

Lucas Nézio Malta

**Regularidade e simultaneidade na técnica
violonística de mão direita: uma abordagem
quantitativa de arpejos, sons *plaqué* e
*tremolos***

Escola de Música
2012

Lucas Nézio Malta

**Regularidade e simultaneidade na técnica
violonística de mão direita: uma abordagem
quantitativa de arpejos, sons *plaqué* e
*tremolos***

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Música da Universi-
dade Federal de Minas Gerais, como re-
quisito parcial para a obtenção do título
de Mestre em Música.

Orientador: Sérgio Freire Garcia

UFMG

Escola de Música
2012

M261r Malta, Lucas Nézio.

Regularidade e simultaneidade na técnica violonística de mão direita: uma abordagem quantitativa de arpejos, sons *plaqué* e *tremolos* [manuscrito] / Lucas Nézio
Malta. – 2012.

73 f., enc.

Orientador: Sérgio Freire Garcia.

Dissertação (mestrado em Música) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Música.

Inclui bibliografia: p. 72-73.

1. Música para violão - métodos. 2. Música e tecnologia 3. Acústica (música). I. Garcia, Sérgio Freire. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Música. III. Título.

CDD: 781



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Música
Programa de Pós-Graduação em Música

Dissertação defendida pelo aluno LUCAS NÉZIO MALTA, em 30 de novembro de 2012, e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Sérgio Freire Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais
(orientador)

Prof. Dr. Hani Camille Yehia
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Maurício Alves Loureiro
Universidade Federal de Minas Gerais

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Freire pela generosidade no conhecimento transmitido, pela paciência e pela amizade no decorrer de todos esses meses de trabalho.

Ao Prof. Dr. Jalver Bethônico pela confiança, pela amizade, pela oportunidade de o acompanhar em suas disciplinas e pelo aprendizado da experiência docente.

Ao programa Capes/REUNI pelo suporte e contribuições indispensáveis.

Aos colegas da Escola de Música da UFMG pela amizade, pelos momentos de descontração e pelas trocas de conhecimentos. Agradeço também a todos os alunos de violão que participaram das gravações durante o projeto.

Ao meu amigo Érico pelo apoio e pelos momentos de lucidez.

Aos meus amigos e família pelo incentivo.

À Laiane pelo carinho e apoio essenciais nesse momento.

Agradeço, principalmente, aos meus pais e ao meu irmão pelo suporte e motivação indispensáveis em todos os momentos.

Resumo

O texto aborda as questões de simultaneidade de ataques e de regularidade rítmico-dinâmica presentes em diferentes técnicas de mão direita de violonistas, a saber: técnicas de arpejos, sons *plaqué* e *tremolos*, sendo todas características marcantes da sonoridade do violão.

Discute-se inicialmente, de forma qualitativa, diversos tópicos da psicoacústica relacionados a estas técnicas, tanto para ilustrar a complexidade presente nestas questões quanto para subsidiar algumas decisões metodológicas da parte experimental.

A seguir é descrito o sistema utilizado nesta pesquisa, desenvolvido a partir de 2011 no Laboratório de Performance com Sistemas Interativos da Escola de Música da UFMG: um violão acústico com captação hexafônica (um sinal por corda) conectado a um software de processamento digital de sons em tempo real. Discute-se também a detecção de ataques (e de extinção de notas) e a estimação de amplitudes, ferramentas fundamentais para as análises propostas.

São analisados excertos de obras do repertório violonístico que são dedicadas ao estudo das técnicas de mão direita escolhidas: "Estudo nº 1" e "Estudo nº 4" de Heitor Villa Lobos, "Estudo nº 2" de Matteo Carcassi e o terceiro movimento, "Scherzino", da peça "Cavatina" de Alexandre Tansmans.

Os aspectos da simultaneidade e da regularidade presentes nessas obras são discutidas através da comparação de diferentes execuções (realizadas por um mesmo ou por diferentes músicos), destacando-se tanto características comuns como diferenças individuais. Ao invés da definição de um padrão de execução "ideal" *a priori*, optou-se pela busca de consistência interpretativa em cada um dos intérpretes/execuções, onde são levadas em conta também opções de dedilhado de mão direita e esquerda.

Não se trata de um estudo quantitativo exaustivo dessas técnicas, mas sim de um estudo que abre novas possibilidades metodológicas e inicia a discussão de questões técnico-interpretativas no violão decorrentes da utilização do sistema desenvolvido.

Palavras-chave: violão, técnica violonística, processamento digital de sons, sistemas musicais interativos.

Abstract

The text approaches the issues of simultaneity of attacks and rhythmic-dynamic regularity present in different guitarists right hand techniques, namely: arpeggio and tremolo techniques and plucked sounds, all hallmarks of this instrument's sound.

Initially it is discussed, in a qualitative way, several psychoacoustic topics related to these techniques, both to illustrate the complexity present in these issues as to subsidize some methodological decisions of the experimental part.

The next section describes the system used in this study, developed in 2011 at the Laboratory of Performance with Interactive Systems in the Music School at UFMG: an acoustic guitar with hexaphonic pickups (one signal per string) connected to a real time digital audio processing software. We also discuss the attack detection, extinguishment of notes and the amplitude estimation, fundamental tools for the proposed analysis.

Excerpts of the guitar repertoire of works devoted to the study of the chosen right hand techniques were analysed: "Study nº 1" and "Study nº 4" by Heitor Villa Lobos, "Study nº 2" by Matteo Carcassi and the third movement, "Scherzino", of the composition "Cavatina" by Alexander Tansmans.

Simultaneity and regularity aspects present in these works are discussed by comparing different plays (performed by the same or by different musicians), highlighting both common features such as individual differences. Instead of defining a "ideal" standard of execution, it was decided to search for interpretative consistency in each of the performers / performances where right and left hands fingering options are also taken into account.

This is not a comprehensive quantitative study of these techniques, but rather a study that opens new methodological possibilities and initiates technical and interpretive issues of the guitar from the use of the developed system.

Keywords: guitar, guitar technique, digital audio processing, interactive music systems.

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	4
Abstract	5
Sumário	6
Lista de Figuras	8
Introdução	12
1 Captação hexafônica no violão: descrição do sistema utilizado.	15
1.1 Revisão dos conceitos psicoacústicos pertinentes	15
1.1.1 Simultaneidade e conceitos psicoacústicos relacionados	16
1.1.2 Integração temporal	19
1.1.3 Regularidade rítmica	20
1.2 Descrição do sistema utilizado	21
1.2.1 <i>Hardwares</i>	22
1.2.2 <i>Softwares</i>	25
1.2.2.1 <i>Max</i>	25
1.2.2.2 <i>Digital Performer e Soundflower</i>	28
1.2.3 Comparação entre som microfonado e som captado	29
1.3 Descritores utilizados	36
1.3.1 Detecção de ataques	36
1.3.2 Cálculo de amplitudes	39
1.3.3 Extinção de notas	40
2 Aplicação do sistema: análises de excertos musicais	44
2.1 Arpejos: Estudo nº 1 de Heitor Villa-Lobos	44
2.1.1 Comparações entre diferentes execuções	48
2.2 <i>Plaquê</i> : Estudo nº 4 de Heitor Villa-Lobos	51
2.2.1 Comparações entre diferentes execuções	51
2.3 Repetição de notas: Estudo nº 2 de Matteo Carcassi	56
2.3.1 Comparações entre diferentes execuções	57

2.4	<i>Tremolo: Scherzino</i> de Alexandre Tansman	62
2.4.1	Comparações entre diferentes execuções	63
3	Discussão	69
4	Conclusão e perspectivas futuras	72
	Referências	73

Lista de Figuras

- 1 Curva representando a intensidade (dB) de estímulos entre 20 e 200 ms, necessária para a percepção de uma mesma intensidade. (GELFAND, 2009, p.170) 19
- 2 Sensação de ritmo subjetivamente uniforme. A coluna à esquerda mostra esquematicamente exemplos de envelopes temporais; as próximas duas colunas indicam os intervalos de tempo T_A e T_B de duração dos eventos sonoros; o deslocamento temporal entre os eventos, Δt , que é necessário para produzir ritmo subjetivamente uniforme é mostrado na última coluna à direita. (ZWICKER, 2007, p.271) 21
- 3 Ressonância observada na corda 6 do violão durante execução de peça polifônica. Notas tocadas: fá# e mi. Acima: forma de onda do trecho observado. Abaixo: espectrograma do mesmo trecho. 25
- 4 *Patch* de Max: Exemplo de programação com alguns objetos (coluna à esquerda: número inteiro, *float*, mensagem e comentário; coluna à direita: um objeto visual *toggle*, o objeto “metro” com o argumento de inicialização de 1000 ms e um objeto visual *bang*). 27
- 5 Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (fá# 92,5Hz). 31
- 6 Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (dó central 261,6Hz). 32
- 7 Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (fá# 740Hz). 33
- 8 Sonogramas relativos à nota dó central (261.6 Hz) em três níveis dinâmicos. O gráfico acima representa o “excesso” espectral do som do captador, o gráfico do meio representa o “excesso” do som microfonado e o gráfico abaixo representa os componentes “comuns”. . 35

- 9 Fluxograma do processamento de sinais digitais das cordas do violão: pré-processamento da corda estudada, determinação do piso, detecção de ataques, cálculo de amplitudes e extinção de notas. . . . 36
- 10 Na primeira linha desta figura, podemos observar a forma de onda resultante de um ataque em uma das cordas do violão. Na segunda linha, um traço vertical marca o momento de detecção do ataque. Na terceira linha, está representada a evolução da curva de RMS do sinal observado na primeira linha. No eixo vertical as unidades são arbitrárias. 40
- 11 Exemplo de captações de ataques e de extinções de notas. No eixo horizontal superior está indicada a escala temporal. No eixo vertical as unidades são arbitrárias. Acima: forma de onda. Centro: linhas verticais marcam momento da detecção de ataques. Abaixo: linhas verticais marcam momento da extinção das notas. 41
- 12 Formas de onda observadas na gravação do excerto analisado na seção 2.4 realizada pelo músico 1. Aumentos na amplitude da onda em momentos entre ataques sugerem a preparação do ataque seguinte. Nos dois eixos as unidades são arbitrárias. 42
- 13 Formas de onda observadas na gravação do excerto analisado na seção 2.4 realizada pelo músico 2. Aumentos na amplitude da onda nos momentos finais das notas sugerem que o músico abafa a nota soante para preparar a seguinte. Nos dois eixos as unidades são arbitrárias. 43
- 14 Compassos 7 a 12 do Estudo nº1 de Villa-Lobos para violão (VILLA-LOBOS, 2000). 45
- 15 *Patch* que mostra programação visual onde é possível observar momento de ataque e duração das notas tocadas. Este trecho representa o primeiro compasso no excerto da figura 14. 45
- 16 Representação gráfica das amplitudes captadas em uma janela de oito segundos. À esquerda, uma visão geral das amplitudes referentes aos compassos 7 e 8 (parte) em uma execução do "Estudo nº 1" de Villa-Lobos; à direita, detalhe das amplitudes das cordas 3 e 4. 47

17	Acima, representação da regularidade na execução das semicolcheias tocadas. Abaixo, representação da regularidade medida em semínimas, mínimas e semibreves. Estão representados 4 compassos do Estudo nº 1.	48
18	Gráficos relativos à agógica de três execuções (por três músicos diferentes) de excerto do Estudo nº 1 de Villa-Lobos (cp. 7 a 13).	50
19	Evolução do pulso de semínima - expresso em bpm - em cada uma das interpretações.	52
20	Trecho selecionado: compassos iniciais do Estudo nº 4 de Villa-Lobos para violão (VILLA-LOBOS, 2000).	53
21	Espalhamento das notas dos 8 primeiros acordes das versões A1, A2, B e C.	53
22	Na figura acima, sequência de amplitudes das cordas 3 e 4 (respectivamente linhas verde e azul) em 4 pulsos da versão C. Na figura abaixo, sequência de amplitudes das mesmas cordas no primeiro compasso da versão A1.	55
23	Amplitudes da corda 5 em acordes não sucessivos da versão A1, tocada primeiramente pelo dedo indicador e depois pelo polegar.	55
24	Estudo nº 2 de Matteo Carcassi (CARCASSI, 1852).	56
25	Variação do pulso (bpm dado pelo intervalo entre mínimas) na versão 1. Curva azul: notas graves (tocadas nas cordas 4, 5 e 6); curva verde: corda 3; curva laranja: corda 2.	58
26	Variação do pulso (bpm dado pelo intervalo entre mínimas) na versão 2. Curva azul: notas graves (tocadas nas cordas 4, 5 e 6); curva verde: corda 3; curva laranja: corda 2.	58
27	Intervalo de tempo entre todos os ataques do trecho. Versão 1.	59
28	Intervalo de tempo entre todos os ataques do trecho. Versão 2.	59
29	Duração das notas tocadas na primeira corda do violão.	60
30	Amplitude de cada nota.	61
31	Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão, versão 1.	61
32	Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão, versão 2.	61
33	<i>Scherzino</i> - Alexandre Tansman (TANSMAN, 1952).	63
34	Variação do pulso de colcheia (bpm) nas duas versões.	64
35	Intervalo de tempo entre ataques - músico 1.	65
36	Intervalo de tempo entre ataques - músico 2.	65

37	Intervalos de tempo (normalizados) entre ataques na primeira corda do violão.	66
38	Duração (normalizada) das notas tocadas na primeira corda do violão.	66
39	Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão.	67
40	Amplitude das notas que formam a melodia (cordas 2, 3 e 4).	67

Introdução

A prática violonística, em suas diversas manifestações estilísticas, guarda uma característica técnica básica: as ações bastante específicas e diferenciadas de cada uma das mãos, sendo, em geral para pessoas destros, a mão direita responsável pela excitação das cordas e a esquerda pela variação da afinação de cada uma delas. Devido a este fato, é bastante comum serem encontradas coleções de estudos técnicos voltados para cada uma das mãos. Podemos citar algumas das principais técnicas de mão direita como sendo os arpejos (quando notas de um acorde são tocadas em sequência, em diferentes cordas), o *plaqué* (quando notas de um acorde são tocadas simultaneamente), o *tremolo* (repetição rápida de uma nota a fim de produzir a sensação de sustentação) e a polifonia de estratos (quando se usa o instrumento para expor vários estratos da música, como baixo, acompanhamento e melodia).

A revisão de textos dessa área não revela muitos estudos quantitativos sobre as técnicas específicas do violão, mas merecem menção alguns estudos similares feitos com uma guitarra elétrica. Por exemplo, Lima (LIMA; RAMALHO, 2008) relata o estudo do ritmo da Bossa Nova através de uma guitarra Midi; os principais problemas relatados se devem ao fato da conversão Midi não poder ser controlada pelo pesquisador, além de se perderem informações de sonoridade nessa conversão. Nos artigos (FRISSON et al., 2009; REBOURSIÈRE et al., 2010), os autores propõem uma guitarra elétrica multimodal, que inclui captação hexafônica¹ e vêm nesse projeto possibilidades tanto de estudo da performance quanto da ampliação criativa do instrumento. Miller Puckette (PUCKETTE, 2007) também se propõe a trabalhar com uma guitarra hexafônica, mas concentra-se nas possibilidades de manipulação do sinal de áudio via processamento digital.

Outros estudos com instrumentos capazes de gerar mais de uma voz (polifônicos) também foram encontrados. Citaremos como exemplo o artigo (REPP, 1996), onde o autor fala sobre a assincronia entre notas de piano tocadas pela mesma

¹Captação individual por corda, mais informações na seção 1.2 do capítulo 1.

mão ou por mãos diferentes de um mesmo músico. Este estudo foi realizado com a utilização de um piano Disklavier e o repertório era composto por três peças do repertório tradicional do instrumento (de Schumann, Chopin e Debussy). No artigo, o autor apresenta também os resultados e as principais tendências observadas.

Esta dissertação trata de estudos realizados com três técnicas de mão direita: arpejos, sons *plaqué* e *tremolos*. A primeira delas trata das notas de um acorde tocadas de forma sucessiva em diferentes cordas e que, no caso estudado, são tocadas todas com o mesmo espaçamento temporal, de forma rítmica precisa e repetitiva. A técnica *plaqué* requer do músico que todas as notas de um acorde sejam executadas em conjunto, soando como um bloco (em inglês, a técnica é chamada de *block chord*). Esta técnica requer do instrumentista precisão para que todos os dedos ataquem ao mesmo tempo. A peça escolhida para o estudo dessa técnica também requer que o músico possua boa habilidade rítmica, pois demanda a execução de vários acordes em *plaqué* de forma sucessiva e com ritmo preciso. Já a técnica *tremolo* também requer as mesmas habilidades, mas nesse caso, uma nota é tocada rápida e repetidamente a fim de imitar o som de uma nota sustentada, como acontece com a técnica de mesmo nome utilizada em instrumentos de arco. O músico, nesse caso, deve tomar muito cuidado para que os dedos diferentes que atacam a corda em questão não produzam diferenças de timbre e intensidade muito grandes.

Para um estudo mais objetivo e quantitativo de técnicas violonísticas, desenvolvemos um sistema composto por um violão acústico com captação hexafônica (um sinal por corda) e uma plataforma de processamento digital de sons em tempo real. A descrição desse sistema, suas características técnicas, possibilidades e limitações são o assunto do capítulo 1. Uma breve discussão de temas da psicoacústica relacionados com o estudo proposto precedem essa descrição.

No capítulo 2 descrevemos e analisamos quatro estudos feitos ao longo do desenvolvimento do nosso trabalho. A primeira seção trata do estudo da técnica arpejo, a segunda do *plaqué*, a terceira trata da repetição de notas na mesma corda e a quarta do *tremolo*. As peças escolhidas para a realização dos estudos de caso foram, respectivamente, "Estudo nº 1" de Heitor Villa Lobos, "Estudo nº 4" de Heitor Villa Lobos, "Estudo nº 2" de Matteo Carcassi e o terceiro movimento, "Scherzino", da peça "Cavatina" de Alexandre Tansman.

O capítulo final aborda, de maneira global, os resultados obtidos até o momento e aponta direções futuras tanto para o aprimoramento do sistema quanto para a abordagem de outros aspectos da técnica violonística.

Embora a partitura seja apenas uma maneira de indicar ao músico o que deve ser tocado e se mostrar imprecisa em alguns aspectos, acreditamos que durante a realização de um estudo técnico o estudante busca máxima regularidade e equilíbrio na técnica estudada. Sabemos que regularidade e simultaneidade absolutas não fazem parte dos dados que analisaremos, mas nos interessa saber (mesmo que apenas através de comparações entre músicos) o quão regular e sincrônico podem ser tais execuções musicais.

1 Captação hexafônica no violão: descrição do sistema utilizado.

Este capítulo se inicia com uma discussão de resultados de experimentos psicoacústicos relevantes para o estudo proposto. A seguir são descritos os elementos de hardware e *software* do sistema utilizado. Detalhes de programação e ajustes de parâmetros são também discutidos, ao lado de algumas limitações.

A última seção do capítulo trata da extração de dados pelo sistema. São eles a captação do momento de ataques, a estimação de amplitudes e a extinção de notas, ferramentas fundamentais para a realização dos estudos de caso apresentados no próximo capítulo.

1.1 Revisão dos conceitos psicoacústicos pertinentes

Nesta seção descrevemos os conceitos psicoacústicos e os resultados correspondentes relatados nos estudos acadêmicos sobre algumas habilidades perceptivas. Acreditamos que os resultados de experimentos controlados podem ser úteis para a abordagem, discussão e compreensão de sonoridades específicas do violão, abordadas no Capítulo 2.

Frente às técnicas escolhidas (*arpejos, plaqué, tremolos*), pode-se notar a importância da discussão da percepção tanto da regularidade do espaçamento temporal quanto da simultaneidade de eventos sonoros para as análises propostas. Adicionalmente consideramos também importante a discussão da integração temporal do ouvido, responsável pela percepção de intensidade, já que precisamos estimar um valor de amplitude para cada nota tocada no violão, cujo som se caracteriza por um transiente muito definido seguido de um decaimento bastante

rápido.

1.1.1 Simultaneidade e conceitos psicoacústicos relacionados

Nosso interesse em estudar a simultaneidade de ataques de duas ou mais notas no violão surgiu juntamente com a possibilidade de detectarmos os momentos de ataques separadamente em cordas individuais do instrumento. Após algumas gravações preliminares de trechos de peças que utilizam a técnica *plaqué*, constatamos que as micro-variações temporais existentes mereciam um estudo mais detalhado.

Inicialmente pretendíamos projetar e realizar um experimento psicoacústico para avaliar a percepção de simultaneamente utilizando os sons do violão, e assim relacionar o experimento com os estudos de técnicas que estamos realizando. Infelizmente tal experimento escapa ao escopo do projeto inicialmente proposto e se mostra muito complexo para ser realizado em pouco espaço de tempo. A dificuldade de se montar um experimento psicoacústico em situação musical voltado para o estudo do som *plaqué* no violão se deve ao grande número e variabilidade dos parâmetros envolvidos: número de notas, registro das notas, tipos de toque, níveis dinâmicos, forma dos envelopes dinâmicos, harmonia utilizada, uso de cordas soltas etc. Mais ainda: devemos considerar a nota do violão como sendo composta por um transiente rápido seguido por uma ressonância ou devemos tratá-la como um só estímulo sonoro? Somam-se a isto questões ligadas a processos cognitivos, tais como a habilidade perceptiva de se identificar e separar as notas tocadas.

