

JESSICA DALSANT

**Avaliação de duas ferramentas para a representação das variáveis
acústicas implicadas no vibrato da flauta**

Belo Horizonte
2011

JESSICA DALSANT

**Avaliação de duas ferramentas para a representação das variáveis
acústicas implicadas no vibrato da flauta**

Dissertação apresentada à Escola de Música da
Universidade Federal de Minas Gerais para
obtenção do título de Mestre em Música.

Área de concentração: Performance Musical

Orientador: Prof. Dr. Maurício Freire Garcia

Belo Horizonte

2011

DALSANT, Jessica. **Avaliação de duas ferramentas para a representação das variáveis acústicas implicadas no vibrato da flauta.** Dissertação apresentada à Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais para a obtenção do título de Mestre em Música.

Aprovado em:

Banca examinadora

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
pelo amor pela música
que me transmitiram e
o apoio que sempre deram.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Maurício Freire Garcia, pelo trabalho, a sabedoria e a disponibilidade como orientador desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Maurílio Nunes Vieira, por sua boa vontade e interesse em clarear muitas dúvidas e fazer sugestões e explicações valiosas ao meu processo de trabalho;

A João Pedro Sansão pela ajuda rápida e eficiente na elaboração dos gráficos;

A Claudio de Freitas e Reinaldo Marques pela paciência e a dedicação com que corrigiram e normalizaram o texto;

A Paola Baron por aceitar o convite de tocar comigo, ensaiar e estudar.

RESUMO

O presente trabalho investigou o *vibrato* na flauta transversal para determinar que ferramentas de análise acústica pudessem descrevê-lo de forma abrangente, tendo em vista sua aplicação no ensino dessa técnica instrumental. Depois de considerarem-se trabalhos previamente escritos sobre o assunto, resolveu-se focar a análise acústica do *vibrato* nos seguintes parâmetros acústicos: a profundidade, a taxa, o desvio da frequência fundamental, a modulação do envelope espectral, a regularidade e a forma da onda, o modo de ataque e conclusão da nota, os ruídos/nuvens “fantasmas”, a evolução no tempo.

Esse conjunto de variáveis foi avaliado por dois processos de cálculo: primeiro, o programa de análise espectrográfica SpectraPro, segundo, o algoritmo proposto pelos departamentos de eletrônica e de física da UFMG. Ambos os processos são baseados na Transformada Rápida de Fourier (FFT), mas usam interfaces diferentes.

Avaliaram-se dois tipos de amostras: 1) nota longa selecionada de gravações comerciais; 2) nota longa escolhida de gravações não comerciais feitas por diversos flautistas profissionais em diferentes oitavas e dinâmicas. A nota selecionada foi sempre a mesma e extraída da peça para flauta solo *Syrinx*, do compositor Claude Debussy (1862-1918). Os resultados da aplicação dessas ferramentas de medição do *vibrato* indicaram que o primeiro processo é mais efetivo na medição do modo de ataque e conclusão da nota, assim como, ruídos/nuvens “fantasmas”, evolução do *vibrato* no tempo e envelope espectral, mas não é adequado para rastrear a evolução temporal da taxa e da profundidade das modulações. O segundo processo calcula com maior precisão a regularidade, a forma da onda, a taxa e a profundidade da frequência fundamental (F_0). A análise de diferentes variáveis acústicas envolvidas no *vibrato* permite-nos compreender mudanças que ocorrem no timbre e no som da flauta. Deste modo, conhecendo os diversos efeitos acústicos causados pelo *vibrato* na flauta, abrem-se possibilidades técnicas e didáticas, que ajudam o flautista a aprimorar o uso, a qualidade e a flexibilidade do seu *vibrato*, aumentando os recursos timbrísticos e expressivos determinantes da qualidade sonora do instrumento.

Palavras chave: *Vibrato* na flauta transversal. Análise espectral aplicada à música. Ferramentas de análise do *vibrato*. Análise espectrográfica do *vibrato*. Algoritmo de análise do *vibrato*.

ABSTRACT

This work investigated the flute *vibrato*, to determine which analytical tools that represent it in a more comprehensive way. Our aim is to use these tools to improve flute instrumental technic.

After considering previously published works on this topic, it has been decided to focus this investigation on the following *vibrato* acoustical parameters: extent, rate, deviation from the fundamental frequency (F_0), regularity and wave shape, attack end ending of the note, use of the vibrato in the attack and ending of the note, noises/ “ghost clouds”, *vibrato* and spectral envelope evolution in time.

Two different types of tools were tested: first the spectrographic analysis program named SpectraPro, second an algorithm for the measure of *vibrato*'s fluctuations, proposed by the Physics and Electronics Departments of UFMG. Both tools are based based on the *Fast Fourier Transform* (FFT), but using different interfaces. Two types of samples have been evaluated: 1) long notes extracted from commercial recording 2) long notes from non commercial recordings, played live by different professional flutists in different dynamics and octaves. The same note was selected from a piece for solos flute, *Syrinx*, by Claude Debussy (1862-1918). The results of the application of these two tools indicated that the first one is more effective in measuring attack end ending of the note, noises/ “ghost clouds”, *vibrato* and spectral envelope evolution along the time, but it's not precise in detecting rate and extent development in time. The second tool revealed to be more precise in measuring regularity, wave shape, rate and extent of F_0 .

The analysis of different acoustical parameters involved in *vibrato* allows us to understand what kind of changes happens in flute's sound and timbre.

To comprehend the various acoustical effects caused by *vibrato* in flute sound, means giving new technical and pedagogical possibilities for every flutist to improve the use, quality and flexibility of his/her *vibrato* and timbre. This can help to enrich the sound quality and the expressive possibilities of the flute.

TERMINOLOGIA

C3 corresponde ao dó central do piano, 261 Hz, conforme o sistema de notação franco belga.

F_0 corresponde à frequência fundamental. A série harmônica depois da F_0 é composta pelo primeiro harmônico F2, o segundo F3, e assim sucessivamente.

Ruídos fantasmas: Sons de baixa intensidade que não fazem parte da série harmônica da nota, conforme Garcia (2009, p. 5).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	UMA REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1	O vibrato numa perspectiva histórica	10
2.2	Entre a física e a música: a produção do vibrato no som da flauta e os parâmetros de representação	12
2.3	A ampliação do leque das variáveis do vibrato	16
3	METODOLOGIA	21
3.1	Definição das variáveis a serem isoladas como objeto de estudo	21
3.2	Seleção do trecho a ser analisado	21
3.3	Seleção das amostras para validar a pesquisa	22
3.4	Gravação dos excertos	23
3.5	O programa de análise espectrográfica SpectraPro: descrição e análise da aplicação	23
3.6	O algoritmo de análise das flutuações do vibrato: descrição e resultados da aplicação	32
4	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51
	Bibliografia Consultada	54
	ANEXO A - Introdução à leitura de um espectrograma	56
	ANEXO B - DVD: amostras auditivas, espectrograma e gráficos	

1 INTRODUÇÃO

Quando ouvimos qualquer flautista executar uma peça musical, constatamos que a qualidade do som e a utilização do *vibrato* são os principais fatores que nos permitem identificá-lo, como uma impressão digital que o diferencia de outros.

Houve uma constante evolução histórica na definição, no uso e na função do *vibrato* da flauta, mas desde os tratados antigos até os trabalhos modernos, os estudos que enfocaram o *vibrato* estão permeados de questões estéticas e estilísticas, que não nos permitem avaliar de forma objetiva o seu uso e efeito. Um estudo de abordagem científica do efeito do *vibrato* na sonoridade da flauta, distante de considerações de cunho estético, ainda não foi desenvolvido de forma abrangente.

Fletcher (1975), Verfaille (2005) e Wion¹ forneceram os pressupostos teóricos para a compreensão do *vibrato* na flauta transversal. Por sua vez, a fundamentação metodológica do presente trabalho baseia-se na pesquisa “A Análise Espectrográfica como Ferramenta Pedagógica”, realizada entre os anos de 2006 e 2007 na Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), coordenada pelo Prof. Dr. Maurício Freire Garcia e realizada por meio do programa de análise espectrográfica SpectraPro, baseado na análise de Fourier.

Além disso, ressaltando a necessidade de se considerar um grupo mais amplo e diferenciado de variáveis acústicas para descrever o *vibrato*, em comparação ao programa SpectraPro, verificou-se a eficácia de outra ferramenta, um programa baseado num algoritmo computacional de análise das flutuações do *vibrato*, desenvolvido entre os anos de 1998 e 2010, por Maurílio Nunes Vieira e José Eduardo de Carvalho Silva, nos departamentos de física e de eletrônica da UFMG, respectivamente.²

Com a avaliação dessas duas ferramentas de análise dos parâmetros do *vibrato*, respondeu-se à hipótese de que seria necessário usar ferramentas diferentes para variáveis específicas, para se obter um modelo de representação do *vibrato* mais completo.

¹ WION, J. **Vibrato**. Disponível em: <<http://homepage.mac.com/johnwion/vibrato.html>>. Acesso em: 03 maio 2010

² Segundo Tavares (1998), “um algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita. Um algoritmo não representa, necessariamente, um programa de computador, e sim os passos necessários para realizar uma tarefa. Sua implementação pode ser feita por um computador, por outro tipo de autômato ou mesmo por um ser humano. Diferentes algoritmos podem realizar a mesma tarefa usando um conjunto diferenciado de instruções em mais ou menos tempo, espaço ou esforço do que outros. Um programa de computador é essencialmente um algoritmo que diz ao computador os passos específicos e em que ordem eles devem ser executados”. (TAVARES, P. de C. **Algoritmo**. In: Enciclopédia Verbo Luso-Brasileira da dada Cultura, Edição Século XXI, Volume II, Editorial Verbo, Braga, 1998). ISBN 972-22-1864-6.

Então, partindo dos trabalhos de Fletcher (1975), Verfaille (2005) e Wion³ definiram-se sete variáveis a serem incluídas na análise do *vibrato*: 1) A profundidade. 2) A taxa. 3) O desvio da frequência fundamental. 4) A modulação do envelope espectral. 5) A regularidade e a forma da onda. 6) O modo de ataque e conclusão da nota. 7) Os ruídos/nuvens “fantasmas”.⁴ 8) A evolução no tempo.

Em seguida, foi selecionada a amostra a ser analisada: usou-se um trecho extraído de uma peça do repertório ao invés de se criar um trecho “abstrato”, seja para comparar gravações comerciais em contraposição a registros não comerciais, seja para garantir a mesma intenção musical, a qual influi na realização do *vibrato*. Com esses pressupostos, optou-se por uma peça para flauta solo, *Syrinx* de Claude Debussy, para evitar que o acompanhamento de outros instrumentos interferisse na análise do som da flauta. Além disso, foi escolhida uma nota isolada dessa peça.

Foram analisadas dezenove amostras: nove foram extraídas de gravações comerciais, dez foram registradas ao vivo por seis flautistas profissionais e quatro alunos da Academia Reina Sofia de Madrid (Espanha).

Foi usado o gravador digital Olympus LS-11, configurado para gravar no formato *Wave* 44,1 kHz e 16 bits, compatível com ambos os programas.

Converteram-se todos os trechos de estéreo para mono, para evitar a questão das diferenças entre os dois canais, por isso foi usado o *software* MeowMultiSound 1.0.0.

Não foi necessário procurar condições acústicas controladas e constantes para a coleta das amostras, pois nosso objetivo foi a avaliação da eficácia das duas ferramentas de análise e não a comparação entre flautistas. Conseqüentemente, reajustou-se a calibração do programa de análise espectral, procurando a imagem mais clara possível em cada amostra.

Os resultados mostraram que o programa SpectraPro pode ser considerado uma ferramenta eficaz para a análise de alguns parâmetros sonoros como, por exemplo, modo de ataque e conclusão da nota, além de, evolução do *vibrato* no tempo, envelope espectral e ruídos/nuvens “fantasmas”, assim como, variações de presença e de intensidade dos harmônicos superiores. O programa de análise das flutuações do *vibrato* desenvolvido na UFMG por Vieira e Silva, demonstrou-se superior na descrição de regularidade, forma, taxa e profundidade da frequência fundamental.

O *vibrato*, além de manifestar as intenções interpretativas e a personalidade de um músico, contribui para o resultado sonoro desejado. Em vista disso, o presente trabalho

³ Cf. Nota 1, p. 7.

⁴ Sons de baixa intensidade que não fazem parte da série harmônica da nota, segundo Garcia (2009, p. 5).

coloca-se como um primeiro passo de um caminho que no futuro possa levar a compreender mais profundamente o funcionamento das variações espectrais do *vibrato*. Ao termos uma ferramenta refinada pela análise das diferentes variáveis acústicas envolvidas no *vibrato*, poderíamos entender como trabalharíamos com o timbre e o som para decifrar eventuais dificuldades práticas, como, por exemplo, termos que tocar em um ambiente com características acústicas muito secas ou muito ressonantes. Além disso, no futuro, ajudar-nos-ia a detalhar uma “configuração de variáveis” particular de cada flautista, que definiria objetivamente aquela “especificidade” no *vibrato* que confere ao timbre uma qualidade individual que distingue um flautista do outro.

Ao compreendermos os diversos efeitos acústicos causados pelo *vibrato* no som da flauta, seriam abertas possibilidades técnicas e didáticas que ajudariam o estudante ou o profissional a aprimorar o uso, a qualidade e a flexibilidade do seu *vibrato*, aumentando os recursos timbrísticos e expressivos determinantes da qualidade sonora do instrumento.

2 UMA REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O vibrato numa perspectiva histórica

A ideia de *vibrato* evoluiu muito na história do desenvolvimento da flauta. Nos tratados antigos, o *vibrato* era considerado uma ornamentação e não uma componente constante do som dos instrumentos.

Nessa literatura detecta-se a falta de unanimidade sobre os termos de definição das ornamentações: diferentes autores em diferentes tratados chamaram a mesma ornamentação com nomes diferentes ou usaram o mesmo nome referindo-se a ornamentações diferentes. Essa falta de clareza pode ser resolvida consultando cada tratado para entender aquilo que o autor queria dizer num determinado contexto. Tentaremos simplificar o caminho histórico da definição do *vibrato*, expondo as principais fontes.

Agricola, no tratado *Musica Instrumentalis deudsch*⁵ (1529 apud SOLUM, 1992, p. 17), descrevera um “*vibrato* de dedos” ou *flattement* e um “*vibrato* de sopro”, diferenciado em “tremolo feito com a garganta” (podemos supor de laringe) e “tremolo feito com o tórax” (podemos supor de diafragma).

No tratado de 1707, Hotteterre (1968, p. 34) explicara que a denominação *flattement* ou *tremblement mineur* é diferente do *trillo* (por ele chamado de *cadence ou tremblement*) porque termina levantando-se o dedo que fazia o próprio *flattement* para se voltar para a nota real, já que esse tipo de ondulação era feito com a nota inferior (*flat*). Na opinião dele, os *flattements* tinham que ser usados "nas notas longas" como semibreves, mínimas ou semínimas pontuadas, segundo critérios ditados pela prática e pelo bom gosto.

Quantz (1752, p. 136-140) ao explicar como se deve tocar um Adágio, descreve o *flattement* em relação à *messa di voce*.⁶ Para ele, o *flattement* tem que ser feito em uma nota que tem a possibilidade de crescer e ter uma forma, assim como o *vibrato*. Para executar o *flattement* precisa “fazer uma *Bebung* com os dedos”.⁷ Então, ele traduz a palavra francesa *flattement* para o alemão *Bebung*.

O *vibrato* de sopro foi preferido por Agricola e Delusse (1760, p. 9), que o descreve como “uma pulsação da coluna de ar, provocada assoprando-se as sílabas *hou, hou, hou* (Hagá

⁵ AGRICOLA, M. *Musica instrumentalis deudsch*. Wittenberb, Germany: Georg Rhau, 1529.

⁶ Termo italiano para “colocação da voz”, ou seja, é um aspecto da técnica do *bel canto*. Consiste em cantar uma nota com uma dinâmica pianíssimo e lentamente abri-la, fazê-la mais poderosa até um forte, e logo reduzi-la até a dinâmica pianíssimo inicial.

⁷ Tradução nossa de *mit dem Finger eine Bebung machen*.

aspirada a se pronunciar como no inglês *how*) com maior frequência possível”. O *vibrato* de tórax era, na opinião dele, parecido ao que na Itália era chamado *tremolo* e era um modo alternativo de executar o *vibrato*, o que contribuía muito para a melodia, enquanto utilizado *ad libitum*. Geralmente o *vibrato* era associado a caràteres ternos, afetuosos, apaixonados ou de lamentação e choro, e primariamente utilizado em notas longas como recurso expressivo.

Tromlitz (1791) definiu o *flattement* como “um movimento flutuante, ondulado, produzido sobre uma nota longa, que pode ser lento ou rápido, uniforme, crescente ou decrescente.”⁸ O *flattement* era executado de forma parecida a um *trillo*: o dedo do flautista abria e fechava o furo correspondente à nota desejada, mas só parcialmente, chegando a cobrir no máximo até a metade do furo. Em relação ao *vibrato* executado com sopro, ele tinha uma opinião claramente contrária: “[...] lembro mais uma vez que, na flauta, a *Bebung* não tem que ser feita com o tórax porque pode facilmente induzir a tocar com um som trêmulo, coisa que leva a uma *performance* fraca.” (TROMLITZ, 1791, p. 240, tradução nossa).⁹

Segundo Lanfranchi (informação verbal),¹⁰ muitos flautistas não tinham uma opinião favorável ao *vibrato* de sopro, devido à dimensão do furo do bocal. De fato, sendo ele menor em relação ao da flauta moderna, as variações da pressão da coluna de ar podiam provocar instabilidade e um enfoque irregular na emissão do som.

Consideramos, também, o tratado de Montéclair, de 1736, denominado *Principes de Musique*. Na verdade, o autor ocupara-se sobretudo do canto, mas para definir o *vibrato* da voz, ele usara uma imagem violinística: o *flattement*, que ele chama de *flaté*, era uma ondulação da voz que produzia a mesma vibração de uma corda tesa posta em vibração pelo dedo. Como consequência, entendemos melhor como executá-lo na flauta: o *flattement* da flauta, que era feito com os dedos, como no violino, é relacionado ao *vibrato* da voz, feito claramente com o "sopro". De qualquer forma, o *flattement* da flauta é uma ornamentação a ser usada com parcimônia e nos momentos de maior expressão.

Fürstenau (1844, p. 81), em sua opinião sobre o *vibrato* de tórax, revelara uma estética romântica, em que ele era utilizado para criar ou intensificar a expressividade e o *pathos* e estava tipicamente aplicado às notas de um clímax, no ápice emocional da frase musical, que era precedido normalmente por um crescendo. Nota-se como ele diferenciou o *flattement* ou *klopfen* (*vibrato* de dedos) da *Bebung*.

⁸ TROMLITZ, J. G., 1791, p. 239, tradução nossa.

⁹ “[...] ich erinnere noch einmahl, dass man auf der Floete die *Bebung* nicht mit dem Brust machem moege, weil man sich sonst sehr leicht zum Zittern gewoehnne koenne, woraus ein elender Vortrag entstehet.”

¹⁰ Informação fornecida em São Paulo, em 2011, por Livia Lanfranchi (Mestre em flauta *traverso* e clássica no Koninklijk Conservatorium The Hague, com Barthold Kuijken).

O *flattement* foi aos poucos abandonado, porque não combinava bem com a nova mecânica das flautas Boehm e o *vibrato* de sopro o substituiu permanentemente.

No percurso histórico acima descrito, nota-se que, antigamente, o *vibrato* fora considerado uma ornamentação. Ele tinha a função de sublinhar e destacar diferentes tipos de sentidos e carâteres de uma peça; além disso, a velocidade das pulsações do *vibrato*, seja de dedos ou de sopro, tinha que mudar segundo o caráter da música.

Por sua vez, o *vibrato* moderno é normalmente produzido por meio de uma pulsação da coluna de ar, controlada pelos músculos da garganta e do diafragma. Deixou, então, de ser uma questão de “gosto” e passou a ser um parâmetro a ser controlado, um recurso essencial para conferir o brilho e a projeção necessários ao som da flauta, quando ouvido em nossas orquestras sinfônicas e nas salas modernas de concerto de amplas dimensões.

Na opinião de Lanfranchi (informação verbal),¹¹ poderíamos relacionar a mudança no uso do *vibrato* com a adoção do temperamento igual ao longo do século XIX, sendo gradualmente eliminados os intervalos justos/puros da afinação dos teclados. Desse modo, o *vibrato* contínuo teria sido um recurso para dissimular os problemas de afinação que se apresentavam toda vez que era preciso tocar com um instrumento com a afinação prefixada como, por exemplo, o piano.

Mas, de que forma o *vibrato* influi no som e no timbre da flauta? O que é que muda? Procuramos, em seguida, por uma resposta na parte científica da literatura sobre o *vibrato*.

