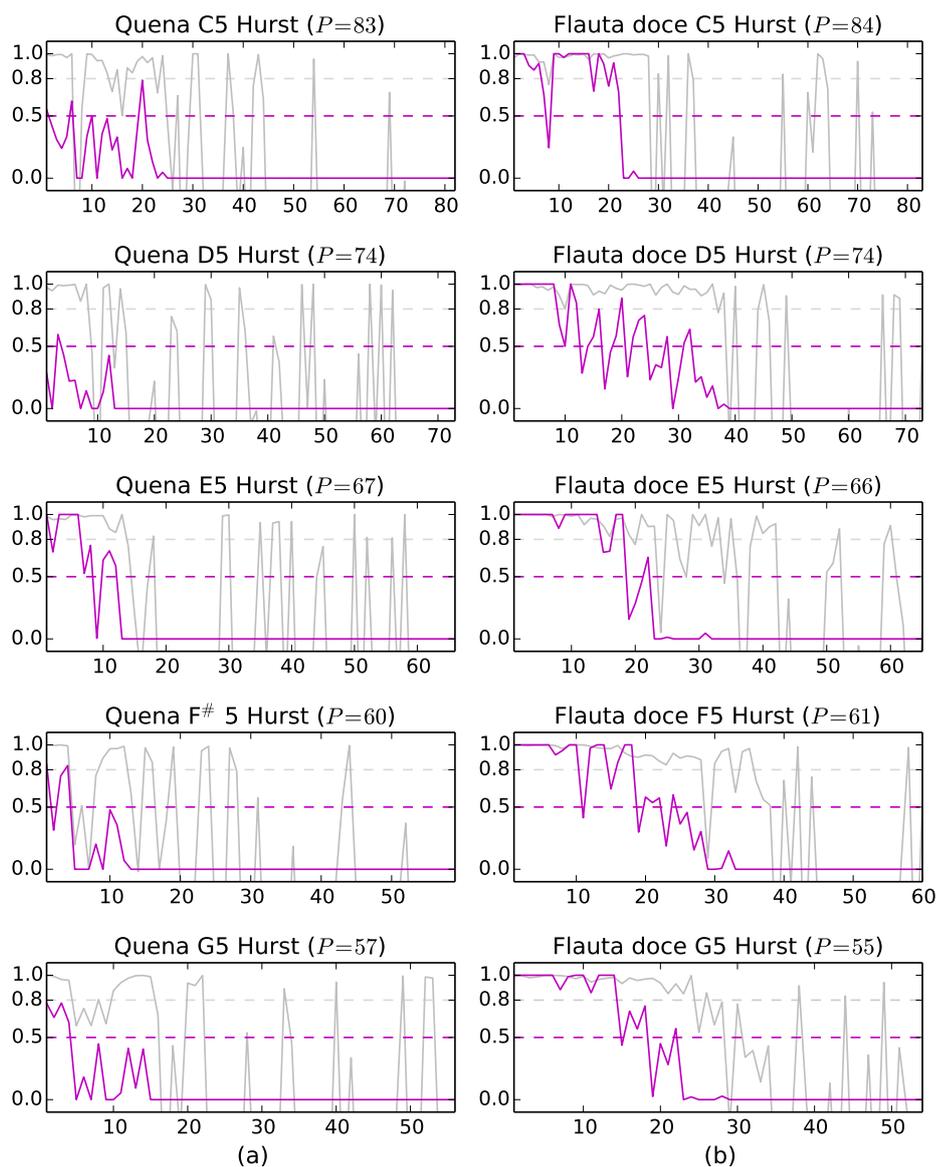


Figura 40 – Análise das notas C5, D5, E5, F5 e G5 na quena e na flauta doce. Em magenta: Expoente Hurst de Banda Harmônica. Em Cinza: Coeficiente de correlação. (a) Expoente Hurst da quena. (b) Expoente Hurst da flauta doce.