Os experimentos psicoacústicos que podem contribuir com a abordagem do som *plaqué* no violão lidam com a resolução temporal (capacidade de separar dois eventos), com a percepção da precedência de estímulos, com a percepção de sincronicidade entre dois ou mais estímulos de natureza variada, com a integração temporal do ouvido, com o mascaramento e com a influência da forma dos envelopes na percepção rítmica.

Um dos conceitos psicoacústicos centrais sobre os limites da percepção entre estímulos simultâneos e sucessivos é a resolução temporal, em torno da qual alguns experimentos foram feitos para medir o menor intervalo de tempo em que o ouvido humano pode discriminar dois sinais. Uma das técnicas usadas para medi-

la é a chamada *gap detection threshold* (GDT), ou limiar de detecção de lacuna, e é descrita por Gelfand (GELFAND, 2009) e por Rossing (ROSSING, 2007). Nesse tipo de experimento, utiliza-se um evento sonoro (ruído, senóide etc) com, por exemplo, 500 ms de duração e então faz-se uma pequena lacuna de aproximadamente 10 ms de silêncio no meio desse ruído. Dessa forma, obtêm-se 245 ms de ruído seguido por 10 ms de silêncio (lacuna), seguido, por sua vez, de outros 245 ms do mesmo ruído inicial. O tamanho da lacuna de silêncio (*gap*) é alterado durante o experimento e os indivíduos são questionados sobre sua capacidade de ouvi-la. Desse modo, detectou-se uma resolução temporal da ordem de 2 a 3 ms, com a utilização de ruídos sem a exclusão das frequências mais altas e em níveis normais de intensidade, com o mesmo ruído em ambos os lados da lacuna. Em contraste, intervalos bem maiores foram encontrados (em média maiores que 20 ms) quando as sons pré e pós-lacuna diferiam em várias formas, tais como em seus espectros e/ou durações. Gelfand explica a diferença entre os dois casos:

“Ouvir a lacuna simplesmente envolve detectar a descontinuidade entre os dois sons quando ambos são iguais (ou seja, dentro do mesmo filtro do canal auditivo), [...] o que pode ser realizado pelo sistema auditivo periférico. Por outro lado, a comparação é mais complexa quando os dois sons são diferentes (ou seja, em diferentes canais auditivos), o que requer processamento central de diferentes canais auditivos.” (GELFAND, 2009, p.178).

Experimentos de detecção de lacunas com senóides (apresentadas com um ruído de fundo constante para mascarar as interrupções bruscas do estímulo) apontam para valores entre 6 e 8 ms na faixa entre 400 e 2000 Hz, mas que aumentam consideravelmente para frequências mais graves - cerca de 18 ms para 100 Hz (ROSSING, 2007). Outras técnicas de medida da resolução temporal usam a modulação da amplitude de estímulos, tais como ruído branco e faixas de ruído com diferentes frequências centrais. Os experimentos buscam medir a audibilidade de tais modulações a partir de diferentes frequências e intensidades de modulação (ROSSING, 2007).

Embora a detecção de lacunas e a identificação da ocorrência de mais de um estímulo (em geral *clicks*) aconteça no intervalo entre 2 e 3 ms, Hammil e Price (2008) apontam que a identificação da ordem temporal dos estímulos se dá quando estes estão separados por um intervalo de pelo menos 20 ms. Essa identificação da precedência ou ordenação pode ser dificultada pela heterogeneidade

dos estímulos que, além do processamento central de diferentes canais auditivos, ainda exigem a segregação da informação auditiva baseada na identificação de fontes diversas (*stream segregation*). Em um experimento com 4 estímulos diferentes, onde um soava imediatamente após o outro, Warren e outros (WARREN et al., 1969) detectaram que uma duração de 200 ms para cada um deles foi insuficiente para uma correta identificação de sua ordem de apresentação. No texto, há a sugestão de que, para ouvintes inexperientes, um aumento na duração dos sons de 200 ms para 700 ms seria suficiente para que metade dos participantes conseguissem identificar verbalmente a ordem correta dos estímulos ouvidos. Para ouvintes experientes, os autores dizem ser impossível identificar a ordem com estímulos de apenas 200 ms de duração, mas que isso poderia ser realizado com estímulos de 300 ms.

Em experimentos utilizando dois tons puros, apresentados com defasagens de 0, 10, 20, 30, 40 e 45 ms, Shirado e Yanagida (2001) concluem que a assincronicidade entre os estímulos foi melhor percebida para intervalos maiores que 30 ms e chegam a definir uma zona temporal de quase-simultaneidade abaixo desse valor. Entre 0 e 30 ms não foi detectada uma assincronia entre os inícios dos estímulos.

O efeito de mascaramento é um dos mais estudados na psicoacústica, contando com experimentos que utilizam uma grande variedade de estímulos e estratégias. Este efeito é fundamental tanto para a compreensão da percepção de intensidade, de timbre, de harmonicidade, de consonância/dissonância etc., quanto para aplicações mais práticas de redução de dados em gravações de áudio e em conforto acústico. A base para o seu estudo é a descrição e a definição das bandas críticas (ZWICKER, 1961), faixas de frequências que compartilham o mesmo feixe de nervos na membrana basilar.

No presente estudo, decidimos tratar as amplitudes das notas do violão sem levar em conta o cálculo de *loudness* (intensidade subjetiva) e do mascaramento mútuo de notas. O cálculo de *loudness* pode ser implementado sem problemas para qualquer sinal de áudio (PEETERS, 2004); no entanto, não faz sentido para sons simultâneos - ou quase - de violão, usar essa grandeza sem o cálculo do mascaramento mútuo que, neste caso, apresenta dificuldades dado o grande número de variáveis a serem consideradas. Buscamos então uma grandeza de amplitude simples, relacionada às intenções de execução do músico (um correlato da força aplicada).

1.1.2 Integração temporal

Do ponto de vista da percepção de intensidade, estímulos maiores que 1 segundo podem ser considerados infinitos para a audição (GELFAND, 2009), enquanto estímulos com duração muito menor que esta interferem na sensibilidade do sistema auditivo. Gelfand, ao discutir o fenômeno da integração temporal, nota que "o ouvido integra energia com o passar do tempo dentro de uma janela temporal de aproximadamente 200 ms". Ao se reduzir a duração de estímulo abaixo desse limite, obtém-se também uma redução da intensidade percebida. Essa relação é expressa pela figura abaixo.

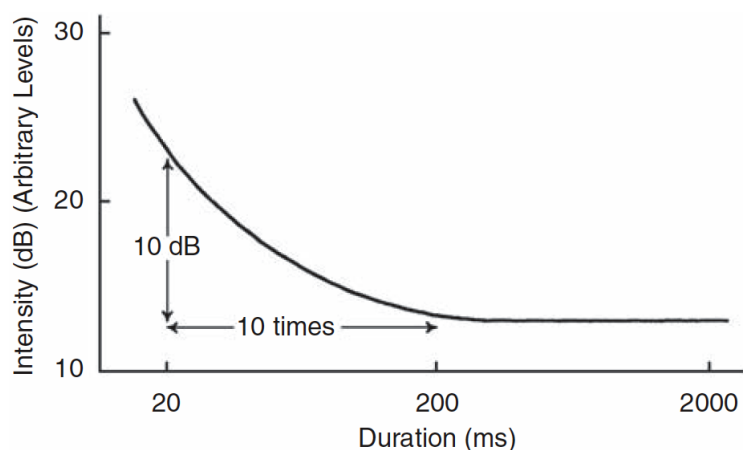


Figura 1: Curva representando a intensidade (dB) de estímulos entre 20 e 200 ms, necessária para a percepção de uma mesma intensidade. (GELFAND, 2009, p.170)

Na seção 1.3 trataremos dos descritores utilizados para a obtenção de dados pelo sistema desenvolvido. Uma das partes principais é a obtenção dos dados referentes às amplitudes (intensidades) com que as cordas foram tocadas pelos músicos. Essas informações são extraídas de forma parecida com a que acontece no nosso ouvido: uma integração temporal. Mas nesse caso, o tempo de integração é definido pelo tempo necessário para fazer o cálculo da energia da corda.

1.1.3 Regularidade rítmica

Zwicker (2007) descreve a influência da forma dos envelopes dinâmicos de sons de curta duração na percepção da regularidade rítmica. Segundo o autor eventos sonoros sucessivos com igual espaçamento temporal provocariam sensação de ritmo subjetivamente uniforme apenas fossem curtos e com envelopes temporais que crescem rapidamente (como um degrau). Os eventos sonoros com envelopes que crescem suavemente muitas vezes requerem desvios sistemáticos do espaçamento temporal para se produzir ritmo a sensação de subjetivamente uniforme. Ele ilustra esse fenômeno através da figura 2. A coluna a esquerda mostra esquematicamente exemplos de envelopes temporais; as próximas duas colunas indicam os intervalos de tempo T_A e T_B de duração dos eventos sonoros; o deslocamento temporal entre os eventos, Δt , que é necessário para produzir ritmo subjetivamente uniforme é mostrado na última coluna à direita. São relatadas diferenças de até 60 ms (figura 2 linha f) no espaçamento temporal entre os estímulos ao se alterarem o formato e a duração de suas curvas dinâmicas.

A discussão dos resultados dos estudos em psicoacústica serve para fundamentar a análise de resultados quantitativos, sejam em relação ao ritmo realizado, à simultaneidade dos acordes ou à real efetividade dos valores de amplitude calculados. Essa questão também deixa evidente a dificuldade já mencionada em se conceber um experimento para estudo da sonoridade *plaqué* em situação musical. Chegamos a realizar, em laboratório, experimentos informais sobre a percepção de acordes de 3 e 4 notas com defasagens entre 0 e 50 ms entre os ataques; ficou evidente que é difícil precisar regiões qualitativamente diferentes, a não ser quando a diferença entre duas notas sucessivas é exagerada. Nota-se sempre uma alteração de sonoridade, um maior ou menor espalhamento entre as notas, mas nada quantitativamente característico. Além disso, as variações de dinâmica, da distribuição das notas no registro e dos diferentes tipos de acordes trazem novas complicações para uma sistematização. Frente a isso, nossa decisão metodológica foi a de buscar consistência nos dados temporais e de amplitudes gerados por diferentes músicos semi-profissionais.

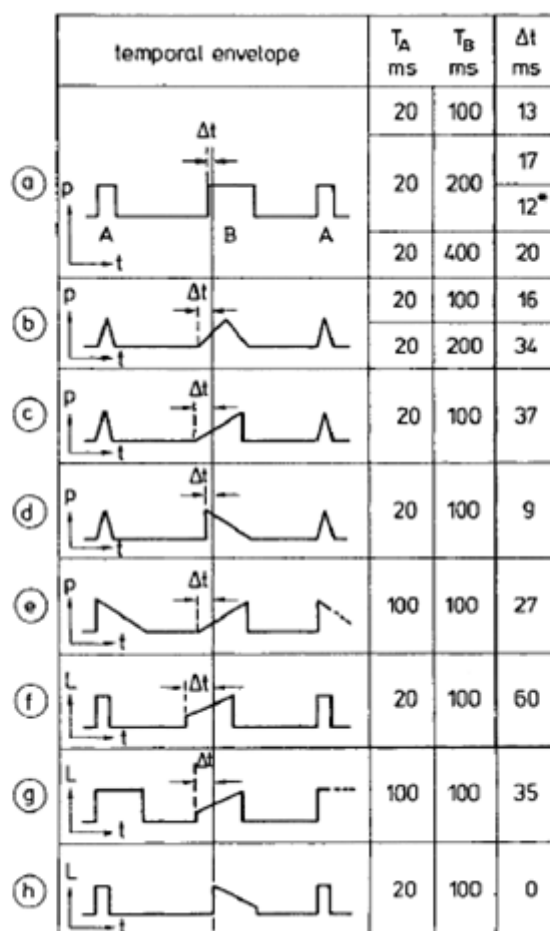


Figura 2: Sensação de ritmo subjetivamente uniforme. A coluna à esquerda mostra esquematicamente exemplos de envelopes temporais; as próximas duas colunas indicam os intervalos de tempo T_A e T_B de duração dos eventos sonoros; o deslocamento temporal entre os eventos, Δt , que é necessário para produzir ritmo subjetivamente uniforme é mostrado na última coluna à direita. (ZWICKER, 2007, p.271)

1.2 Descrição do sistema utilizado

Descreveremos a seguir o sistema utilizado no presente trabalho. Iniciaremos listando os equipamentos utilizados (*hardwares* e *softwares*) e em seguida falaremos sobre as diferenças entre o som do violão captado por microfone e o som captado por captadores.

1.2.1 Hardwares

Atualmente, o sistema está assim configurado:

- um violão acústico espanhol Alhambra modelo E-533 (1978);
- captadores individuais do fabricante LRBaggs, de funcionamento passivo;
- cabos para conexão das seis saídas independentes;
- mesa de som analógica Mackie 24x8 para adequação da impedância dos sinais (com níveis semelhantes ao de um microfone dinâmico);
- placa de som Motu 828 mkII;
- computador PowerPC G5 2 Ghz.

Com os equipamentos descritos acima e com o *software* Max (ver 1.2.2.1), obtivemos os valores básicos de níveis de sinal expressos na tabela 1 (todos os valores em dB são dados em dBFS, que atribui 0 dB ao valor RMS máximo obtido na digitalização do sinal). O valor RMS de cada corda foi calculado para cada 1024 amostras, atualizada a cada 512 amostras e com uma frequência de amostragem de 48 kHz. Nessa tabela pode-se observar que a faixa dinâmica de cada corda encontra-se em torno a 40 dB.

	Afinação (Hz)	Nota	Ruído de fundo (dB)	Intensidade em ataque pp	Intensidade em ataque ff
Corda 1	330	Mi	-88	-60	-23
Corda 2	247	Si	-89	-62	-23
Corda 3	196	Sol	-89	-62	-20
Corda 4	147	Ré	-89	-60	-23
Corda 5	110	Lá	-89	-60	-23
Corda 6	82.5	Mi	-90	-60	-20

Tabela 1: Valores dos níveis de intensidade básicos do sistema

Com esse sistema, foi possível observar o fenômeno de acoplamento mecânico entre as cordas do violão. Trata-se da transmissão de energia, na forma de

vibração, de uma corda para as outras. Sendo o instrumento construído em madeira e possuindo o tampo¹ flexível, as ondas mecânicas produzidas pelas cordas atacadas são transmitidas tanto para a caixa acústica, quanto para as demais cordas.

O acoplamento mecânico mútuo existente entre as diferentes cordas do violão utilizado, apesar de ser uma característica esperada de um instrumento acústico, foi maior do que o esperado. Face à inviabilidade de uma medição objetiva de todas as combinações possíveis entre as cordas, as posições dos dedos da mão esquerda e as dinâmicas, podemos dizer que esse acoplamento pode ser razoavelmente expresso pelos valores da tabela 2. A primeira coluna representa a amplitude RMS medida em uma corda solta não tocada, enquanto todas as outras cordas são tocadas o mais forte possível. A segunda coluna representa a soma das amplitudes RMS de cinco cordas não tocadas, enquanto a corda restante é tocada o mais forte possível. Neste caso, pode-se notar que, de maneira geral, as cordas agudas têm mais influência sobre as graves. Essas medidas se referem ao transiente de ataque, que é transmitido pelo cavalete às outras cordas.

	Nota	Influência máxima das outras cordas sobre a corda não tocada (dB)	Influência máxima da corda tocada sobre as restantes não tocadas (dB)
Corda 1	Mi	-48	-34
Corda 2	Si	-45	-35
Corda 3	Sol	-44	-42
Corda 4	Ré	-45	-45
Corda 5	Lá	-45	-49
Corda 6	Mi	-45	-46

Tabela 2: Valores do acoplamento mútuo entre as cordas.

Um outro efeito também significativo é a ressonância por simpatia, que faz com que uma corda, mesmo sem ser tocada, produza um sinal mais longo com

¹O tampo superior é um dos elementos da cadeia de casamento de impedância do violão, que liga a vibração das cordas à emissão sonora em sua abertura circular; essa cadeia inclui ainda as laterais e o tampo inferior, além do própria cavidade de ressonância do violão. Tal fenômeno acontece porque uma das extremidades das cordas do violão é presa no cavalete, que se localiza sobre o tampo do instrumento e recebe diretamente a vibração das cordas. Nesse percurso, diversas filtragens acontecem.

energia não desprezível e composição espectral variável no tempo (observe a figura 3). Tal fenômeno acontece quando uma das cordas vibra em uma frequência que pertence à série harmônica de alguma das demais cordas. Quando isso acontece, a corda não tocada que possui tal frequência como um de seus harmônicos começa a vibrar gerando sinal de áudio que não deve ser confundido com um ataque.

A figura 3 ilustra o fenômeno de ressonância já citado. Nessa figura, podemos observar na parte de cima a forma de onda de um trecho selecionado e abaixo o espectrograma do mesmo trecho. Na forma de onda podemos observar dois momentos bastante característicos: os ataques. Esses momentos podem ser identificados pela diminuição súbita da intensidade seguida de um aumento também súbito da mesma. Cada um desses eventos pode ser identificado no espectrograma pelas duas mudanças espectrais que apresentam grande quantidade de transientes (próximos aos tempos 2 e 4 marcados no eixo horizontal).

No espectrograma, as linhas horizontais representam as frequências que compõem a onda. A intensidade de cada uma dessas frequências é representada pela intensidade da cor da linha. Observe que nos momentos de ataque as intensidades estão mais escuras e, com o passar do tempo, se tornam mais claras até desaparecerem. Em algumas frequências mais graves, em torno da linha que marca 625 Hz, é possível observar algumas linhas que possuem intensidades que variam sem terem recebido energia de um novo ataque. Esse fenômeno está bastante claro entre os segundos 6 e 8 na linha sobre a frequência 625 Hz. Esse ganho de energia por frequências específicas acontece quando notas que pertencem à série harmônica da corda estudada são atacadas em outras cordas do instrumento.

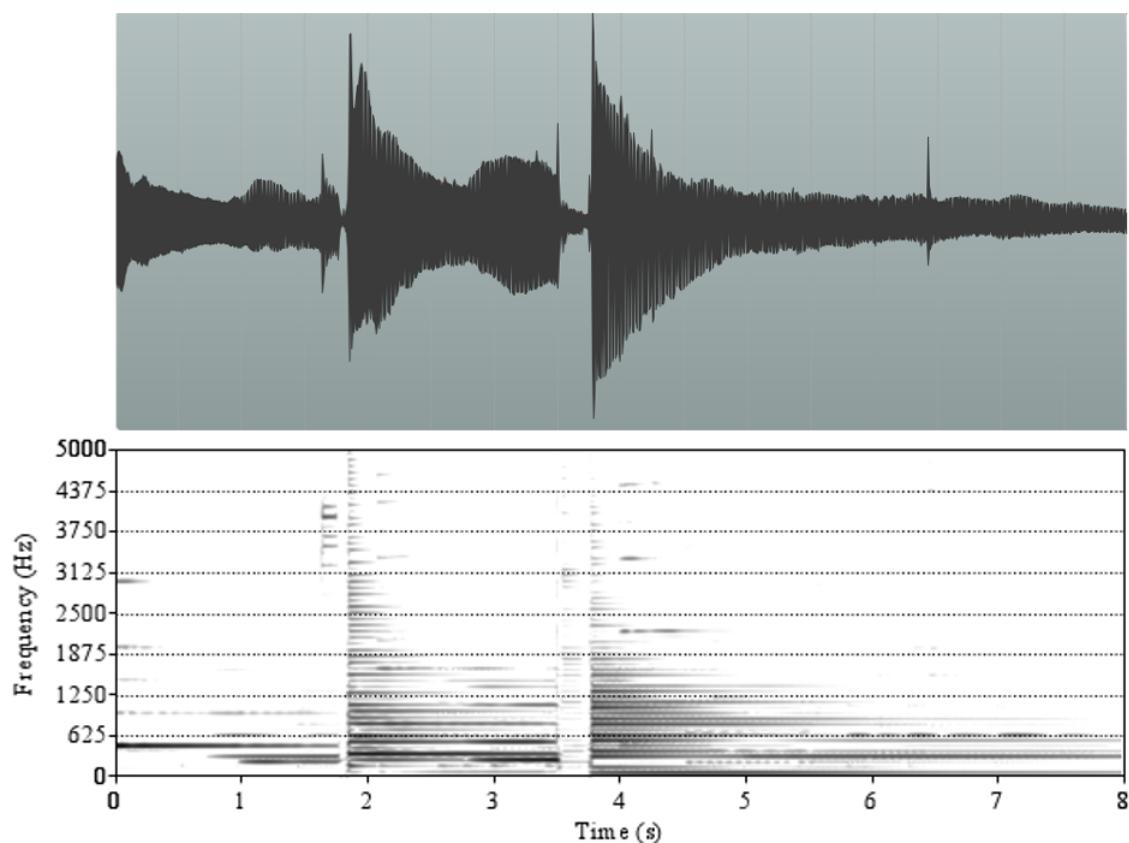


Figura 3: Ressonância observada na corda 6 do violão durante execução de peça polifônica. Notas tocadas: fá# e mi. Acima: forma de onda do trecho observado. Abaixo: espectrograma do mesmo trecho.