2.2 Entre a física e a música: a produção do vibrato no som da flauta e seus parâmetros de representação

O termo *vibrato*, utilizado no italiano e no francês - ou segundo Fürstenau (1844), *Bebung*, no alemão - foi empregado para traduzir palavras como “ondulação”, “onda” ou “tremor” na tentativa de caracterizar a percepção da mudança ondulatória de afinação, timbre ou intensidade, procurada como finalidade expressiva na *performance* musical.

Seashore (1938, p. 199-203) deu uma primeira definição e também uma tentativa de representação do vibrato usando a *Violin Performance Score*,¹² um procedimento de análise que mostra modulações de frequência e de amplitude (AM/FM) ao longo de uma *performance* com o violino.

De acordo com Fletcher (1974, p. 61), o vibrato da flauta, ao contrário daquele

¹¹ Cf. Nota 9, p. 11.

¹² SMALL, 1937, p. 172-231.

produzido pelos instrumentos de corda, é eminentemente de intensidade. Enquanto no violino, por exemplo, os pequenos movimentos do dedo sobre uma corda provocam ondulações na frequência (variações de afinação) que chamamos de *vibrato*, na flauta, ele é feito por meio de pequenos *crescendos/diminuendos* (variações de dinâmica) que sendo impossíveis de serem compensados, provocam como efeito secundário alterações de frequência (afinação). A variação de frequência considerada como secundária por Fletcher (1974) acontece, então, como um efeito colateral da variação de intensidade.

Garcia (2009, p. 1-8.) explica que todo flautista é treinado – ou pelo menos assim deveria ser - a compensar as tendências de variação de afinação que acontecem com a dinâmica. De modo geral, a afinação da flauta tende a subir quando aumentamos a intensidade e a baixar quando diminuimos a intensidade. Esse controle torna-se ainda mais importante quando notamos que esta tendência acústica da flauta é oposta aos outros instrumentos de sopro da orquestra. Infelizmente, é impossível realizarmos os pequenos ajustes de embocadura/coluna de ar na velocidade do vibrato, que gira, em média, conforme Fletcher (1975, p. 236), em torno de 300 oscilações de intensidade por minuto.

Verfaille (2005, p. 3), de acordo com Fletcher, afirma que o vibrato nos instrumentos de sopro é obtido por meio de uma modulação no fluxo de ar: isso produziria uma variação na amplitude (AM) e conseqüentemente na frequência fundamental (FM).

Começamos, então, a individualizar alguns dos parâmetros acústicos envolvidos no vibrato: variações de frequência (FM) e de amplitude (AM). No caso da flauta, tem prioridade a mudança de amplitude, ou seja, de dinâmica.

Em qualquer instrumento acústico, variação de dinâmica significa mudança no número e na distribuição de intensidade dos harmônicos, que são umas das determinantes do timbre.

Lembramos que um tom harmônico caracterizado por alguma periodicidade, consiste de uma frequência fundamental e de uma série de frequências mais altas, chamadas de harmônicos ou parciais superiores. Dois tons produzidos por diferentes instrumentos podem ter a mesma frequência fundamental, ou seja, a mesma afinação, mas “soar” diferentes por causa da diferença entre as intensidades relativas de uns harmônicos. Podemos definir o timbre como aquele “atributo do sentido auditivo em termos do qual o ouvinte pode julgar que dois sons similarmente apresentados com a mesma intensidade e altura, são dissimilares” (RISSET e WESSEL, 1999).

Fletcher (1975, p. 233) investigou esse ponto em um experimento em que examinou as diferentes componentes do *vibrato* usando um analisador de onda. Ele mostrou as mudanças que o *vibrato* produz nas parciais que formam um som e afirmou que as variações envolveram

os harmônicos superiores, mais do que a fundamental. Em seu experimento, a amplitude do quarto e do quinto harmônico pareceu mudar muito mais do que o da fundamental, enquanto as mudanças de afinação associadas resultaram pouco significativas.

Para Fletcher (1975), apesar de existirem pequenas variações de frequência e intensidade, o *vibrato* da flauta é prevalentemente um *vibrato* de timbre: “[...] é possível entender que o *vibrato* consiste essencialmente em uma variação de amplitude [intensidade] dos harmônicos superiores do som, causando variações periódicas no volume e, principalmente, no timbre” (FLETCHER, 1975, p. 236, tradução nossa).¹³

As conclusões de Fletcher (1975, p. 233) foram obtidas por meio de um experimento cuja validade nos deixa em dúvida. Ele utilizou-se de quatro flautistas: entre os quais, dois eram flautistas profissionais, um semiprofissional e um estudante avançado. Assim, seja por causa do pequeno número de participantes, seja pela diferença de nível entre eles, percebemos que a possibilidade de generalizar os resultados obtidos precisaria ser verificada.

Segundo Cogan (1998), “com as tecnologias científicas do século XX é possível agora analisar amostras de som linguisticamente e musicalmente, tanto na música instrumental quanto na música vocal, por meio de espectrogramas.” O mesmo autor (1998) afirma que o uso de espectrogramas pode facilitar a análise musical, por permitir uma visão diferente da usual: “telescopicamente, um espectrograma possibilita um retrato da macroestrutura de uma obra musical; [...] por outro lado, propicia uma rara e penetrante visão da microestrutura musical, dos harmônicos que abrangem a realidade subatômica da música.” (COGAN, 1998, p. 2).

Verfaille (2005) depois de apresentar uma resenha das diferentes definições e aspectos descritivos do *vibrato* baseados principalmente nos parâmetros da modulação de frequência e amplitude (AM/FM) propõe um modelo mais completo, que compreende a modulação do envelope espectral (SEM).

A pesquisa de Verfaille (2005) pretendia desenvolver um modelo generalizado, que poderia abranger a diversidade de comportamento do *vibrato* em diferentes instrumentos e na voz cantada. Na proposta dele, esse modelo poderia ser utilizado para transformar o *vibrato* dos instrumentos acústicos tradicionais e gerar sons sintetizados com *vibrato* em instrumentos digitais. Para validar o modelo, Verfaille (2005) investigou a influência da modulação do envelope espectral (SEM) na qualidade percebida do som. Integraram o experimento, oito participantes, cinco com e três sem formação musical.

¹³ “[...] it is apparent that flute vibrato consists largely of an amplitude modulation of the upper partials of the tone, causing a periodic variation both in loudness and, more importantly, in timbre”.

Utilizou-se no experimento doze pares de sons com *vibrato*, sintetizados a partir de sons originais de saxofone alto. Cada um desses pares incluíam um som com um envelope espectral médio constante (AM idêntica por todas frequências) e outro com envelope espectral modulado (frequência dependente da AM). Ambos sons de cada par tinham sido subjetivamente nivelados na amplitude em um experimento antecedente por cinco ouvintes treinados. Pediu-se a seguir, para que fosse dito que versão soava mais natural e justificar a escolha por meio de um questionário escrito e uma porcentagem estatisticamente relevante dos participantes preferiu o som com o envelope espectral modulado. Os pares foram apresentados de maneira casual, evitando, assim, que as preferências pudessem ser influenciadas pelo efeito/ordem ou pelo efeito/sequência de cada par/estímulo. Dessa forma, Verfaille (2005) demonstrou que a modulação do envelope espectral é claramente percebida no som do saxofone com *vibrato*, assim como fundamental na geração do efeito/*vibrato*, precisando-se considerá-la entre os parâmetros fundamentais em um modelo de representação do vibrato.

Outra importante observação saiu do trabalho de Verfaille (2005) com a análise espectral: ele achou que um enriquecimento espectral aparece enquanto o músico sopra mais *forte* e desaparece enquanto sopra mais *piano*.

Garcia (2009. p. 1-8.) corroborou as observações de Verfaille (2005) sobre o enriquecimento espectral, assim como as de Fletcher (1975) sobre as variações que envolvem os harmônicos superiores. Relembremos seu trabalho na figura 1, que mostra as pequenas variações de frequência da fundamental nas pequenas curvaturas que aparecem na linha de baixo do gráfico.

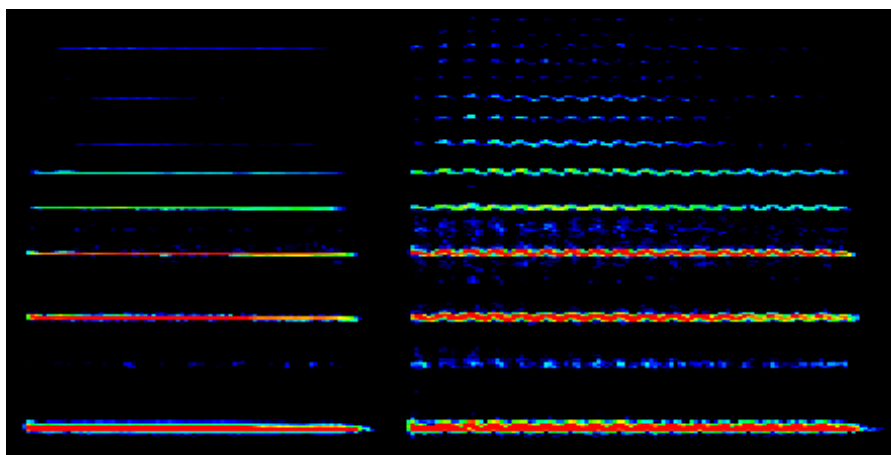


Figura 1 - Espectrograma da nota dó 5 sem e com vibrato

Nessa imagem (retirada do artigo de Garcia 2009, originalmente sem escala de frequência e intensidade), torna-se claro também que essas mesmas variações acontecem nos

parciais superiores; de acordo com as observações de Fletcher (1975), Garcia (2009. p. 1-8.) considera que a intensidade dos harmônicos também muda - o efeito pode ser identificado pela modificação nas cores das linhas, onde a cor vermelha indica uma intensidade mais forte. Essa variação é tão marcada que alguns harmônicos chegam a desaparecer, formando pontos em vez de linhas. Com relação à leitura de um espectrograma, ver anexo B.

Igualmente, vê-se na referida imagem que acontece um “enriquecimento” no espectro do som com o *vibrato*. Além do aumento do número e da intensidade dos harmônicos, outros sons, que não são nem a fundamental ou os parciais superiores, são reforçados pelo uso do *vibrato*.

Uma linha entre a fundamental F_0 e o segundo harmônico que aparecia de uma forma tênue na nota sem *vibrato*, torna-se muito mais clara e segundo harmônico que aparecia de uma forma tênue na nota sem *vibrato* torna-se muito mais clara ao adicionar-se o *vibrato*. Que frequência seria esta? Trata-se de uma espécie de “fantasma” do terceiro harmônico (12^a) da nota sol 3, fundamental do tubo. A presença dessa frequência não é descrita em nenhum trabalho sobre *vibrato* e abre um novo leque de investigação. Além disso, o trabalho de Garcia (2009) ressalta uma “nuvem” azul de ruídos principalmente entre o terceiro e o quarto harmônico. Será que esses ruídos são sempre iguais e constantes ou alguma coisa específica e única para cada flautista?

Fletcher aborda superficialmente este aspecto, detectando variações tanto de presença como de intensidade dos harmônicos superiores, que são determinantes para a percepção do timbre, mas como observado, o envelope espectral, com particular atenção aos harmônicos agudos, precisa de um estudo mais profundo e detalhado e entra com certeza nos parâmetros fundamentais que definem o *vibrato*.

2.3 A ampliação do leque das variáveis do vibrato

Na construção de um modelo de representação do vibrato juntamos até agora as primeiras variáveis a serem consideradas: a modulação de frequência e amplitude (AM/FM), assim como, a modulação do envelope espectral (SEM), com atenção aos harmônicos agudos.

Porém, outros aspectos que ainda precisam ser mais profundamente estudados emergiram. Tentaremos identificá-los, sabendo que esta seleção influi na escolha da metodologia e das ferramentas de análise.

Diversos autores, por meio de trabalhos científicos, tentaram definir os parâmetros acústicos que caracterizam o *vibrato*.

Sundberg (1995) individualiza quatro parâmetros próprios do vibrato no canto:

- 1) Taxa: velocidade do vibrato, número de ondulações por segundo = $1/\text{Período}$.
- 2) Extensão: profundidade ou amplitude da onda.
- 3) Regularidade: mede a similaridade entre os ciclos. É considerado um sinal de habilidade, quanto maior é a regularidade, melhor a qualidade do vibrato.
- 4) Forma da onda: contorno da onda ao longo do tempo; pode ser senoidal, triangular ou trapezoidal.

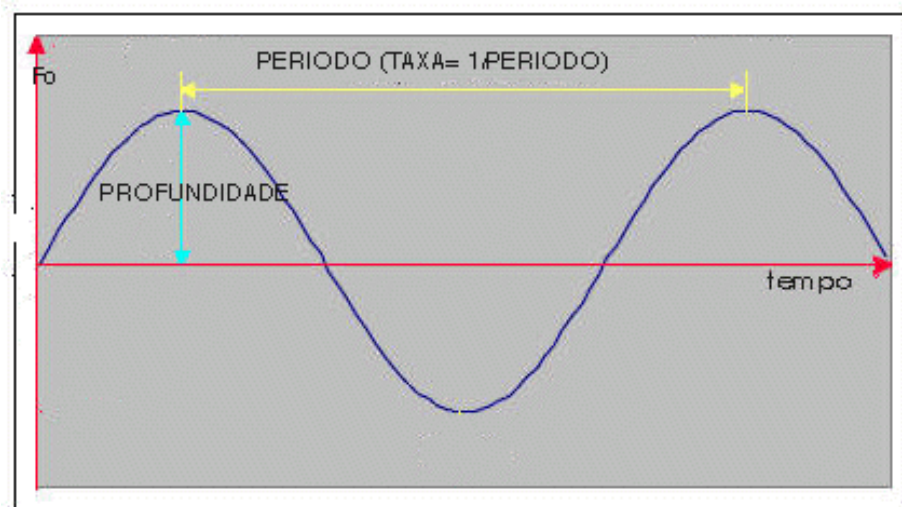


Figura 2 - Definição de período, taxa e profundidade do vibrato

O mesmo autor acrescenta que os últimos dois parâmetros, isto é, a regularidade e a forma da onda, ainda não foram adequadamente estudadas. Em um estudo posterior sobre o *vibrato* envolvendo dez sopranos cantando uma nota longa em crescendo (BRETOS; SUNDBERG, 2002, p. 37-44) a taxa revelou não ser constante para a mesma cantora e foi também comprovado que a média das frequências fundamentais varia sistematicamente junto com o nível sonoro. A mesma coisa acontece pelo desvio da média.

Wion construiu uma página *web* sobre o *vibrato*.¹⁴ Ele selecionou trechos de gravações de vários flautistas e fez uma análise do *vibrato* de cada um. Como método, ele diminuiu a velocidade das amostras sonoras em 300% e evidenciou aspectos surpreendentes de cada flautista, como taxa do vibrato, variação de frequência, direção da variação de frequência (para cima ou para baixo da nota), regularidade, etc.

¹⁴ Disponível em: <<http://homepage.mac.com/johnwion/vibrato.html>>. Acesso em: 03 maio 2011.

O trabalho de Wion¹⁵ detecta, mas não quantifica as variações de frequência. Segundo Garcia (2009. p. 1-8.), Wion, na mencionada página, acrescenta considerações de cunho estético e de gosto pessoal, que divergem do tom central de suas análises, as quais, entretanto, enfocam apenas o que ocorre com a fundamental, sem abordar o que acontece nos harmônicos superiores do som, os quais determinam o timbre. O *vibrato* provoca mudanças de timbre: mas que tipo de mudanças seria e a que nível aconteceria?

O timbre de um som não é determinado exclusivamente pela configuração estática do espectro. Por exemplo, um sintetizador é um instrumento eletrônico capaz de produzir sons a partir de sinais elétricos com frequências diferentes. Desse modo, produz uma grande quantidade de sons, e pode também imitar os instrumentos acústicos. Porém, os sintetizadores falharam ao não reproduzir as irregularidades orgânicas que ocorrem no som natural.

Para conseguir uma imitação fiel, historicamente, em computação musical, foram usadas as técnicas de análise e síntese de timbres musicais. A análise extrai informações parametrizáveis do sinal musical existente no domínio do tempo, e as utiliza como parâmetros controladores em um processo inverso, isto é, a síntese, por meio do qual se reproduz o sinal original. A análise espectral é uma técnica deste tipo.

O espectro de qualquer som real tem uma constante evolução temporal. Para obter uma imitação semelhante, o processo de síntese de um sinal sonoro tem que gerar um envelope que controle os parâmetros em cada momento da duração do sinal. Esse envelope é conhecido pela sigla inglesa ADSR e inclui um conjunto de quatro estágios: ataque (*attack*), uma queda inicial (*decay*), um período de sustentação (*sustain*) e a queda final (*release*). A figura 3 ilustra o envelope temporal e seus estágios ou regiões básicas descritas sob um ponto de vista físico.

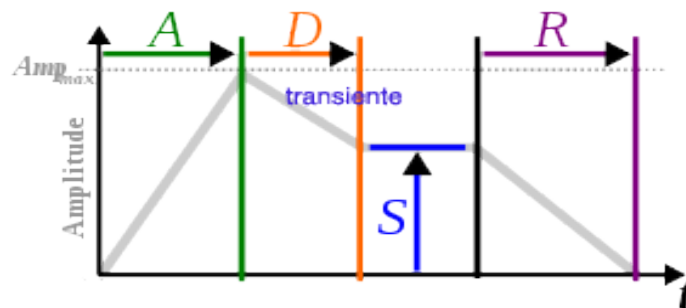


Figura 3 - Envelope de amplitude x tempo, ou ADSR¹⁶

¹⁵ Ibid.

¹⁶ Imagem disponível em <http://www.musicproductioncourses.net/edm-electronic-dance-music-production-envelopes-and-adsr/>. Acesso em 04. mar. 2011

A) Ataque - a primeira região de subida do tom até um pico determinado - refere-se ao período transitório de excitação quando vibrações em várias faixas de frequência são estabelecidas e um determinado padrão harmônico, solicitado.¹⁷

D) Decaimento - o período sucessivo: vai do pico do ataque (transiente) até a etapa de regime permanente em que as vibrações convergem para modos estacionários.

S) Sustentação - o período referente ao estado de regime permanente, em que as vibrações são sustentadas pela duração - e sob o efeito das modulações - que se desejam impor ao tom/timbre.

R) Liberação - o período de colapso, que se inicia ao fim da excitação e corresponde ao desvanecimento do tom, associado ao desmonte dos padrões vibratórios, até o seu completo término.

A dinamicidade do espectro de um som real fica especialmente acentuada nas fases transitórias do som (*attack*, *decay* e *release*), que são importantes para o reconhecimento do timbre e pela identificação do instrumento. O mesmo Fletcher (1975, p. 57), sublinha a importância do modo de ataque e fechamento de uma nota: explica que, por exemplo, se excluirmos o ataque de um som numa gravação, fica difícil perceber que instrumento está tocando. A fase de sustentação (*sustain*) é marcada por variações espectrais menores.

Em 1969, Risset e Mathews realizaram estudos para desvendar aspectos intrigantes dos timbres de trompetes e violinos que os tornavam inimitáveis. Estudaram, de cada instrumento, a sua estrutura espectral, determinando sua composição, sua frequência e sua evolução no tempo. O que mais os intrigava era a “relutância” que esses timbres, em particular, tinham em serem imitados por processos de síntese artificial.

Nesse trabalho, os sons instrumentais foram analisados e a relevância destas análises foi *checada* pela síntese: ao ter os parâmetros “auditivamente” significativos, as análises deveriam permitir uma imitação razoável do som analisado. Dessa forma, Risset e Mathews puderam verificar a relevância dos dados da análise, assim como validar o modelo de síntese empregado.

Utilizando as técnicas de análise e síntese no estudo do trompete, Risset observou que o aumento na intensidade (*loudness*) do som implicava num alargamento do espectro do timbre, enriquecendo-o. Também verificou que os parciais harmônicos mais altos apareciam mais tarde no ataque, depois dos parciais baixos, e também terminavam antes que estes. Embora variações aleatórias da amplitude dos parciais não provassem ter alguma importância

¹⁷ IAZZETTA, F. **Transiente**. Disponível em <<http://www.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/acustica/transientes/transientes.html>>. Acesso em: 02 abr. 2011.

para o ouvido, variações aleatórias das frequências desses parciais foram importantes na síntese de sons realistas do trompete. Por intermédio de testes auditivos, concluiu-se que certas características do som do trompete obedecem mais as leis de variação do espectro do que a características fixas da estrutura espectral (RISSET, 1965; RISSET; MATHEWS, 1969).

Graças a esses resultados, podemos juntar mais variáveis a serem analisadas com nossas ferramentas: modo de ataque/fechamento do som e evolução no tempo.