dência a presença de informação importante nos primeiros 14 e 24 canais (12 harmônicos entre G4 e E5). O mesmo resultado foi obtido na comparação anterior para um registro distinto de notas da quena (C5 a G5) o que ratifica a ideia de que a característica harmônica do instrumento prevalece de maneira representativa no gráfico de H_p . Aproximadamente, os primeiros canais com $p \leq 8$ apresentam um valor de $H_p > 0.5$ (valor característico do modelo $1/f$). Em canais maiores com $p > 8$ tem-se $H_p < 0.5$ que indica dependência de curta duração e, em conformidade com a análise do caso anterior, trate-se de resultados esperados na quena. Os harmônicos f_1 até f_4 (oito primeiros canais) resultam ser mais destacados (Ver Fig. do espectro 41a). Para os harmônicos $f_k > f_4$, a medida que aumenta a frequência diminui a característica autossimilar $1/f$. Para frequências mais altas ($f_k > f_{12}$) o parâmetro Expoente Hurst de Banda Harmônica

tem valores negativos ($H_p \leq 0$), o que indica carência de harmônicos relevantes nesta região.

Na escaleta, a informação do parâmetro Expoente Hurst de Banda Harmônica é mais abrangente, pois compreende canais maiores até $p \leq 40$ ou $p \leq 80$ (com $H_p > 0$ e Coeficiente de Correlação maior a 0.8). Conclui-se que a escaleta apresenta de 20 a 40 harmônicos importantes entre as notas C5 e G5. A diferença da quena, quase todos os canais na escaleta apresentam valor $H_p > 0.5$ (dependência de longa duração característica dos sinais $1/f$) o que indica maior energia contida nos harmônicos de maneira que todos eles resultam sendo predominantes (ver Fig. 41b). O gráfico do Expoente Hurst de Banda Harmônica da 42b apresenta uma queda mais pronunciada para valores $H_p < 0.5$ a diferença da queda mais suave no caso da quena. Isso acontece dada a característica do som da escaleta, que contém mais harmônicos do que a quena, todos eles com maior energia ($H_p \geq 0.5$).

5.5 Conclusões

Em conclusão, é possível extrair características relevantes de um sinal de som através do estudo de um número muito reduzido de parâmetros representados nos valores do Expoente Hurst de Banda Harmônica (H_p). Mediante análise do parâmetro H_p encontrou-se a quantidade de harmônicos presentes em cada som e o comportamento espectral deles como a quantidade de harmônicos mais ressaltantes e o decaimento deles com o aumento de frequência. No caso da quena foram até 24 canais relevantes (12 harmônicos), no caso da flauta doce 38 canais (19 harmônicos) e no caso da escaleta até 80 canais (40 harmônicos). Sendo o som um fenômeno físico bastante complexo, a contribuição deste estudo favorece na análise de som simplificada porém significativa determinada somente por um parâmetro, o Expoente Hurst de Banda Harmônica H_p , para um conjunto específico de sinais de som denominados pseudo-periódicos. Assim, o parâmetro de Hurst de Banda Harmônica contém informação útil sobre o sinal toda vez que favorece na extração de informação como a quantidade de harmônicos e a relevância deles a partir da análise de poucos dados ($50 < P < 120$), em comparação com o tamanho original do som digitalizado. Com estas características, o Expoente Hurst de Banda Harmônica resulta ser um descritor interessante em estudos de análise sonora. Como indicação para futuros estudos e pesquisadores motivados na área de análise sonora, é possível aproveitar as vantagens do Expoente Hurst de Banda Harmônica para trabalhos em reconhecimento e classificação de instrumentos musicais ou armazenamento de informação do instrumento em domínio comprimido.