Através da figura 3, também é possível observar algumas linhas espectrais similares aos momentos de ataque localizadas logo antes dos reais ataques. Tratam-se dos momentos em que o dedo do músico encosta na corda para atacá-la. Em alguns desses momentos, é possível perceber esses eventos como ruídos nas gravações, que são causados principalmente por esbarrões da unha dos intérpretes.

1.2.2 Softwares

1.2.2.1 Max

Nos próximos parágrafos, serão explicadas as principais características e termos envolvidos na programação do sistema de captação de dados, discutida na seção 1.3. Gostaríamos de apresentar de forma clara o *software* e a linguagem de

programação utilizados, para que o leitor possa entender melhor algumas seções e as descrições da programação realizada.

Max (CYCLING74, a) é uma linguagem de programação visual criada para trabalhar com música e com multimídia ao vivo e é largamente utilizada por compositores, designers de *software*, pesquisadores e artistas interessados em fazer performances, instalações e arte interativa. O programa foi escrito por Miller Puckette em meados da década de 1980 no IRCAM, como um editor gráfico (*patcher*) que trazia para os compositores a possibilidade de se fazer música interativa com computadores. O nome Max é uma homenagem de Puckette à boa influência que sofreu do trabalho de Max Matthews, um pioneiro na área de computação musical que desenvolveu alguns dos primeiros softwares para geração de som (PUCKETTE, 2002). Atualmente o programa é desenvolvido e distribuído pela empresa americana Cycling'74, localizada em São Francisco, Califórnia. Ele possui um grande número de extensões, das quais destaco um conjunto de objetos chamados *Max Signal Processing* (MSP), derivados do trabalho de Puckette no desenvolvimento de rotinas de processamento de sinal em tempo real para o *software* Puredata (Pd) (PUCKETTE, 2002). Esta extensão permite a manipulação de sinais de áudio digital em tempo real, tornando possível a análise, a síntese e o processamento digital de áudio paralelamente ao desenvolvimento da programação. Após a adição desse módulo, o *software* começou a ser chamado também de Max/MSP.

A linguagem básica do Max é um sistema de fluxo de dados. As programações criadas nesse *software* são chamadas de “*patches*” e são feitas dentro de um “*patch*” (uma tela em branco como uma página em branco de um editor de texto ou editor de imagem), através da organização e interconexão de blocos fundamentais chamados “objetos”. Esses “objetos” são como pequenos programas ou partes de programas que desempenham funções específicas e podem ser conectados entre si para gerar um programa maior. Em uma programação em Max, há alguns comandos que nos possibilitam introduzir objetos na tela inicial. Eles são visualizados como pequenos blocos que contêm seus nomes e seus parâmetros de inicialização. O *software* suporta seis tipos de dados básicos que podem ser transmitidos de objeto para objeto: números inteiros (*int*), números não inteiros (*float*), listas, símbolos (*symbol*), *bang* (mensagem padrão que ativa eventos na programação) e sinais digitais. Além dos componentes já citados, o Max possui também matrizes e vetores (utilizados para manipular dados mais complexos), objetos que permitem a manipulação de áudio digital e alguns objetos visuais (com interface para usuá-

rio). Outras maneiras de lidar com os dados de forma mais específica podem ser encontradas no próprio *software* e também nos artigos (PUCKETTE, 2002) e (PUCKETTE, 1988).

A figura 4 mostra um exemplo de um *patch* feito em Max. Nele estão representados alguns objetos de programação para ilustrar o funcionamento do *software*. Na coluna à esquerda no *patcher*, estão dispostos quatro objetos visuais de programação utilizados, são eles: o *float* (número não inteiro), *int* (número inteiro), mensagem, e comentário. Esses objetos são utilizados para configurar objetos externamente enquanto o programa está em funcionamento, o que possibilita uma programação dinâmica e em tempo real.

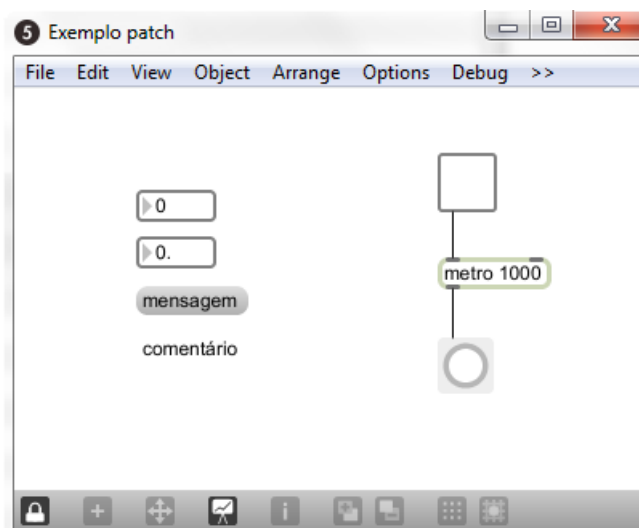


Figura 4: *Patch* de Max: Exemplo de programação com alguns objetos (coluna à esquerda: número inteiro, *float*, mensagem e comentário; coluna à direita: um objeto visual *toggle*, o objeto “metro” com o argumento de inicialização de 1000 ms e um objeto visual *bang*).

Observe que o objeto “metro” possui pequenos quadrados escuros nas linhas superior e inferior que compõem seus blocos visuais. Os quadrados superiores são as entradas de dados (ou *inlets*) e os quadrados inferiores são as saídas de dados (ou *outlets*). Os objetos se comunicam através de ligações entre os *outlets* e *inlets* (e nunca o contrário) feitas por “cordas” visuais.

O objeto “metro”, por exemplo, é uma função pré-programada que dispara um

bang a cada intervalo de tempo (em milissegundos), determinado pelo programador. O número escrito dentro do objeto "metro" é seu argumento inicializador, o que significa que se este objeto for ligado ele produzirá um *bang* em seu *outlet* a cada 1000 ms (1 segundo). O *inlet* da esquerda do "metro" serve para ligar ou desligar este objeto, e nele está ligado um objeto visual chamado *toggle*, que serve como um botão de "liga/desliga" e envia de seu *outlet* o número 1 ou o número 0 toda vez que é clicado. O *inlet* à direita no "metro" serve para receber um número que altere seu intervalo entre *bangs*. Isso pode ser feito conectando um objeto visual de número (como os da esquerda no *patch* - inteiros ou não inteiros) a essa entrada e escrevendo o número diretamente nesse objeto. A saída do "metro" (*outlet*) está conectada ao objeto gráfico *bang*, que apenas altera sua cor quando recebe um dado em seu *inlet* ou quando é clicado (neste caso ele envia um *bang* para seu *outlet*).

Na pequena programação do exemplo, quando ligamos o *toggle* podemos observar que o *bang* ligado ao "metro" pisca a cada 1 segundo. Caso liguemos uma caixa de número no segundo *inlet* do "metro" poderemos alterar a frequência dos disparos apenas alterando o valor na tela, em tempo real.

No desenvolvimento deste trabalho, o uso de dados e de processamento de sinal em tempo real foi indispensável. Fazem parte dos nossos objetivos o uso do sistema em performances ao vivo e também como ferramenta didática. Para ambos os casos, respostas e, se necessário, a visualização de parâmetros específicos simultaneamente à performance do músico são almejados. O *software* também nos permite trabalhar em tempo diferido, que é importante para algumas análises mais minuciosas. As características descritas nesta seção reforçam nossa escolha por esta plataforma, que nos possibilita realizar performances e estudos detalhados.

1.2.2.2 *Digital Performer e Soundflower*

Para realizar gravações com o sistema que estamos descrevendo utilizamos o *software Digital Performer (MOTU)*. Este *software* é uma plataforma de trabalho para áudio digital (*Digital Audio Workstation/Sequencer - DAW*) que acompanha as interfaces de áudio da marca MOTU. Esse programa nos permite gravar várias pistas simultaneamente, sendo possível a gravação independente dos sinais

de cada captador.

Utilizamos também o *software Soundflower* (CYCLING74, b), que nos permite transportar o áudio de um programa para outro. Ele é reconhecido pelo computador como um dispositivo virtual de áudio por onde os programas podem enviar e receber até 16 canais de áudio.

Utilizando em conjunto os três *softwares* descritos, é possível analisar gravações em tempo diferido. Podemos utilizar o *Digital Performer* para gravar vários músicos em uma só sessão, ou várias gravações de um mesmo músico, sem nos preocuparmos em analisar em tempo real o que está sendo tocado. Mais tarde, quando já temos dados suficientes para analisar e comparar, podemos reproduzir as gravações no *Digital Performer* e enviar o áudio para o Max utilizando o *Soundflower*. Desta forma, pela nossa programação temos acesso direto aos dados gravados. Essa característica do sistema nos possibilita ajustar e calibrar a programação de forma precisa para cada intérprete.

1.2.3 Comparação entre som microfonado e som captado

A utilização de um instrumento acústico sem modificação de sua forma ou de sua sonoridade original é bastante vantajosa ao trabalhar com análise de gravações de interpretação musical, já que as condições normais de execução permanecem preservadas. O uso de captadores também oferece vantagens frente às inevitáveis diferenças de timbre e intensidade causadas pela movimentação do músico frente a um microfone, além de reduzir a influência dos ambientes e dos equipamentos de gravação nos resultados. No entanto, é necessário conhecer a correlação entre o que o músico escuta (representado aqui pela captação por microfone) e o que é captado, pois é do som captado que extrairemos as informações (descritores acústicos) relativas à interpretação de um determinado instrumentista.

Um estudo exaustivo dessa correlação, embora não impossível, é inviável dentro do escopo de nosso projeto. Precisaríamos, ao menos, garantir a realização de um mesmo tipo de ataque em todas as notas do instrumento e em diferentes níveis dinâmicos, o que só seria possível com o uso de automação. Já que na utilização regular do sistema não foram detectadas distorções significativas de timbre e amplitude ligadas às diferentes cordas e posições no braço do violão, decidimos,

como alternativa, estudar esta correlação a partir de notas tocadas em três registros do instrumento, em três diferentes dinâmicas. Utilizou-se um microfone capacitivo de sensibilidade média - Samson C02.

As notas escolhidas foram fá#2 na corda 6 (frequência fundamental de 92,5 Hz), dó central na corda 3 (261,6 Hz) e fá#5 na corda 1 (740 Hz). Essas três notas foram executadas em três níveis de dinâmica, sendo eles *pianíssimo*, *mezzopiano* e *forte*, e a gravação foi feita simultaneamente pelos captadores e pelo microfone. As gravações foram normalizadas para cada uma das alturas. Na comparação, serão utilizados os envelopes dinâmicos, cocleagramas² e espectrogramas.

Nas figuras 5, 6 e 7, cada coluna representa uma das alturas escolhidas, nos três níveis de dinâmica; de cima para baixo temos cocleograma do som do captador, cocleograma do som microfonado e envelopes dinâmicos de ambas as fontes (a curva mais escura representa o sinal dos captadores e a mais clara o sinal do microfone).

²O cocleograma representa o padrão de excitação da membrana basilar no ouvido interno em função do tempo. O eixo vertical é calibrado em Barks. Figuras geradas a partir do *software* Praat (BOERSMA; WEENINK). Informações sobre a divisão das frequências auditivas em bandas críticas podem ser encontradas em ZWICKER (1961).

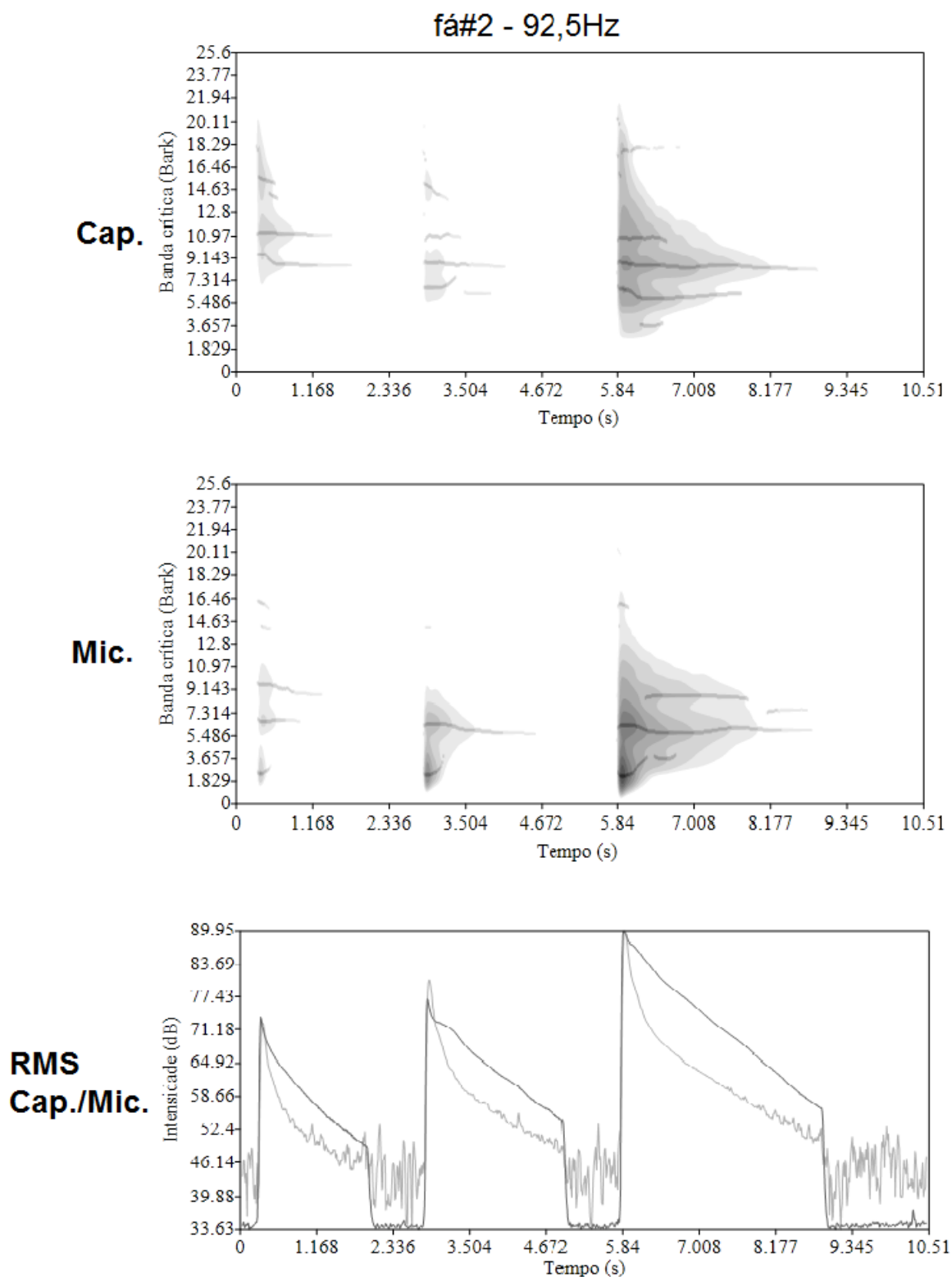


Figura 5: Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (fá# 92,5Hz).

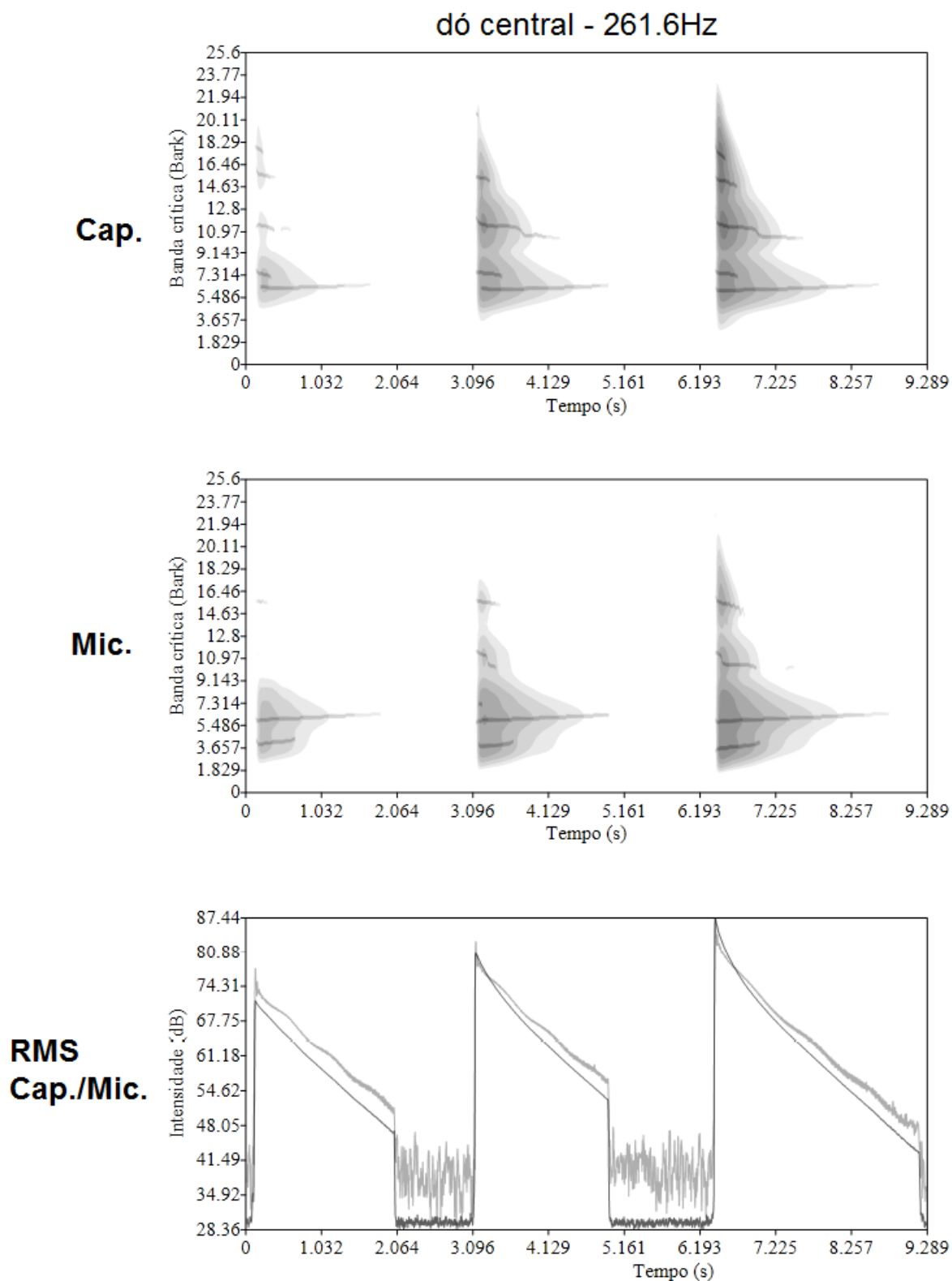


Figura 6: Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (dó central 261,6Hz).

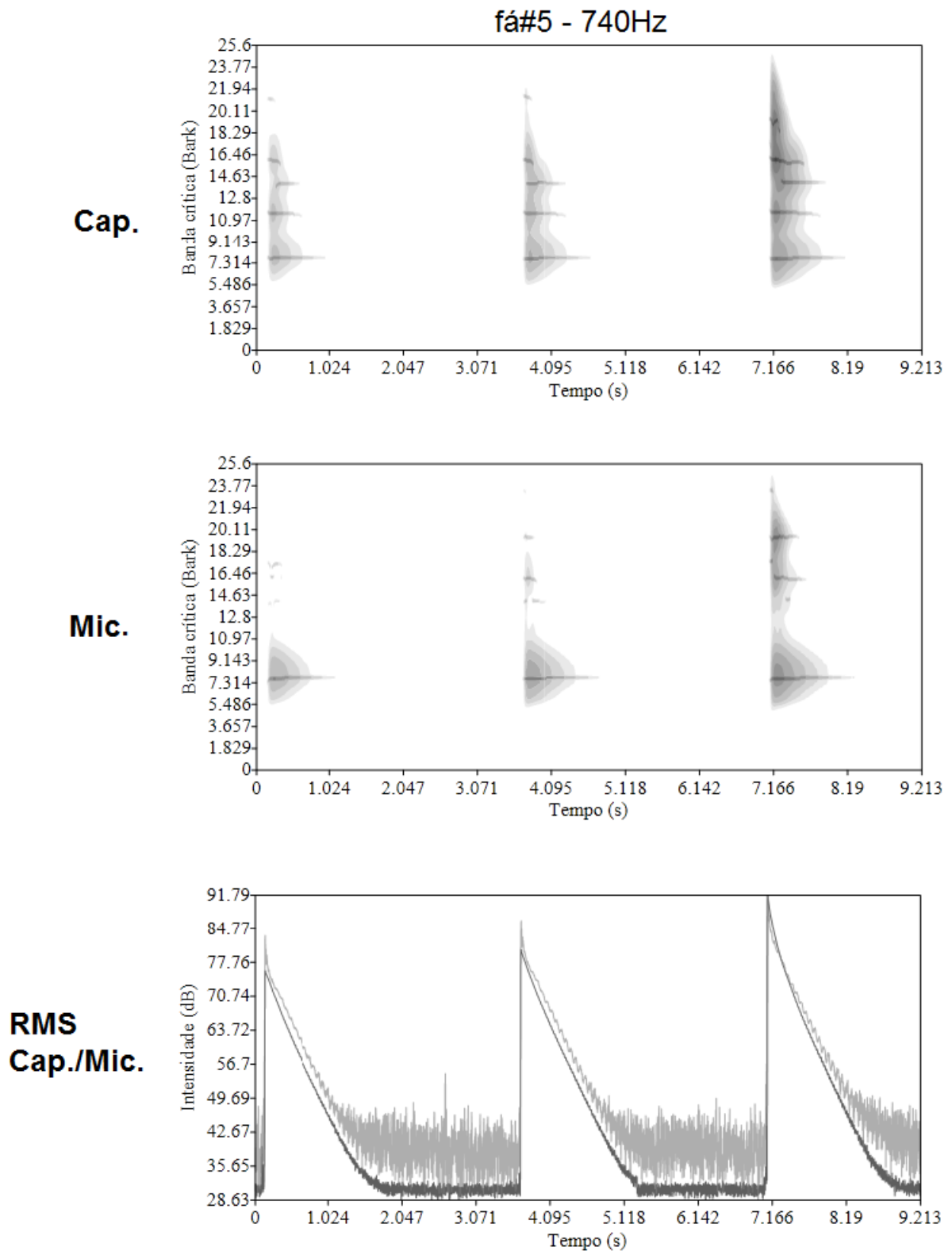


Figura 7: Cocleograma e envelopes dinâmicos utilizados na comparação dos sons do violão (fá# 740Hz).