Todos esses trabalhos, além de tomar como ponto de partida sons de instrumentos musicais tradicionais procurando imitá-los fidedignamente, exploram o mundo dessa propriedade do som que chamamos de timbre, procurando entender como ouvimos os sons desses instrumentos e principalmente como ouvimos a música produzida por eles.

Portanto, o timbre é um fenômeno de difícil definição. Ele depende, até certo ponto, do espectro do som, mas vai além disso. Por exemplo, é possível reconhecer diferentes instrumentos tocados através de um rádio de pilha monoaural e de baixa fidelidade, o qual distorce e corta o espectro original dos sons. O fato de aumentarmos o volume do som nesse tipo de dispositivo não altera nossa percepção da dinâmica do som original, como por exemplo, se é um pianíssimo ou um fortíssimo. Isso constitui outra confirmação sobre a complexidade da percepção do timbre.

O espectro e o timbre são conceitos relacionados, mas não equivalentes. Segundo Loureiro (2006, p. 57),

[...] o timbre é o atributo do som que apresenta maior complexidade na medição e na especificação dos parâmetros envolvidos na sua percepção. O conceito abstrato aparentemente simples de timbre refere-se comumente à cor ou à qualidade do som. É percebido a partir da interação de inúmeras propriedades estáticas e dinâmicas do som, agregando não apenas um conjunto extremamente complexo de atributos auditivos, mas também uma enorme gama de fatores que traduzem aspectos psicológicos e musicais. As ferramentas computacionais de análise baseadas no espectro encontram limites em tarefas de alto nível em musicologia, como análise de estilos, percepção e identificação de características na interpretação musical.

A análise desses elementos característicos dos timbres instrumentais, encontra alicerce em grande parte nos paradigmas da psicoacústica. Psicólogos usam o termo timbre para se referirem às qualidades percebidas e aos mecanismos perceptuais que permitem classificar os sons em famílias.

3 METODOLOGIA

Avaliamos duas ferramentas com a finalidade de verificar sua efetividade na análise das diferentes variáveis que descrevem o *vibrato*. Por meio dessas ferramentas foi possível desenvolvermos um modelo de representação do *vibrato* mais completo que os precedentes. (ver itens 2.2 - 2.3 acima).

A primeira ferramenta foi a *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier) implementada no programa de análise espectrográfica SpectraPro. A segunda ferramenta - consiste no algoritmo de análise das flutuações do vibrato desenvolvido por Maurílio Nunes Vieira (VIEIRA M. N., 1998 e VIEIRA M. N. et al., 2011) no departamento de física da UFMG e investigado por José Eduardo de Carvalho Silva, em 2010, em sua dissertação de mestrado em engenharia elétrica, na mesma universidade. As duas serão detalhadamente apresentadas e discutidas nos próximos capítulos.

O presente trabalho pode ser definido como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e com objetivos descritivos de caráter transdisciplinar – em colaboração com o departamento de física da UFMG - cujos passos metodológicos descrevemos a seguir.

3.1 Definição das variáveis a serem isoladas como objeto de estudo

Por meio da revisão bibliográfica conseguimos selecionar um conjunto bem amplo de variáveis do *vibrato* a serem analisadas:

- 1) A profundidade.
- 2) A taxa.
- 3) O desvio da frequência fundamental.
- 4) A modulação do envelope espectral.
- 5) A regularidade e a forma da onda.
- 6) O modo de ataque e conclusão da nota.
- 7) Os ruídos/nuvens “fantasmas”.¹⁸
- 8) A evolução no tempo.

3.2 Seleção do trecho a ser analisado

Na seleção do trecho musical a ser analisado, considerou-se a possibilidade de se usar uma nota avulsa tocada em duas oitavas diferentes, mas ao compararem-se gravações comerciais com os registros não comerciais, decidiu-se usar um trecho extraído de uma peça de repertório para flauta, por nós flautistas muito conhecida e realizada. Outra razão para não se criar um trecho *ad hoc*, avulso de um contexto musical conhecido, foi o desejo de garantir a

¹⁸ Sons de baixa intensidade que não fazem parte da serie harmônica da nota, segundo Garcia (2009, p. 5).

mesma intenção musical e facilitar uma execução musical parecida entre os flautistas, levando em consideração a seguinte hipótese de Shipp (1980): “a taxa pessoal do *vibrato* dos cantores de ópera parece depender entre outros fatores, também do envolvimento emocional.” (SHIPP; LEANDERSON; SUNDBERG, 1980, p. 8-25).

Para se evitar que o acompanhamento de outros instrumentos interferisse na análise do som da flauta, optou-se por uma peça para flauta solo, *Syrinx* de Claude Debussy. Escolheu-se, então, um trecho de três compassos, ilustrados pela Figura 4, com o objetivo de induzir uma direção de fraseado semelhante entre todos os participantes, enquanto o enfoque da análise fixou-se no si bemol 4 (932 Hz na escala temperada baseada no lá a 440 Hz) sob a fermata indicada no segundo compasso.¹⁹

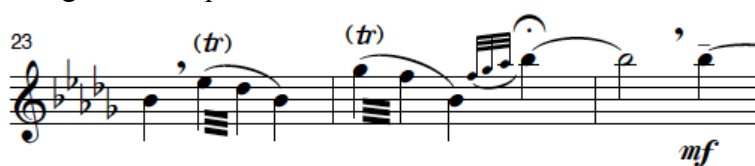


Figura 4 – Trecho escolhido

Este trecho não exige muito do instrumentista, desse modo, a sua atenção pode se concentrar estritamente nos aspectos sonoros e no *vibrato*.

3.3 Seleção das amostras para a pesquisa

Analizamos gravações de dezenove flautistas, divididas em duas bases de amostras: a primeira, composta por nove trechos extraídos de gravações publicadas por nove flautistas de reputação internacional (amostras n. 33-100).²⁰ A segunda, composta por gravações ao vivo de dez flautistas profissionais: seis professores de orquestra e quatro alunos avançados da Academia Reina Sofía de Madri, na Espanha (amostras n. 1-10).²¹

Nessa segunda base de amostras, os flautistas foram orientados a tocar o trecho três vezes: a primeira, à vontade, a segunda, com um *crescendo* na nota em questão e a terceira, uma oitava abaixo (si bemol 2). Essa orientação deve-se à exigência de se investigar mudanças de espectro, em relação ao vibrato, em oitavas diferentes e dinâmicas diferentes. Obtivemos, assim, um total de trinta trechos.

Como critério para a escolha dos participantes, incluiu-se somente flautistas cujo nível de preparação excluísse a interferência de problemas técnicos na execução do *vibrato*. Desse modo, valorizando-se itens como homogeneidade e qualidade do som, optou-se pela não definição dos termos, dando mais liberdade aos flautistas participantes. Cada flautista tem para si o que é um som de qualidade e um som homogêneo e o alto nível dos participantes foi considerado uma garantia de domínio do instrumento.

¹⁹ Dó central do piano = dó 3.

²⁰ Ver DVD anexo.

²¹ Ibid.

3.4 Gravações dos excertos

Cada amostra foi registrada com um gravador digital Olympus LS-11 no formato *Wave* 44,1 kHz e 16 *bits*, compatível com ambos os programas. Achou-se importante converter todos os trechos de estéreo para mono, para evitar o problema das diferenças entre os dois canais, usando-se, conseqüentemente, o *software* MeowMultiSound 1.0.0.

Sendo nosso objetivo a avaliação da eficácia das duas ferramentas de pesquisa e não a comparação entre flautistas, não foi necessário procurar condições acústicas controladas e constantes para a coleta das amostras. Isso teve como conseqüência a necessidade de reajustar a calibragem²² do programa SpectraPro para cada amostra, conseguindo-se assim, uma imagem mais nítida.

3.5 O programa de análise espectrográfica SpectraPro: descrição e análise da aplicação

No programa SpectraPro, um sinal de áudio digitalizado é computado por um algoritmo matemático conhecido como *Fast Fourier Transform* (FFT), que converte o sinal do domínio do tempo ao domínio da frequência. Quando se usam as técnicas de Fourier na análise, os parâmetros extraídos revelam o conteúdo espectral do sinal, e, portanto, estão descritos no domínio da frequência. A FFT foi desenvolvida em 1965 para simplificar o número de cálculos requeridos na Transformada de Fourier.²³

Como observado, um sinal de áudio, no nosso caso, uma nota tocada por uma flauta, é composta de - ou pode ser decomposta em - uma série de ondas senoidais, chamadas parciais superiores.²⁴ A Transformada de Fourier decompõe o sinal em seus parciais e trabalha com uma componente por vez. A versão rápida dela, a FFT, permite passar ao domínio da frequência por meio de um número menor de operações, subdividindo a onda em muitas seções e aplicando a Transformada de Fourier em cada uma delas. Portanto, a FFT é uma ferramenta importante para análise de sinais complexos, por meio dela o espectrograma consegue visualizar todos os componentes parciais de um som, incluindo os harmônicos, que são frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (F_0), e outros componentes, como, por exemplo, ruídos. Iremos expor, em seguida, os dados coletados mediante a aplicação do programa SpectraPro para averiguar quais dos parâmetros levados em consideração, quais foram detectados com maior clareza.

²² Resolução, extensão (plot range) e limite (plot top) da frequência, escala linear ou logarítmica

²³ A FFT foi apresentada pela primeira vez por Cooley e Tukey, em 1965, mas Gauss já havia descrito os passos críticos dela, em 1805. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

²⁴ O espectrograma consegue visualizar todos os componentes parciais de um som, incluindo os harmônicos, que são frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (F_0), e outros componentes, como, por exemplo, ruídos.

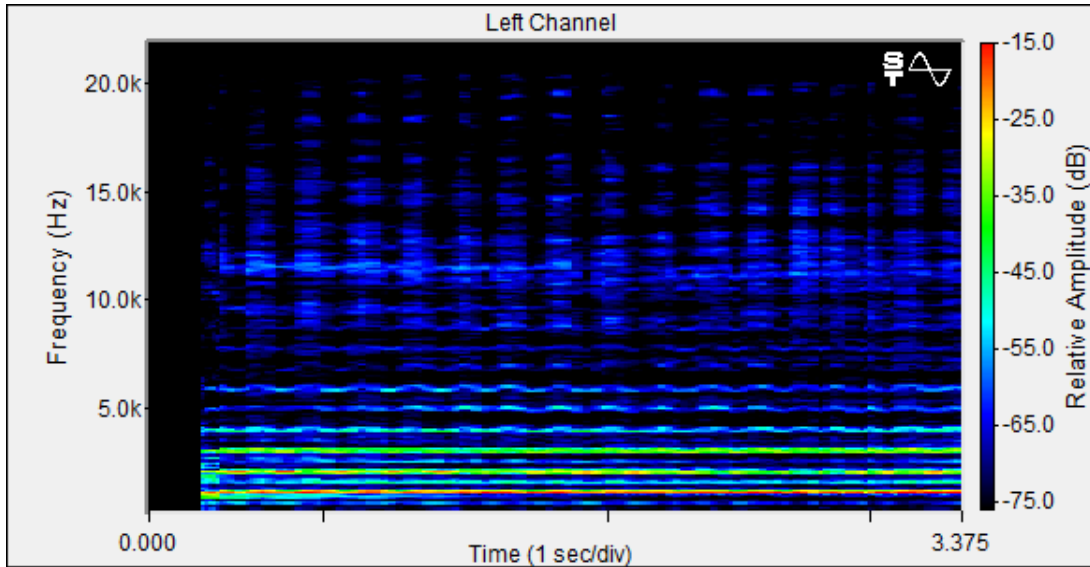


Figura 5 - Amostra 36: plot top = -15, plot range = 61, visualização em escala linear

Na figura 5, a visualização do trecho na escala linear nos entrega uma visão panorâmica do envelope espectral da nota si bemol 4. À primeira vista, percebemos que as pulsações do *vibrato* são comparáveis com alguns pequenos *crescendos*, e, de acordo com Fletcher, Verfaille e Garcia, verificamos que causam efeito no envelope espectral da nota: cada pulsação do *vibrato* vai “acordar” parciais muito agudos, acima dos 10.000 Hz. Analisaremos esse fenômeno nos próximos parágrafos. Observando os harmônicos F4, F5 e F6, parece que desde seu ataque, o *vibrato* pulsa com pequenos *crescendos*, que provocam um desvio de frequência direcionado para cima da frequência fundamental (F_0). Notamos também que, a região da fundamental precisa ser analisada com maior detalhe. Vamos, então, modificar a escala de linear para logarítmica, para facilitar a visualização das frequências próximas a F_0 .

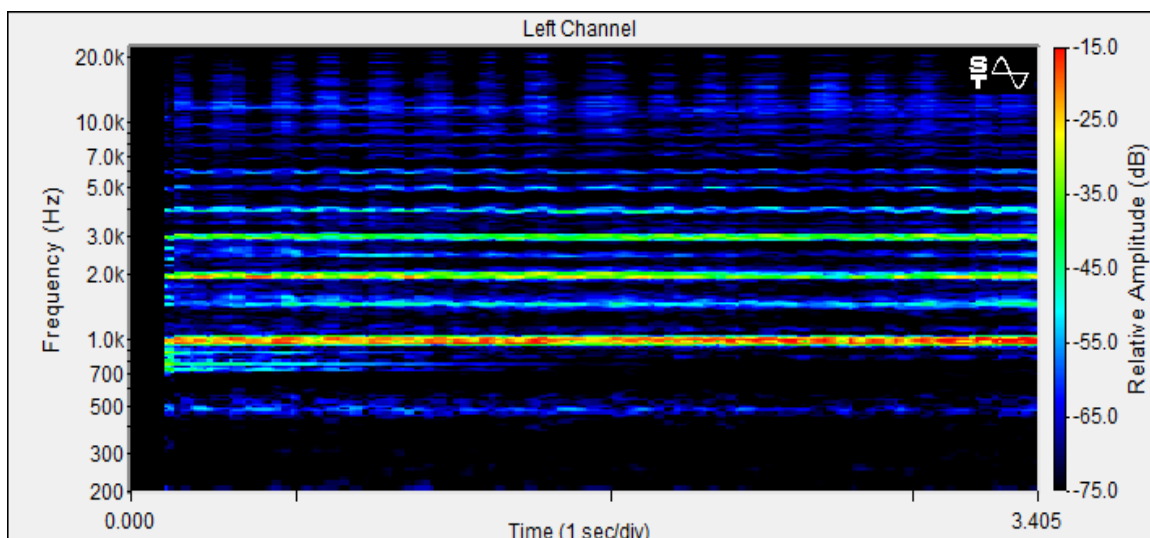


Figura 6 - Amostra 36: plot top = -15, plot range = 61, visualização em escala logarítmica

Nessa visualização (figura 6), percebemos com mais clareza a região da fundamental F_0 (si bemol 4) e observamos uma linha bastante clara aos 500 Hz, uma oitava a baixo dela: trata-se, provavelmente, da ressonância da fundamental do tubo da flauta. Observamos, também, que as pulsações do *vibrato* se refletem em pulsações na intensidade da frequência fundamental (vermelho intermitente). Com mais uma mudança na calibragem do programa, na figura 7 entramos no detalhe da faixa de frequências entre 7500 e 21000 Hz.

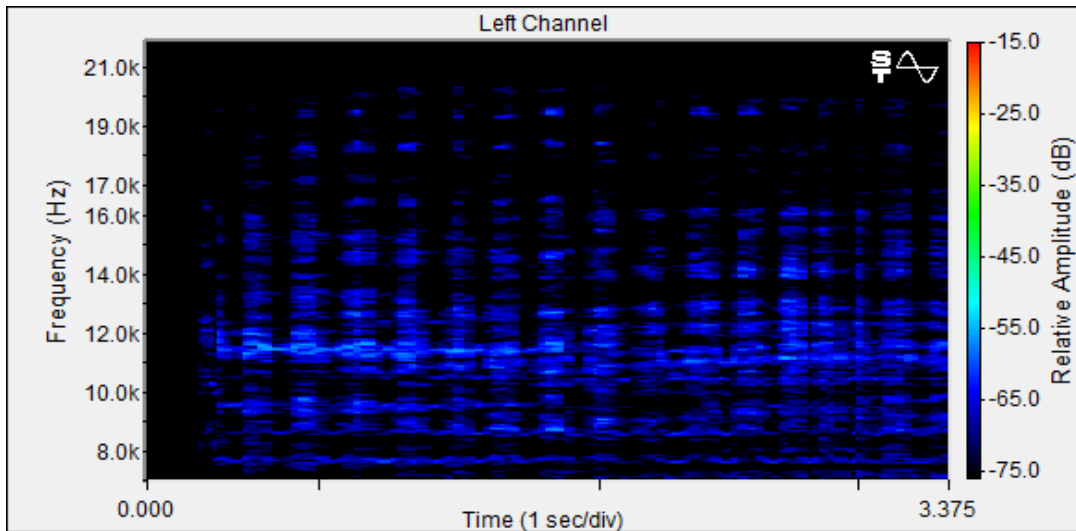


Figura 7 - Amostra 36: plot top = -15 e plot range = 61, visualização em escala logarítmica, enfoque na faixa de frequências desde 7500 até 21000 Hz

Temos uma visão bem clara das mudanças provocadas pelo *vibrato* nos parciais superiores, neste caso, os efeitos são visíveis até entorno de 20.000 Hz. Na hipótese que isto pudesse depender da forte reverberação da gravação, comparamos a amostra 36 com a amostra 37 (figura 8) gravada numa acústica mais seca.

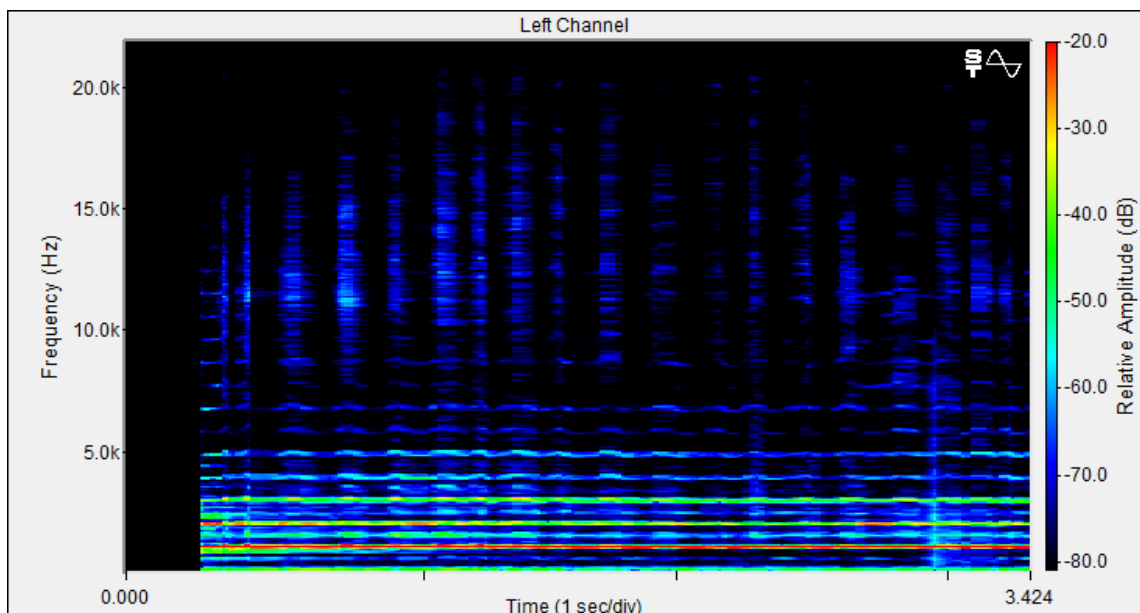


Figura 8 - Amostra 37: plot top = -20, plot range = 61, escala linear

Relevamos aqui, também, os efeitos do *vibrato* nos parciais superiores até 20000 Hz, e notamos algo a mais: uma região de “apagamento” dos harmônicos acima dos 5000 Hz no intervalo de tempo entre os 1,5 até os 2,5 segundos. Analisaremos, na figura 9, esse detalhe selecionando as frequências acima dos 4000 Hz.