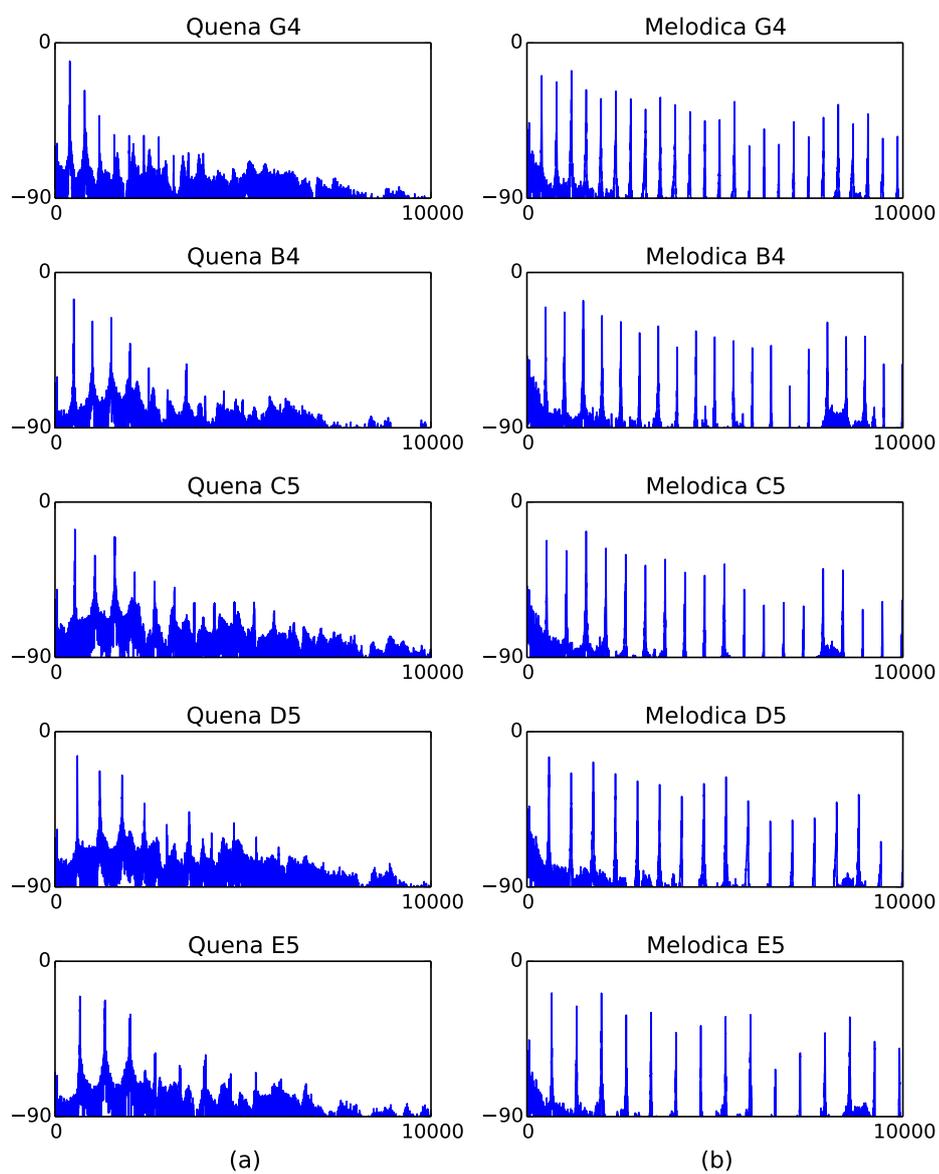


Figura 41 – Análise das notas G4, B4, C5, D5 e E5 na quena e na escaleta. (a) Espectro de potência da quena. (b) Espectro de potência da escaleta.