É possível observar, de maneira geral, algumas características comuns nessas representações: os cocleagramas do sinal do microfone mostram uma presença maior das frequências graves (colunas 1 e 2), enquanto nos momentos de ataque os cocleagramas dos sinais dos captadores mostram uma melhor definição dos transientes desses eventos (colunas 1, 2 e 3). O padrão dos cocleagramas é afetado pelo nível de intensidade com que a corda foi tocada e as execuções em *forte* (maior intensidade) possuem maior espalhamento espectral. Nos gráficos que representam os envelopes dinâmicos, podemos notar que os sinais captados pelo microfone, em geral, são mais ruidosos que os dos captadores, o que pode ser melhor observado nos momentos de menor intensidade entre os ataques. As curvas que representam os envelopes são praticamente iguais, embora para a frequência mais grave (coluna 1) possamos observar que o envelope traçado pelo microfone descreve um decaimento mais acentuado nos primeiros instantes de cada ataque, ficando em paralelo à curva do captador logo em seguida. Pode-se ainda notar que as distâncias entre os picos de dinâmica de cada nota são um pouco maior nos sinais gerados pelo captador.

Podemos comparar, de forma aproximada, as representações dos sinais representados pelas figuras 5, 6 e 7 com o que se escuta nas gravações correspondentes. Ouvindo as gravações feitas por microfone percebe-se claramente sua melhor resolução de frequências graves, bem como o maior nível dos ruídos. A sonoridade das duas gravações é bastante diferente, faltando ao som do captador as ressonâncias mais graves típicas do violão acústico. Por outro lado, sua definição de transientes é melhor, o que é vantajoso para as rotinas de detecção de momentos de ataque (seção 1.3). Para uma representação quantitativa das diferenças espectrais entre os dois sons, utilizamos a seguinte estratégia: (1) normalização do envelope de amplitude nos dois canais (canal 1: som do captador, canal 2: som do microfone); (2) cálculo das magnitudes espectrais e sua evolução temporal (*short-time FFT*); (3) subtração das magnitudes de cada *bin* da análise espectral em cada uma das janelas de análise; (4) valores positivos foram ressintetizados como “excesso” do captador e valores negativos foram ressintetizados como “excesso” do som microfonado (após multiplicação por “-1”) e (5) os valores mínimos de cada comparação foram ressintetizados como “componentes comuns”. A figura 8 mostra o espectro de cada uma dessas ressínteses para as gravações da nota dó central.

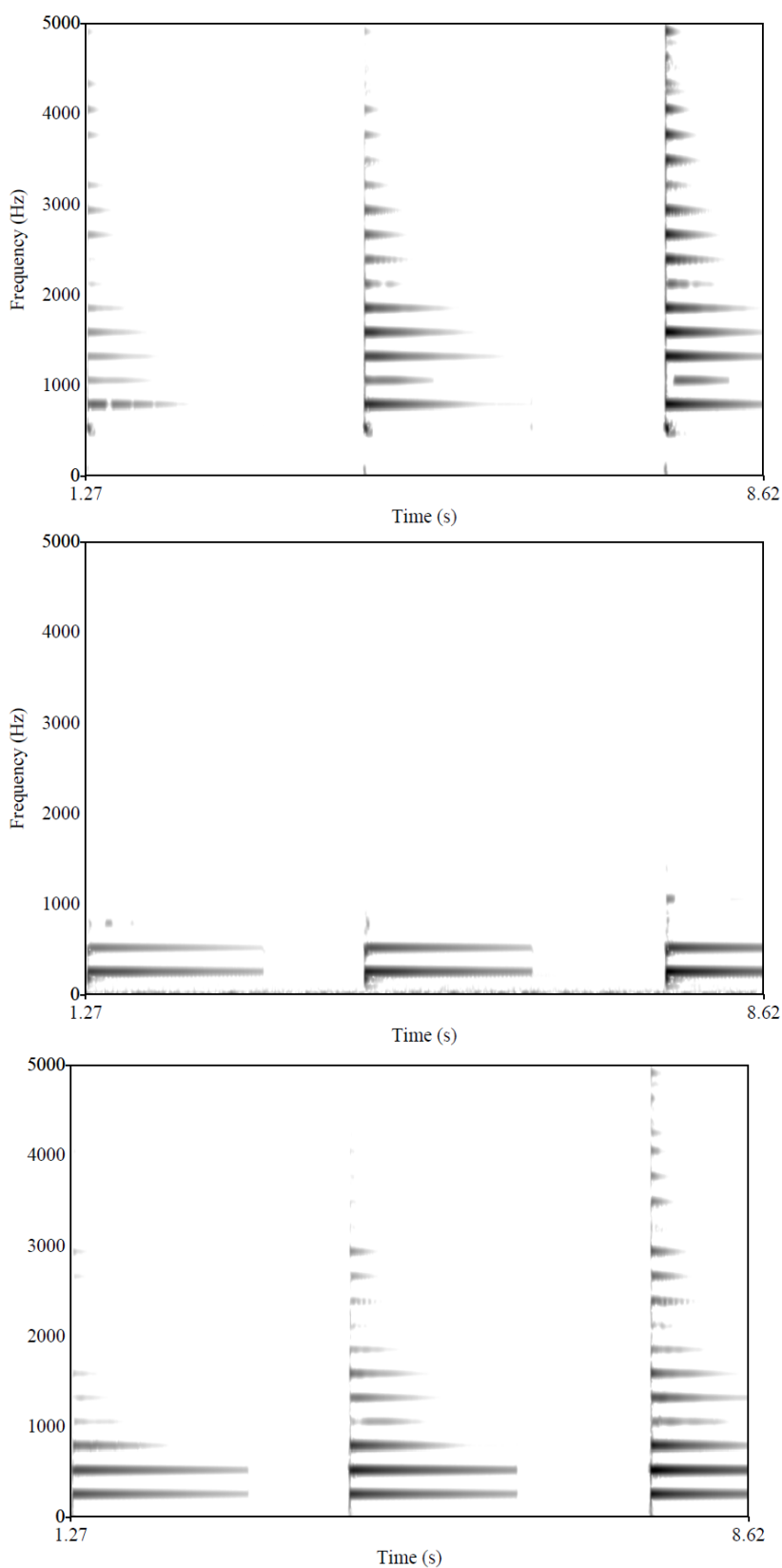


Figura 8: Sonogramas relativos à nota dó central (261.6 Hz) em três níveis dinâmicos. O gráfico acima representa o “excesso” espectral do som do captador, o gráfico do meio representa o “excesso” do som microfonado e o gráfico abaixo representa os componentes “comuns”.

1.3 Descritores utilizados

Esta seção apresenta os descritores implementados e utilizados para a extração de dados quantitativos de gravações realizadas. O principal descritor implementado é a detecção de ataques, descrita na subseção 1.3.1. Também estão expostos os descritores de cálculo de amplitudes e de extinção de notas.

1.3.1 Detecção de ataques

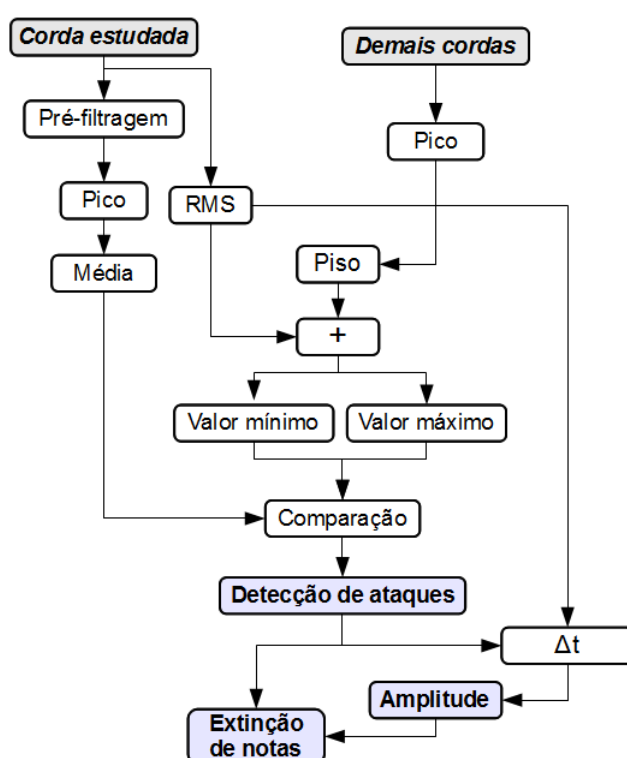


Figura 9: Fluxograma do processamento de sinais digitais das cordas do violão: pré-processamento da corda estudada, determinação do piso, detecção de ataques, cálculo de amplitudes e extinção de notas.

A detecção de ataques é a base de toda a aquisição de dados do sistema. Ela é realizada a partir da comparação do sinal digital das cordas após passar por processamentos previamente programados. Resumidamente, comparamos as amplitudes de uma média dos valores de pico do sinal da corda pré-filtrado com um valor de média RMS das demais cordas, que funciona como um limiar adaptativo. Os

detalhes desse processo estão representados do fluxograma abaixo. Em seguida, descrevemos como o processo ocorre para cada corda, lembrando que ele ocorre simultaneamente para as 6 cordas e em tempo real. O algoritmo descrito a partir do próximo parágrafo foi originalmente desenvolvido pelos participantes do projeto, embora algumas sugestões tenham sido aproveitadas do artigo (BELLO et al., 2005).

O primeiro passo dessa etapa é a filtragem do sinal digital da corda estudada. Essa filtragem consiste em retirar do sinal grande parte das suas frequências mais baixas, como fundamental e primeiros harmônicos. O que sobra do sinal, no domínio das frequências, são em maior parte os transientes que ocorrem quando a corda em questão sofre ataques. Esse procedimento é feito para que possamos observar mais claramente uma característica forte dos ataques nas cordas do violão: transientes extensos e claros.

Do sinal resultante identifica-se, a cada 10 ms, os maiores valores absolutos de amplitude (valor de pico³). Uma média com os três últimos valores é calculada e o valor resultante (convertido para dB). O motivo pelo qual acumulamos os últimos três valores de pico numa lista e fazemos uma média entre eles é que, caso o pico observado seja realmente um ataque, os valores da média se mantêm altos e contribuem na etapa de detecção de ataques. Já quando o que ocorre é um “esbarrão” na corda, ou um toque onde a corda não continua vibrando (quando, por exemplo, estamos tocando uma corda e encostamos em outra), os valores da média caem muito rápido e assim evitamos detecções de falsos ataques.

A ideia básica do algoritmo é comparar o valor de pico da amplitude da corda estudada com seu valor de amplitude RMS (medido normalmente a cada 1024 amostras). Mas também deve ser levado em conta a influência das outras cordas sobre a própria corda estudada, o que é feito pela determinação do piso de um amplitudes. Este piso existe para determinar o valor mínimo que a amplitude da corda estudada deve superar, no momento de ataque, para que o ataque ocorrido seja validado. O piso é adaptativo, ou seja, varia de acordo com os parâmetros que descreveremos a seguir.

Para o cálculo que se segue, os valores de entrada são a soma dos valores de

³Durante o desenvolvimento deste algoritmo, a utilização de valores de pico para a amplitude neste estágio do processamento mostrou-se mais efetivo do que o valor RMS medido no mesmo intervalo temporal.

pico (maior valor absoluto a cada 10 ms) dos sinais das outras cinco cordas do instrumento. O sinal resultante serve como um monitor da atividade nas demais cordas. Esses valores são reescalados não linear para servirem como um valor variável que se soma a um piso fixo estabelecido em -60dB⁴. Ou seja, quanto maior a atividade nas outras cordas, maior o valor do piso, e portanto, menor chance de um “esbarrão” ou ressonância por simpatia causar falsa detecção de ataque na corda estudada.

Os valores resultantes passam então por um objeto que coloca uma condição para a criação do piso. Caso o valor do piso seja maior que o valor RMS da corda estudada, o valor que prevalece é o das outras cordas; já no caso contrário, onde a corda estudada possui maior amplitude RMS, prevalecerá o valor da corda estudada. Esse mecanismo nos garante que o piso será obedecido e construído sempre com os maiores valores necessários a fim de evitar erros.

O passo seguinte é estabelecer, a partir do valor do piso, um valor superior e um inferior que serão utilizados na comparação com o valor de pico resultante da corda estudada. Os valores calculados são usados como parâmetros no seguinte procedimento. O sinal pré-filtrado entra como dado a ser analisado e sua amplitude é monitorada por um objeto que produz um sinal “0” ou “1” na saída de acordo com as seguintes condições: caso a amplitude se mantenha abaixo do valor superior, o resultado do procedimento é um sinal com valor “0”; caso ela ultrapasse o valor superior o resultado é um sinal de valor “1”; quando a amplitude do sinal de entrada cai a valores abaixo do valor inferior, o sinal resultante retoma o valor “0”. Essa alternância do sinal entre zeros e uns é monitorada por um objeto que detecta suas mudanças nos dois sentidos, de “zero para um” e de “um para zero”. No nosso caso, definimos as mudanças de “um para zero” como sendo um ataque. Dessa forma, é necessário que o sinal de entrada ultrapasse o valor superior e em seguida o valor inferior para que um novo ataque seja reconhecido, evitando detecção de ataques em casos em que a amplitude da corda permanece alta e ela não é atacada.

⁴Como visto na seção 1.2.1 tabela 1, o valor -60dB é a intensidade mais baixa alcançada quando a corda é tocada em *pianíssimo*. Sinais com valores menores que esse são considerados ruído do captador ou do sistema.

1.3.2 Cálculo de amplitudes

No mesmo *patch* em que se processa a detecção de ataques, também se monitora a evolução da amplitude do sinal da corda estudada. Como dissemos anteriormente, na seção de psicoacústica, assim como em nossos ouvidos há um atraso devido à integração temporal da intensidade percebida, também no cálculo da amplitude feita pelo computador há um atraso entre o momento de ataque e a leitura da amplitude máxima atingida pela corda (ver figura 10). A amplitude é calculada através da média (RMS) feita para cada 1024 (podendo ser alterado para valores maiores ou menores) amostras do sinal digital da corda estudada, atualizados a cada 512 amostras. Trabalhando com frequência de amostragem igual a 48000 Hz, sabemos que essa média é atualizada a cada 11 ms.

Após algumas medidas e observações sobre o comportamento do desenvolvimento dessa curva após uma detecção de ataques, observamos que, nas condições descritas anteriormente, a média calculada demora em torno de 60 ms para a atingir seu valor máximo. Dessa forma, a amplitude da corda é monitorada o tempo todo, e quando acontece um ataque atribuímos a ele o maior valor de amplitude ocorrido num intervalo de 60 ms depois da detecção.

Como a geração sonora no violão se baseia no modelo ataque-ressonância, estamos assumindo que o pico do envelope dinâmico após o ataque representa a amplitude do toque. Embora esse cálculo não leve em conta as características não-lineares do ouvido, responsáveis pela real percepção de *loudness* (intensidade subjetiva) nas diferentes regiões de frequência (PEETERS, 2004), ele, de certa maneira, representa a força que o músico emprega em seu toque. Como nosso sistema está bem calibrado em relação aos ganhos individuais de cada corda, consideramos

que o valor calculado pode indicar com fidelidade a dinâmica do trecho tocado.

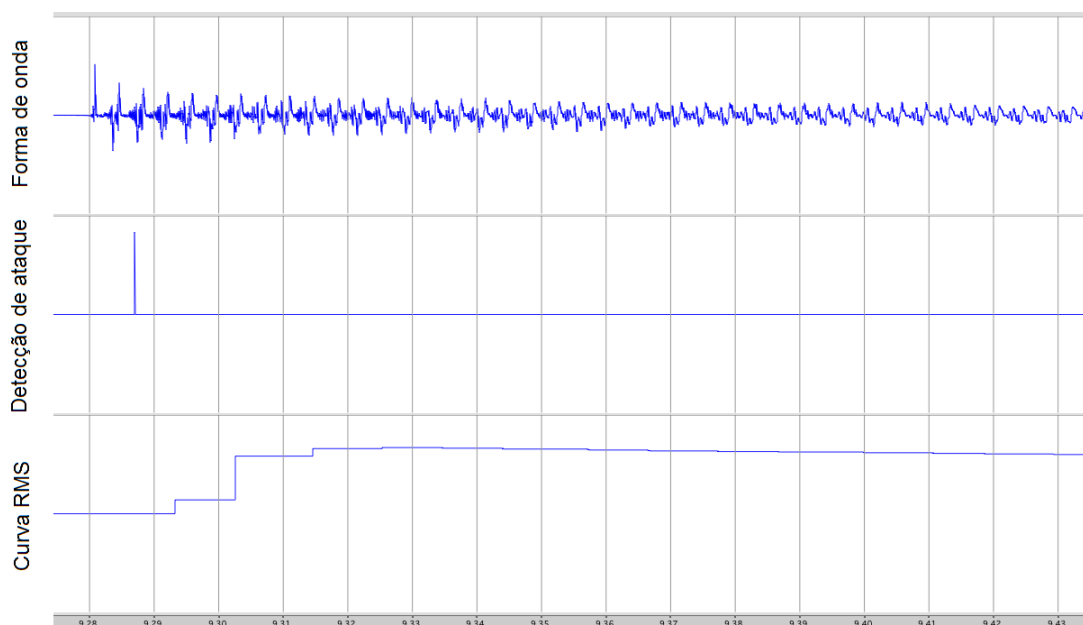


Figura 10: Na primeira linha desta figura, podemos observar a forma de onda resultante de um ataque em uma das cordas do violão. Na segunda linha, um traço vertical marca o momento de detecção do ataque. Na terceira linha, está representada a evolução da curva de RMS do sinal observado na primeira linha. No eixo vertical as unidades são arbitrárias.

1.3.3 Extinção de notas

Para realizar o estudo de notas repetidas nas mesmas cordas e o estudo de *tremolos* (respectivamente no capítulo 2, seção 2.3 e seção 2.4) resolvemos medir também a duração efetiva de cada nota tocada. Para isso, implementamos duas estratégias complementares: no violão, o final de uma nota ou é definido por um novo ataque na mesma corda ou quando a amplitude RMS decresce abaixo de certo valor. Este valor é um dos parâmetros a serem afinados na programação de cada trecho a ser estudado.

No caso dos *tremolos* na corda 1, utilizamos um valor relativamente elevado (entre -39 e -48 dB), já que os intervalos temporais são bastante curtos nesse caso e um valor mais baixo acabaria por indicar o final da nota somente no início da próxima.

A figura 11 mostra, acima, a forma de onda de um trecho de uma gravação onde o músico executou a técnica *tremolo*. O trecho recortado é referente a três ataques na primeira corda do instrumento. Na linha central, podemos ver linhas verticais que marcam os momentos das detecções de ataques. Já na linha inferior, estão representadas linhas verticais (mais curtas que as anteriores) que marcam as extinções das notas tocadas.

