

# PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADO À ANÁLISE COMPARATIVA DO TIMBRE DE INSTRUMENTOS PRODUZIDOS COM MADEIRAS NACIONAIS E TRADICIONAIS

**Thiago Henrique Lara Pinto, M.Sc., [thiago.lara@ict.ufvjm.edu.br](mailto:thiago.lara@ict.ufvjm.edu.br)**

Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), UFVJM – Campus JK, Diamantina, MG, Brasil

PosEEs, Departamento de Eng. de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG – Campus Pampulha, BH, MG, Brasil

**Olavo Cosme da Silva, Dr., [olavo.cosme@ict.ufvjm.edu.br](mailto:olavo.cosme@ict.ufvjm.edu.br)**

Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), UFVJM – Campus JK, Diamantina, MG, Brasil

**Alexsander Vanzela, [alexvanzela@gmail.com](mailto:alexvanzela@gmail.com)**

Conservatório Estadual de Música Lobo de Mesquita - Diamantina, MG, Brasil

PPG SaSA / UFVJM – Campus JK, Diamantina, MG, Brasil

**Resumo.** *Instrumentos musicais considerados de alta qualidade são, em geral, construídos com o uso de madeiras tradicionais, como maple e mogno, muitas vezes escassas e de alto custo. No Brasil, possuímos opções de madeiras mais acessíveis aos nossos luthiers e, no entanto, de alta qualidade para a produção de instrumentos musicais, como o pau ferro e a braúna. O objetivo deste trabalho é verificar a qualidade do timbre de um instrumento produzido utilizando-se madeiras nacionais, tendo como objeto de estudo a Guitarra AV-1, produzida por um profissional da região e, como base de comparação, propõe-se a utilização de instrumentos renomados encontrados no mercado. Os estudos foram realizados utilizando-se arquivos de gravações realizadas com a guitarra AV-1 e os instrumentos de referência, tentando-se reproduzir detalhes característicos nos diversos instrumentos objetos de estudo. Tais gravações são então convertidas em sinais numéricos e, lançando-se mão de técnicas de processamentos de sinais, podemos identificar características reconhecidas por músicos como sendo uma alta ou baixa qualidade de timbre e, através de análise comparativa, a correlação com o que é observado pelas análises dos sinais provenientes do instrumento construído com madeiras nacionais. De acordo com os resultados de análises sonoras, bem como as opiniões manifestadas por instrumentistas que testaram a guitarra AV-1, podemos afirmar que as madeiras de origem nacional, utilizadas para a fabricação desta guitarra, apresentam uma qualidade semelhante à das madeiras utilizadas em guitarras de renome.*

**Palavras-chave:** *Sistemas dinâmicos, Processamento de sinais, Audio, Timbre, Madeiras nacionais*

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do timbre de um instrumento produzido utilizando-se madeiras nacionais, tendo como objeto de estudo a Guitarra AV-1, produzida por um profissional da região e, como base de comparação, instrumentos renomados encontrados no mercado.

Na construção da guitarra objetivo deste estudo, foram utilizadas as madeiras Pau Pereiro (tampo, braço e headstock); Braúna (escala) e Cedro (corpo). Em estudos anteriores, de posse do modelo AV-1 produzido, foram realizadas pesquisas de opinião com estudantes do curso de música da Universidade Vale do Rio Verde e outras, onde se observou um alto índice de aprovação (Vanzela, 2011).

Propõe-se aqui uma discussão geral destes resultados sob a ótica, e lançando mão de ferramental existente, de engenharia. Para tal, foram realizados ensaios simples, realizados com as cordas soltas e palhetadas, não puxadas, e aquisitados por uma placa de som por meio de um microfone posicionado à frente do amplificador, tendo sido realizado apenas o tratamento padrão da placa, como o anti-aliasing analógico comum para este tipo de equipamento.

## 2. ANÁLISES

Para a gravação dos objetos de estudo das análises realizadas neste trabalho, foi utilizado um amplificador Marshall Valvestate VS 30 R sem efeitos ativos, no qual foram conectadas três guitarras:

- Guitarra AV1, produzida a partir de madeiras de origem nacional;
- Ibanez Sereis S 520 EX, com dois humbucker (INF1 e INF2), chave de 3 posições, cordas 0,09 mm, ponte ZR com ZPS-2.
- Ibanez, modelo Gio RG 220, equipada com dois captadores duplos e um simples, ponte Ibanez patentada da Floyd Rose e cordas 0,09 mm.