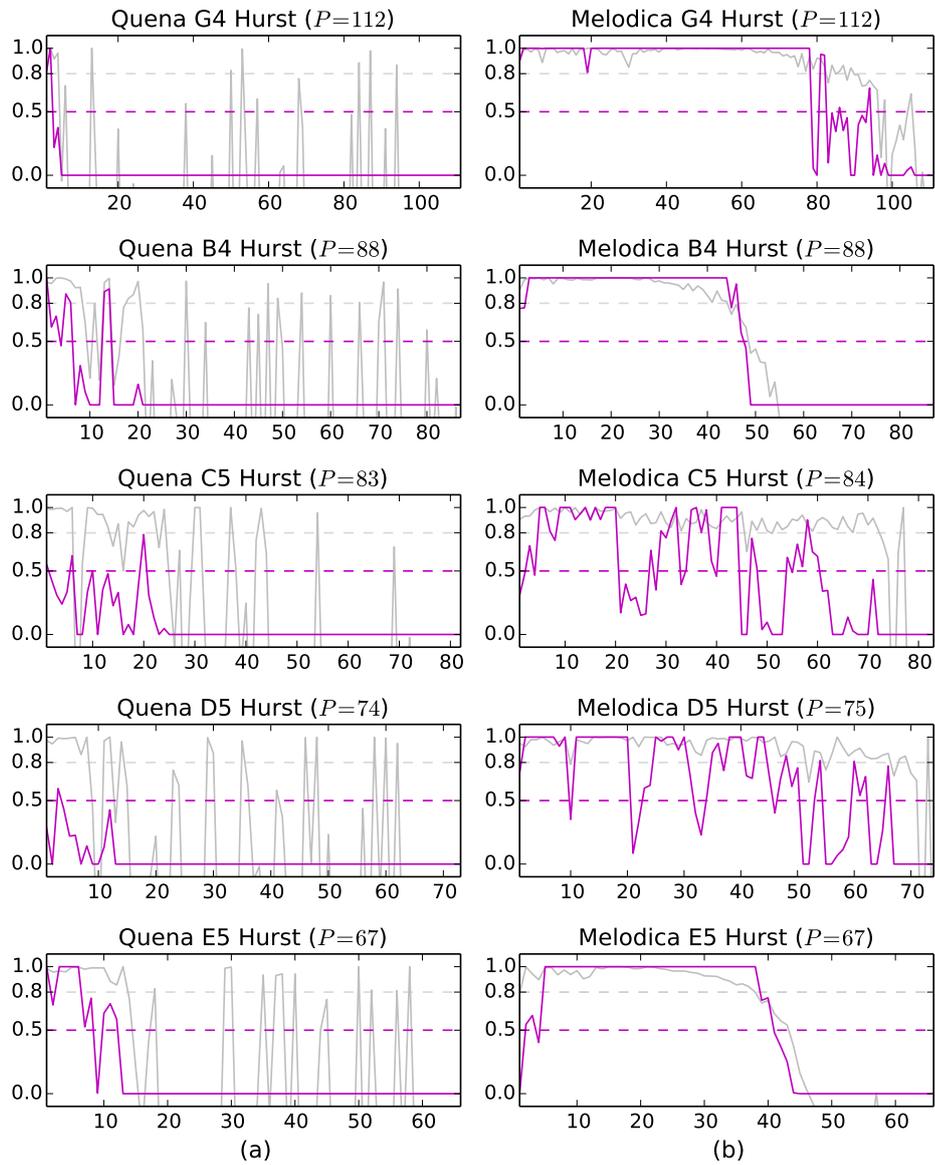


Figura 42 – Análise das notas G4, B4, C5, D5 e E5 na quena e na escala. Em magenta: Expo-
 nente Hurst de Banda Harmônica. Em Cinza: Coeficiente de correlação. (b) Expo-
 nente Hurst da quena. (b) Expoente Hurst da escala.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposto um novo atributo denominado *Expoente Hurst de Banda Harmônica* para a análise e descrição de sinais musicais baseado no modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico. Foi utilizado o método de representação de sinal da Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT), em lugar de um modelo físico de produção de som. A transformada HBWT é uma ferramenta concebida inicialmente para a síntese e geração eficiente de sinais de ruído $1/f$ pseudo-periódico que modela fielmente uma grande variedade de sinais musicais. Neste trabalho, comprovou-se que este método é também uma poderosa ferramenta analítica, útil para a separação dos sinais de ruído do comportamento harmônico puro. Este processamento favoreceu a proposição do *Expoente Hurst de Banda Harmônica*, desenvolvido a partir da decomposição dos sinais de ruído $1/f$ inter-harmônicos. O benefício do modelo de ruído $1/f$ pseudo-periódico é que pode ser controlado por poucos parâmetros completamente independentes. Tal abordagem provavelmente não seja a mais adequada para melhorar a nossa compreensão da produção do som nos instrumentos musicais do ponto de vista estritamente físico, no entanto, pode ser útil para efeitos de análise, processamento e síntese, porque:

1. O Expoente Hurst de Banda Harmônica é uma representação de sinal teórica e precisa;
2. Fornece um modelo de decomposição que favorece a caracterização dos harmônicos e do ruído;
3. Permite a extração de parâmetros acústicos perceptualmente relevantes;
4. A qualidade do som obtida experimentalmente na síntese foi excelente.