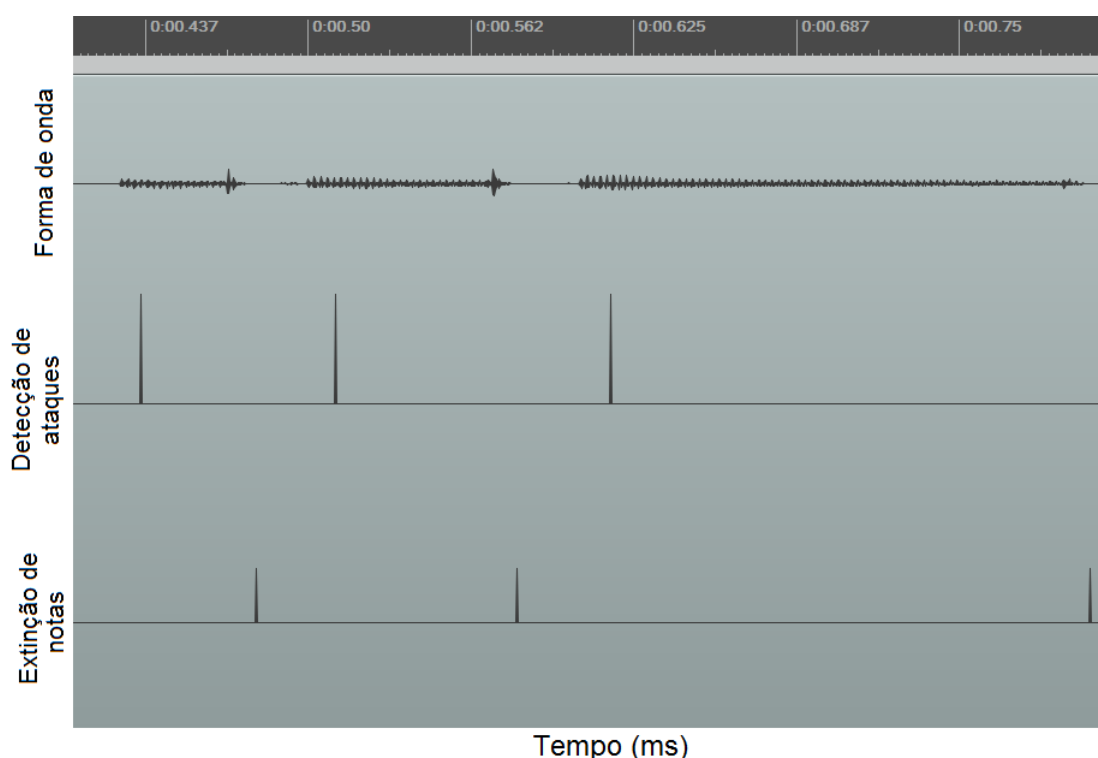


Figura 11: Exemplo de captções de ataques e de extinções de notas. No eixo horizontal superior está indicada a escala temporal. No eixo vertical as unidades são arbitrárias. Acima: forma de onda. Centro: linhas verticais marcam momento da detecção de ataques. Abaixo: linhas verticais marcam momento da extinção das notas.

As linhas verticais que marcam os eventos mostrados na figura 11 foram *clicks* disparados nos momentos em que cada evento foi detectado. Eles foram gravados em canais de áudio separados para ilustrar o funcionamento das detecções de ataques e extinções de notas descritas anteriormente.

Devemos também chamar atenção para a influência da maneira como os mú-

sicos agem sobre as cordas para provocar a extinção de uma nota. Tal efeito foi observado, principalmente, nas análises apresentadas nas seções 2.3 e 2.4, que tratam de repetições de notas em uma mesma corda. As figuras 12 e 13 mostram formas de ondas observadas nas gravações analisadas na seção 2.4 pelos dois músicos participantes.

Na figura 12, podemos observar pequenos aumentos da amplitude da onda logo antes de um ataque. Esse efeito sugere a preparação de um ataque. O músico parece encostar o dedo (ou a unha, ou ambos) na corda momentos antes de realizar o ataque seguinte. Já na figura 13 (e também na figura 11) podemos observar um aumento da amplitude da onda na parte final de sua duração. Tal efeito parece acontecer quando o músico abafa a corda (que estava soando) para em seguida realizar um novo ataque. Ambos os efeitos observados se referem à diferentes maneiras de atacar repetidamente a mesma corda, e por consequência, ao abafamento da nota que soava anteriormente.



Figura 12: Formas de onda observadas na gravação do excerto analisado na seção 2.4 realizada pelo músico 1. Aumentos na amplitude da onda em momentos entre ataques sugerem a preparação do ataque seguinte. Nos dois eixos as unidades são arbitrárias.

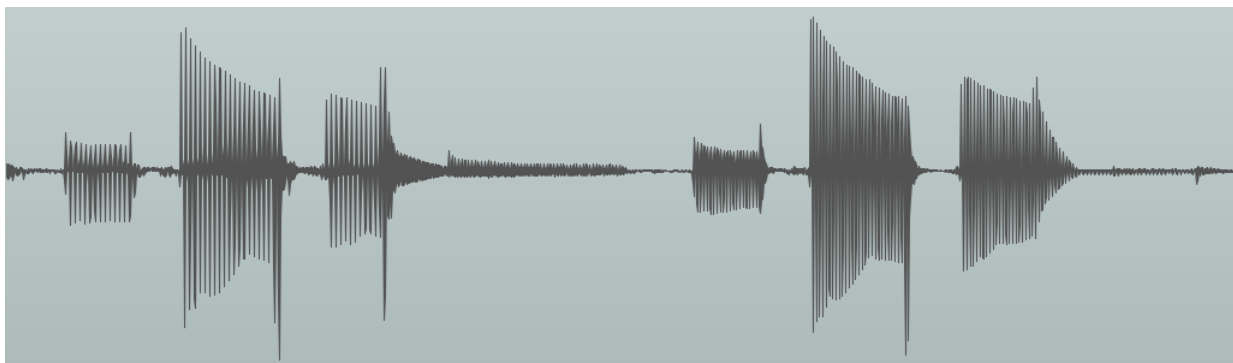


Figura 13: Formas de onda observadas na gravação do excerto analisado na seção 2.4 realizada pelo músico 2. Aumentos na amplitude da onda nos momentos finais das notas sugerem que o músico abafa a nota soante para preparar a seguinte. Nos dois eixos as unidades são arbitrárias.

2 Aplicação do sistema: análises de excertos musicais

Este capítulo discute os análises de excertos realizadas entre 2011 e 2012, que também tiveram um papel importante no refinamento progressivo do sistema desenvolvido e utilizado na pesquisa. Tais análises foram feitas em tempo diferido a partir de gravações de excertos das peças "Estudo nº 1" e "Estudo nº 4" de Heitor Villa Lobos, "Estudo nº 2" de Matteo Carcassi e o terceiro movimento, "Scherzino", da peça "Cavatina" de Alexandre Tansman. Essas peças tratam respectivamente das técnicas arpejos, *plaqué*, repetição de notas e *tremolo*. Todos os excertos foram escolhidos privilegiando os aspectos de regularidade e simultaneidade presentes na técnicas do violão.

2.1 Arpejos: Estudo nº 1 de Heitor Villa-Lobos

O primeiro estudo de caso que descreveremos foi o primeiro a ser testado pelo sistema. Em um trabalho anterior (FREIRE; NÉZIO; PIMENTA, 2011) mostramos a parte inicial do projeto, as características do desenvolvimento que estava acontecendo naquele momento e um estudo preliminar de uma gravação do Estudo nº 1 de Heitor Villa Lobos. Posteriormente foi apresentado no trabalho (FREIRE; NÉZIO; PIMENTA, 2012a), um estudo mais consistente da mesma peça, com mais dados e com o sistema em melhor funcionamento.

A técnica violonística que abordaremos nessa seção serão os arpejos. Trata-se da maneira de se produzir som em que o músico toca as notas de um acorde de forma sucessiva. Foram realizadas gravações com 3 estudantes de violão; no período das gravações dois deles cursavam o 5º período e um cursava o 7º período do curso de Música da UFMG. Os músicos foram instruídos apenas a seguir a par-

titura do excerto selecionado (figura 14).

Figura 14: Compassos 7 a 12 do Estudo nº1 de Villa-Lobos para violão (VILLA-LOBOS, 2000).

É característica do violão, no caso de notas tocadas em posição fixa¹, como as mostradas na partitura (figura 14), que o músico continue prendendo a corda na posição de execução e esta continue soando, gerando o efeito mostrado na figura 15.

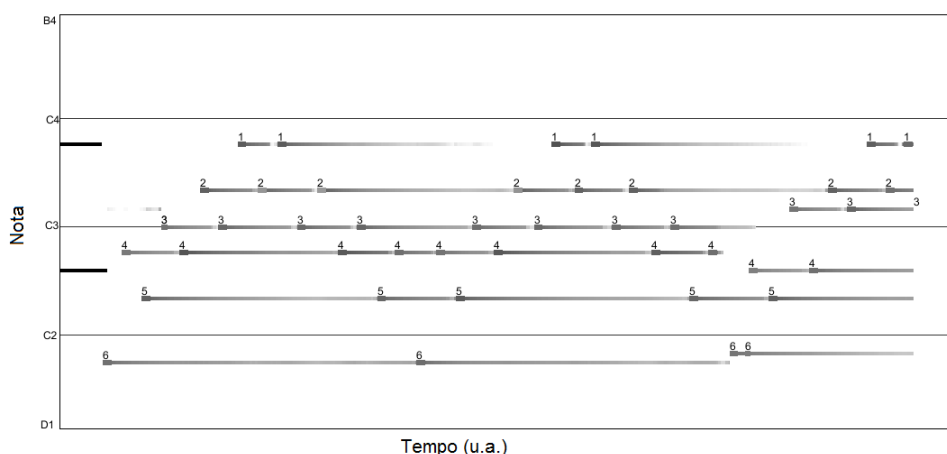


Figura 15: *Patch* que mostra programação visual onde é possível observar momento de ataque e duração das notas tocadas. Este trecho representa o primeiro compasso no excerto da figura 14.

¹Neste caso, a digitação feita pela mão esquerda do músico é fixa em cada compasso, ou seja, os dedos dessa mão permanecem parados apertando as cordas num único ponto. Já a mão direita realiza os arpejos sempre repetindo uma mesma forma de digitação.

Essa figura mostra o *patch* contruído para se observar o momento de ataque e a duração das notas tocadas em tempo real. Os dados estão representados pelas linhas grossas cinzas na figura. O eixo vertical desse gráfico representa as notas tocadas, enquanto o eixo horizontal representa o tempo. Podemos notar no início de cada linha cinza um número sobre um quadrado com largura ligeiramente maior que a da linha. Esse número indica o número da corda em que a nota foi atacada. O comprimento horizontal dessas linhas representa a duração das notas e a amplitude é representada pela intensidade da cor da linha. Podemos observar que as durações efetivas são diferentes, efeito resultante que faz parte da sonoridade típica do violão.

No trabalho (FREIRE; NÉZIO; PIMENTA, 2011) tínhamos proposto uma quantização das amplitudes em faixas dinâmicas fixas. Mais tarde, decidimos mudar essa interpretação e representar graficamente os valores reais calculados das amplitudes para cada uma das cordas tocadas no violão. A figura resultante é um gráfico de barras em uma tela que armazena as amplitudes de eventos dos últimos 8 segundos da execução (figura 16). A altura das barras representa a amplitude da corda tocada. O gráfico se encontra na tela inicial do *patch* principal, servindo como uma representação visual para as seis cordas ao mesmo tempo e em tempo real.

O dedilhado de mão direita utilizado neste estudo e que se repete a cada compasso é : p(6) i(4) p(5) i(3) p(4) m(2) i(3) a(1) m(2) a(1) i(3) m(2) p(4) i(3) p(5) i(4), onde “p” indica dedo polegar, “i” indicador, “m” médio, “a” anular, e os números entre parênteses indicam qual corda é tocada. Nas mudanças de acorde, a corda 4 é a mais problemática, pois é a última a ser atacada em um acorde e a segunda nota do acorde seguinte. Na figura 16 podemos ver esse momento onde em cada grupo de quatro amplitudes para a corda 4, a segunda se refere a um ataque no novo acorde e tem sempre a amplitude menor do que as vizinhas.

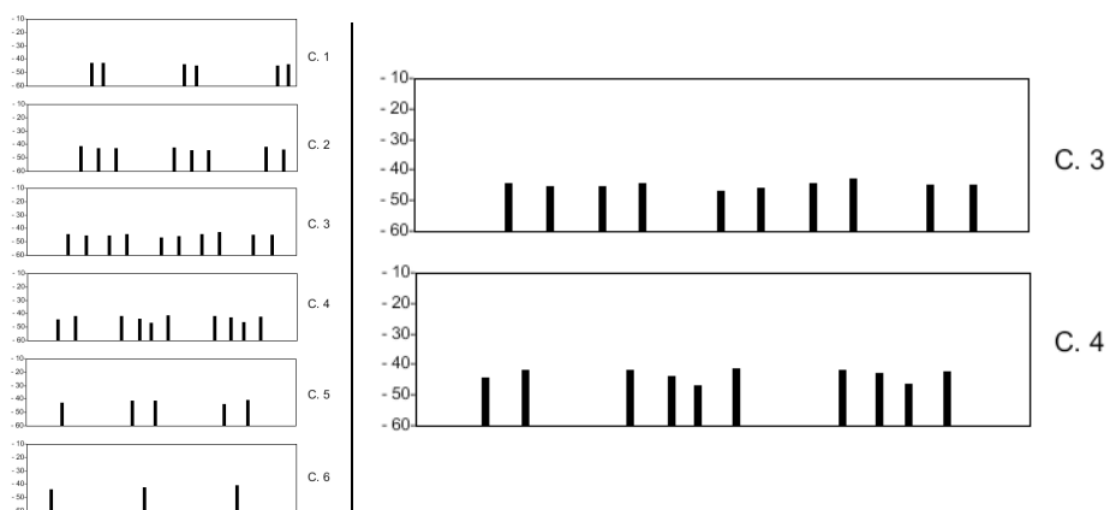


Figura 16: Representação gráfica das amplitudes captadas em uma janela de oito segundos. À esquerda, uma visão geral das amplitudes referentes aos compassos 7 e 8 (parte) em uma execução do "Estudo nº 1" de Villa-Lobos; à direita, detalhe das amplitudes das cordas 3 e 4.

Para o estudo da regularidade de ritmo e andamento no Estudo nº 1 de Villa-Lobos, desenvolvemos duas representações gráficas que funcionam em tempo real. Uma delas mede a regularidade da execução calculando as durações entre cada ataque; a outra representa o andamento (BPM) de três formas: em cada pulso, metade do compasso e compasso inteiro (figura 17). Para as análises e comparações subsequentes, escolhemos o excerto compreendido entre os compassos 7 e 13 (cada um com uma repetição - figura 14).

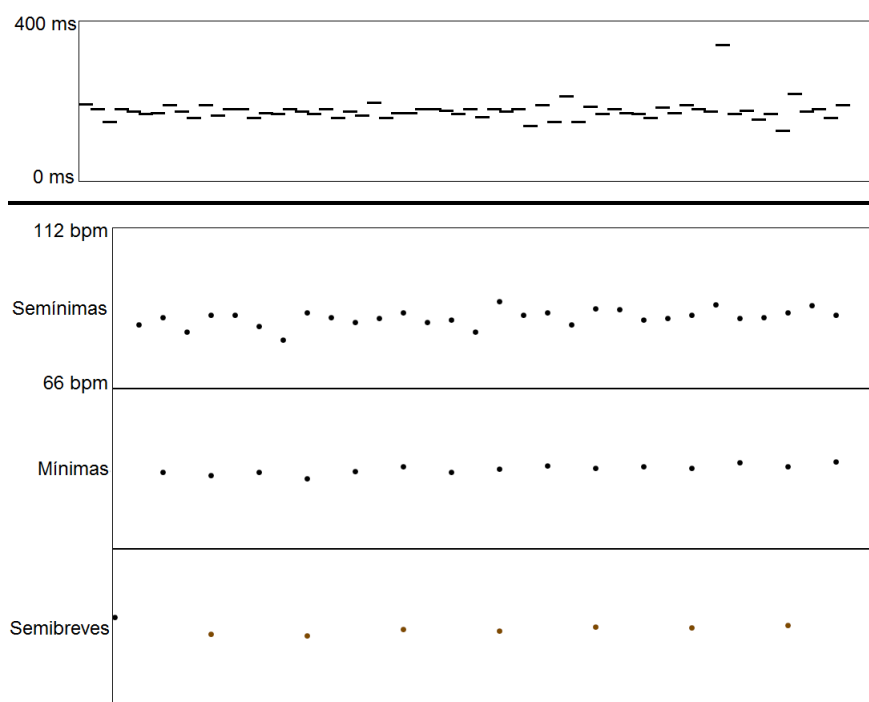


Figura 17: Acima, representação da regularidade na execução das semicolcheias tocadas. Abaixo, representação da regularidade medida em semínimas, mínimas e semi-breves. Estão representados 4 compassos do Estudo nº 1.

No gráfico da regularidade rítmica, valores excêntricos normalmente representam uma deteção de falso ataque (ou a não deteção de um deles), que pode indicar problemas na regulagem do sistema e também “sujeiras” na execução do instrumentista.

2.1.1 Comparações entre diferentes execuções

Os gráficos que se seguem representam os intervalos de tempo correspondentes à execução de três níveis rítmicos (semibreve, mínima e semínima) extraídos de gravações feitas com três violonistas diferentes tocando o excerto do Estudo nº1 de Villa-Lobos indicado na figura 14. É importante lembrar que o cálculo do andamento só é feito a partir do segundo ataque: desse modo, no gráfico de semibreves, o primeiro ponto indica o início do *ritornelo* do primeiro compasso (cp. 7), e seu valor em BPM se refere ao intervalo temporal entre o primeiro ataque do compasso anterior e o início do atual (cp. 7b). O mesmo vale para os níveis

mais rápidos: o valor de BPM para as mínimas é calculado a partir da metade do primeiro compasso, e para as semínimas a partir do segundo pulso do primeiro compasso (cp. 7). Dessa forma, os gráficos abaixo iniciam-se com o ponto “2”. A mudança de acordes (um fator relevante a ser considerado na análise da regularidade) acontece em cada ponto ímpar (do eixo horizontal) para o nível das semibreves, a cada 4 pontos (5, 9, 13, 17 etc.) para o nível das mínimas e a cada 8 pulsos de semínima (pontos 9, 17, 25, 33 etc.). O trecho escolhido apresenta uma característica importante: dos compassos 7 a 11, os acordes exigem o uso de *pes-tana*² pela mão esquerda e, a partir do compasso 12, um acorde de forma fixa com cordas soltas inicia um longo movimento descendente pelo braço.

²Técnica violonística em que o dedo indicador da mão esquerda pressiona todas as cordas do instrumento na mesma casa.

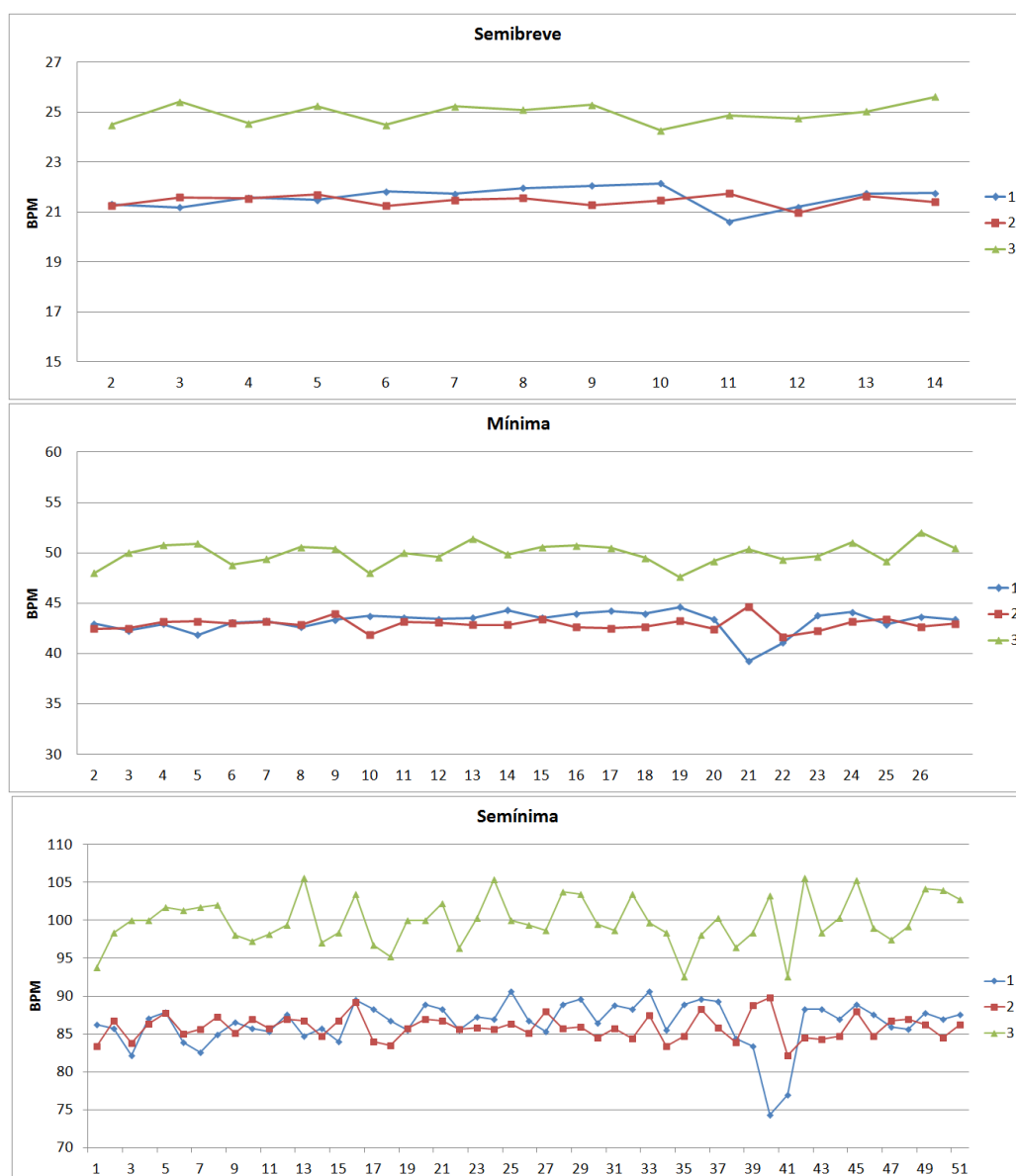


Figura 18: Gráficos relativos à agógica de três execuções (por três músicos diferentes) de excerto do Estudo nº 1 de Villa-Lobos (cp. 7 a 13).