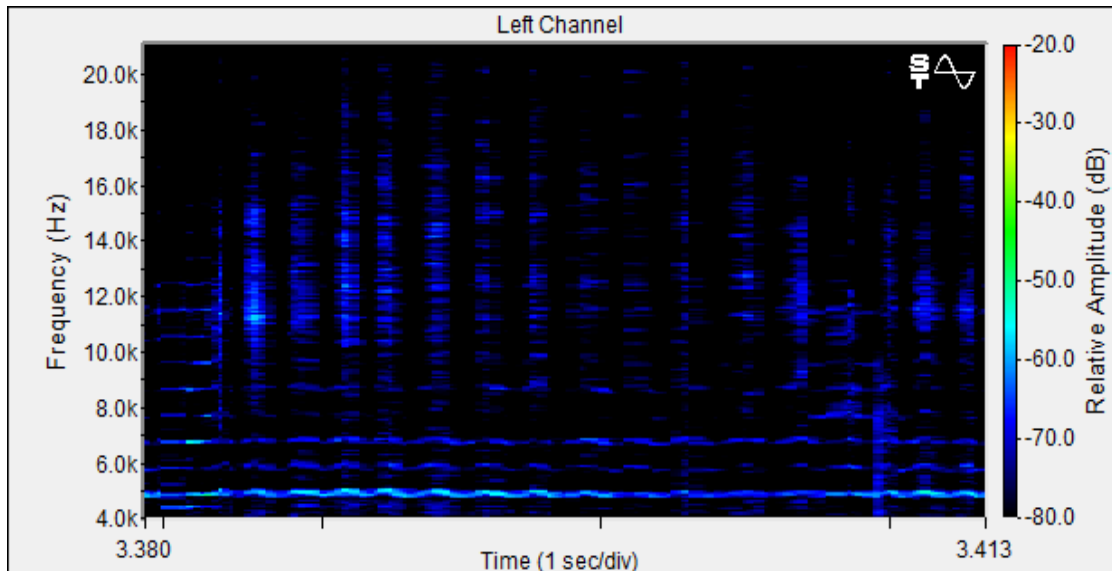


Figura 9 - Amostra 37: plot top = -20, plot range = 61, escala linear, enfoque na faixa de frequências desde 4000 até 20000 Hz

Escutando a gravação, esse fenômeno parece depender de um *diminuendo*, como se casualmente o flautista tivesse se movimentado afastando-se um pouco do microfone. Também, nesse momento, parece que a profundidade do *vibrato* diminui, considerando-se a hipótese que o apagamento seja uma característica espectral do flautista. Visualizando a nota na escala logarítmica (figura 10), conseguimos ver mais claramente um ruído na altura dos 2,961 s e mais uma vez a linha de ressonância uma oitava abaixo da frequência fundamental. Neste caso, assim como na amostra 36, o desvio de frequência parece direcionado para cima da frequência alvo.

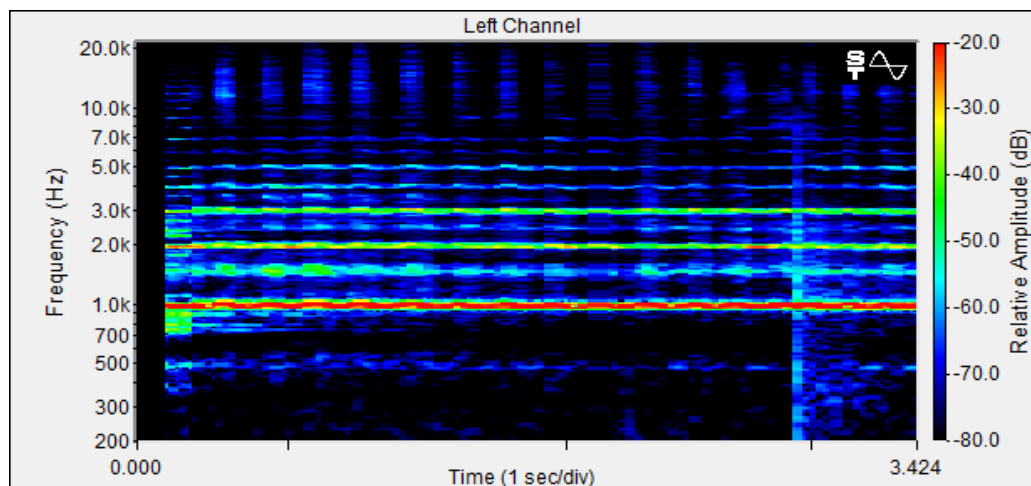


Figura 10 - Amostra 37: plot top = -20, plot range = 60, escala logarítmica

Seguimos na análise de outras amostras interessantes, que pertencem à série gravada ao vivo. Nas duas amostras seguintes foi incluída a *anacruse* do si bemol (fã-sol-lá, figura 11).



Figura 11 - Anacruse do si bemol

Abaixo, a amostra 10 da figura 12 começa sem *vibrato* e termina em *diminuendo*, além de ser executada na oitava grave.

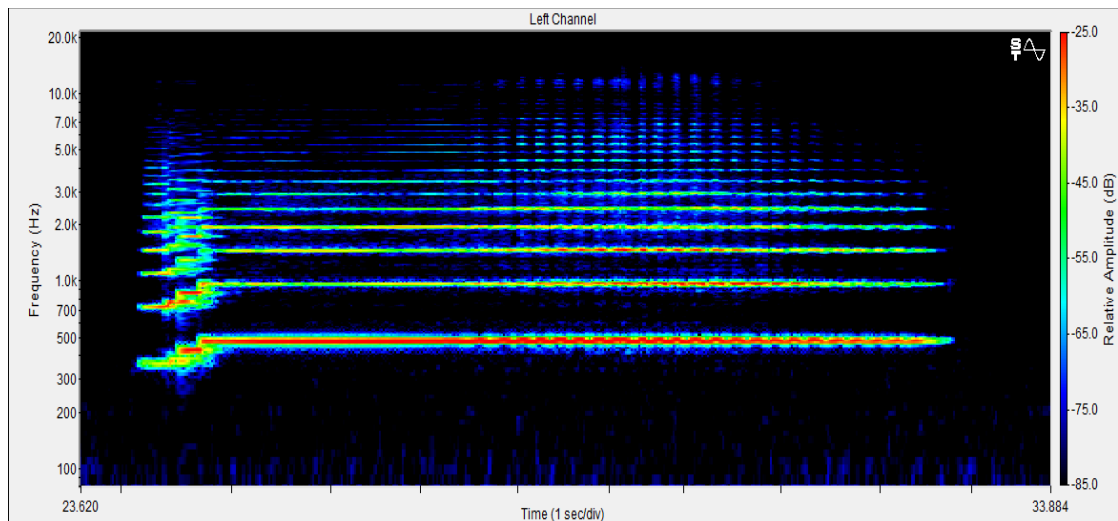


Figura 12 - Amostra 10: grave, plot top = -20, plot range = 65, escala logarítmica

O espectrograma da figura 12 evidencia a flutuação de frequência causada pelo *vibrato* na fundamental e nos parciais superiores. Mostra, também, com boa precisão, que a nota começa sem *vibrato* e que a partir da introdução do *vibrato* acontece um enriquecimento nos parciais superiores, inclusive as linhas de ruídos “fantasmas” que aparecem entre as linhas de frequência do primeiro e quarto parciais.

Ruídos “fantasmas” parecidos na faixa entre o primeiro e o terceiro parcial (2400/3300 Hz) aumentam significativamente com o *vibrato* (4,5 sec./div), também no espectrograma da amostra 3 (figura 13), realizada na oitava original, iniciando-se sem *vibrato*.

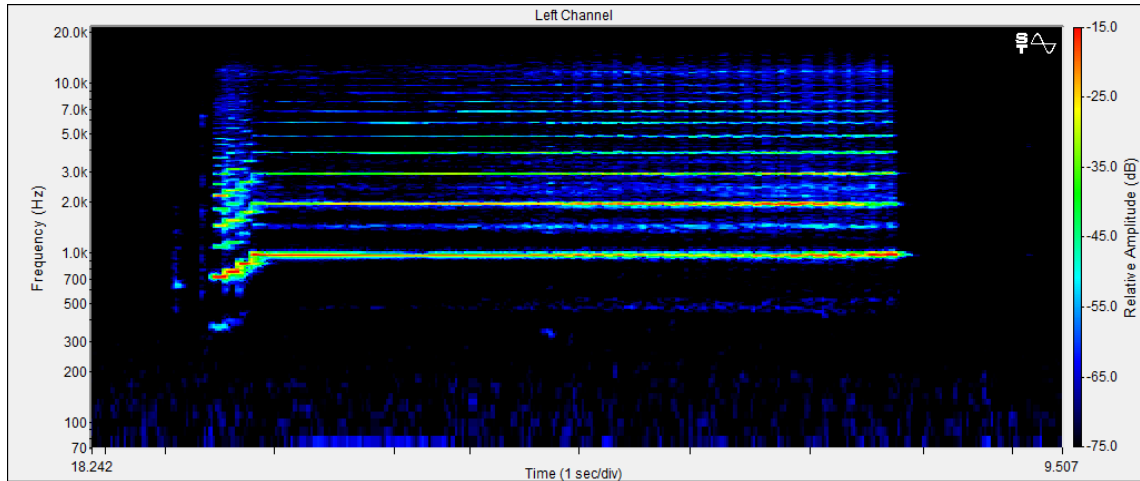


Figura 13 - Amostra 3: livre sem crescendo, plot top = -15, plot range = 60, escala logarítmica

A necessidade de se representar a evolução temporal do espectro de um som, justifica o uso das representações tempo – frequência - amplitude, por essa razão decidiu-se usar o espectrograma como ferramenta para a análise desses parâmetros.

Contudo, mesmo para as amostras musicalmente longas, de dois segundos de duração, por exemplo, não é possível obter uma resolução no tempo e na frequência satisfatória.

No caso do *vibrato*, normalmente, essas pulsações repetem-se a uma taxa de aproximadamente 5-7 Hz (SUNDBERG, 1995, p. 39), o que significa que cada pulsação dura cerca de 1/6 de segundo, o seja, dentro do espectrograma teríamos que analisar um sinal que corresponde a um espaço muito pequeno para ser medido com precisão. Podemos então imaginar que os parâmetros que precisam de medições detalhadas não sejam bem representados pelo espectrograma. Verificaremos, a seguir, diretamente nas imagens.

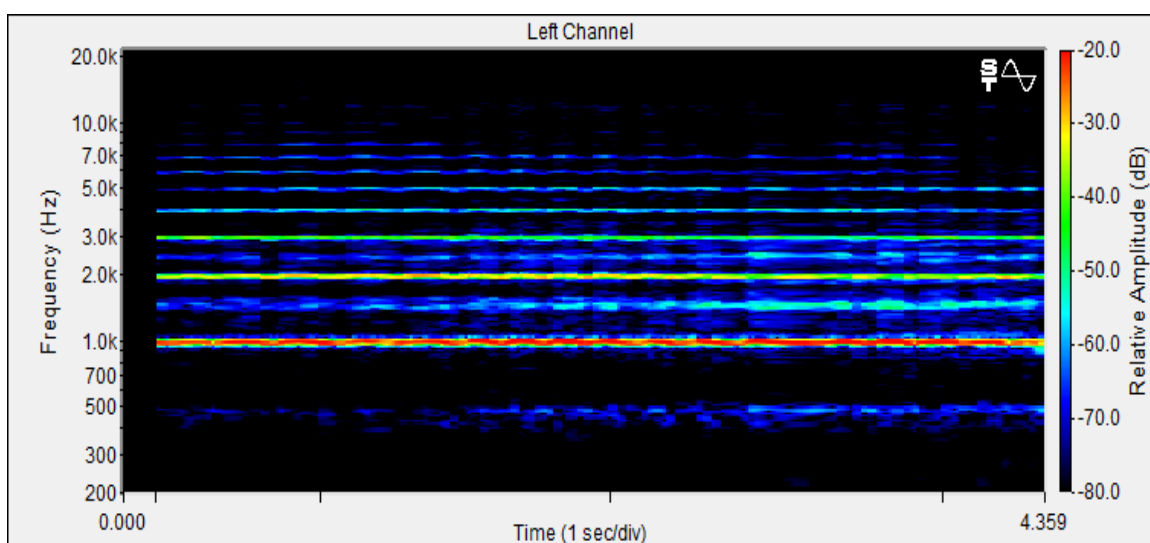


Figura 14 - Amostra 100: plot top= -20. Plot range= 60, escala logarítmica

O espectrograma da figura 14 pertence à primeira base de amostras, com gravações comerciais de flautistas de reputação internacional. Notamos que o flautista usa o *vibrato* desde o ataque da nota, que a taxa vai aumentando - o número de pulsações por segundo aumenta, indicando uma aceleração - e que a profundidade não parece muito grande. Contrariamente ao que detectamos nas figuras 5, 6 e 7, aqui parece que o desvio de frequência provocado pelas pulsações do *vibrato* está direcionado para baixo da frequência fundamental (F_0): olhando para os harmônicos F4 e F5, temos a impressão que o *vibrato* começa com um pequeno *diminuendo*, que faz cair a frequência da onda para logo levá-la de volta até a F_0 , mas a imagem não é suficientemente detalhada para averiguar nossa impressão. O problema surge no momento de medir efetivamente esses parâmetros, cuja definição foi descrita na figura 2.

Em um espectrograma, a medição da taxa, da profundidade e da regularidade pode ser feita somente de uma forma manual, deslocando-se o *mouse* para quantificar cada variável. Na figura 15 aumentamos o detalhe da imagem na região da fundamental e na figura 16 na região dos parciais superiores para verificar essa possibilidade.

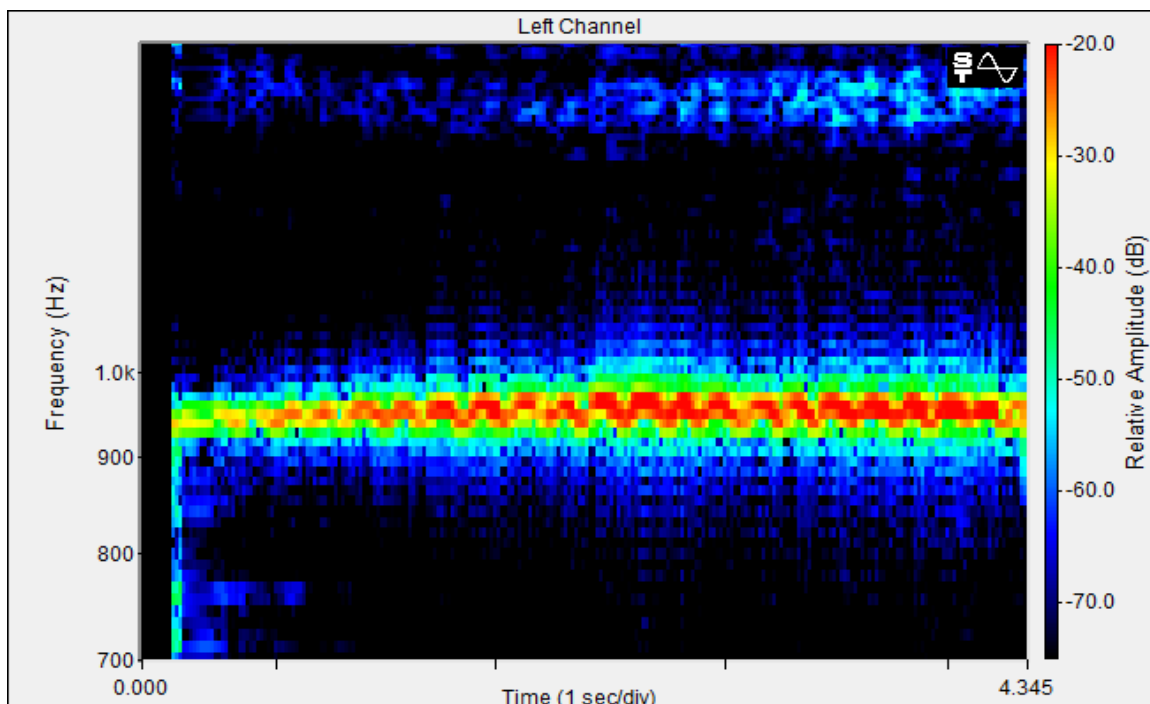


Figura 15 - Amostra 100: plot top = -20, plot range = 55, enfoque na frequência fundamental

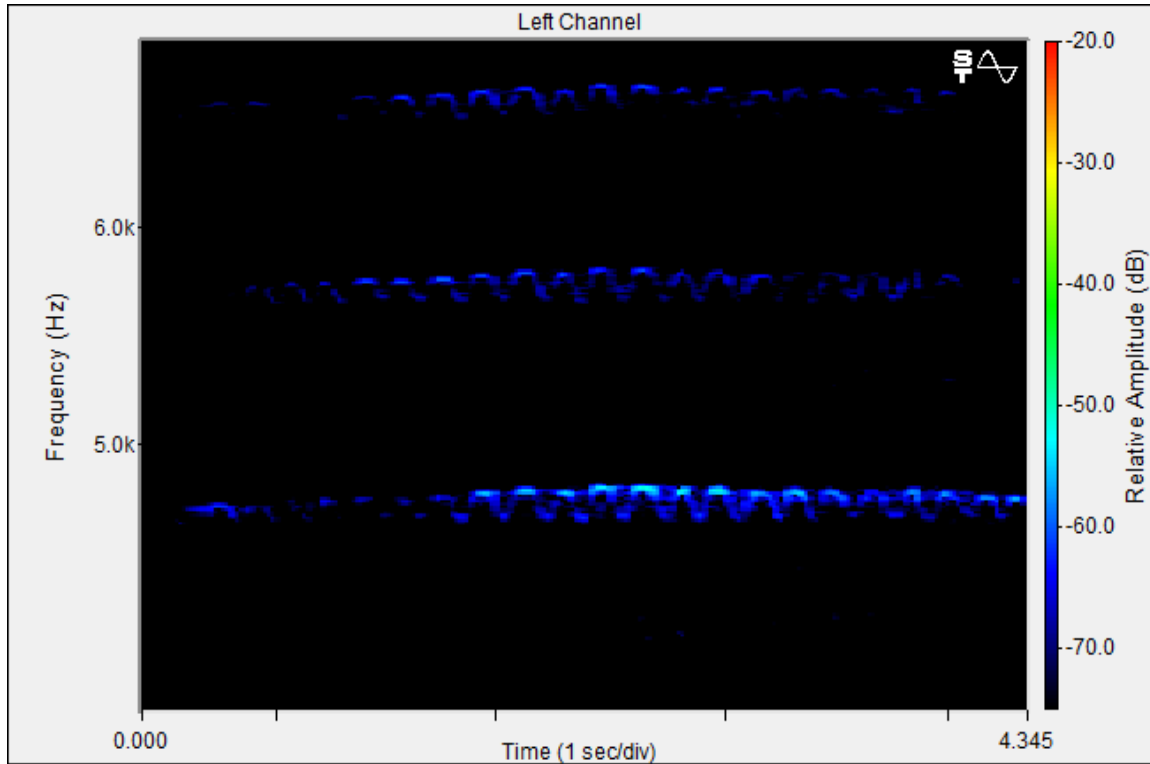


Figura 16 - Amostra 100: plot top = -20, plot range = 55, enfoque na faixa de frequências desde 4000 até 7000 Hz, harmônicos superiores

A figura 17 evidencia os harmônicos agudos e pertence à segunda base de amostras, gravadas ao vivo.

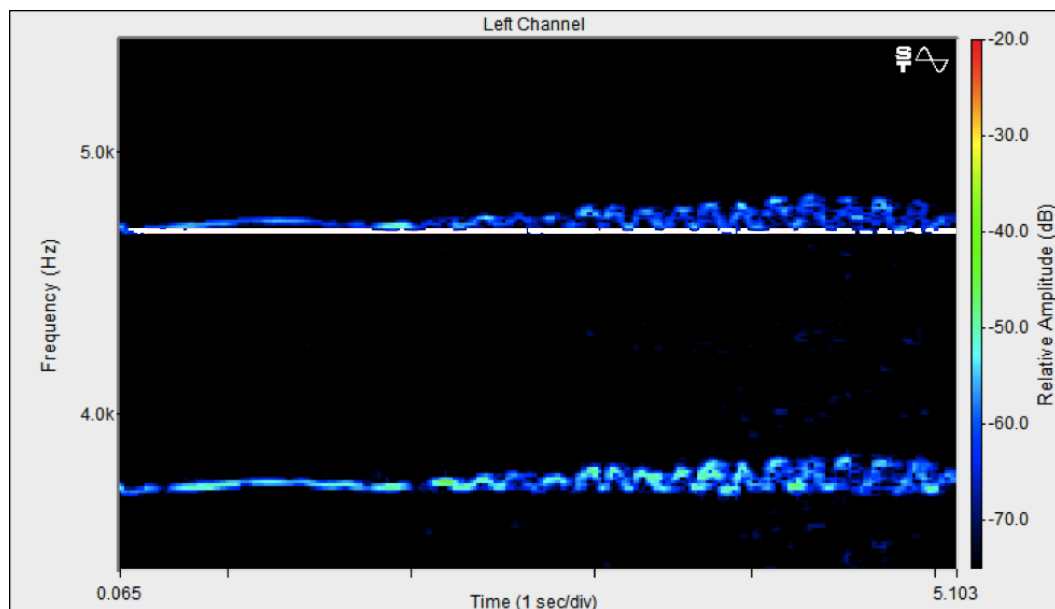


Figura 17 - Amostra 6: plot top = -20, plot range = 55, faixa de frequências desde 3500 até 5500 Hz

Conseguimos visualizar o início da produção do *vibrato* dentro de uma nota atacada de maneira plana. Além disso, podemos avaliar como esse flautista usa o *vibrato* no ataque da nota: a primeira pulsação do *vibrato* consiste em um *crescendo*, que provoca um desvio para

cima da F_0 , indicada pela linha branca. O desvio fica constantemente acima da frequência alvo do quinto harmônico indicada pela linha branca. Mas, em todos os casos, as linhas do espectrograma não parecem suficientemente definidas, não se pode calcular com precisão, nem a quantidade de desvio, nem a distância entre os picos das ondas para extrair a taxa do *vibrato*. A situação torna-se ainda pior ao tentarmos analisar as amostras gravadas na oitava grave.