Este trabalho coloca uma luz sobre o tratamento do ruído como elemento distintivo no processamento e caracterização de sinais de áudio. Na ciência aplicada, o Expoente Hurst é usualmente utilizado para indicar a complexidade de um determinado objeto, sendo somente uma dentre varias características utilizadas para descrevê-lo. Ao longo da dissertação o Expoente Hurst de Banda Harmônica foi utilizado para descrever sinais de áudio geradas pelos instrumentos de sopro quena, flauta doce e escaleta. Como a maioria dos instrumentos baseados na ressonância de colunas de ar, o espectro dos três instrumentos analisados é principalmente harmônico. Além disso, conseguiu-se comprovar experimentalmente que as bandas laterais dos harmônicos dos sinais musicais estudados contêm energia não nula descrita por um comportamento espectral do tipo $1/f$. Esta informação foi fundamental para a extração do atributo Expoente Hurst de Banda Harmônica que caracteriza a energia das bandas laterais e fornece informação relevante para a descrição dos sinais musicais.

Estimou-se o Expoente Hurst de Banda Harmônica (H_p) a partir de regressão dos coeficientes da decomposição wavelet dos sinais de áudio gravados para um único tom desempenhado por cada instrumento, utilizando o método da Transformada Wavelet de Banda Harmônica (HBWT). Enquanto uma quantidade moderada do desvio da frequência fundamental f_0 tipicamente não causa um erro apreciável na análise das harmônicas inferiores, em uma certa harmônica a precisão da análise para os parciais superiores foi afetada. Esta é uma limitação básica da abordagem do banco de filtros harmônicos. Os erros cometidos na estimativa do parâmetro H_p (valores atípicos) foram truncados na conta obtendo uma simplificação conveniente do ponto de vista matemático para análise e interpretação dos resultados.

O Expoente Hurst de Banda Harmônica é um parâmetro que pode ser usado para a quantificação, classificação e reconhecimento de instrumentos musicais. Os harmônicos das notas musicais formam uma característica padrão do timbre do instrumento na transformação HBWT. Assumindo que cada harmônico tem o mesmo peso relativo a medida que a frequência fundamental muda, a posição relativa desses harmônicos permanece constante. Isso pode tornar a identificação de instrumentos muito mais fácil. Porém, para a diferenciação mais precisa, recomenda-se a aplicação de métodos adicionais de análise.

A metodologia proposta favorece a criação de um banco de dados do Expoente Hurst de Banda Harmônica (H_p) e correspondente Dimensão Fractal de Banda Harmônica (D_p) dos instrumentos musicais, beneficiando o armazenamento de informação em domínio comprimido das características sonoras relevantes dos instrumentos. Dado que na comunidade científica existem diversas abordagens para a extração de atributos fractais similares, torna-se complicada a comparação entre os métodos.

Um desafio a futuro será aprofundar na análise e caracterização dos ruídos de sinais musicais em termos do Expoente Hurst de Banda Harmônica em uma lista maior de instrumentos andinos incluindo a zampoña, antara e quenacho e sua aplicação na síntese e modulação do som musical.