As interpretações 2 e 3 apresentam, respectivamente, maior e menor regularidade rítmica. Nota-se que a irregularidade do músico 3 se dá nos três gráficos apresentados na figura 18. Observa-se também que a regularidade no nível das semibreves, presente em todas as execuções, é construído de forma diferente pelos músicos: nem sempre o padrão de variações no nível das semínimas se reflete nos níveis mais lentos. Por exemplo, as variações que o músico 3 realiza no excerto

(gráfico superior), são geradas por diferentes relações entre os pulsos tocados em cada compasso. O momento em que a mão esquerda deixa de realizar a pestana, aliado ao fato do próximo ataque se dar em uma corda solta, é também marcante nas três execuções (índice 11 nas semibreves, 21 nas mínimas e 41 nas semínimas): enquanto o músico 1 desacelera, os músicos 2 e 3 aceleram. Nota-se ainda que esse músico tende a desacelerar após a troca de acordes.

2.2 *Plaqué: Estudo nº 4 de Heitor Villa-Lobos*

Para a abordagem quantitativa dos sons simultâneos, escolhemos um trecho do Estudo nº 4 de Villa-Lobos (*Des accords répétés*). O trecho escolhido é composto em sua maior parte por acordes de 4 notas, cada um repetido quatro vezes, em um andamento relativamente rápido. Três estudantes de violão, dois do quinto e um do sétimo período do curso, foram solicitados a realizar uma execução não expressiva, sem seguir as indicações dinâmicas e agógicas da partitura e também evitando qualquer arpejo deliberado afim de evitar variações na técnica estudada. Em todos os acordes, os dedos da mão direita utilizados foram polegar, indicador, médio e anular. A análise que se segue é uma extensão do trabalho apresentado anteriormente em (FREIRE; NÉZIO; PIMENTA, 2012b).

2.2.1 Comparações entre diferentes execuções

Foram realizadas várias gravações e escolhemos quatro delas para serem analisadas. Os três músicos serão chamados, nessa seção, de músico A, músico B e músico C. Do músico A examinamos uma versão mais lenta e outra mais rápida (A1 e A2), dos músicos B e C examinamos apenas uma versão. No total, cada trecho possui 36 acordes. A tabela 3 mostra as médias e desvios padrão dos intervalos entre as primeiras notas atacadas nos acordes e dos espalhamentos das notas (intervalo de tempo entre a primeira e a última nota atacada em cada acorde) em cada uma das execuções.

Execução	Intervalo (ms)	Desvio padrão (ms)	Média do espalhamento (ms)	Desvio padrão (ms)
A1	365	20	31	9
A2	243	19	25	7
B	263	13	8	5
C	276	21	11	5

Tabela 3: Médias e desvios padrão dos intervalos entre as primeiras notas atacadas nos acordes e dos espalhamentos das notas (intervalo de tempo entre a primeira e a última nota atacada em cada acorde) em cada uma das execuções.

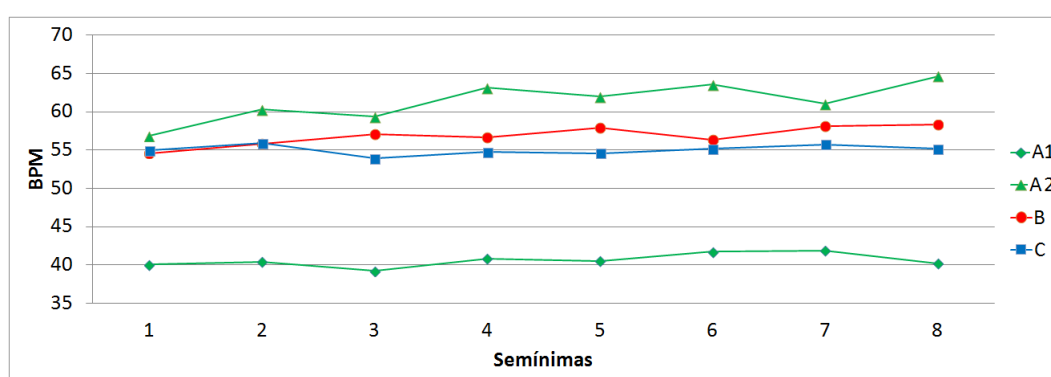


Figura 19: Evolução do pulso de semínima - expresso em bpm - em cada uma das interpretações.

A figura 21 representa os espalhamentos dos 8 primeiros acordes de cada uma das versões. É interessante notar que o músico A, que apresenta uma média maior de espalhamento, mantém um certo padrão de ordenação dos ataques em ambas as versões, lenta e rápida. Não se observa a mesma regularidade no espalhamento das notas nas versões dos músicos B e C, cuja média é bem menor. Pode-se notar também que a montagem dos acordes é diferente entre os músicos, já que nos primeiros 4 acordes o músico A utiliza as cordas 6, 4, 3 e 2, enquanto os outros 2 usam as cordas 6, 5, 4 e 3.



Figura 20: Trecho selecionado: compassos iniciais do Estudo nº 4 de Villa-Lobos para violão (VILLA-LOBOS, 2000).

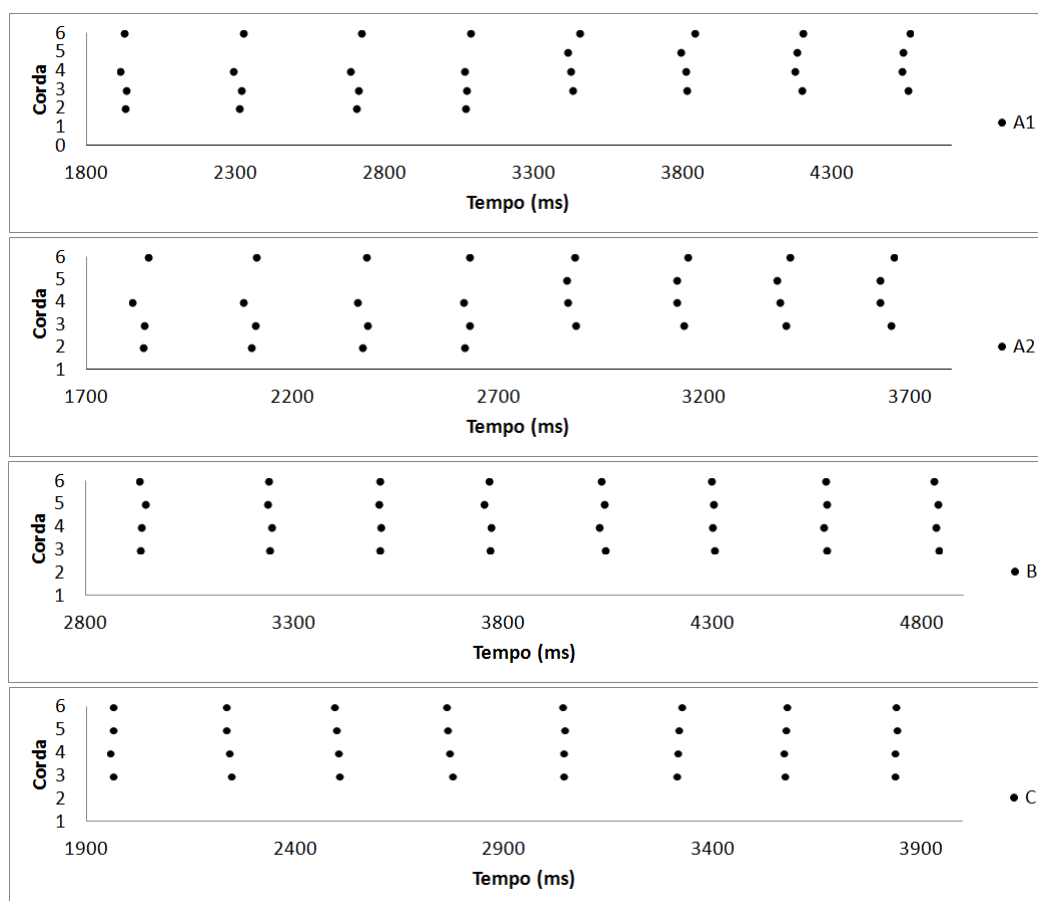


Figura 21: Espalhamento das notas dos 8 primeiros acordes das versões A1, A2, B e C.

Em nenhuma das versões detectou-se um equilíbrio entre as amplitudes das notas; as notas mais forte e mais fraca de cada acorde diferenciam-se às vezes em até 10 dB. A análise da variação de amplitude em cada corda deve levar em conta,

dentre outros fatores, o dedo da mão direita que a ataca. Os gráficos mostrados nas figuras 22 e 23 representam a sequência de amplitudes das cordas 3 e 4 (respectivamente linhas verde e azul) em trechos específicos de mudanças de dedos da mão direita. No gráfico acima na figura 22, estão representadas as amplitudes do músico C nos acordes compreendidos entre o segundo tempo do primeiro compasso e os 2 primeiros tempos do segundo compasso. Entre o oitavo e nono acordes, ocorre uma mudança dos dedos da mão direita que atacam essas cordas, e é onde exatamente se dá o cruzamento das linhas de amplitude. Nota-se também que o dedo médio *m* mantém uma regularidade dinâmica, mesmo após a troca de cordas. No gráfico abaixo na figura 22, o comportamento desse mesmo dedo se mantém para o músico A (versão A1). Um fator complicador da análise desse último caso é a presença de cordas soltas nos acordes extremos, que apresentam, na maioria das vezes, com amplitudes mais baixas do que as das cordas presas.

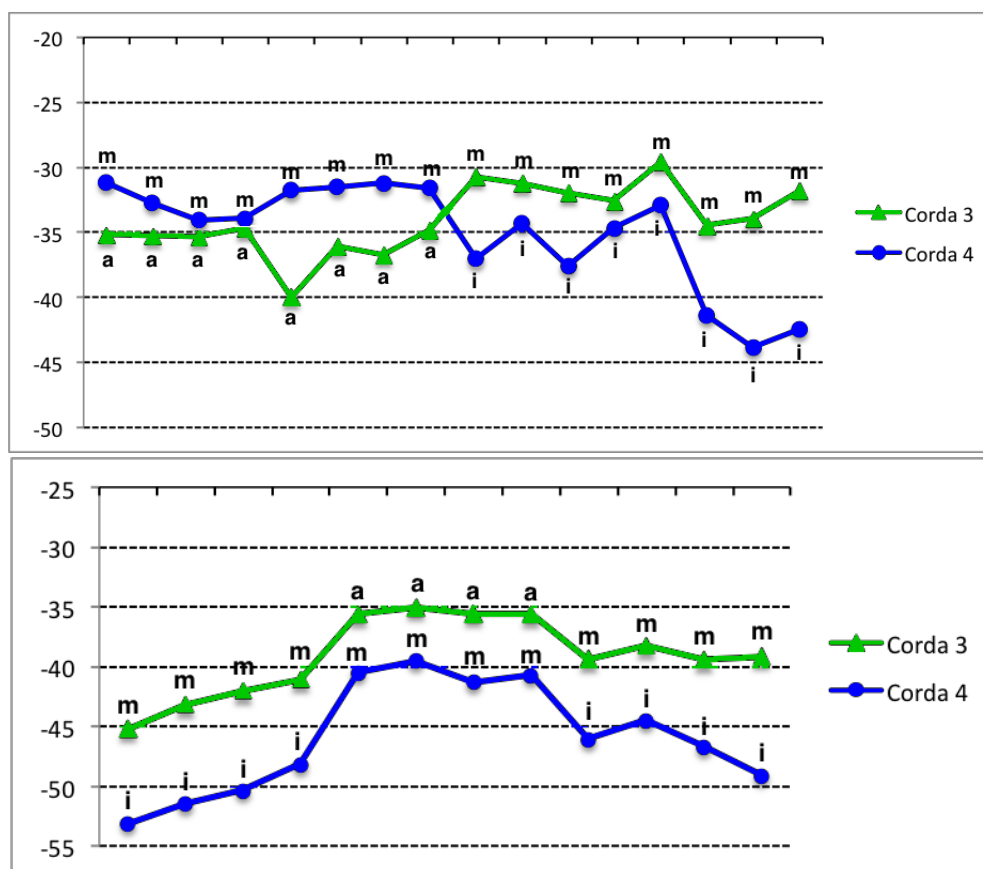


Figura 22: Na figura acima, seqüência de amplitudes das cordas 3 e 4 (respectivamente linhas verde e azul) em 4 pulsos da versão C. Na figura abaixo, seqüência de amplitudes das mesmas cordas no primeiro compasso da versão A1.

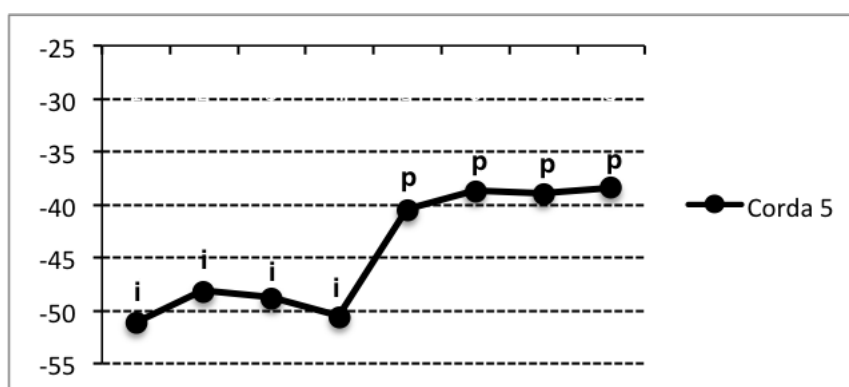


Figura 23: Amplitudes da corda 5 em acordes não sucessivos da versão A1, tocada primeiramente pelo dedo indicador e depois pelo polegar.

Em todas as versões, observa-se uma tendência das notas tocadas pelo polegar serem mais fortes do que as demais. A figura 23 ilustra uma diferença de 10 dB entre notas de 2 acordes não sucessivos na corda 5, tocada primeiramente pelo indicador e em seguida pelo polegar. Os acordes estão no segundo tempo do primeiro compasso e no primeiro tempo do terceiro compasso. Embora não sucessivos, não há toque na corda 5 entre esses acordes, devido ao dedilhado de mão esquerda escolhido pelo músico.

2.3 Repetição de notas: Estudo nº 2 de Matteo Carcassi

Nesta seção mostraremos os resultados da análise da seção inicial do Estudo nº 2 de Matteo Carcassi (CARCASSI, 1852). O trecho selecionado está ilustrado na figura 24, com seus oito primeiros compassos. Podemos observar no motivo musical que se repete ao longo desse trecho, arpejos compostos por uma nota grave (tocada pelo dedo polegar *p* nas cordas 4, 5 ou 6), seguido de uma nota na corda 3 (tocada pelo dedo indicador *i*), outra na corda 2 (tocada pelo dedo médio *m*) e uma sequência de cinco notas na corda 1 (tocadas por combinações dos dedos indicador *i*, médio *m* e anular *a*). Cada um desses padrões é tocado com uma posição fixa da mão esquerda. As durações das notas repetidas na corda 1 merecerão uma atenção especial mais adiante.

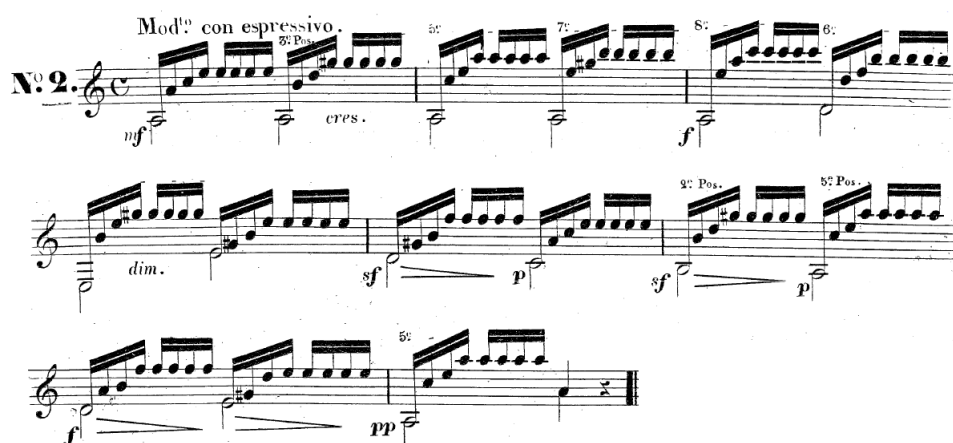


Figura 24: Estudo nº 2 de Matteo Carcassi (CARCASSI, 1852).

A análise apresentada a seguir compara duas gravações feitas pelo mesmo músico, onde em cada versão são utilizados padrões técnicos diferentes na repetição das últimas cinco notas de cada motivo musical. O músico executou o trecho realizando os padrões de mão direita *p-i-m-a-m-a-m-a* (ou seja, foram utilizados sucessivamente os dedos: polegar, indicador, médio, anular, médio, anular, médio e anular) na primeira versão e *p-i-m-a-m-i-m-a* (ou seja, foram utilizados sucessivamente os dedos: polegar, indicador, médio, anular, médio, indicador, médio e anular) na segunda versão.

Este estudo de repetição de notas prepara a próxima análise (sobre a técnica *tremolo*) que aborda a repetição de notas de forma mais rápida que a tratada na presente seção.

2.3.1 Comparações entre diferentes execuções

As variações do pulso (bpm) nas versões estudadas estão representadas nos gráficos das figuras 25, versão 1, e 26, versão 2. Nesta análise decidimos representar o pulso pelas mínimas em cada compasso, ou seja, o intervalo temporal entre dois motivos musicais completos. Para enriquecer essa representação decidimos plotar, além dos intervalos de mínimas dado pela nota mais grave (baixos), os mesmos intervalos realizados pelas notas tocadas na terceira e na segunda corda do violão. Na partitura (figura 24), podemos observar que as repetições de notas nessas cordas também representam intervalos de mínimas. As curvas em azul representam o andamento das mínimas tocadas pelo dedo polegar nas cordas 4, 5 e 6, enquanto as curvas em verde e em laranja representam as mínimas tocadas, respectivamente, na corda 3 e na corda 2.

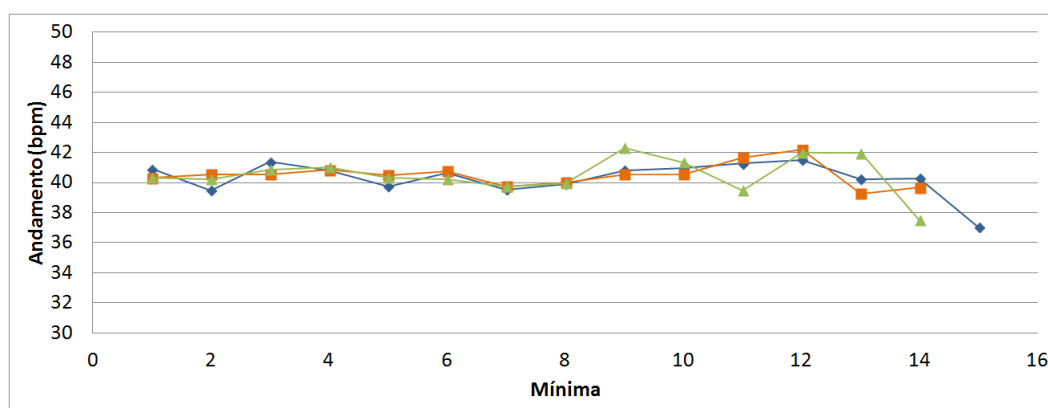


Figura 25: Variação do pulso (bpm dado pelo intervalo entre mínimas) na versão 1. Curva azul: notas graves (tocadas nas cordas 4, 5 e 6); curva verde: corda 3; curva laranja: corda 2.