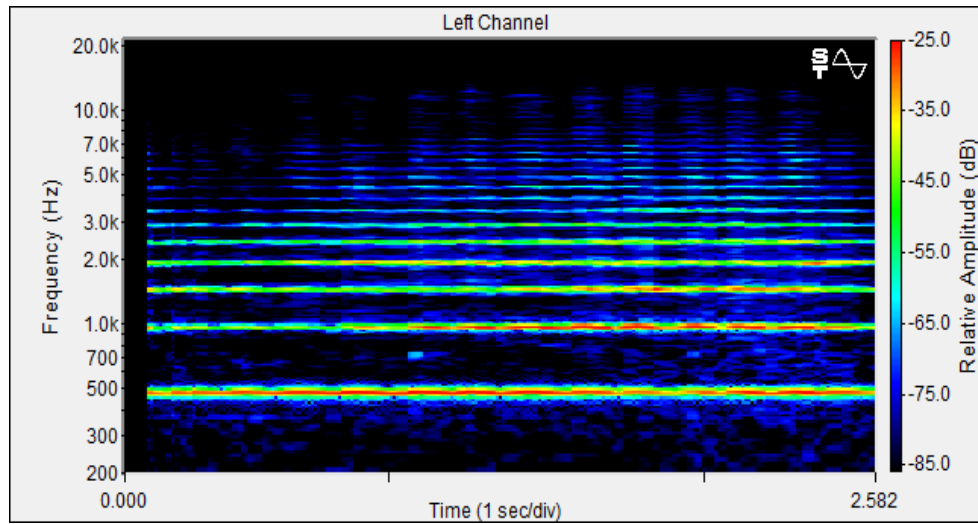


Figura 18 - Amostra 8: plot top = -25, plot range = 16

Na figura 18, as linhas apresentam uma espessura maior, o que dificulta ainda mais a medição da flutuação do *vibrato* ao redor da frequência base de cada parcial, tornando inviável a análise da profundidade e do desvio da frequência fundamental. Em que ponto nós teríamos que colocar o *mouse* dentro de uma linha tão grossa?

Resumindo, o algoritmo SpectraPro consegue descrever com precisão o uso do *vibrato*, no ataque e conclusão da nota, a direção de desvio da F_0 (acima ou abaixo dela), as nuvens e ruídos “fantasmas”, o envelope espectral, a evolução no tempo dos componentes parciais de F_0 , as variações de presença e de intensidade dos parciais superiores.

Porém, devido à necessidade de uma medição manual, não apresenta um bom desempenho com sinais de “curta duração”, como a pulsação do *vibrato*. Além disso, ele é bastante impreciso para a medição dos outros parâmetros como: a profundidade do *vibrato*, a taxa do *vibrato*, o desvio da frequência fundamental, a regularidade e forma da onda, a evolução temporal da curva F_0 - a qual não inclui a variação de intensidade, e que, ao contrário da evolução temporal de espectro, é bem representada pelo espectrograma.

Uma maneira de descrever as oscilações do *vibrato* é por meio da sua frequência instantânea e da sua envoltória, ou seja, em termos de componentes modulados em frequência (FM) e em amplitude (AM) (ARROABARREN, 2002). No caso da curva de F_0 de um *vibrato*, as variações na frequência instantânea são mapeadas em alterações na taxa, e as

variações na envoltória da fundamental são mapeadas em alterações na extensão da curva melódica.

A análise do comportamento da curva de F_0 tem o objetivo de investigar sua regularidade. Como observado por Sundberg (1995, p. 39), não há nada que justifique que a regularidade tenha menor relevância perceptiva que a taxa e a extensão. Ainda assim, apenas esses dois últimos parâmetros têm sido extensivamente analisados na bibliografia, mesmo sendo a regularidade relevante perceptivamente, já que, por exemplo, quanto mais regular é a curva de F_0 do *vibrato*, melhor a sua qualidade estética (DIAZ; ROTHMAN, 2003).

Segundo Silva (2010, p. 44), os poucos trabalhos que publicaram maneiras automatizadas de medir a regularidade do *vibrato* foram baseados em métodos que necessitavam de alguma filtragem do sinal, operação que, modificando o contorno do sinal, inviabilizava a medição da regularidade baseada na forma da onda de F_0 . Nesses trabalhos, foi estudada somente a variação instantânea da taxa e da profundidade de F_0 e foram reportados resultados apenas para amostras de *vibrato* no canto lírico, onde a onda da voz é considerada senoidal.

Silva, em 2010, trabalhou com um algoritmo de análise das flutuações do *vibrato* que compreende também ondas cuja forma da frequência fundamental não é senoidal, como as provocadas pelo tremor da voz na doença de Parkinson, ou no *vibrato* de cantores inexperientes. Esse algoritmo isola e analisa o percurso de F_0 com muito muito mas detalhe.

3.6 O algoritmo de análise das flutuações do *vibrato*: descrição e resultados da aplicação

O algoritmo usado por Silva (2010) para a análise das flutuações do *vibrato* é basicamente composto por três blocos de análise: 1) Extração e análise da curva de frequência fundamental (F_0) do sinal original. 2) Extração e análise da envoltória do sinal original. 3) Análise de regularidade da frequência fundamental

1) A Extração e análise da curva de frequência fundamental (F_0) do sinal original: a curva de F_0 é extraída do sinal original usando-se o algoritmo denominado *Super Resolution Pitch Determination* (SRPD) e analisada por um método baseado na análise de Fourier (VIEIRA, 1998).

Há certo consenso (RABINER; SCHAFER, 1978) de que na análise dos detalhes presentes em cada ciclo da voz, os algoritmos que operam no domínio do tempo, no lugar daqueles que operam na frequência, têm melhor desempenho (VIEIRA, 1997, cap. 5). Um exemplo é o algoritmo de comparação de forma de onda (*wave-matching*), que está baseado na FAC. FAC nos entrega uma quantificação da semelhança entre ciclos consecutivos de F_0 para indicar o quanto regular é a curva da frequência fundamental e será detalhada em seguida.

Como algoritmo pela análise de regularidade baseado na FAC, José Eduardo Silva,

usou o *Super Resolution Pitch Determination* (SRPD, MEDAN et al., 1991). O autor ressalta que o SRPD já foi avaliado independentemente em diversos trabalhos (BAGSHAW et al., 1993; BAGSHAW, 1994; VIEIRA, 1997) e que eles mostraram que esse algoritmo é um dos mais confiáveis extratores de F_0 (BAGSHAW, 1994, cap. 7). Ele calcula o valor da frequência em intervalos regulares de tempo e é capaz de rastrear as flutuações do período do sinal, apesar delas não serem visualmente detectáveis na forma de onda do sinal.

A curva de F_0 , extraída usando-se o algoritmo de SRPD, é logo analisada por meio das técnicas de Fourier. Este tipo de aplicação das técnicas de Fourier não é novo, porém, poucos a empregaram para investigar o *vibrato*. Na bibliografia relacionada, Yair e Gath (1988) foram os únicos a usá-la para estudar o tremor vocal. Eles determinaram o espectro de F_0 de vários indivíduos afetados pela doença de Parkinson e mostraram que ele pode ser diagnosticado por meio deste espectro. Contudo, não exploraram todas as possibilidades dessa técnica, apresentando apenas valores da taxa das perturbações, sem investigar as respectivas extensões.

No trabalho de Silva (2010), a análise de Fourier das séries de $F_0(n)$ tem por objetivo determinar a amplitude de cada componente espectral e cada sinal.

É comum a curva de frequência fundamental estimada pelo algoritmo de extração de F_0 apresentar alguns erros. Esses erros são consequências de instabilidades no sinal original que não foram adequadamente rastreadas. Na figura 19, por exemplo, o algoritmo falha de modo grosseiro em torno de 5 e de 6 segundos.

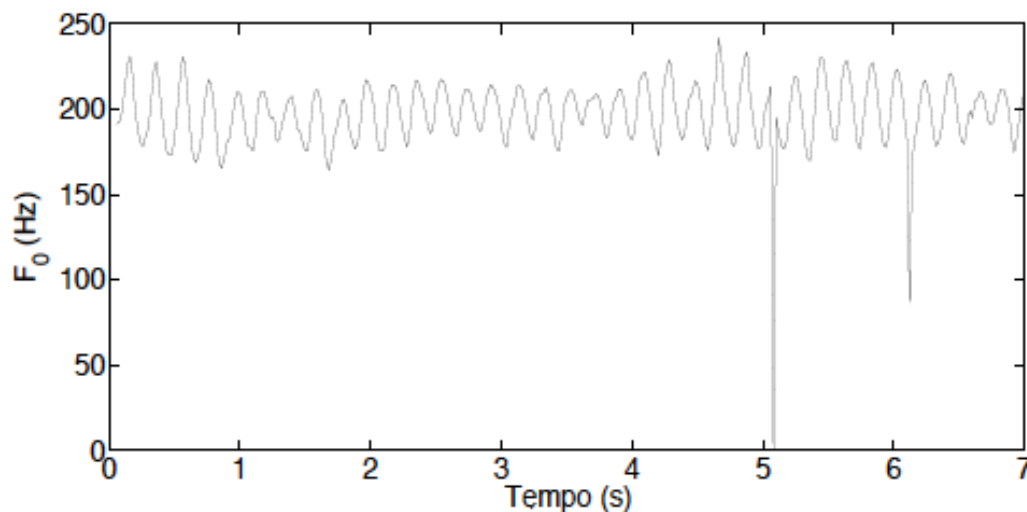


Figura 19 - Exemplo de erros vistos ao redor de 5 e 6 segundos (SILVA, 2010, p. 31)

Aplicando esse algoritmo nas bases de amostras do presente trabalho, aconteceram muitos erros deste tipo em coincidência com o começo e com o fechamento dos trechos gravados. A falha no começo era devida a presença da anacruse: a sequência rápida de três notas deixava uma ressonância que, prolongando-se até se sobrepor com o si bemol, interferia

no processamento do sinal e produzia uma quebra no gráfico. O erro no final acontecia em trechos que apresentavam uma queda de amplitude no acabamento da nota, até um nível onde a sensibilidade do programa não chega perceber o sinal.

Erros como esses foram eliminados editando todos os trechos e fragmentando manualmente o sinal original de modo a eliminar as regiões que provocaram a falha do SRPD. Como todos os sinais após da segmentação tinham mais do que um segundo de duração, todos foram aproveitados e não foi descartada nenhuma amostra.

2) A extração e análise da envoltória do sinal original: uma vez que a curva F_0 não apresente problemas, é extraído o espectro da envoltória. Ele exibe a amplitude de cada componente harmônica que modula o contorno do sinal de voz. Na realidade, essa fase do algoritmo tem o objetivo de investigar a hipótese de que o espectro da envoltória da emissão possa ser usado em lugar do espectro da frequência fundamental quando esta não esteja disponível. Isso acontece, por exemplo, no caso da voz disfônica, onde não existe algoritmo para extração de frequência fundamental que opere com segurança. Sendo assim, essa parte coloca-se fora do escopo deste trabalho e não será considerada.

3) Segundo Silva (2010, p. 26) “A análise de regularidade da frequência fundamental: analisa-se a semelhança entre ciclos consecutivos da curva de F_0 , por meio da Função de Auto Correlação (FAC).” O primeiro estágio do análise da regularidade é separar um trecho da série de F_0 com uma janela retangular. A função desta janela é isolar alguns ciclos da série de F_0 para, em uma etapa seguinte, calcular a FAC do trecho emoldurado pela janela e medir a similaridade entre os ciclos. O tamanho da janela deve atender à seguinte relação de compromisso: se ela for muito curta, apenas alguns pontos são cercados e não há comparação entre ciclos adjacentes; se for muito grande, vários ciclos são emoldurados e os detalhes do comportamento temporal são perdidos. Depois de calcular a FAC de um trecho, a janela é deslocada de um determinado número de amostras e a nova região emoldurada é analisada. O processo de emoldurar a janela, calcular a FAC e deslocar a janela é repetido até atingir o final da série de F_0 . A FAC é uma medida de semelhança entre as amostras emolduradas, mede a similaridade entre os ciclos. Da aplicação desse algoritmo podemos obter diferentes tipos de visualizações dos parâmetros do *vibrato*.

No escopo do presente trabalho, foram utilizados somente os gráficos derivados do primeiro bloco de análise do algoritmo, a saber: os gráficos da curva temporal de F_0 , útil para investigar sua forma e evolução, e do espectro de F_0 , eficaz no estudo da taxa, da profundidade/ desvio da frequência fundamental.

A primeira peculiaridade a ser destacada é que nesse algoritmo, diferentemente do espectrograma, o gráfico do espectro F_0 é baseado em valores médios. Esse gráfico além da taxa e da profundidade, fornece informações também sobre a forma: se é regular ou não, se é senoidal ou não, como veremos nas figuras 20-23.

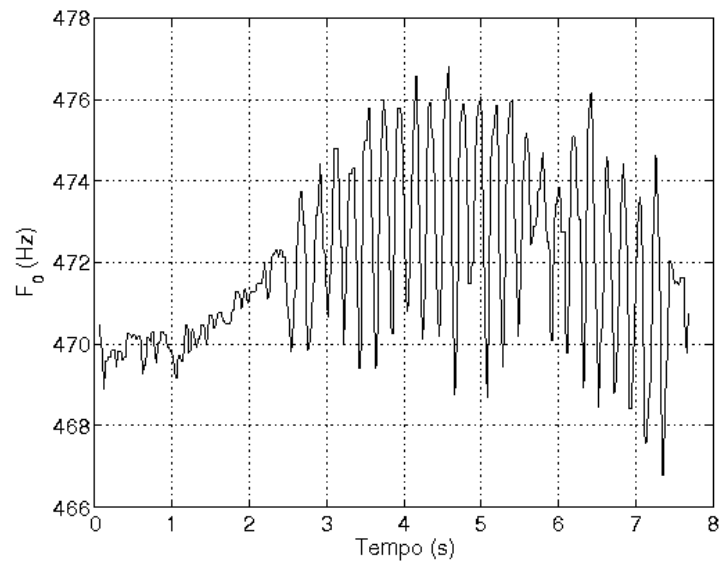


Figura 20 – flautista 10 tocando a nota si bemol 3, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL10-GRAVE__f0Tempo.png)

A figura 20 é o gráfico do flautista 10 tocando a nota si bemol 3. A visualização evidencia o comportamento da curva de F_0 no Tempo e nos indica que o som ataca plano e o *vibrato* começa depois de 2.5 segundos.

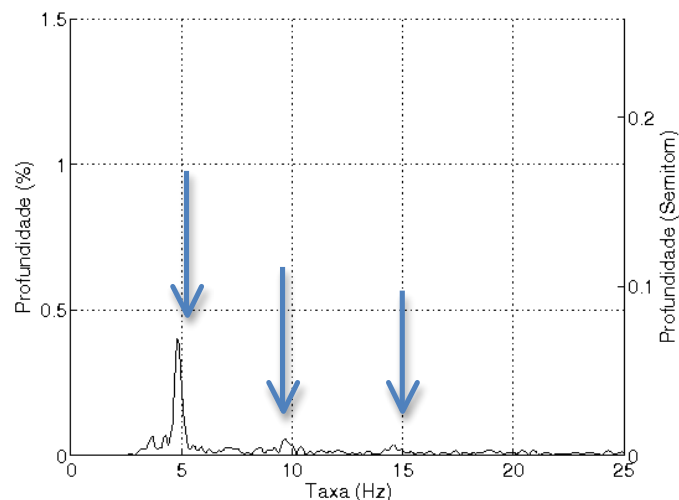


Figura 21 – gráfico taxa X profundidade do flautista 10 tocando a nota si bemol 3 (no cd: FL10-GRAVE__f0Freq_2.png)

Na figura 21, temos a mesma amostra, mas na visualização que considera a profundidade com a taxa. Observamos um pico ao redor de 4.5 Hz e uns picos menores (setas azul), regularmente espaçados ao redor dos 9 e dos 14.5 Hz, caracterizando uma série harmônica, o que indica que as oscilações no tempo foram regulares, e não senoidais - caso contrário, seriam flutuações senoidais e haveria apenas uma raia, em torno de 5 Hz. Percebemos, então, que a estrutura harmônica é definida principalmente pela forma. Podemos dizer que a curva de F_0 é predominantemente uma senoide de frequência 4.5 Hz com

profundidade de aproximadamente 0,4 %. Em outras palavras, o *vibrato* do flautista 10, na maior parte do tempo, pulsa com uma taxa de 4.5 Hz e uma profundidade de 0.4 % - lembramos que um semitom é equivalente a 6% e que o valor aqui representado equivale ao desvio do centro da frequência e não de pico a pico.

Ao analisarmos só a parte com *vibrato* da mesma amostra, obtemos a figura 22 em que o pico da taxa fica estável com 4.5 Hz, mas a profundidade dele resulta maior, superando o 0.5%.

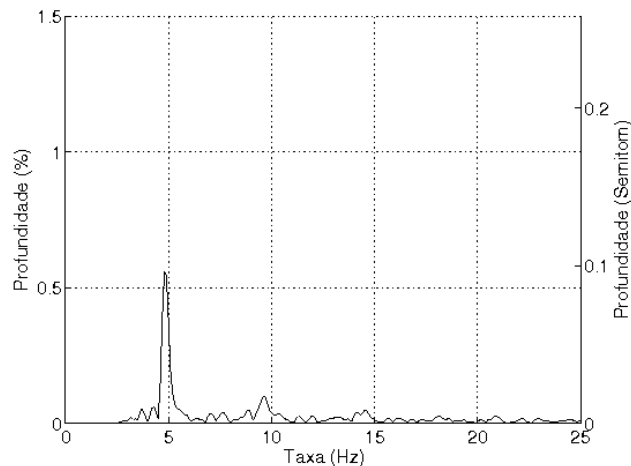


Figura 22 – gráfico taxa X profundidade do flautista 10 tocando a nota si bemol 3, tendo selecionado somente a parte com vibrato da amostra (no cd: FL-10GRAVE_vib_f0Freq_2.png)

Na figura 23, ao considerarmos somente a parte plana da amostra, o algoritmo não detecta corretamente nenhum pico

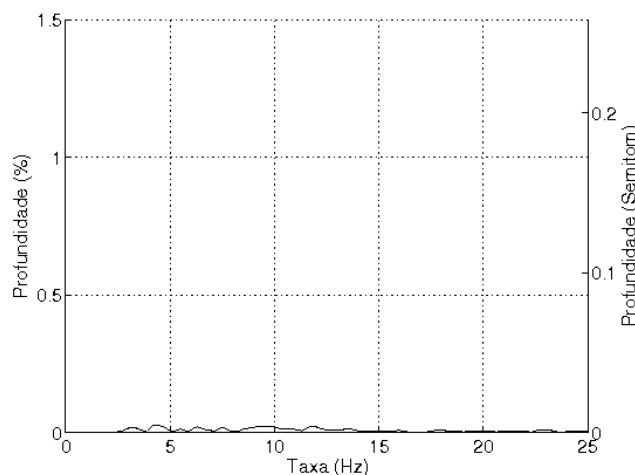


Figura 23 – gráfico taxa X profundidade do flautista 10 tocando a nota si bemol 3, tendo selecionado somente a parte plana da amostra (no cd: FL-10-GRAVE_plano_f0Freq_2.png)

Desse modo, nós entendemos que o pico no gráfico completo da amostra (figura 20) resulta ter uma profundidade menor do pico da parte com *vibrato* (figura 22), porque inclui o trecho inicial tocado sem *vibrato*, o qual puxa a média para baixo. Mostramos, então, que o

algoritmo trabalha com valores médios e por consequência, o próprio gráfico representa uma média de toda a gravação.

Consequentemente, deve-se ter o cuidado para que o *vibrato* esteja presente desde o começo até o final de cada amostra e caso isso não aconteça, deve-se descartar a parte sem *vibrato*, para evitar que perturbe a medição da taxa e da profundidade.

No caso do flautista 3 (figura 24), uma vez mais, observamos que na visualização que considera taxa com profundidade, em ausência de *vibrato*, o algoritmo não releva picos.