No intuito de se reduzir o efeito da posição dos captadores, todas as guitarras foram reguladas de forma a utilizar apenas o o captador humbucker da posição braço durante as gravações.

### 2.1 Pré-processamento

Em estudos envolvendo sistemas dinâmicos, são necessários cuidados quanto a escolha de taxas de amostragem ou mesmo tamanho de janela (quantidade de amostras) de aquisição do sinal no domínio do tempo. Por exemplo, o *Aliasing* é um problema associado à análise espectral digital, causado pela discretização do histórico no tempo (*time-history*) contínuo original Ewins (1984). Pode ser descrito como um fenômeno que ocorre durante a conversão analógica para digital, em que a frequência do sinal convertido é menor que a do sinal original. Isso acontece quando a frequência de amostragem é insuficiente para descrever o sinal, gerando-se um modo irreal, como na Figura 1.

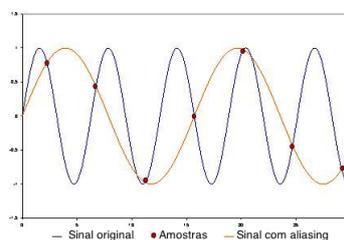


Figura 1. O fenômeno *Aliasing*.

Vale ressaltar que, apesar de um histórico temporal conter, teoricamente, toda a gama de frequências de respostas da estrutura, ao se trabalhar em um domínio de tempo discreto, a faixa de frequência observável depende da taxa de frequência de amostragem. Pelo menos duas medidas por ciclo são necessárias para se definir digitalmente a frequência original de um dado analógico. Assim, para uma dada taxa de aquisição, a frequência de corte máxima é dada pela Equação 1 (Bendat e Piersol (1971)).

$$f_{Nyquist} = \frac{2}{T_{sample}} \quad (1)$$

A frequência de corte máxima, para uma dada taxa de aquisição, é também conhecida como frequência de Nyquist ou de dobramento.

#### 2.1.1 Leakage

O *leakage* (vazamento) é consequência direta da necessidade de se selecionar apenas uma parte finita do *time-history* (Figura 2), juntamente com o fato de se assumir a periodicidade do sinal Ewins (1984). Este efeito ocorre devido ao

truncamento da série de sinais discretos no tempo quando estes são coletados em uma condição na qual a descontinuidade imposta pelo corte faz surgir conteúdos de frequência espúrios, ou seja, inexistentes no sinal de resposta coletado.

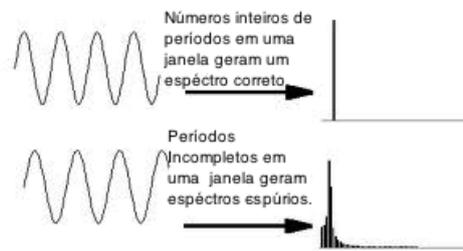


Figura 2. O fenômeno *Leakage*.

Difícilmente o sinal é de tal forma que um número inteiro de ciclos se encaixa no tempo de medição, gerando o espectro de frequências esperado. Assim, o espectro de frequências é ampliado pelas "falhas" nas extremidades na grande maioria dos casos. O problema é agravado pelo fato de o tamanho do pulso aleatório depender de quando a primeira medição ocorreu no ciclo, assim a ampliação pode se alterar se a medição for repetida. Ao analisar uma sequência de dados finita através de Fourier ou outro método de análise espectral, o janelamento pode ser utilizado no intuito de se minimizar o efeito das formas de onda truncadas, reduzindo dessa forma a perda espectral [Andrade e Soares \(2000\)](#).

### 2.1.2 Bias

Se um teste modal for realizado repetidas vezes, os parâmetros modais identificados receberão valores diferentes para cada teste. Se a média destes valores coincide com o valor verdadeiro para um respectivo parâmetro, foi obtida uma estimativa com baixo *bias* [Benini \(2006\)](#). É desejável ter estimativas sem tendências (baixo *bias*) e também baixa variância entre os testes.