REFERÊNCIAS

- AGAPITO, R.; ORTIZ, S.; ROJAS, M. **Caracterización musical de una quena**. 2011. 115 p. Trabalho de Conclusão do Curso — Instituto Politécnico Nacional de Mexico, Ciudad de México, 2011. Disponível em: <<http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/10750>>. Acesso em: 7 mar. 2015.
- BADER, R. Turbulent k-e model of flute-like musical instrument sound production. In: **Fractals in engineering: new trends in theory and applications**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 109–121.
- BILBAO, S. Direct simulation of reed wind instruments. **Computer music journal**, v. 33, n. 4, p. 43–55, dez. 2009. Disponível em: <<http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/comj.2009.33.4.43>>. Acesso em: 12 mar. 2015.
- BRITANAK, V. A survey of efficient MDCT implementations in MP3 audio coding standard: retrospective and state-of-the-art. **Signal processing**, v. 91, n. 4, p. 624–672, abr. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168410003622>>. Acesso em: 7 fev. 2015.
- DAS, A.; DAS, P. Fractal analysis of different eastern and western musical instruments. **Fractals**, v. 14, n. 3, p. 165–170, 2006. Disponível em: <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218348X06003192>>. Acesso em: 2 nov. 2014.
- DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 p. Disponível em: <<http://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9781611970104>>. Acesso em: 1 oct. 2013.
- DÍAZ, A.; MENDES, R. Analysis/synthesis of the Andean quena via Harmonic Band Wavelet Transform. In: **Proceedings of the 18th international conference on digital audio effects (DAFx-15)**. Trondheim: 18, 2015. p. 1–5. Disponível em: <http://www.ntnu.edu/documents/1001201110/1266017954/DAFx-15_submission_74_v3.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2015.
- ERONEN, A. Comparison of features for musical instrument recognition. In: **Proceedings of the 2001 IEEE workshop on the applications of signal processing to audio and acoustics**. IEEE, 2001. p. 19–22. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=969532>>. Acesso em: 2 jul. 2014.
- EVANGELISTA, G.; DÖRFLER, M.; MATUSIAK, E. Arbitrary phase cocoders by means of warping. **Musica/tecnologia**, v. 7, p. 91–118, 2013. Disponível em: <<http://www.fupress.net/index.php/mt/article/view/13210>>. Acesso em: 5 mar. 2015.
- FABRE, B. *et al.* **Aeroacoustics of musical instruments**. 2012. 1–25 p.
- FALCONER, K. **Fractal geometry: mathematical foundations and applications**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 366 p. Disponível em: <<http://www.google.com.tr/books?hl=en&lr=&id=xTKvG\j4LvsC&pgis=1>>. Acesso em: 5 mar. 2015.

FLETCHER, N. H. Some acoustical principles of flute technique. **Instrumentalist**, v. 28, n. 7, p. 57–61, 1974.

GERHARD, D. **Pitch extraction and fundamental frequency: history and current techniques**. [S.l.], 2003. 23 p. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.58.834&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2014.

GLOVER, J.; LAZZARINI, V.; TIMONEY, J. Metamorph: real-time high-level sound transformations based on a sinusoids plus noise plus transients model. In: **Proceedings of the 15th international conference on digital audio effects (DAFx-12)**. York, UK: 12, 2012.

GUNASEKARAN, S.; REVATHY, K. Fractal dimension analysis of audio signals for Indian musical instrument recognition. In: **International conference on audio, language and image processing**. IEEE, 2008. p. 257–261. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4590238>>. Acesso em: 2 jun. 2014.

HORNBOSTEL, E. M. V.; SACHS, C. Classification of musical instruments. **The Galpin Society journal**, v. 14, p. 3, mar. 1961. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/842168?origin=crossref>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

KIM, H.-G.; MOREAU, N.; SIKORA, T. **MPEG-7 audio and beyond**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. 1–285 p. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/0470093366>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

LLIMPE, C.; MORENO, J.; PIAGGIO, M. Introduction to the acoustic study of the Peruvian quena. In: **19th international congress on acoustics 2007 (ICA 2007)**. Madrid: Sociedad Española de Acústica (SEA), 2007. p. 1766–1772. Disponível em: <http://www.sea-acustica.es/WEB_ICA_07/fchrs/papers/mus-02-008.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2014.

MALVAR, H. S. **Signal processing with lapped transforms**. Norwood, MA: Artech House, Inc., 1992.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco, CA: Freeman, 1983. 286 p.

MARAGOS, P. Fractal aspects of speech signals: dimension and interpolation. **Proceedings of the international conference on acoustics, speech, and signal processing (ICASSP 91)**, 1991.