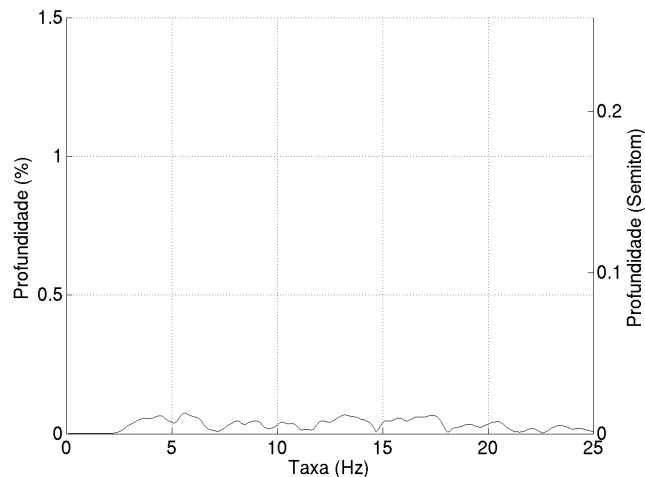


Figura 24 - gráfico taxa X profundidade do flautista 3 tocando a nota si bemol 3 em *crescendo*, tendo selecionado somente a parte plana da amostra (no cd: FL3-CRES_plano_f0Freq_2.png)

O espectrograma correspondente - na figura 25 - mostra também linhas de frequência planas, na parte plana da amostra.

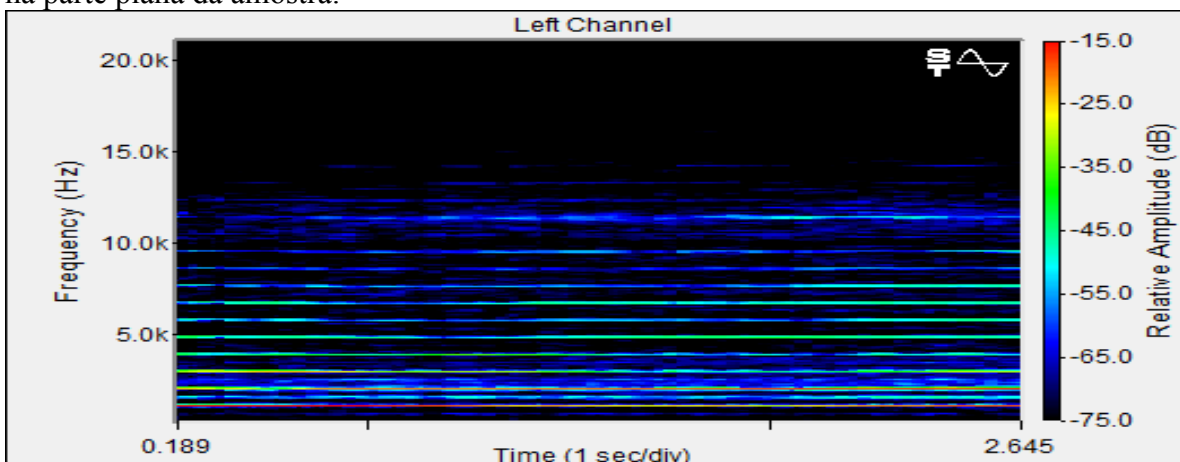


Figura 25 – espectrograma do flautista 3 tocando a nota si bemol 3 em *crescendo*, tendo selecionado somente a parte plana da amostra (no cd: FL3-CRES_plano, -15/60 linear)

Porém, ao considerarmos a visualização do comportamento temporal da curva F_0 , a qual mostra a regularidade e a forma da onda, notamos que o algoritmo nos entrega o gráfico da figura 26, aparentemente irregular.

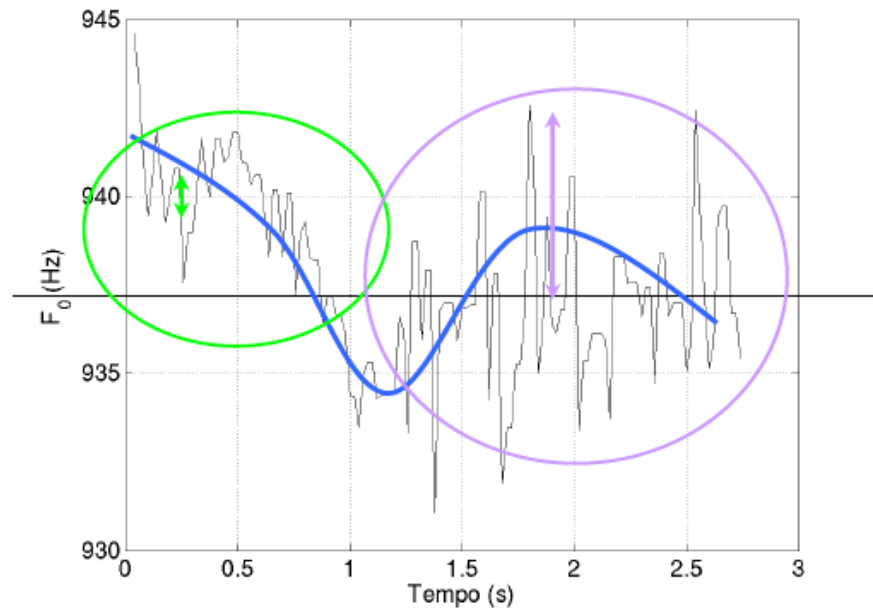


Figura 26 – evolução temporal de F_0 (si bemol 4) no flautista 3, parte plana da amostra tocada em crescendo (no cd: FL3-CRESC_plano_f0Tempo.png)

Na realidade, as oscilações grandes - destacadas em azul - são lentas: houve no máximo 1,5 oscilações em 2,5 segundos, ou seja, a taxa é de $1,5 / 2,5 = 0,6 \%$. As oscilações “rápidas” são irregulares, iniciam com pequena profundidade - trecho em verde - e depois aumentam a profundidade - trecho em lilás. Mesmo no trecho em lilás, a extensão das oscilações é menor que 5 Hz, portanto, a taxa resulta menor que $5 / 937,5 = 0,533\%$: uma porcentagem irrelevante considerando que um semitom corresponde a uma variação de 6% da taxa. Assim, constatamos que, em relação ao espectrograma, a análise do comportamento temporal da curva F_0 , feita com o algoritmo usado por Silva (2010), releva e mede até as mínimas flutuações com uma sensibilidade e uma precisão maior, permitindo uma análise da forma e da regularidade da onda, mais profunda e detalhada.

Passamos a avaliar a efetividade desse algoritmo na análise dos outros parâmetros. Nas figuras 27-28, podemos observar e medir com clareza as diferenças na taxa e na profundidade entre as duas amostras do *vibrato*. Na figura 27, a profundidade chega a 0,6 %, e a taxa do *vibrato* é de 5,05 Hz. Na figura 28, a profundidade chega quase a 1,5 % e a taxa mede 6 Hz.

Então, em relação ao SpectraPro, constatamos que o algoritmo aqui usado nos permite medir com precisão, a taxa e a profundidade do *vibrato*, podendo ser usado na comparação de diferentes amostras.

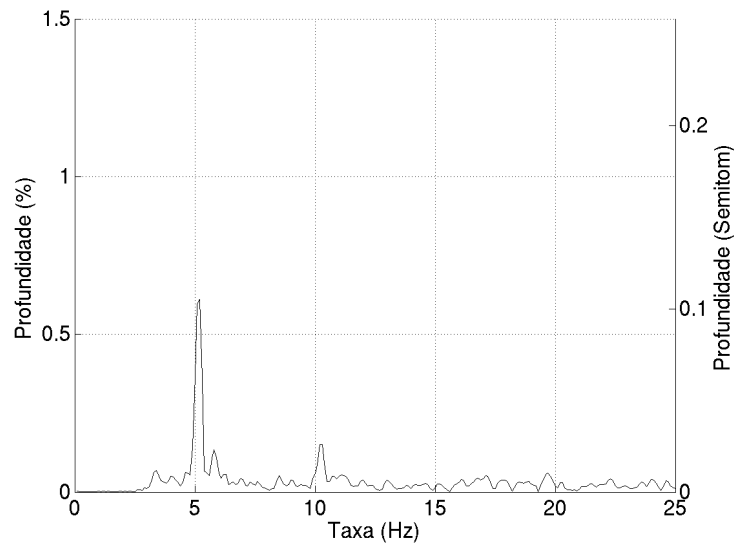


Figura 27 – gráfico profundidade X taxa do flautista 4, tocando o si bemol 4 de maneira livre (no cd: FL4-LIVRE_f0Freq_2.png)

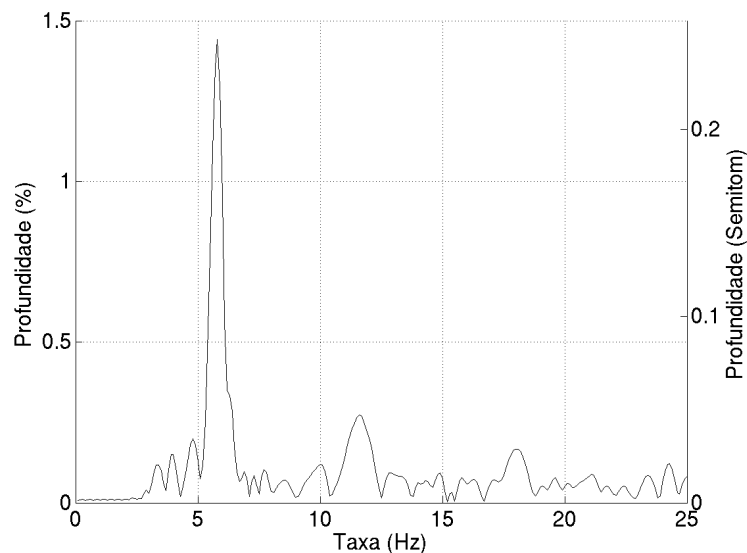


Figura 28 - gráfico profundidade X taxa do flautista 37, tocando o si bemol 4 (no cd: 37mono_f0Freq_2.png)

Seguindo na análise da figura 28, notamos mais uma vez uns picos menores, ao redor dos 12 e dos 18 Hz, caracterizando a série harmônica e indicando que as oscilações no tempo foram regulares, mas não senoidais. Seriam flutuações regulares e senoidais se tivesse apenas o pico maior em torno de 6 Hz.

Por meio do gráfico da figura 29, visualizamos o comportamento temporal da curva F_0 , evidenciando a forma da onda.

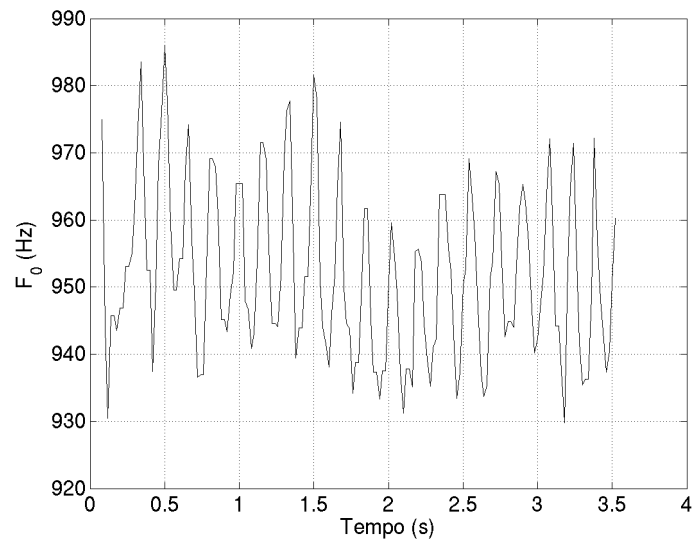


Figura 29 - flautista 37 tocando o si bemol 4, gráfico da F_0 no tempo (no cd: 37mono__f0Tempo.png)

Os primeiros 0,5 segundos da série de F_0 dessa amostra englobam ciclos com comportamento irregular. A nota alvo (si bemol) tem uma F_0 média ao redor dos 955 Hz entre os 0,5 e os 1,7 segundos. Logo, a excursão do F_0 vai se centrar em uma frequência ligeiramente menor, entre os 945 e os 950 Hz, para voltar excursionar em torno do valor médio da nota alvo, a partir dos 2,4 segundos. Em geral, a curva F_0 dessa amostra tem um comportamento estável, a forma da onda é regular por ter bastante semelhança entre ciclos consecutivos.

Como pode ser verificada no anexo,²⁵ a maioria dos gráficos das amostras examinadas com o algoritmo de análise das flutuações do *vibrato* resultou em um perfil parecido com os precedentes.

Porém, alguns deles mostraram curvas mais irregulares: as curvas das amostras das figuras 30a, 31a e 32a evidenciam muitos picos que não formam uma série harmônica. Isso aparece na irregularidade da forma da onda evidenciadas das figuras 30b, 31b e 32b. A hipótese consequente seria que ao longo da gravação, as oscilações foram irregulares, sem um período que se repetiu predominantemente. No caso da figura 32a parece ter havido oscilações intensas que flutuaram entre 4 e 6 Hz, aproximadamente.

²⁵ Ver CD anexo.

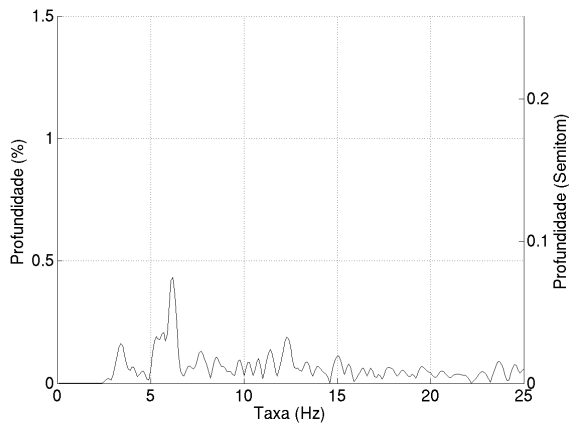


Figura 30a – flautista 1 tocando o si bemol 4 em *crescendo*, gráfico de taxa X profundidade (no cd FL1-CRESC_f0Freq_2.png)

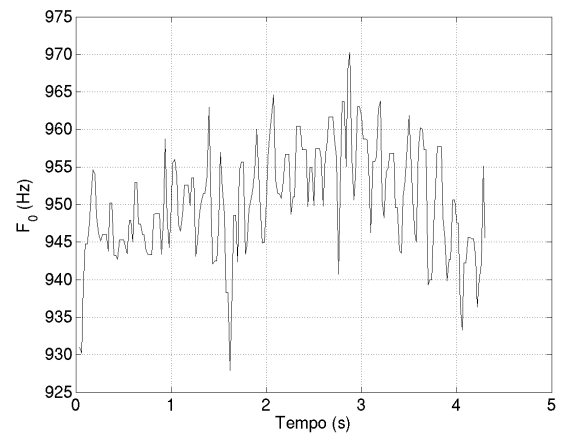


Figura 30b - flautista 1 tocando o si bemol 4 em *crescendo*, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL1-CRESC_f0Tempo.png)

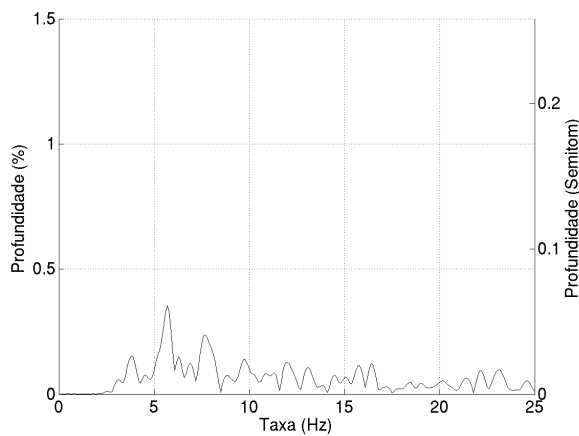


Figura 31a – flautista 1 tocando o si bemol 4 livremente, gráfico de taxa X profundidade (no cd: FL1-LIVRE_f0Freq_2.png)

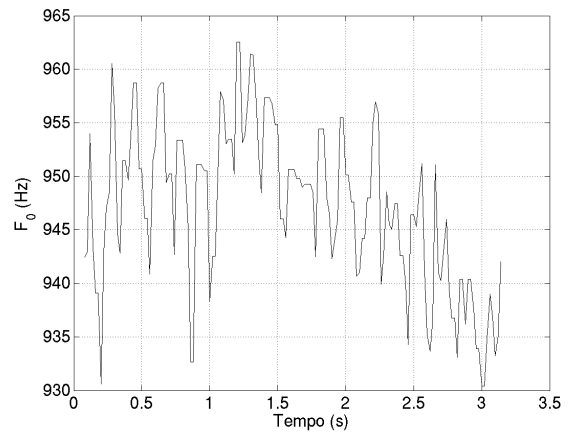


Figura 31b – flautista 1 tocando o si bemol 4 livremente, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL1-LIVRE_f0Tempo.png)

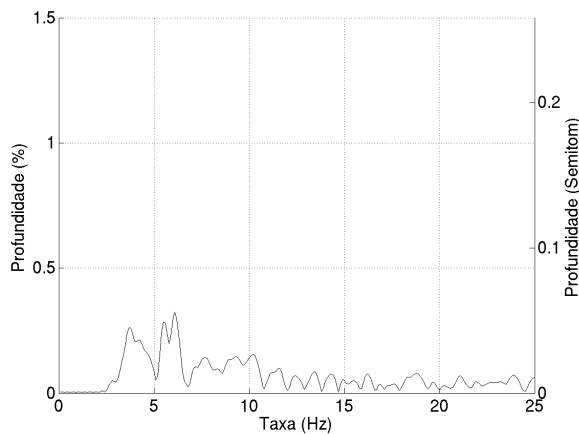


Figura 32a – flautista 2 tocando o si bemol 4 em *crescendo*, gráfico de taxa X profundidade (no cd: FL2-CRESC__f0Freq_2.png)

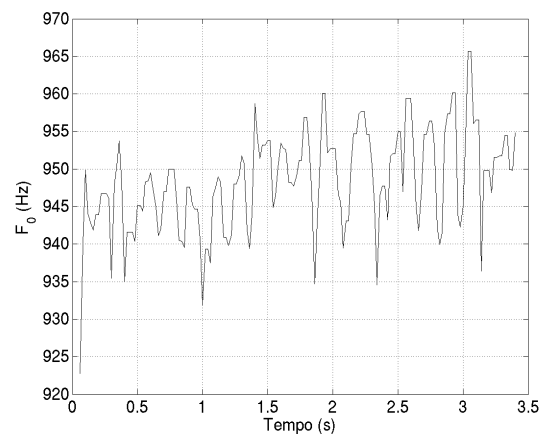


Figura 32b – flautista 2 tocando o si bemol 4 em *crescendo*, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL2 CRESC__f0Tempo.png)

Porém, ao ouvir novamente as gravações originais, reparamos que essas amostras irregulares foram tocadas pelos flautistas 1 e 2, ambas gravadas ao vivo em salas com muita reverberação. Surgiu, então, a hipótese que a irregularidade dos gráficos dependesse da reverberação exagerada, a qual teria criado uma “sobreposição” das pulsações do *vibrato*. Para explorar essa hipótese, decidiu-se fazer um pequeno experimento. Sendo a autora desta dissertação a flautista FL3, que gravou as próprias amostras ao vivo, em um ambiente acusticamente seco, resolveu ela mesma gravar mais umas amostras em uma sala reverberante, tentando escutar as notas da mesma forma que na gravação anterior, para fazer uma comparação. Os resultados aparecem nas figuras 33a/b, 34a/b e 35a/b.