A ocorrência de um elevado nível de *bias* pode ser uma indicação de não linearidades no sistema, onde este tipo de erro está ligado à flexibilidade restrita do modelo [Nelles \(2001\)](#) devida a uma representação aproximada do sistema. Contudo, o aumento da ordem do sistema para a minimização do *bias*, aumenta a quantidade de informação necessária para a solução do problema e, desta forma, aumenta a possibilidade de o ruído gerar um alto nível de erro durante otimização de parâmetros.

## 2.2 Janelamento

Durante a análise de sinais, temos a necessidade de realizar o truncamento da série discreta analisada, subdividindo em trechos os sinais, sendo tais subdivisões nomeadas janela. Assim, utilizando-se técnicas de janelamento, é possível definir a duração do período de observação de um sinal amostrado.

Se considerarmos o ruído um sinal aleatório, e sabendo-se que a média de um sinal aleatório tende a zero, podemos concluir que o uso do janelamento possibilita a redução do efeito do ruído ao possibilitar a realização de médias entre os trechos do sinal (janelas). Técnicas de janelamento podem também ser utilizadas para minimizar efeitos como o *leakage* [Ewins \(1984\)](#). Para tal, a função janela utilizada deve ser escolhida de forma que as extremidades de cada recorte do sinal tendam a zero, minimizando assim o efeito do truncamento do sinal.

Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Devido ao fato de a multiplicação no domínio do tempo ser equivalente à convolução no domínio da frequência, o espectro de um sinal janelado é a convolução do espectro do sinal original com o espectro da janela. Dessa maneira, o janelamento modifica a forma do sinal tanto no domínio do tempo quanto no da frequência [Andrade e Soares \(2000\)](#).

### 2.2.1 Janela Hanning

A janela Hanning, utilizada neste trabalho, é uma janela de uso geral comumente indicada para sinais contínuos. Matematicamente, ela pode ser definida pela [Equação 2](#) ([Maia e Silva \(1997\)](#)):

$$W(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right] \implies |t| \leq \frac{T}{2}; \quad W(t) = 0 \implies |t| > \frac{T}{2} \quad (2)$$

A [Figura 3](#) apresenta, graficamente, a janela Hanning no domínio do tempo. Pode-se observar que esta tem seu máximo na metade de seu período ( $t = 0$ ) e mínimos em suas extremidades ( $|t| = \frac{T}{2}$ ).

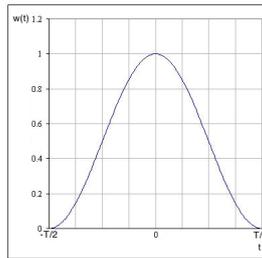


Figura 3. Janela Hanning no domínio do tempo.

Para compensar a distorção produzida no sinal pelo janelamento, é necessário multiplicar a FFT do sinal janelado por um fator de correção. Para a janela Hanning, o fator de correção é dado pela [Equação 3](#). Este fator é composto pela multiplicação entre os fatores responsáveis pela correção da degradação de amplitude (2) e da degradação de energia ( $\sqrt{\frac{8}{3}}$ ) ([Maia e Silva \(1997\)](#)).

$$F_{cor} = 2\sqrt{\frac{8}{3}} \quad (3)$$

### 2.3 Função de Resposta em Frequência (FRF)

A Função Resposta em Frequência, ou FRF, de um sistema pode ser vista como uma função filtro, criada pelo próprio, aplicado à excitação de entrada [Avitabile \(2006\)](#). Esta contém a informação de cada um dos modos de vibração e as frequências de ressonância relacionadas.

Durante a obtenção das FRFs, sinais aleatórios não podem ser tratados da mesma forma que sinais determinísticos devido à sua natureza não periódica [Maia e Silva \(1997\)](#). Desta forma, não é possível calcular a FRF de sinais aleatórios pela simples razão entre entradas e saídas do sistema, mesmo que para isso seja proposto analisar tais sinais como se possuíssem um período infinito, uma vez que tal análise violaria a condição de Dirichlet ([Equação 4](#)).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (4)$$

### 2.4 Densidade Espectral de Potência

Na maioria dos casos práticos, como forma de contornar esta característica, os sinais são considerados estacionários e ergódicos. Assim, considera-se que médias calculadas com base em vários históricos temporais, medidos em um único período de tempo, seriam equivalentes às calculadas com base em vários recortes de um único histórico temporal. Podemos assim definir as funções de auto-espectro e de espectro cruzado como funções que descrevem, em uma faixa de

frequência, o conteúdo energético do sinal.