MARAGOS, P. Fractal signal analysis using mathematical morphology. In: **Advances in electronics and electron physics**. [s.n.], 1994. v. 88, p. 199–246. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065253908605491>>. Acesso em: 5 mar. 2015.

MARAGOS, P.; POTAMIANOS, A. Fractal dimensions of speech sounds: computation and application to automatic speech recognition. **The journal of the acoustical society of America**, v. 105, n. 3, p. 1925–1932, 1999.

MEYER, J. **Acoustics and the performance of music**. New York, NY: Springer New York, 2009. 446 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-09517-2>>. Acesso em: 13 set. 2014.

NGUYEN, T.; KOILPILLAI, R. The theory and design of arbitrary-length cosine-modulated filter banks and wavelets, satisfying perfect reconstruction. **IEEE transactions on signal processing**, v. 44, n. 3, p. 473–483, mar. 1996. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=489021>>. Acesso em: 11 set. 2014.

ÖZASLAN, T. H.; SERRA, X.; ARCOS, J. L. Characterization of embellishments in ney performances of Makam Music in Turkey. In: **ISMIR**. [S.l.: s.n.], 2012.

PAPOULIS, A. **The Fourier integral and its applications**. New York: Mcgraw-Hill, 1962. 320 p.

POLOTTI, P. **Fractal additive synthesis**: spectral modeling of sound for low rate coding of quality audio. 2003. 155 p. Tese (Doutorado) — École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003. Disponível em: <<http://infoscience.epfl.ch/record/33187>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

POLOTTI, P.; EVANGELISTA, G. Fractal additive synthesis. **IEEE signal processing magazine**, v. 24, n. 2, p. 105–115, mar 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4117933>>. Acesso em: 15 dec. 2014.

RAMAMURTHY, S.; RAGHAVAN, M. Filter design for synthesis of musical notes: a multidimensional feature-based approach. In: **IEEE international conference on signal and image processing applications**. IEEE, 2013. p. 106–111. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6707986>>. Acesso em: 14 mar. 2015.

SERRA, X. *et al.* **Roadmap for music information research**. [S.l.]: Creative Commons BY-NC-ND 3.0 license, 2013. 88 p.

SERRA, X.; SMITH, J. Spectral modeling synthesis: a sound analysis/synthesis system based on a deterministic plus stochastic decomposition. **Computer music journal**, v. 14, n. 4, p. 12, jan. 1990. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3680788?origin=crossref>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

SHADY, R. *et al.* Las flautas de Caral-Supe: aproximaciones al estudio acústico-arqueológico del conjunto de flautas más antiguo de América. **Boletín del Museo de Arqueología y Antropología de la UNMSM**, v. 3, n. 11, p. 2–9, 2000.

STRANG, G.; NGUYEN, T. **Wavelets and filter banks**. 2. ed. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 1996. 490 p.

SU, Z.-Y.; WU, T. Music walk, fractal geometry in music. **Physica A: statistical mechanics and its applications**, v. 380, p. 418–428, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107002014>>. Acesso em: 5 jan. 2015.

SUITS, B. **Physics of music - notes**. 1998. Disponível em: <<http://www.phy.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

TERRIEN, S. *et al.* Numerical resolution of a physical model of flute-like instruments: comparison between different approaches. In: **Acoustics**. Nantes: Société Française d'Acoustique, 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00811041>>. Acesso em: 12 mar. 2015.

VAIDYANATHAN, P. P. **Multirate systems and filter banks**. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 927 p.

VALIMAKI, V. Discrete-time synthesis of the sawtooth waveform with reduced aliasing. **IEEE signal processing letters**, v. 12, n. 3, p. 214–217, 2005.

WORNELL, G. W. Wavelet-based representations for the $1/f$ family of fractal processes. **Proceedings of the IEEE**, v. 81, n. 10, p. 1428–1450, 1993.

ZLATINTSI, A.; MARAGOS, P. Multiscale fractal analysis of musical instrument signals with application to recognition. **IEEE transactions on audio, speech, and language processing**, v. 21, n. 4, p. 737–748, abr. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6365763>>. Acesso em: 2 fev. 2014.