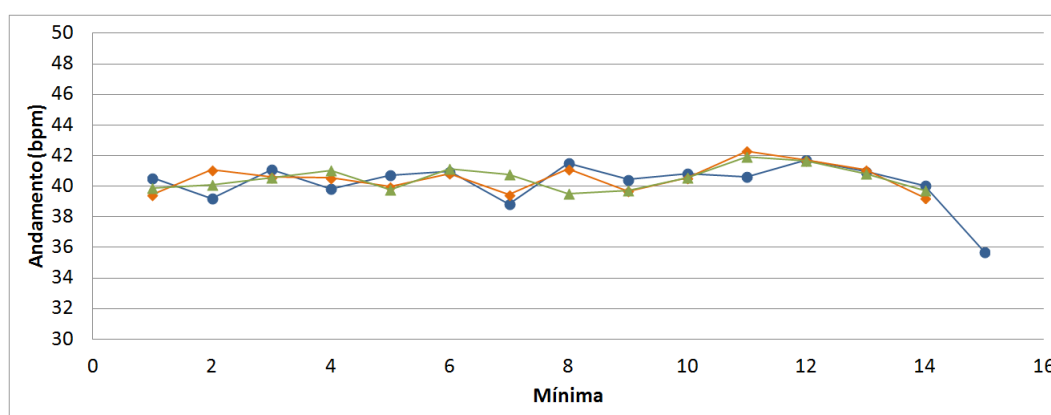


Figura 26: Variação do pulso (bpm dado pelo intervalo entre mínimas) na versão 2. Curva azul: notas graves (tocadas nas cordas 4, 5 e 6); curva verde: corda 3; curva laranja: corda 2.

Nas duas versões observamos que os pulsos variam em torno de 40 bpm, sem alterações bruscas, até o quarto compasso do trecho selecionado (oitava mínima). Na primeira versão, podemos observar que as curvas azul e laranja descrevem um *accelerando* nos compassos 5 e 6, e logo em seguida, um *ritardando* nos últimos 2 compassos. Nesse mesmo trecho a curva verde mostra variações em torno das outras duas. Já na segunda versão, há um *accelerando* das três curvas por 2 compassos (quatro pontos) e em seguida um *ritardando* marcando o final do trecho.

As variações entre os pulsos medidos pelo dedo polegar, indicador e médio

indicam antecipações e atrasos das notas tocadas pelos dedos indicador e médio, em relação à nota do polegar, nesta sequência de motivos musicais.

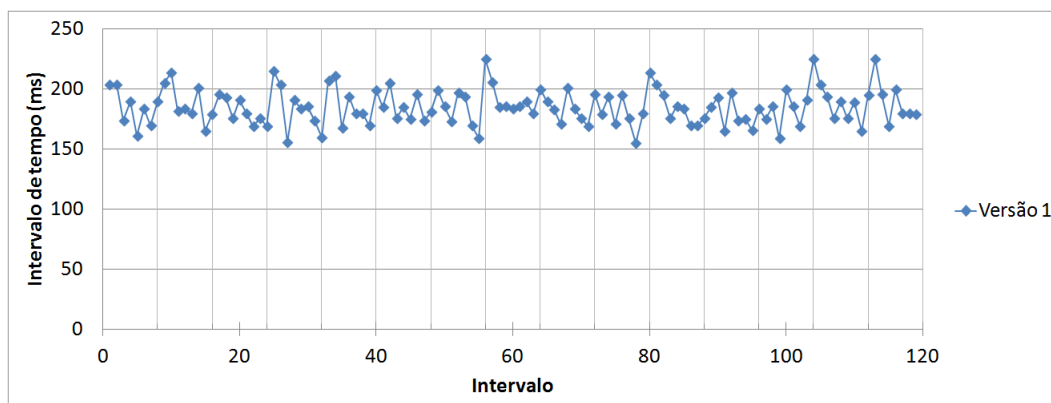


Figura 27: Intervalo de tempo entre todos os ataques do trecho. Versão 1.

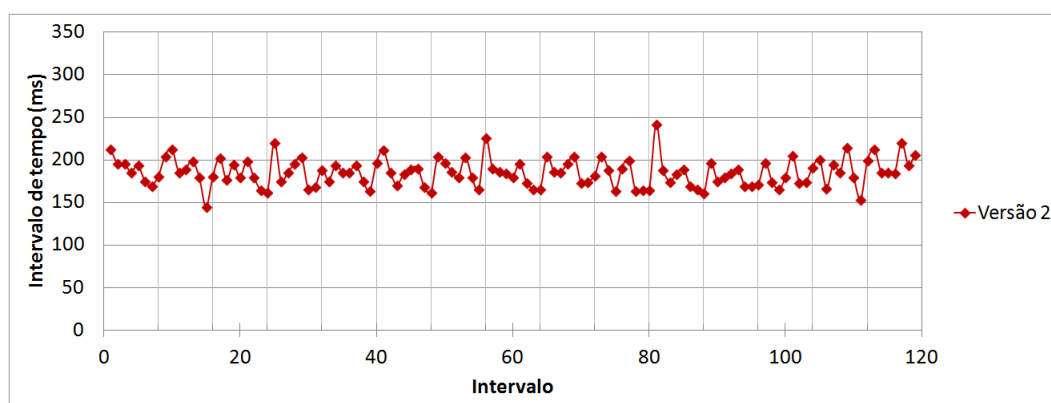


Figura 28: Intervalo de tempo entre todos os ataques do trecho. Versão 2.

Os dados que mostram os intervalos de tempo entre ataques, figura 27 versão 1 e figura 28 versão 2, apresentam intervalos de tempo com variações pequenas, sendo a média dos valores de cada versão, respectivamente 184 ms e 186 ms. Os desvios padrão correspondentes são 17 ms (versão 1) e 18 ms (versão 2), mostrando que os músicos realizaram em média 10% de variação em torno da média. Dessa forma, os gráficos podem ser lidos como uma execução bastante precisa, onde o músico respeitou o tempo de duração de cada nota. Esses resultados concordam com os gráficos de variação de pulso no mesmo trecho, figuras 25 e 26.

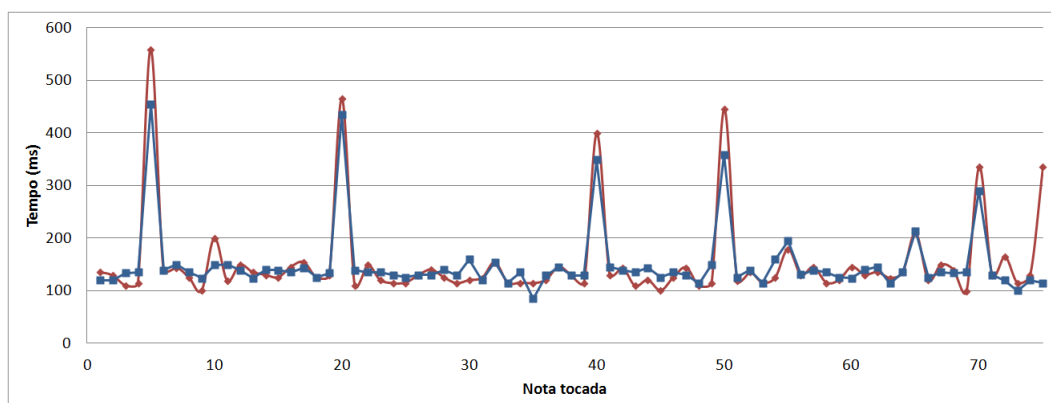


Figura 29: Duração das notas tocadas na primeira corda do violão.

A figura 29 representa as durações das notas tocadas na primeira corda do instrumento. As curvas das duas versões concordam mostrando algumas particularidades do trecho da peça escolhida. Os picos apresentados com duração maior que 250 ms estão sempre localizados em valores múltiplos de cinco no eixo horizontal, o que indica que representam a última nota de um dos motivos musicais. Esses picos acontecem devido à maneira como é feita a digitação das notas pelos dedos da mão esquerda do músico. Quando a digitação do acorde seguinte é em uma posição afastada ou muito diferente da do acorde anterior, o músico precisa de mais tempo para realizar a mudança, forçando o término das notas que ainda estão soando. Já quando a diferença de digitação é pequena, ou se faz uso de corda solta (nota mi 5), o músico realiza as mudanças necessárias mais rapidamente, podendo deixar as notas tocadas sejam um pouco mais longas.

Para as curvas em azul, que representam a versão 1, a curva de durações mostrou valor médio de 134 ms e desvio de 17 ms. Na curva em vermelho, que representa a versão 2, os valores foram 130 ms de média com 20 ms de desvio padrão para a curva que mostra a duração das notas tocadas na primeira corda do instrumento.

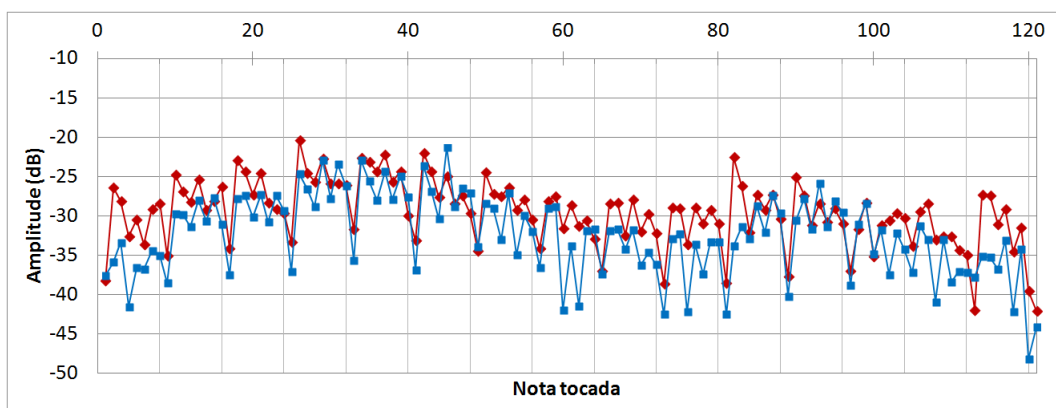


Figura 30: Amplitude de cada nota.

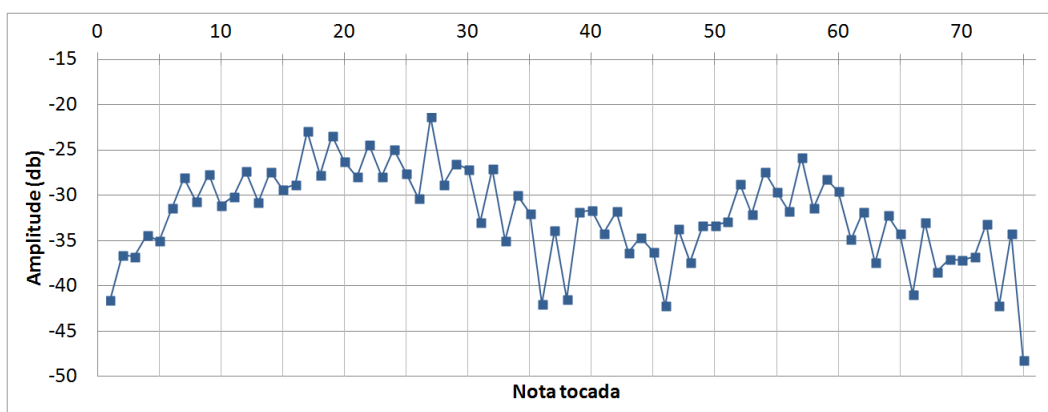


Figura 31: Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão, versão 1.

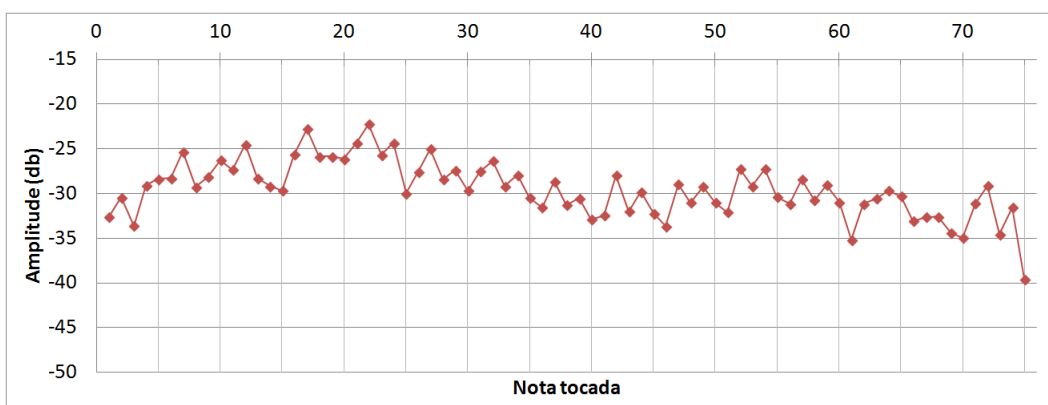


Figura 32: Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão, versão 2.

A figura 30 representa a amplitude de cada nota tocada nas gravações de cada versão. As linhas verticais indicam a posição da última nota de cada motivo musical apresentados na partitura (figura 24). Podemos observar, nas duas versões, que de forma geral, as notas tocadas pelo polegar (primeira nota após cada linha vertical) apresentam amplitudes baixas.

As figuras 31 e 32 mostram as amplitudes das notas tocadas apenas na corda 1 nas duas versões analisadas. Nessas figuras as linhas verticais separam os grupos de cinco notas tocadas na mesma corda, portanto, cada número do eixo vertical sinaliza o limite entre 2 compassos. No primeiro espaço entre duas linhas verticais de cada uma das figuras está indicado o dedo que tocou a corda na digitação específica da versão representada. Essa digitação se repete em cada um dos espaços.

Podemos observar que nas duas versões as notas tocadas pelo dedo médio *m* possuem maior intensidade que as tocadas pelos outros dedos. Esse efeito fica mais evidente no gráfico da versão 1 (figura 31), que possui digitações apenas dos dedos anular *a* e médio *m*. A variação de amplitudes entre notas sucessivas nesse gráfico é maior do que a apresentada no gráfico da versão 2 (figura 32). Essa diferença fica mais evidente no quarto compasso do trecho, momento em que é pedido ao intérprete a diminuição da intensidade das notas.

Observando os gráficos podemos notar também o momento em que o músico realiza, nas duas versões, as indicações da partitura referentes à variação de dinâmica. Podemos observar que as intensidades crescem nos dois primeiros compassos e se estabilizam no terceiro, indicando que alcançaram o *forte* indicado na partitura. Os compassos seguintes possuem indicações para serem executados em *sforzato decrescente*, chegando ao *pianíssimo* no último compasso do trecho, passagens estas que não estão claramente representadas nos gráficos.

2.4 Tremolo: Scherzino de Alexandre Tansman

A técnica violonística *tremolo* consiste, basicamente, na repetição rápida e regular de uma nota, a fim de imitar o efeito alcançado pela técnica de mesmo nome em instrumentos de arco. Esta técnica visa também a conseguir uma sustentação, mesmo que artificial, de uma nota no violão, cujo timbre é caracterizado pelo modelo ataque-ressonância. Na peça escolhida, o músico realiza uma melodia grave,

tocada pelo dedo polegar *p*, acompanhada pela repetição rápida de notas agudas, tocadas pelos outros três dedos (anular *a*, médio *m* e indicador *i*).

A figura abaixo mostra o trecho da peça escolhida para a realização deste estudo de caso. Trata-se dos primeiros quatro compassos do terceiro movimento, *Scherzino*, da peça Cavatina de Alexandre Tansman (TANSMAN, 1952).

III Scherzino



Figura 33: *Scherzino* - Alexandre Tansman (TANSMAN, 1952).

Podemos notar que o trecho selecionado compreende exatamente uma melodia mais grave que se desenvolve sendo acompanhada pela nota aguda sol que se repete (sol 392Hz). Observa-se também que as notas que se repetem estão escritas em semifusas, o que normalmente significa uma execução em pulso rápido, fato corroborado pela indicação de andamento: *allegro con moto*.

A próxima seção analisa duas gravações de músicos diferentes. Por se tratar de músicos semi-profissionais (estudantes), e sabendo que se tratava de uma técnica considerada difícil, os participantes foram orientados apenas a executar o excerto escolhido da melhor forma possível.

2.4.1 Comparações entre diferentes execuções

Primeiramente analisamos o pulso geral observado na execução dos músicos. Para realizar tal análise selecionamos as notas tocadas pelo dedo polegar e que, na partitura, são as colcheias do trecho. Calculando o intervalo de tempo entre as colcheias tocadas, foi possível construir uma curva da variação do pulso ao longo das gravações. Nos gráficos, o músico 1 é representado pelas curvas em azul, en-

quanto o músico 2 é representado pelas curvas em vermelho.

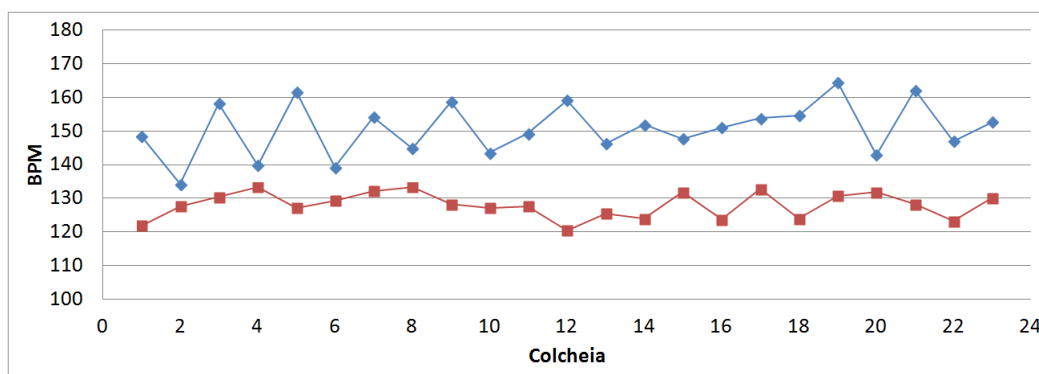


Figura 34: Variação do pulso de colcheia (bpm) nas duas versões.

Podemos observar no gráfico que representa o músico 1 uma variação do andamento em torno de 150 bpm durante todo o trecho gravado. Apenas no trecho entre os pontos 15 e 18 é possível observar um pequeno *accelerando*. O músico 2 inicia sua execução com um *accelerando* nas primeiras quatro colcheias do trecho selecionado, realizando em seguida um pequeno *ritardando* para então retomar ao *accelerando* por mais quatro colcheias. Sua interpretação segue com variações do pulso no intervalo entre 120 e 135 bpm.

Os gráficos mostrados nas figuras 35 e 36 mostram os intervalos de tempo entre ataques nas duas execuções. Podemos observar, de forma geral, que a variação do intervalo de tempo entre ataques permanece entre 50 e 150 ms para o músico 1 (curva em azul, figura 35) e entre 50 e 200 ms para o músico 2 (curva em vermelho, figura 36). Tais valores concordam com o gráfico da figura 34. No entanto, a curva que mostra os dados do músico 1 não mostra regularidade quanto a sequência dos dedos da mão direita que realizou os ataques. Comparando as duas curvas podemos notar que o músico 2 segue com um padrão de três ataques mais rápidos seguidos de um mais lento. Observe que os picos com valores maiores que 150 ms nessa execução somente acontecem em ataques realizados pelo polegar do músico (valores de ataques múltiplos de 4, representados pelas linhas verticais nos gráficos), o que sugere um tempo de reação maior desse dedo em relação aos outros dedos.

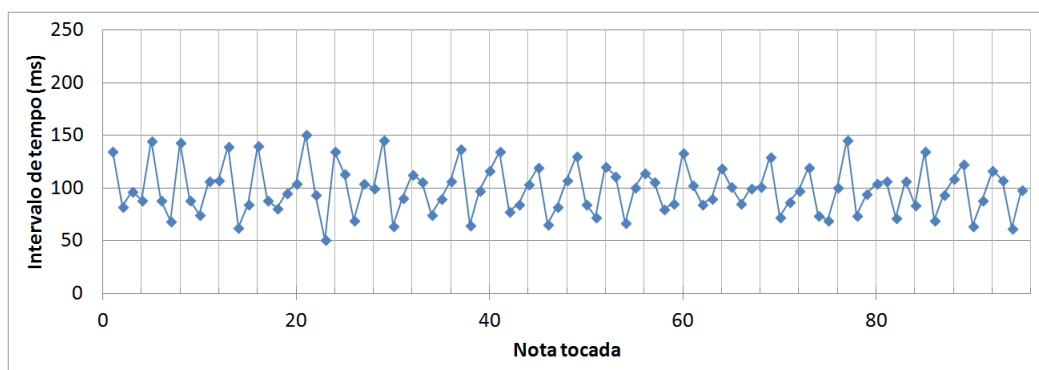


Figura 35: Intervalo de tempo entre ataques - músico 1.