O auto-espectro do sinal, também conhecido como densidade espectral de potência (PSD ou *Power Spectral Density*), pode ser calculado a partir da transformada discreta de Fourier (DFT) deste sinal, como na [Equação 5](#). Vale ressaltar que a somatória desta equação está implícita devido ao uso da notação indicial de Einstein.

$$S_{xx}(Jf_s/N) = \frac{T}{N} |X(Jf_s/N)|^2 \quad (5)$$

Onde  $X$  é a DFT de  $x$ ,  $f_s/N$  é a frequência de amostragem do sinal,  $N$ , o número de amostras,  $T$ , o período e  $J$  é um número inteiro, variando de 0 a  $N$ , indicando a amostra utilizada para a média realizada durante o cálculo do PSD.

De forma similar, o espectro cruzado entre os sinais de entrada e saída, pode ser definido pela [Equação 6](#).

$$S_{fx}(Jf_s/N) = \frac{T}{N} F^*(Jf_s/N)X(Jf_s/N) \quad (6)$$

Onde o  $*$  sinaliza a utilização do complexo conjugado da função.

Vale ressaltar que o espectro cruzado entre sinais carrega informações relativas à fase e à magnitude da função de transferência do sistema, diferentemente do auto-espectro que, por sua vez, carrega apenas informações relativas à magnitude.

## 2.5 Estimadores de FRF

Embora existam diferentes formas para a obtenção da função de resposta de frequência, o estimador  $H_1$  é a forma mais popular, sendo utilizada na maioria dos testes modais de entrada única realizados hoje [Avitabile \(2002\)](#). O estimador convencional de FRF  $H_1(\omega)$  é indicado para casos onde se considera que haverá um maior nível de ruído no sinal de saída. Este pode ser definido ([Equação 7](#)) como a razão entre o espectro cruzado de entrada e saída pelo auto-espectro da entrada do sinal [Maia e Silva \(1997\)](#).

$$H_1(\omega) = \frac{S_{f^*x}(\omega)}{S_{f^*f}(\omega)} \quad (7)$$

Outra possibilidade de estimador de FRF [Maia e Silva \(1997\)](#),  $H_2(\omega)$ , pode ser obtido pela razão entre o auto-espectro da saída pelo espectro cruzado da entrada e saída do sinal ([Equação 8](#)), sendo indicado para casos onde se considera que haverá um maior nível de ruído no sinal de excitação.

$$H_2(\omega) = \frac{S_{x^*x}(\omega)}{S_{x^*f}(\omega)} \quad (8)$$

Segundo [Olson \(1967\)](#), o auto-espectro típico de uma guitarra tem o aspecto apresentado na [Figura 4](#):

Processando o sinal obtido de gravações realizadas (9 segundos, 16 kHz), onde faz-se a *FFT* e, em seguida, médias de todos os blocos juntos, ([Audacity, 2016](#)), subdivididos em janelas de 512 pontos, podemos obter os seguintes resultados experimentais ([Figura 5](#)):

Comparando-se os resultados obtidos a partir das guitarras estudadas, observa-se uma similaridade com o esperado pelos resultados qualitativos apresentados na literatura. Nota-se a presença de bandas de frequências no lugar dos picos uma vez que um modelo real possui a presença de amortecimento estrutural.

Observa-se ainda que quanto maior a janela utilizada, melhor será a resolução em frequência obtida nos resultados. Contudo, o aumento do tamanho da janela aumenta o espaço de tempo no qual as médias estão sendo realizadas, necessi-

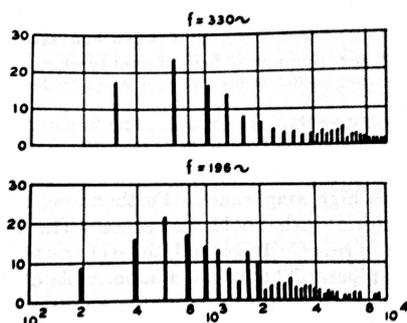


Figura 4. Espectro de frequências típico de uma guitarra.