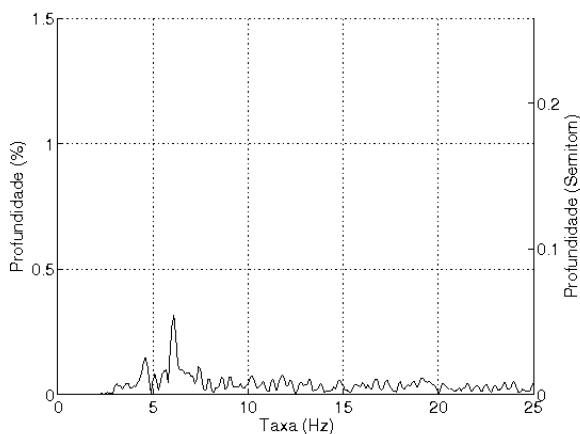


Figura 33a - flautista 3 tocando o si bemol 4 em uma sala com muita reverberação, gráfico taxa X profundidade. (no cd: fl3- reverb_cut_f0Freq_2.png)

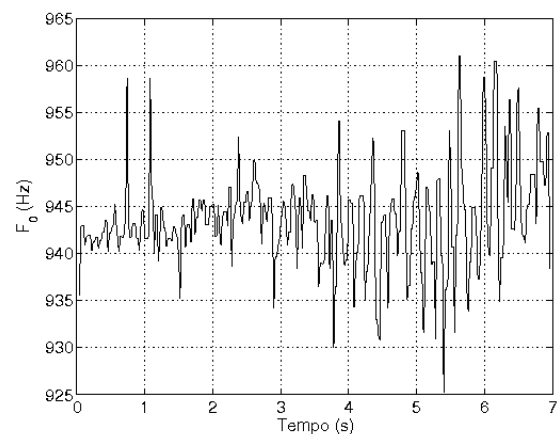


Figura 33b – flautista 3 tocando o si bemol 4 sala com muita reverberação, gráfico de F_0 no tempo (no cd: fl3-reverb_cut_f0Tempo.png)

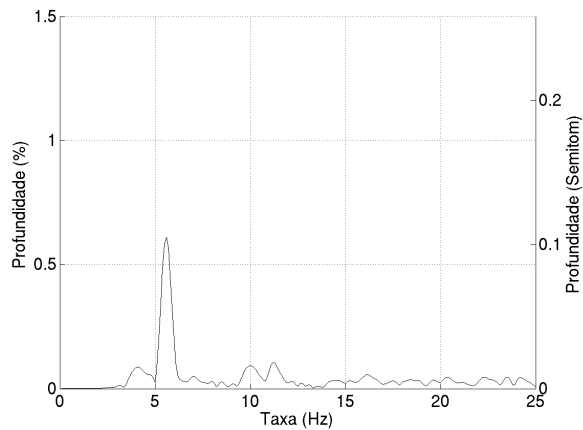


Figura 34a – flautista 3 tocando o si bemol 4 livremente em uma sala normal, amostra com vibrato, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL3-LIVRE_vib_f0Freq_2.png)

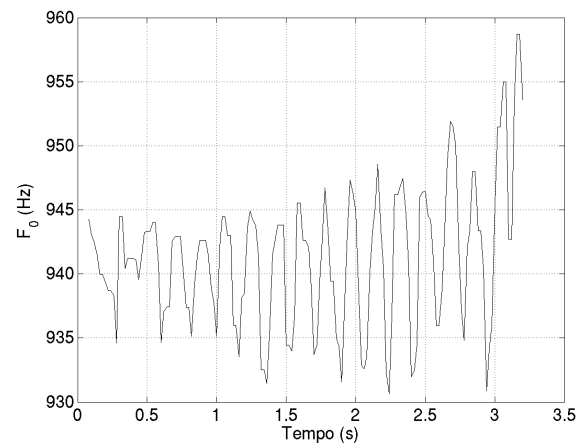


Figura 34b – flautista 3 tocando livremente o si bemol 4 em uma sala normal, amostra com vibrato, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL3-LIVRE_vib_f0Tempo.png)

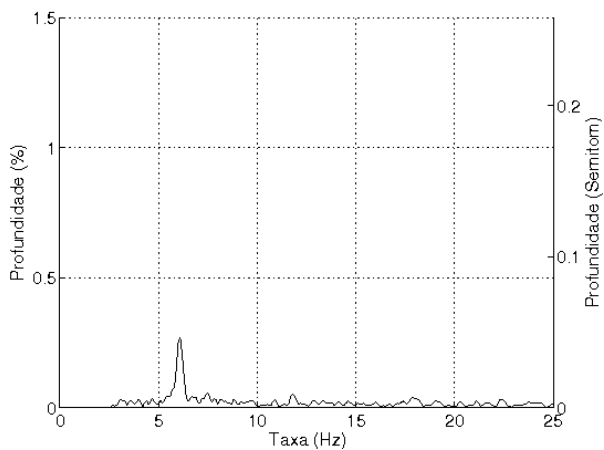


Figura 35a – flautista 3 tocando o si bemol 3 em uma sala com muita reverberação, gráfico taxa X profundidade (no cd: fl3-reverbgrave_f0Freq_2.png)

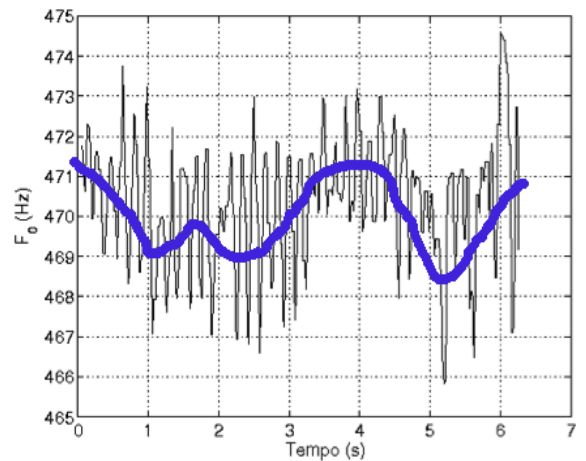


Figura 35b – flautista 3 tocando o si bemol 3 em uma sala com muita reverberação, gráfico de F_0 no tempo (no cd: fl3-reverbgrave_f0Tempo.png)

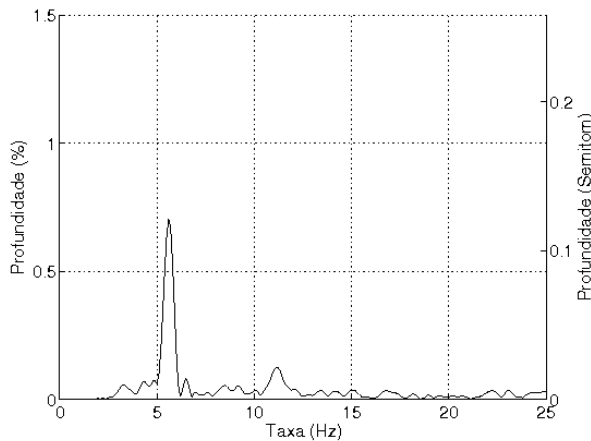


Figura 36a – flautista 3 tocando o si bemol 3 em uma sala normal, amostra com vibrato, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL3-GRAVE_vib_f0Freq_2.png)

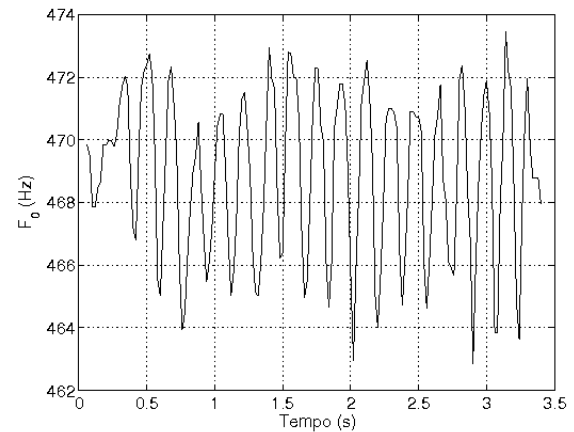


Figura 36b - flautista 3 tocando o si bemol 3 em uma sala normal, amostra com *vibrato* gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL3-GRAVE_vib_f0Tempo.png)

Na figura 33a a curva de F_0 relativa à gravação em sala reverberante, comparada com a da 34a em sala seca, revela uma maior irregularidade com muitos picos de altura parecida e não regularmente espaçados. Da mesma maneira, a forma da onda na figura 33b resulta claramente mais irregular do que aquela da figura 34b.

Porém, analisando as amostras das figuras 35a e 36a, gravadas na oitava grave, a irregularidade não aparece. Confrontando as imagens 35b e 36b, verificamos que na primeira, gravada na sala reverberante, a curva F_0 apresenta uma flutuação lenta (grafada em roxo), mesmo assim, a taxa e a profundidade não apresentam irregularidades em relação a F_0 média. Além disso, aparentemente, a amplitude das amostras gravadas na sala com reverberação teria profundidade menor do que a metade daquelas gravadas na sala seca. Na realidade, mesmo tendo cuidado em tocar as notas de modo mais semelhante nas duas situações, não podemos desconsiderar a possibilidade que uma mudança tão evidente na profundidade tenha podido depender de alguma diferença na execução.

Entretanto, os dados mostram com alguma clareza que a reverberação influencia na forma de onda ($F_0 \times t$) e, aparentemente, na medida de profundidade, que parece diminuir. Com certeza esse fenômeno precisa ser explorado em trabalhos futuros.

Outros gráficos chamaram atenção por ter umas irregularidades aparentemente não devidas a acústica reverberante do lugar da gravação.

Tendo como exemplo de regularidade o gráfico da figura 37, as figuras 38-39 referem-se às gravações em que as pulsações do vibrato resultam de um modo de execução irregular. Notamos que, em relação ao flautista número 8, o algoritmo detecta fielmente picos desordenados na figura 38a, assim como uma forma da onda pouco regular na figura 38b, em que a curva de F_0 aparece mais uniforme durante o primeiro segundo, mas logo a onda perde

regularidade, mesmo ficando centrada ao redor de uma F_0 estável, de aproximadamente 940 Hz.

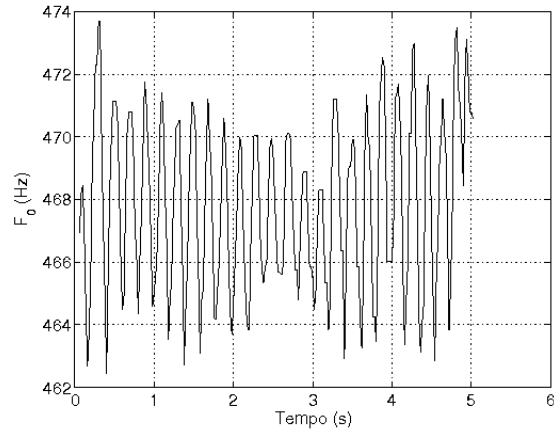


Figura 37 – flautista 37 tocando o si bemol 3, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL4-GRAVE_f0Temp.png)

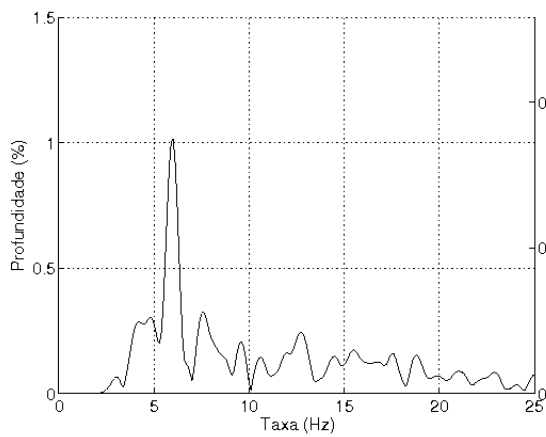


Figura 38a – flautista 8 tocando livremente o si bemol 4, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL8-LIVRE_f0Freq_2.png)

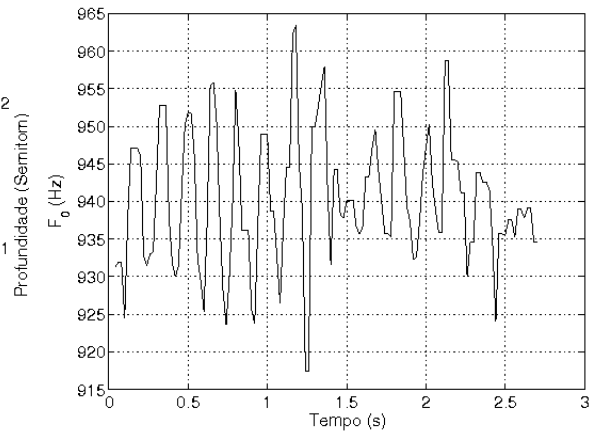


Figura 38b – flautista 8 tocando o si bemol 4, livremente, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL8-LIVRE_f0Tempo.png)

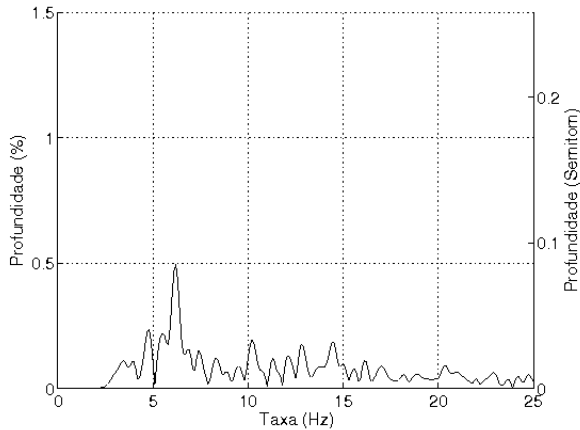


Figura 39a – flautista 9 tocando o si bemol 4 em *crescendo*, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL9-CRESC_f0Freq_2.png)

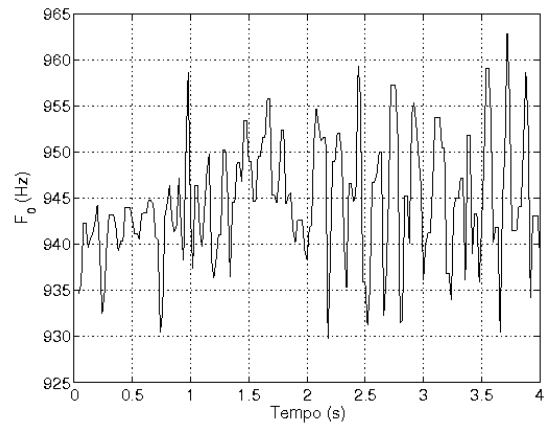


Figura 39b - flautista 9 tocando o si bemol 4, em *crescendo*, gráfico de F_0 no tempo (no cd: FL9-CRESC_f0Tempo.png)

Como última observação, olhando as figuras 40-43, sinalizamos que nas amostras analisadas, a taxa do *vibrato* não parece mudar significativamente em relação ao registro de execução e a profundidade parece depender mais da dinâmica de execução da nota, do que da oitava em que foi tocada. Isso é diferente do que acontece com instrumentos de cordas, pelos quais resulta evidente que “o vibrato executado no registro mais alto (...) tem taxa e profundidade maiores que o *vibrato* executado no grave” (SILVA, 2010, p. 66) e depõe mais uma vez a favor do fato que o *vibrato* da flauta é primariamente devido a oscilações de amplitude/timbre.

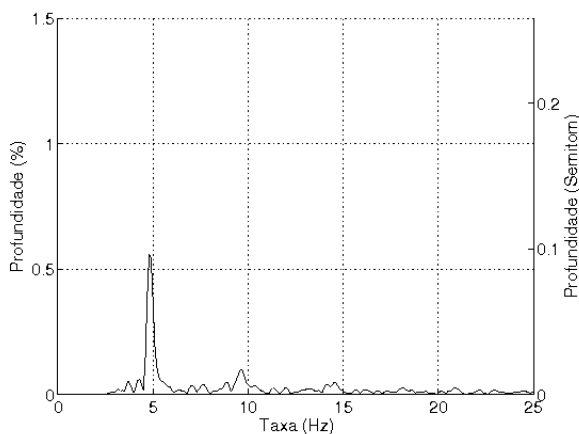


Figura 40a – flautista 10 tocando o si bemol 3, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL10-GRAVE_vib_f0Freq_2.png)

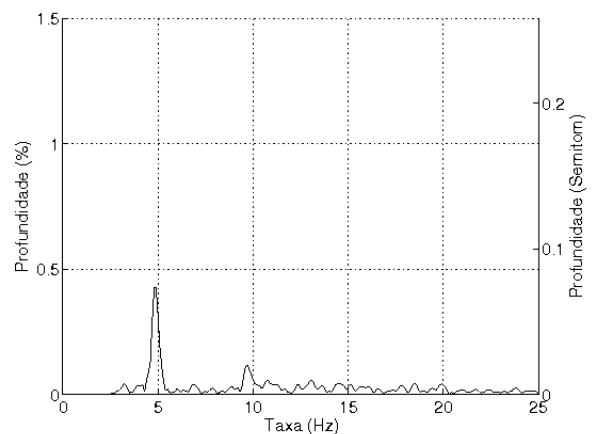


Figura 40b - flautista 10 tocando livremente o si bemol 4, gráfico taxa X profundidade (no cd: FL10-LIVRE_f0Freq_2.png)

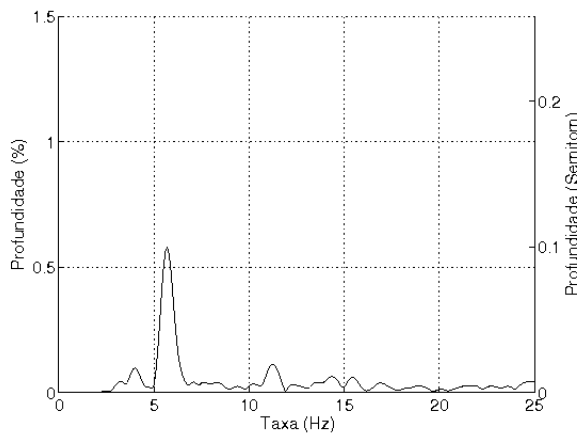


Figura 41a – flautista 8 tocando o si bemol 3
gráfico taxa X profundidade
(no cd: FL8-GRAVE__f0Freq_2.png)

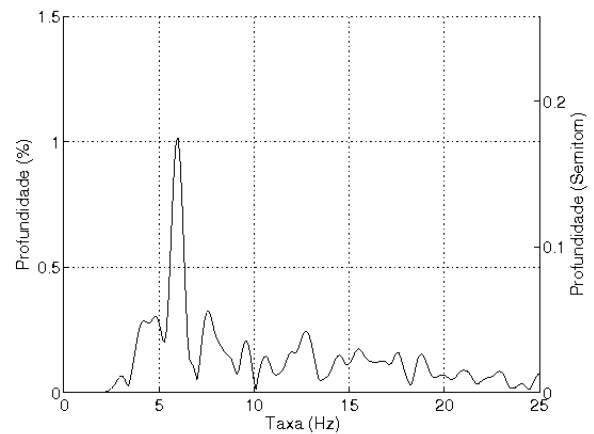


Figura 41b – flautista 8 tocando o si bemol 4
livremente, gráfico taxa X profundidade
(no cd: FL8-LIVRE__f0Freq_2.png)

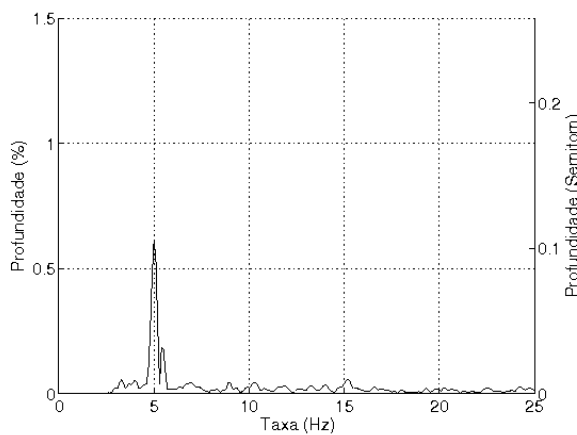


Figura 42 – flautista nº 4 tocando o si bemol 3,
gráfico de taxa X profundidade
(no CD, gráfico FL4-GRAVE__f0Freq_2.png)

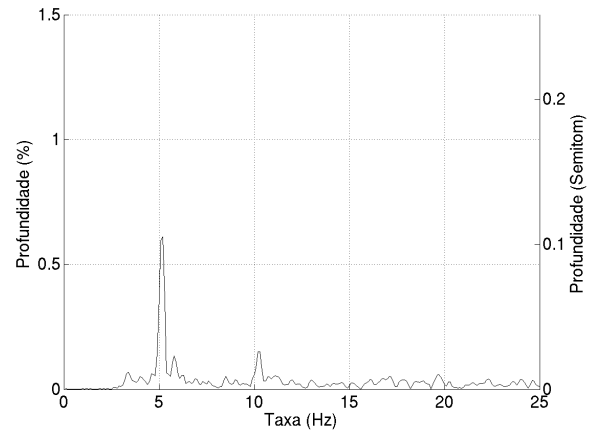


Figura 42 - flautista nº 4 tocando livremente o si
bemol 4, gráfico de taxa X profundidade (no CD,
gráfico FL4-LIVRE__f0Freq_2.png)

As figuras 42a e 42b, gravadas pelo flautista 4, impressionam pela grande semelhança, mesmo sendo gravadas em oitavas diferentes. As imagens sugerem que a taxa desse sinal não seja composta por uma só componente harmônica: parece haver, além da componente de maior profundidade na região de 5 Hz, outro pico com taxa de aproximadamente 5.2 Hz e profundidade de 0.2%. Isso indica que a forma da onda é regular, mas não senoidal.

Vemos que, em comparação ao espectrograma, o algoritmo de análise das flutuações do vibrato evidencia, com maior clareza, a regularidade e a forma da onda; por meio de uma

simples inspeção visual, já podemos constatar se a semelhança entre ciclos foi suficiente para resultar em uma curva de F_0 regular. Da mesma forma, nós podemos medir com precisão o desvio médio provocado pelas pulsações do vibrato com relação à mesma F_0 , indicado pela altura do pico dos gráficos profundidade/taxa, assim como pela altura das ondas no gráfico F_0 /Tempo com respeito à frequência média da nota alvo.