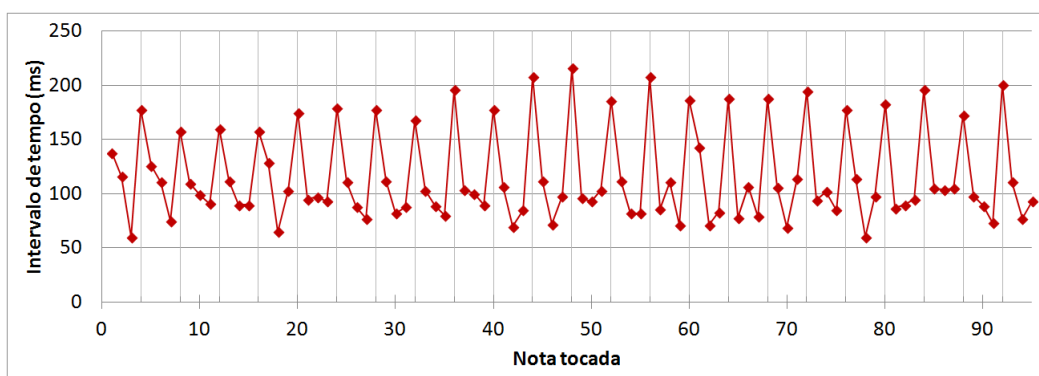


Figura 36: Intervalo de tempo entre ataques - músico 2.

A quantidade de dados aqui mostrada é insuficiente para avaliar o desempenho dos músicos participantes, embora possamos notar uma irregularidade temporal em ambos. Os dados de intervalo de tempo entre ataques extraídos da gravação do músico 1 mostram que ele manteve uma média de 99 ms entre ataques, sendo o desvio padrão de 25 ms. Já o músico 2 realizou o trecho com média de intervalo de tempo entre ataques de 116 ms e desvio padrão de 42 ms. No entanto, pode-se supor que os músicos estejam utilizando estratégias distintas para tentar superar essa irregularidade devida à rapidez das notas. No caso do músico 1, as compensações das durações são feitas de modo mais irregular, como se ele tentasse tocar uma grande frase com um dedilhado de mão direita que se repete a cada 4 notas. Já o músico 2 segue executando as notas como um padrão técnico de estudo de mão direita.

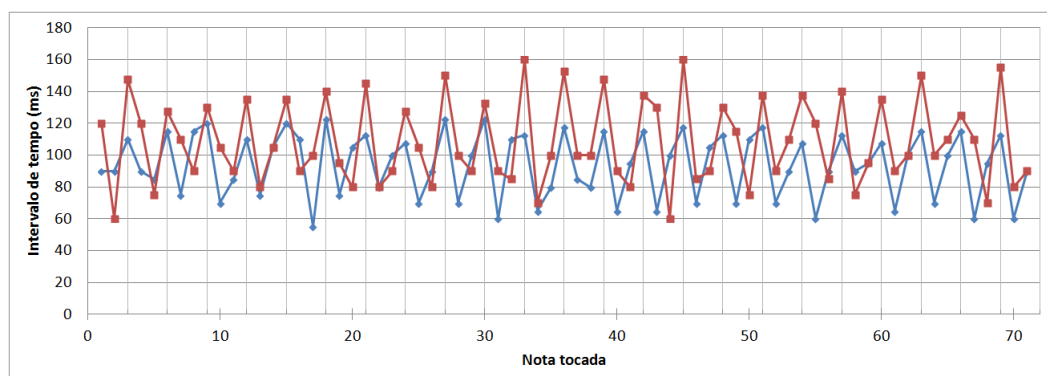


Figura 37: Intervalos de tempo (normalizados) entre ataques na primeira corda do violão.

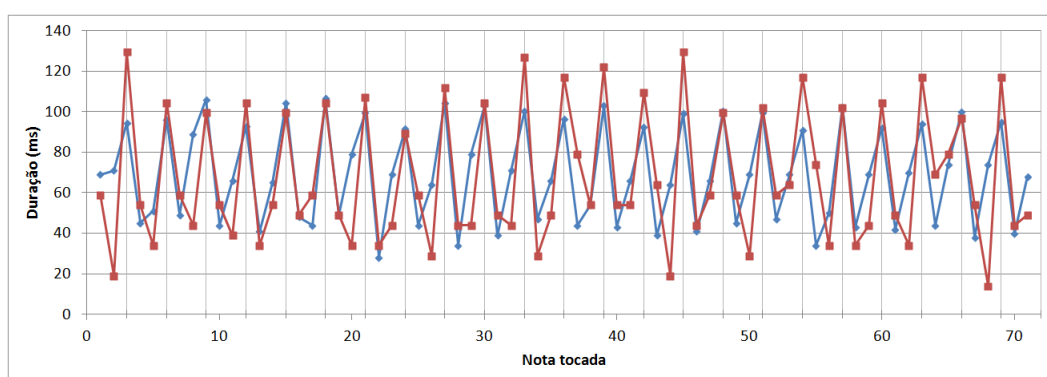


Figura 38: Duração (normalizada) das notas tocadas na primeira corda do violão.

Os gráficos 37 e 38 mostram respectivamente os intervalos de tempo entre ataques e a duração das notas tocadas na corda 1. Para os dois gráficos realizamos a seguinte normalização: entre a última nota de cada sequência de três e a primeira da próxima sequência há sempre uma semifusa que é tocada pelo polegar (melodia), desta forma o intervalo medido é, em geral, o dobro dos outros intervalos; optamos então por dividir o intervalo mencionado por 2 para podermos compará-lo com os demais. Ainda assim, podemos observar nas duas execuções dois intervalos curtos seguidos de um longo, representando cada conjunto de três notas sol aguda que se repetem no trecho selecionado (figura 33).

Calculamos as médias e desvios padrão para os intervalos de tempo entre ataques e as durações das notas tocadas na corda 1 para cada execução. Os dados do músico 1 (curva azul) mostram média de 94 ms entre ataques, com desvio padrão de 20 ms. Mostram também média de 69 ms de duração das notas rápidas, com

desvio de 24 ms. Já os dados do músico 2 mostram, respectivamente, média de 109 ms e desvio de 27 ms para os intervalos entre ataques, e média de 67 ms e desvio de 32 ms para as durações.

Podemos observar nas curvas da figura 37, que o músico 2 possui intervalos maiores entre as notas tocadas, principalmente a última nota sol de cada repetição. Isso está refletido também na duração da mesma nota indicada na figura 38. Esses dois resultados concordam com o gráfico 34 que mostra um andamento geral mais lento na execução do músico 2. É preciso também ressaltar, como já foi observado na seção 1.3.3, que os músicos participantes realizavam diferentes maneiras de extinguir as notas tocadas. Na técnica estudada nessa seção, é necessário que o músico ataque a corda 1 várias vezes em pequenos intervalos de tempo. Dessa forma, a corda apenas começa a vibrar e em seguida é abafada e recebe um novo ataque.

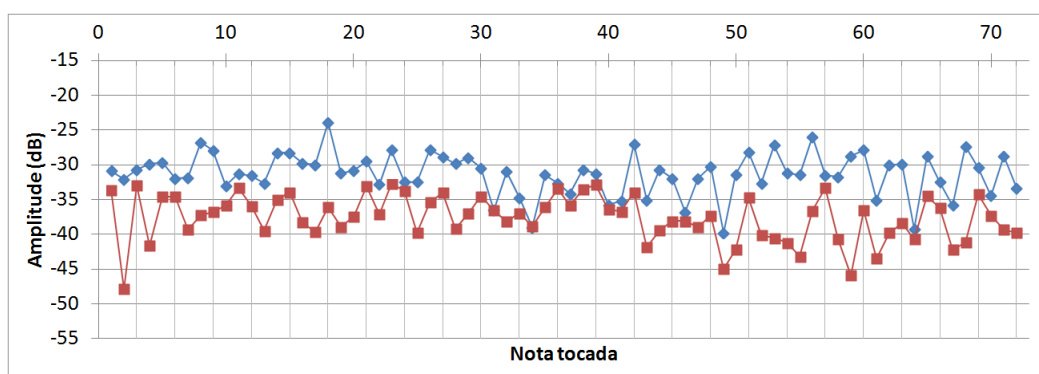


Figura 39: Amplitude das notas tocadas na primeira corda do violão.

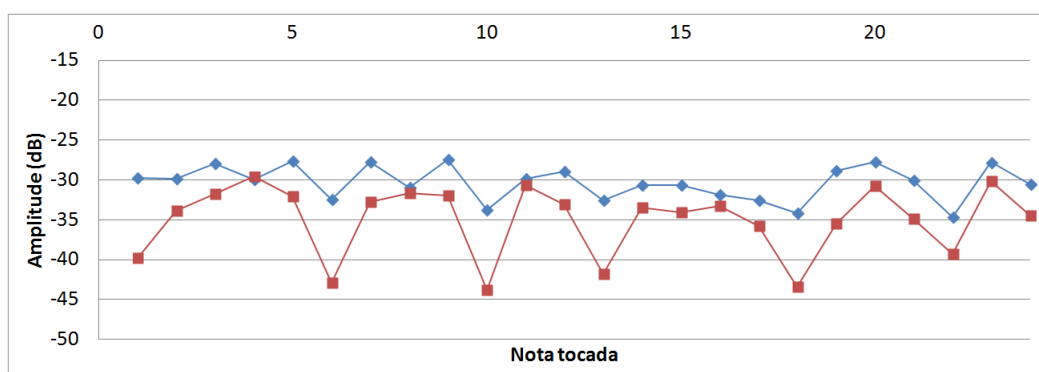


Figura 40: Amplitude das notas que formam a melodia (cordas 2, 3 e 4).

O gráfico apresentado na figura 39 mostra a amplitude das notas tocadas na corda 1 nas duas gravações analisadas. As curvas apresentadas não mostram movimentos de dinâmica aparentes, o que sugere regularidade no controle das amplitudes das notas tocadas. Já a figura 40 mostra as amplitudes das notas da melodia grave indicada na partitura (figura 33). Podemos observar que a curva vermelha (músico 2) representada nesse gráfico possui alguns pontos bastante distintos (intensidades inferiores a -40 dB). Tratam-se dos pontos que representam as notas tocadas na quarta corda do instrumento, ou seja, são as notas mais graves do trecho escolhido. Podemos notar que o músico 2 realiza as notas mais graves do trecho com amplitude menor que as demais notas da melodia apresentada, enquanto o músico 1 as realiza com intensidade próxima à intensidade das notas tocadas nas outras cordas. Esses dados nos sugerem que o músico 1 executou o trecho em 2 estratos: notas graves (melodia) e notas repetidas (acompanhamento), enquanto o músico 2 executou o mesmo trecho em três estratos: baixo (notas mais graves), melodia (notas tocadas nas cordas 2 e 3) e notas repetidas (acompanhamento).

3 *Discussão*

Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento do projeto de pesquisa sobre regularidade e simultaneidade nas técnicas violonísticas de mão direita, realizado no Laboratório de Performances com Sistemas Interativos da Escola de Música da UFMG. Inicialmente discutimos alguns conceitos psicoacústicos pertinentes aos fenômenos sonoros estudados, tanto para ilustrar a complexidade dos problemas propostos como, também, para nos guiar em algumas partes dos experimentos.

Na seção 1.2 descrevemos o funcionamento do sistema que está sendo desenvolvido por nós desde 2011, tendo passado por várias modificações e melhorias, e que tornou possível o trabalho realizado. Por se tratar de um sistema original, não foi possível encontrar nas publicações da área projetos semelhantes que nos guiassem durante seu desenvolvimento. Grande parte das alterações foi resultado do conhecimento empírico alcançado através de experimentos-teste realizados para compreendermos o funcionamento do sistema como um todo. As análises de excertos (apresentados no capítulo 2) mostram a aplicação do sistema, tendo também realizado papel central no refinamento do mesmo.

Na seção 1.3 tratamos dos descritores implementados e utilizados no capítulo 2. A detecção de ataques é a parte do sistema responsável por reconhecer os momentos de ataque ocorridos nas cordas do violão. Em seu funcionamento, esta detecção leva em conta a vibração de cada uma das cordas, estudadas separadamente, em relação à influência das outras. Alguns parâmetros de ajuste são utilizados para refinar o processo e obter maior precisão nos dados. A partir dos dados de detecção de ataques, o sistema também é capaz de estimar a amplitude das notas tocadas e de detectar o momento da extinção das mesmas.

A primeira aplicação do sistema realizada e apresentada (seção 2.1) trata da técnica arpejo. Durante sua execução, desenvolvemos a interface que mostra a amplitude das notas tocadas (figura 16) e a interface para a observação da regula-

ridade rítmica (figura 17), ambas feitas para o uso do sistema em tempo real. Os dados utilizados para a observação da regularidade rítmica nessa seção foram apenas as variações do pulso correspondentes às semibreves, às mínimas e às semínimas. Também foram apontadas influência das mudanças de acorde (pela mão esquerda) nas amplitudes de algumas notas.

O estudo apresentado na seção 2.2 foi o único realizado para o estudo da técnica *plaqué*. O fenômeno da simultaneidade nos chamou a atenção quando percebemos que seria possível observar os ataques separadamente em cada corda e com resolução temporal suficiente para explorar os intervalos de tempo entre notas supostamente simultâneas. A tabela 3 mostra que o maior valor médio de espalhamento encontrado foi 31 ms, referente à execução A1. Esses resultados estão de acordo com os experimentos psicoacústicos de Shirado (SHIRADO; YANAGIDA, 2001), que conclui que eventos separados por menos de 30 ms são percebidos como simultâneos (experimento feito com tons puros). Foi também interessante notar as diferenças entre a maneira como os músicos participantes atacam as cordas do instrumento. Isso está bem representado na figura 21. Os resultados apresentados mostram algumas diferenças entre as gravações analisadas e apontam para a diferenciação entre notas tocadas por dedos diferentes da mão direita. A falta de uniformização dos dedilhados (mãos esquerda e direita) na captação de dados impede conclusões mais gerais sobre os padrões de ordenação e possível controle da condução das quatro vozes da harmonia.

A repetição de notas foi estudada na seção 2.3. Nas duas versões não foram observadas variações significativas no andamento do trecho selecionado. Os gráficos de intervalos de tempo entre ataques corroboram esse resultado, mostrando média de desvio em torno de 10% do valor médio dos intervalos. As figuras que mostram as curvas de amplitude para cada ataque detectado sugerem que o dedo médio *m* ataca com maior força que os demais. Esse efeito fica ainda mais evidente na figura 31. A diferença entre as duas digitações podem ser observadas comparando-se as figuras 31 e 32. No entanto, as mesmas curvas não parecem reproduzir os movimentos expressivos indicados na partitura.

A última análise foi apresentada na seção 2.4 e trata da técnica *tremolo*. Por se tratar de uma técnica executada com velocidade elevada, é possível observar maiores variações no pulso que as observadas no estudo apresentado na seção 2.3. O mesmo acontece com os dados de intervalo de tempo entre ataques, dados es-

ses que apresentaram desvio padrão que atinge 25% da média dos intervalos de tempo nas duas versões apresentadas. Esse valor é muito maior que o valor observado entre os dados similares da análise apresentada na seção anterior (que também trata da repetição de notas, mas em velocidade menor), o que sugere que o aumento da velocidade causa uma diminuição no controle motor da execução. Isso também pode ser notado quando observamos que, os valores dos desvios referentes aos intervalos de tempo entre ataques na primeira corda e duração das notas tocadas na mesma corda, também são maiores nos dados referentes à técnica *tremolo*. Resultados mais consistentes dependem de uma base de dados mais ampla.

Para examinar a irregularidade rítmica observada no quarto estudo de caso (seção 2.4) realizamos ressínteses dos ritmos tocados pelos músicos utilizando apenas *clicks* em cada momento de ataque para representar as notas tocadas. Para os dados de cada músico obtivemos dois arquivos resultantes nesse processo, o primeiro apenas marca o ritmo tocado (com os *clicks*), enquanto o segundo leva em conta o ritmo e as amplitudes das notas tocadas. Embora feito informalmente, quando comparamos aos arquivos originais com as ressínteses, estas soam mais claramente irregulares que os originais. A adição das amplitudes aos ritmos representados apenas com *clicks* também altera a percepção de ritmo do som resultante. Isso nos reforça as observações feitas no capítulo 1, onde salientamos as complexidades envolvidas na avaliação dos estudos a serem realizados.

4 *Conclusão e perspectivas futuras*

Os resultados não mostram um estudo exaustivo das técnicas violonísticas escolhidas, mas sim abre novas possibilidades metodológicas e inicia uma discussão de questões técnico-interpretativas no violão, decorrentes da utilização do sistema desenvolvido.

A falta de um padrão nas análises apresentadas no capítulo 2 reflete a maneira como o projeto foi desenvolvido. O amadurecimento do projeto e as consequentes alterações no programa foram acompanhados também pelo crescimento de nossa confiança no sistema. No decorrer desse processo, nossa exigência na obtenção e análise de dados também aumentou, refletida nas últimas duas análises de excertos apresentadas (capítulo 2).

O aprofundamento nas análises das técnicas descritas neste trabalho merecem nossa atenção futura. O estudo de *tremolos*, por exemplo, indicou irregularidades não esperadas, mas a falta de dados impossibilitou seu estudo aprofundado. Alguns dos aspectos que merecem atenção são as diferentes digitações utilizadas por diferentes músicos quando executam um mesmo trecho musical, a diferença de "força" nos ataques com dedos diferentes, tempos de reação de dedos diferentes, maneiras diversas de produzir a extinção de uma nota etc.

A futura implementação de novos descritores pode ser importante para o aprimoramento do sistema e também para tornar possíveis os estudos de outras técnicas violonísticas. Lembrando ainda que o funcionamento do sistema em tempo real traz a possibilidade da aplicação do sistema como uma ferramenta didática e também como uma interface para aplicações interativas.

Referências

BELLO, J. P. et al. A tutorial on onset detection in music signals. *IEEE Transactions on speech and audio processing*, 2005.

BOERSMA, P.; WEENINK, D. Praat: doing phonetics by computer. *Software versão 5.2.18 baixada em 10/03/2011*. Disponível em: <<http://www.praat.org>>.

CARCASSI, M. *25 Estudos: op. 60*. [S.l.]: Mayence, B. Schott's Söhne, 1852. Partitura. Violão.

CYCLING74. Max, versão 5. Disponível em: <<http://cycling74.com/products/max/>>.

CYCLING74. Soundflower, versão 1.4. Disponível em: <<http://cycling74.com/products/soundflower/>>.

FREIRE, S.; NÉZIO, L.; PIMENTA, R. Descrição de um sistema para estudo das possibilidades articulatórias da mão direita de violonistas. *Anais do XXI Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música, Uberlândia*, p. 1600–1606, 2011.

FREIRE, S.; NÉZIO, L.; PIMENTA, R. Do tocado/escutado ao captado/medido: diferentes níveis rítmicos no estudo nº1 para violão de villa-lobos. *Anais do XXII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música, João Pessoa*, 2012.

FREIRE, S.; NÉZIO, L.; PIMENTA, R. O som *plaqué* no violão: aspectos qualitativos e quantitativos em situação musical. *Anais do IV Seminário Música Ciência Tecnologia: Fronteiras e Rupturas, USP*, p. 125–133, 2012.

FRISSON, C. et al. Multimodal guitar: Performance toolbox and study workbench. v. 2, n. 3, p. 67–84, 9 2009. Disponível em: <<http://www.numediart.org/projects/07-1-multimodal-guitar/>>.

GELFAND, S. *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics, Fifth Edition, Revised and Expanded*. [S.l.]: Informa Healthcare, NEW YORK, 2009.

HAMMIL, T. A.; PRICE, L. L. *The Hearing Sciences*. [S.l.]: Plural Publishing Inc., San Diego, CA, 2008.

- LIMA, E. T. d.; RAMALHO, G. On rhythmic pattern extraction in bossa nova music. *ISMIR*, 2008.
- MOTU. Digital performer. Disponível em: <<http://www.motu.com/>>.
- PEETERS, G. A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the cuidado project. *IRCAM, Analysis/Synthesis Team*, 2004.
- PUCKETTE, M. The patcher. 1988.
- PUCKETTE, M. Max at seventeen. 2002.
- PUCKETTE, M. Patch for guitar. *Pd Convention, Montreal*, p. 1–5, 2007.
- REBOURSIÈRE, L. et al. MultimodalGuitar: a toolbox for augmented guitar performances. Sydney, Australia, June 15-18 2010. Disponível em: <<http://www.numediart.org/projects/07-1-multimodal-guitar/>>.
- REPP, B. Patterns of note onset asynchronies in expressive piano performance. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 100, p. 3917–3932, 1996.
- ROSSING, T. D. *Springer Handbook of Acoustics*. [S.l.]: Springer, Stanford, 2007.
- SHIRADO, T.; YANAGIDA, M. Relationship between off-scale perception and the perception of simultaneity of two pure tones presented almost simultaneously. *Acoustical Science and Technology*, v. 22, n. 3, p. 239–244, 2001.
- TANSMAN, A. *Cavatina*. [S.l.]: Schott & Co, Londres, 1952. Partitura. Violão.
- VILLA-LOBOS, H. *12 Estudos para violão*. 2000.
- WARREN, R. M. et al. Auditory sequence: Confusion of patterns other than speech or music. *Science*, p. 586–587, 1969.
- ZWICKER, H. F. E. Subdivision of the audible frequency range into critical bands (frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 33, n. 2, p. 248, 1961.
- ZWICKER, H. F. E. *Psychoacoustics, Facts and Models*. [S.l.]: Springer, München, 2007.