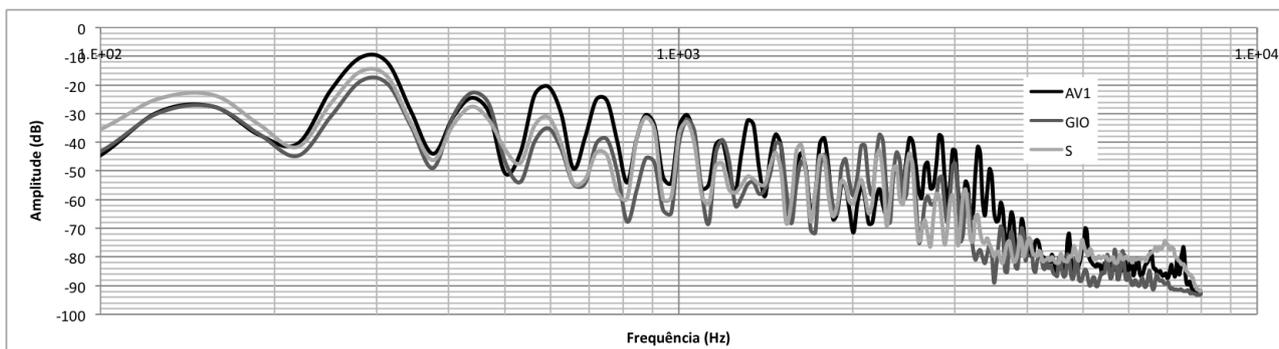


Figura 5. Espectro de frequências medidos nas guitarras estudadas - nota fundamental em 294 Hz.

tando assim de maiores medidas.

### 3. Resultados

Um espectrograma usa a Transformada rápida de Fourier (FFT em sigla em inglês) para exibir as informações de frequência em função do tempo. Há um *trade-off* inerente entre resolução de frequência e tempo de resolução. Janelas menores resultarão em uma melhor resolução em tempo, enquanto janelas maiores, uma melhor resolução em frequência.

Nos resultados apresentados deste trabalho, uma janela Hanning com 2048 pontos foi utilizada no intuito de se privilegiar a resolução em frequência. Esta janela, considerada grande, nos dá ainda a possibilidade de desconsiderar ruídos de curta duração possivelmente presentes nas gravações utilizadas. A Figura 6 apresenta um resultado típico obtido para a guitarra AV1, plotado para a faixa de frequência audível.

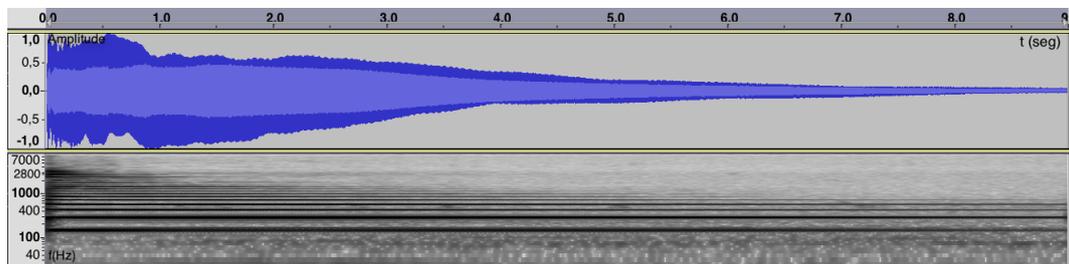


Figura 6. Espectrograma medidos na guitarra AV1 - nota fundamental em 294 Hz - Escala Logarítmica.

A parte superior das imagens apresentadas demonstra o comportamento do sinal, sem artifícios numéricos, durante um intervalo de 9 segundos. A parte inferior, por sua vez, apresenta o espectrograma relativo.

Observa-se que, apesar de termos como convenção o uso da escala logarítmica para resultados de engenharia, o uso de escala melódica, baseada na comparação de tons, facilita a visualização dos resultados por se tratar de uma análise

de um instrumento melódico. A [Figura 7](#) apresenta os mesmos resultados da [Figura 6](#), alterando a visualização para o formato da escala melódica.