Esse algoritmo, em relação ao SpectraPro, quantifica a regularidade e a forma da onda da F_0 , além de, o desvio provocado pelas pulsações do *vibrato* com respeito a mesma F_0 , sem ter que recorrer a medição manual. Por isso, o mencionado algoritmo revelou-se mais efetivo na análise desses parâmetros.

Por outro lado, com o espectrograma podemos visualizar com mais facilidade a direção do desvio da frequência.

Essas duas ferramentas parecem se complementar na análise dos parâmetros que caracterizam o vibrato na flauta.

4 CONCLUSÃO

Apresentou-se a avaliação de duas ferramentas pela análise do *vibrato* na flauta: o programa de análise espectrográfica SpectraPro e um algoritmo para análise das flutuações presentes nos sinais de *vibrato* elaborado entre os anos de 1998 e 2010 por Vieira e Silva dos departamentos de física e de eletrônica da UFMG, ambos baseados na análise de Fourier.

Por meio da revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa, constatou-se que o estudo do *vibrato* na flauta foi sempre limitado a poucas variáveis, seja por causa da complexidade da definição deste fenômeno, seja pela falta de disponibilidade de uma ferramenta de pesquisa sofisticada, apta a analisar um número amplo de variáveis. Entre os parâmetros considerados importantes pela representação do *vibrato*, resolveu-se analisar os seguintes:

- 1) A profundidade.
- 2) A taxa.
- 3) O desvio da frequência fundamental.
- 4) A modulação do envelope espectral.
- 5) A regularidade e a forma da onda.
- 6) O modo de ataque e conclusão da nota.
- 7) Os ruídos/nuvens “fantasmas”.
- 8) A evolução no tempo.

Avaliaram-se um total de dezenove amostras da nota si bemol extraída da peça para flauta solo *Syrinx*, do compositor Claude Debussy (1862-1918) e subdivididas em duas bases:

- 1) Si bemol selecionado de gravações comerciais;
- 2) Si bemol escolhida de gravações não comerciais feitas por diversos flautistas profissionais em diferentes oitavas e dinâmicas.

Foi usado o gravador digital Olympus LS-11, configurado para gravar no formato *Wave* 44,1 kHz e 16 bits, compatível com ambos os programas. Converteram-se todos os trechos de estéreo para mono, para evitar a questão das diferenças entre os dois canais, por isso foi usado o *software* MeowMultiSound 1.0.0.

Os resultados da aplicação dessas ferramentas de análise do *vibrato* indicaram que o programa SpectraPro é mais efetivo na medição do modo de ataque e conclusão da nota, assim como, ruídos/nuvens “fantasmas”, evolução do *vibrato* no tempo, direção do desvio da F_0 e envelope espectral, além da duração, da intensidade e da ocorrência dos parciais superiores, mas encontra limites no rastreamento da evolução temporal da taxa e da profundidade das modulações provocadas pelo *vibrato*.

O programa proposto por Vieira e Silva calcula com maior precisão a regularidade, a forma, a taxa, a profundidade e o desvio da frequência fundamental (F_0). De fato esse algoritmo, diferentemente do SpectraPro, mede a regularidade da onda da F_0 e o desvio provocado pelas pulsações do *vibrato* com relação a mesma F_0 , sem ter que recorrer a medições manuais.

Com a avaliação dessas duas técnicas de análise dos parâmetros do *vibrato*, respondeu-se à hipótese de que seria necessário usar ferramentas diferentes para variáveis específicas, para se obter um modelo de representação do *vibrato* mais completo.

O *vibrato*, além de manifestar as intenções interpretativas e a personalidade de um músico, contribui para o resultado sonoro desejado. Em vista disso, o presente trabalho coloca-se como um primeiro passo de um caminho que no futuro possa levar a compreender mais profundamente o funcionamento das variações espectrais do *vibrato*. Ao compreendermos os diversos efeitos acústicos causados pelo *vibrato* no som da flauta, seriam abertas possibilidades técnicas e didáticas que ajudariam o estudante ou o profissional a aprimorar o uso, a qualidade e a flexibilidade do seu *vibrato*, aumentando os recursos tímbrísticos e expressivos determinantes da qualidade sonora do instrumento.

Enfim, os dados recolhidos por meio do algoritmo de Vieira e Silva mostram com alguma clareza que a reverberação influi na forma de onda ($F_0 \times t$) e, aparentemente, na medida de profundidade, que, por sua vez, parece diminuir. Com certeza esse fenômeno precisa ser explorado em trabalhos futuros. Por meio de um experimento poderia se reproduzir em uma sala reverberante o arquivo gravado na sala seca com amplitude semelhante à execução originária, e gravar o sinal resultante para obter controle sobre a taxa e profundidade, pois pode haver variação - como houve na taxa, o que nesse caso não parece depender da sala. Outro aspecto que mereceria ser estudado é a relação entre *vibrato* e dinâmica nos instrumentos de sopro, pesquisando também as diferenças entre instrumentos de cordas e de sopro.

REFERÊNCIAS

AMBROSI, A. *Psicoacustica e psicofisica dei suoni*. Disponível em: <<http://audio.accordo.it/articles/2010/02/32148/psicoacustica-psicofisica-dei-suoni.html>>. Acesso em: 09 jan. 2011.

ARROABARREN, I. et al. Measurement of vibrato in lyric singers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 51, n. 4, p. 660–665, Aug. 2002.

BAGSHAW, P. C. *Automatic prosodic analysis for computer aided pronunciation teaching*. PHD Thesis – University of Edinburgh, Edinburgh, 1994.

BRETOS, J.; SUNDBERG, J. Measurements of vibrato parameters in long sustained crescendo notes as sung by ten sopranos. *Journal TMH-QPSR, KTH*, Stockholm, v. 43, n. 1, p. 37-44, 2002.

COGAN, R. *Music seen, Music Heard: a picture book of musical design*. Cambridge: Publication Contact International, 1998. 127 p.

DELUSSE, C. *L'Art de la Flûte traversière*. [s.n.t]. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/48676931/L-Art-de-la-Flute-traversiere-Charles-de-Lusse>>. Acesso em: 16 jan. 2011.

DIAZ, J. A.; ROTHMAN, H. B. Acoustical comparison between samples of good and poor vibrato in singers. *Journal of Voice*, Philadelphia, v.17, n. 2, p. 179-184, 2003.

FLETCHER, N. H. Acoustical correlates of flute performance technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 57, n. 1, p. 236, Jan. 1975.

FÜRSTENAU, A. B. *Die kunst der floetespiels*. Leipzig: Brietkopf & Härtel, 1844.

GARCIA, M. F. O vibrato na flauta transversal: em busca de um olhar objetivo. In: *IX Encontro da Associação Brasileira de Flautistas*, 2009, Uberlândia. Anais do IX Encontro da Associação Brasileira de Flautistas. Uberlândia, 2009. v. único. p. 1-8.

HETRICK, W. E. *The 'Musica instrumentalis deudsch' of Martim Agricola: a treatise on musical instruments, 1529 and 1545*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

HOTTETERRE, J. *Principes de la Flûte Traversière e l'art de Préluder sur la Flûte Traversière*. Paris: Christophe Ballard, 1707. 50 p. Translated and Edited by David Lasocki. *Principles of the Flute, Recorder, and Oboe*. New York: Frederick A. Praeger, 1968.

IAZZETTA, F. *Transientes*. Disponível em:

<<http://www.eca.usp.br/prof/iazzeta/tutor/acustica/transientes/transientes>>. Acesso em: 02 abr. 2011.

LOUREIRO, M. A; PAULA, H.B de. Timbre de um instrumento musical. *Per Musi*, Belo Horizonte, n. 14, 2006. p. 57-81.

MONTÉCLAIR, M. P. *Principes de musique*. [s.l. : s.n] [1736?]. p. 77-92. Disponível em: <http://imslp.org/wiki/Principes_de_musique_%28Mont%C3%A9clair,_Michel_Pigolet_de%29>. Acesso em: 20 jan. 2011

QUANTZ, J. *On playing the flute*. New York: Schirmer Books, 1985. p. 166.

RABINER, L.; SCHAFER, R. *Digital processing of speech signals*. New Jersey: Prentice-Hall, 1978.

RISSET, J. C. Computer Study of Trumpet Tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 38, p. 912, 1965.

RISSET, J. C.; Mathews, M. V. Analysis of Musical Instrument Tones. *Physics Today*, Melville, NY, v. 22, n. 2, p. 23-40, 1969.

RISSET, J. C.; WESSEL, D. L. Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis. In: Deutsch, D. (Ed.). *Psychology of Music*. San Diego, California: Academic Press, 1999. p. 25-58.

SILVA, J. E. C. *Tremor e vibrato humanos: medição de taxa, profundidade e regularidade no movimento de membros, na voz e no contrabaixo acústico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo

Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://www.cefala.org/~jose-eduardo/msc-joseEduardo.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2010

SEASHORE, C.E (Ed.). The vibrato. *University of Iowa studies, New series*, Iowa City, University Press, n. 225, 1932.

SOLUM, J. *The early flute*. Oxford: Clarendon Press, 1992. p. 17.

SUNDBERG, J. Acoustic and psychoacoustic aspects of vocal vibrato. In: DEJONCKERE, P. H.; HIRANO, M.; SUNDBERG, J (Ed.). *Vibrato*. San Diego: Singular Publishing, 1995.

TROMLITZ, J. G. *Ausführlicher und gründlicher Unterricht die Flöte zu spielen*. Leipzig: Adam Friedrich Böhme, 1791. Disponível em: <http://imslp.org/wiki/Ausf%C3%BChrlicher_und_gr%C3%BCndlicher_Unterricht_die_Fl%C3%B6te_zu_spielen_%28Tromlitz,_Johann_George%29>. Acesso em: 08 jan. 2011.

VERFAILLE, V.; GUSTAVINO, C.; DEPALLE, P. Perceptual Evaluation of Vibrato Models. *Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology*. 2005, p. 1-19.

VIEIRA, M. N. Algoritmo para extração do espectro do tremor e do vibrato na voz humana. *Technical Report FAPEMIG – TEC 1143/98*, Departamento de Física/ICEx/UFMG, 1998.

VIEIRA M. N. et al.: Vibrato and tremor extent spectrum EL7. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 130 (1), July 2011

_____. *Automated measures of dysphonias and the phonatory effects of asymmetries in the posterior larynx*. PhD thesis - University of Edinburgh, Edinburgh, 1997.

WION, J. *Vibrato*. Disponível em: <<http://homepage.mac.com/johnwion/vibrato.html>>. Acesso em: 03 maio 2010.

YAIR, E.; GATH, I. On the use of pitch power spectrum in the evaluation of vocal tremor. *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 9, p. 1166–1175, Sept. 1988.

ZURMELY, R. M. *Forma de onda, espectro e espectrograma*. Disponível em: <<http://www.qsl.net/py4zbz/teoria/espectro.html>>. Acesso em: 03 mar. 2011.

Bibliografía Consultada

BROWN, J. C. Frequency ratios of spectral components of musical sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 99, p. 1210-1218, Feb. 1996.

CASTALLENGO, M.; RICHARD, G.; D'ALESSANDRO, C. Study of vocal pitch vibrato perception using vsynthesis. In: *Proceedings of the 13th International Congress on Acoustics*, Yugoslavia, 1989.

COLTMAN, J. W. Acoustics of the Flute. *Physics Today*, New York, n. 21, p. 25-32., Nov. 1968.

DEUTSCH, D. (Ed.). *The Psychology of Music*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1999.

PRAME, E. Vibrato extent and intonation in professional western lyric singing. *Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 102, n. 1, p. 616–621, 1997. 6 p.

SEASHORE, C. E. Psychology of the vibrato in voice and instrument. *University of Iowa Studies in the Psychology of Music*. Iowa City, v. 3, 1936.

_____. (Ed.). Objective analysis of musical performance. *University of Iowa Studies in the Psychology of Music*, Iowa City, v. 4, 1937.

_____. *Psychology of Music*. New York: McGraw-Hill, 1938.

SHIPP, T.; LEANDERSON, R.; SUNDBERG, J. Some acoustic characteristics of vocal vibrato. *Journal of Research in Singing*, v. 4, n. 1, p. 18-25, 1980.

SHONIE, J. I.; HORAN, K. E. The pitch of vibrato tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 67, n. 1, p. 246–252, 1980. 7 p.

SMALL, A. M. An objective analysis of artistic violin performance. In: SEASHORE, C. E (Ed), *University of Iowa Studies in the Psychology of Music*, v. 4, Objective analysis of

musical performance, Iowa City, University of Iowa, p. 172-231, 1937.

STEVENS, S. S.; VOLKMANN, J.; NEWMAN, E. B. *Journal of the Acoustical Society of America*, New York, v. 8, n. 3, p. 185-190, 1937. 6 p.

SUNDBERG, J. Effects of the vibrato and the 'singing formant' on pitch. *Journal of Research in Singing*, v. 5, n. 2, p. 5-17, 1978.

_____. *The Science of the Singing Voice*. Illinois: Northern Illinois University Press, 1987.

SUNDBERG, J.; IWARSSON, J.; HAGEGÅRD, H. A singer's expression of emotions in sung performance. In: FUJIMURA, O.; HIRANO, M (Ed.). *Vocal fold physiology: voice quality and control*. San Diego: Singular Publishing Group, 1995.

SUNDBERG, J.; PRAME, E.; IWARSSON, J. Replicability and accuracy of pitch patterns in professional singers. In: DAVIS, P. J.; FLETCHER, N. H. *Vocal fold physiology*. San Diego, Singular Publishing Group, 1996.

TIMMERS, R.; DESAIN, P. Vibrato: Questions and answers from musicians and science. In: *Proceedings of the 6th ICMPC* (Int. Conf. on Music Perception and Cognition). Staffordshire, England, Keele University, Aug. 2000

ANEXO A - Introdução à leitura de um espectrograma

Conforme disponível na página <<http://www.qsl.net/py4zbz/teoria/espectro.htm>>,²⁶ um sinal periódico qualquer, no nosso caso o som da maioria dos instrumentos ocidentais²⁷ é composto de – ou pode ser decomposto em – uma série de ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (F_0). Estas ondas senoidais são chamadas de harmônicos.

A onda senoidal é a onda mais simples ou pura que existe, tem uma única frequência, e para completar a sua descrição basta indicar a sua amplitude e a sua fase.

O espectro é a representação das componentes de um som num gráfico que mostra suas amplitudes versus frequência. O espectro de uma senoide é uma raia, pois ocupa uma única frequência, com altura igual à amplitude. No espectro, não é possível representar a fase da raia. A figura seguinte é um exemplo de espectro do sinal áudio com frequência fixa (nota longa).

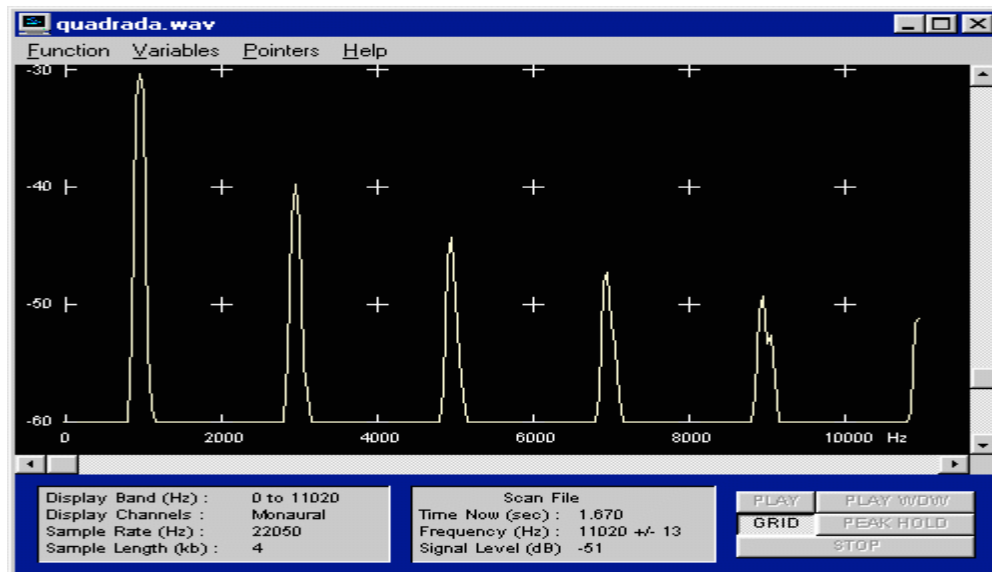


Figura 43 - Espectro de uma nota longa: à esquerda, o pico da frequência fundamental (F_0) com amplitude maior e a seguir os picos dos outros harmônicos. (disponível na página <<http://www.qsl.net/py4zbz/teoria/espectro.htm>>)

²⁶ ZUMERLY, R. M. Acesso em: 03 mar. 2011.

²⁷ Existem sons compostos por frequências que não são múltiplas inteiras da fundamental, como alguns instrumentos de percussão.

A forma de onda é a representação dos valores instantâneos em função do tempo. Para entender melhor a relação entre forma de onda e espectro, a figura seguinte mostra isso de forma tridimensional para uma onda quadrada complexa.

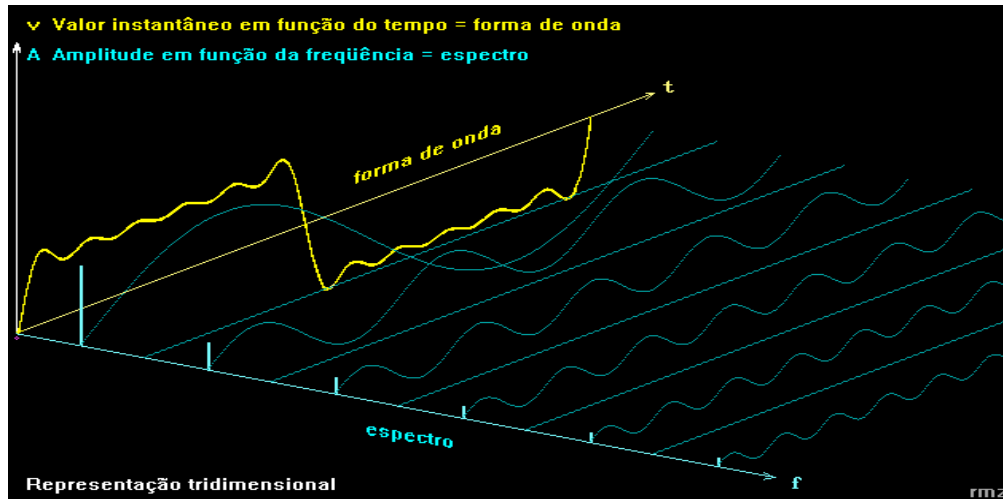


Figura 45 - Representação tridimensional de um espectro de onda (disponível na página <<http://www.qsl.net/py4zbz/teoria/espectro.htm>>)

A figura 45 representa uma onda sonora dentro de três eixos ortogonais: amplitude (A), tempo (T) e frequência (F). Vemos a forma de onda colocando num plano os eixos A e T, e vemos o espectro colocando num plano os eixos F e A. O espectrograma é a vista de cima da figura tridimensional anterior, coloca num plano os eixos F e T e representa a evolução da frequência do espectro do sinal em função do tempo. A amplitude pode ser mostrada usando uma escala de cores convencionalmente previamente.

Portanto, num espectrograma, aparecem todas as frequências presentes no som, com indicação da intensidade de cada uma delas. As cores, no gráfico, representam a amplitude relativa do som, em decibel (dB). Do azul para o vermelho, a intensidade é crescente, como mostra a figura 46.



Figura 46 - Gráfico de cores utilizado em um espectrograma, representando a intensidade crescente

Na figura 48 temos um espectrograma com indicações de como deve ser feita a leitura da imagem.



Figura 48 - Espectrograma com sinais para a análise da imagem: retângulo marcando um conjunto de harmônicos (nota musical); setas indicando os três primeiros harmônicos de uma nota; e círculos indicando ruídos na imagem

Cada uma das linhas que aparecem na imagem de um espectrograma representa um parcial ou harmônico da nota analisada. Na figura 48, as setas indicam os três primeiros harmônicos de uma das frequências analisadas; cada nota é representada por um conjunto de harmônicos, como indicado pelo retângulo branco, à esquerda; os círculos, em verde, indicam alguns dos ruídos presentes no espectrograma. A indicação do valor das frequências encontra-se à esquerda; e a da amplitude relativa, à direita. O conjunto de frequências que formam uma nota é chamado envelope espectral.

Portanto, o espectrograma é de fundamental importância para analisar a evolução espectral de um sinal complexo e variável no tempo, como por exemplo, um sinal de voz ou áudio.

ANEXO B- CD incluindo:

- **todas as amostras que foram analisadas neste trabalho**
- **todos gráficos, incluso aqueles não colocados na dissertação.**
- **todos espectrogramas, incluso aqueles não colocados na dissertação.**