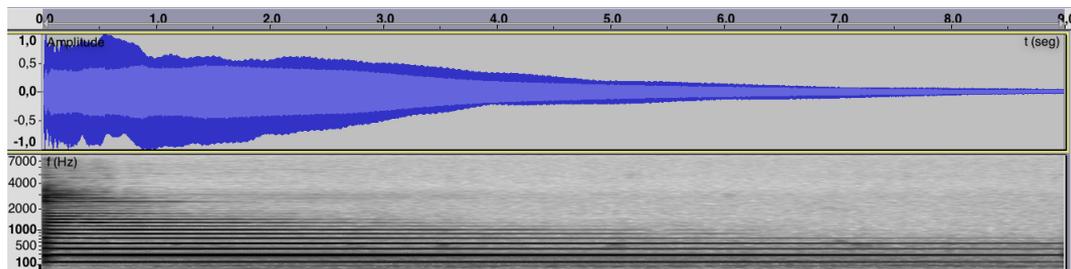


Figura 7. Espectrograma medidos na guitarra AV1 - nota fundamental em 294 Hz - Escala Melódica.

Como base de comparação, são apresentados resultados similares para as guitarras utilizadas como parâmetro de controle. A [Figura 8](#) apresenta resultados típicos, seguindo o mesmo padrão de processamento, para a Ibanez S:

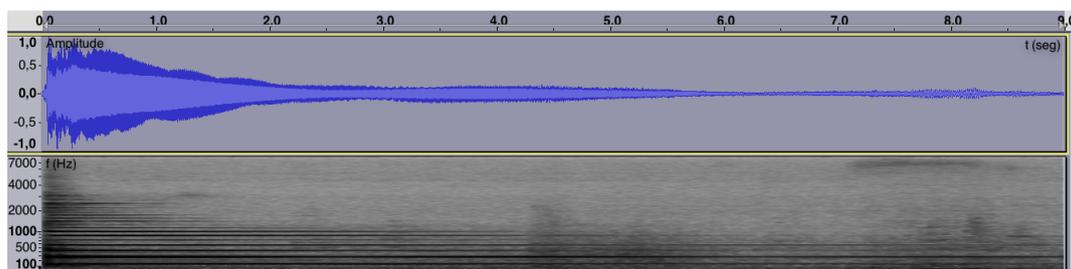


Figura 8. Espectrograma medidos na guitarra Ibanez S - nota fundamental em 294 Hz - Escala Melódica.

Em seguida, a [Figura 9](#), apresenta resultados típicos, novamente seguindo o mesmo padrão de processamento, para a Ibanez GIO:

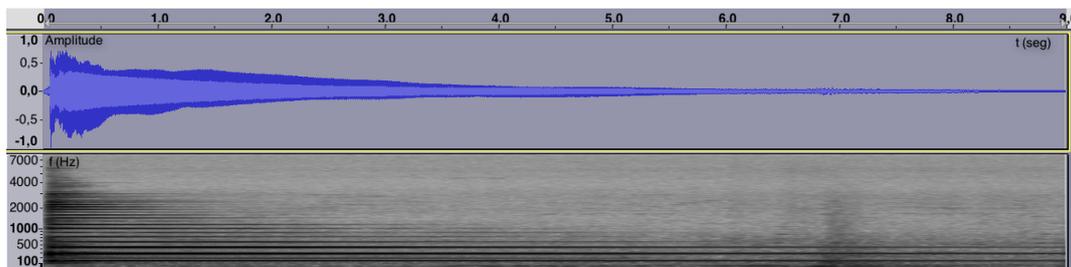


Figura 9. Espectrograma medidos na guitarra Ibanez GIO - nota fundamental em 294 Hz - Escala Melódica.

Pode-se observar uma tendência a uma manutenção da série harmônica durante um maior período de tempo para a Guitarra AV1, contudo, dada a baixa massa estatística de dados utilizada nestes estudos, e o fator humano na excitação do sistema, os resultados são considerados pouco conclusivos. Contudo, observa-se que o modelo proposto apresentou em geral resultados pelo menos similares aos obtidos a partir dos modelos comerciais.

#### 4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados de análises sonoras, bem como as opiniões manifestadas por instrumentistas que testaram a guitarra AV-1, podemos afirmar que existem madeiras de origem nacional que, tal qual as utilizadas para a fabricação desta guitarra, apresentam uma qualidade semelhante à das madeiras utilizadas em guitarras de renome, no entanto, os resultados mostrados neste trabalho ainda estão em um nível bastante incipiente e necessitam de grande avanços para serem considerados conclusivos.

O aumento da base de dados estatísticos, a inserção de padrões de uma guitarras consideradas de baixa qualidade, o uso de filtros controláveis, melhorias no equipamento e processo de gravação, tentativas de padronização de input e estudo da influência de frequências inaudíveis, são algumas das propostas futuras de melhorias e avanços deste trabalho.

Comparando-se os resultados obtidos a partir das guitarras estudadas, observou-se uma similaridade com o esperado pelos resultados qualitativos apresentados na literatura. Pode-se observar ainda, apesar da baixa massa estatística de dados e presença de fatores pouco controlados, uma tendência a bons resultados para a Guitarra AV1, ainda que as guitarras possuam geometrias diferentes, madeira diferentes e, principalmente, a AV-1 seja uma guitarra semi-acústica e não sólida como as utilizadas para comparação. É importante salientar que dado o nível de trabalho artesanal empregado, mesmo guitarras feitas da mesma madeira, e com os mesmos componentes eletrônicos, podem possuir timbres distintos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem ao apoio da *UFVJM*, por meio do programa *PROCARTE*; do *Conservatório Estadual de Música Lobo de Mesquita*; e dos demais integrantes envolvidos no projeto *Física de Instrumentos Musicais*.

## NOMENCLATURA

$f$	frequencia (Hz)	$S_{f \cdot f}$	auto espectro da entrada (IN)
$f_s$	recorte em frequencia (Hz)	$S_{x \cdot x}$	auto espectro da saída (OUT)
$F_{cor}$	fator de correção hanning	$t$	tempo
$H$	função de resposta em frequência (FRF)	$T$	período
$H_1$	estimador convencional de FRF	$W$	função janela
$H_2$	estimador alternativo de FRF	$w$	frequencia ( <i>rad/s</i> )
$p$	período da janela		
$S_{f \cdot x}, S_{x \cdot f}$	espectro cruzado IN-OUT		

## REFERÊNCIAS

- Andrade, A.O. e Soares, A.B., 2000. "Técnicas de Janelamento de Sinais. In: SEMINÁRIO DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFU, 3., 2000, Uberlândia". *Anais...*, pp. 16–18, Uberlândia: UFU.
- Audacity, 2016. *Manual for Audacity 1.2*. online: <http://www.audacityteam.org/>.
- Avitabile, P., 2002. "Modal space - in our own little world: Could you please explain the basic steps to acquire data for modal testing?" *SEM Experimental Techniques*, p. 2.
- Avitabile, P., 2006. "Modal space - in our own little world: What is a good mac value so i know my model is right?" *SEM Experimental Techniques*, p. 2.
- Bendat, J. e Piersol, A., 1971. *Random Data*. Wiley-Interscience, analysis and measurement procedures. New York.
- Benini, G.R., 2006. *Detection and Identification of Nonlinearities for Flight Flutter Testing*. Tese (Doutorado), School of Mechanical, Aerospace & Civil Engineering, University of Manchester, Manchester.
- Ewins, D.J., 1984. *Modal Testing*. Research Studies Press LTD., theory and practice. London.
- Maia, N.M.M. e Silva, J.M.M., 1997. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press, London.
- Nelles, O., 2001. *Nonlinear System Identification*. Springer, from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Berlin.
- Olson, H.F., 1967. *Music, Physics and Engineering*. Dover, NY.
- Vanzela, A. e Trombini, L.M., 2011. "Características timbrísticas entre guitarras elétricas de corpos sólidos e semi-sólidos". *Universidade Vale do Rio Verde - Trabalho de conclusão de curso de licenciatura em música*.

## NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material reproduzido nesse artigo.