

# Análise do Vibrato e Bending na Guitarra Elétrica

Tairone N. Magalhães<sup>1</sup>, Davi A. Mota<sup>1</sup>, Aluizio B. Oliveira<sup>1</sup>, Mauricio A. Loureiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudos do Gesto e Expressão Musical – Escola de Música da UFMG  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Cep: 31270-010 - Belo Horizonte - MG

{tairone, aluizioneto, davimota}@ufmg.br, mauricio@musica.ufmg.br

**Abstract.** *On the electric guitar, vibrato and bending are techniques that, according to common sense, play a key role in a guitarist's playing signature. This work aims at investigating features of vibratos and bendings that differentiate one guitarist from another. Moreover, we propose a model for the categorization of performances composed by four stages: (1) pitch extraction; (2) note segmentation; (3) extraction of descriptors for bending and vibrato; (4) analysis and categorization of performances based on the proposed parameterization. In order to validate the model, we analyzed a set of several performances of two short musical excerpts, performed by 8 guitarists of distinct expertise.*

**Resumo.** *Na guitarra elétrica, o vibrato e o bending são técnicas que, de acordo com o senso comum, tem um papel importante na assinatura do guitarrista. Esse trabalho visa investigar características na execução do bending e do vibrato que diferenciam um guitarrista do outro. Propomos um modelo para a categorização das performances composto de quatro estágios: (1) extração de altura; (2) segmentação de notas; (3) extração de descritores de bending e vibrato; (4) análise e categorização de performances baseada na parametrização proposta. Para validar o modelo, analisamos um conjunto de performances de dois trechos, executadas por oito guitarristas de expertise distinta.*

## 1. Introdução

Na guitarra elétrica, os músicos desenvolvem, em grande parte, uma linguagem musical muito pessoal e característica. De acordo com [Méndez, 2012], ouvintes são capazes de distinguir claramente as manipulações de propriedades sonoras realizadas por guitarristas, e criam preferências baseadas nessas diferenças. É possível até mesmo reconhecer um guitarrista ouvindo apenas alguns compassos de uma performance. De acordo com o senso comum, o *vibrato* e o *bending* exercem um papel importante na assinatura do guitarrista, principalmente em estilos como o rock e o blues, em que tais técnicas são amplamente utilizadas. Em ambos recursos o instrumentista possui controle direto e contínuo da altura do som produzido, como em um instrumento de corda sem trastes ou na voz. Segundo [Grimes, 2014], o timbre e o vibrato de um guitarrista podem ser fortemente intrínsecos ao instrumentista, o que tornaria sua sonoridade tão particular quanto o timbre vocal. Diante de tal panorama, identificou-se a possibilidade de se promover um estudo sistemático do emprego de tais técnicas em performances na guitarra, com o objetivo de avaliar se é mesmo possível detectar uma assinatura ou categorizar performances baseado nos perfis de bending e vibrato empregados pelo músico.

### 1.1. O Vibrato

O vibrato é um tipo de modulação periódica muito utilizada como recurso expressivo em instrumentos musicais e no canto. Em uma nota com vibrato, o som pode variar de três

diferentes formas [Fletcher, 2001]: amplitude, frequência e timbre<sup>1</sup>. São utilizados três parâmetros para representar a modulação [Seashore, 1917]: taxa, extensão e forma. De acordo com [Desain et al., 1999], a taxa de vibrato geralmente gira entre 6 e 7 Hz, mas ela pode variar de 4 a até 12 Hz. A extensão varia de 0,2 a 0,35 semitons em instrumentos de corda, e 0,6 a 2 semitons no canto [Timmers and Desain, 2000]. O vibrato é muito utilizado para dar ao som mais “profundidade” e “sustentação”, e para fazê-lo se destacar do restante do espaço sonoro [Jarvelainen, 2002]. Na guitarra o vibrato é produzido alterando-se ciclicamente a tensão de corda, por meio do deslocamento da corda na direção transversal ou longitudinal<sup>2</sup>.

## 1.2. O Bending

Utiliza-se o termo *bending*, *pitch bending* ou simplesmente *bend* para se referir a essa técnica. De acordo com [Chen et al., 2009], o bending se refere ao ajuste da altura de uma nota musical. Geralmente representa uma variação suave em altura, e pode incluir portamento ou glissando, que se refere a uma variação de altura de uma nota para outra. Similar ao vibrato, o bending é realizado por meio de um deslocamento da corda de sua posição de equilíbrio, na direção transversal à mesma, utilizando o dedo que pressiona a corda entre os trastes. O uso da técnica possibilita ao músico incorporar características microtonais em sua performance [Grimes, 2014].

## 2. Metodologia

O estudo proposto neste trabalho engloba as seguintes etapas:



Figura 1: Diagrama Metodologia

A análise das gravações, segmentação e extração de descritores foram realizadas utilizando a ferramenta Expan [Campolina et al., 2009], que foi ampliada e reestruturada durante a execução deste trabalho. Foram necessárias algumas correções manuais nas segmentações realizadas pela ferramenta. Tais ajustes foram feitos utilizando o software Sonic Visualizer [Cannam et al., 2010], que facilita a navegação pelos arquivos de áudio e marcação dos pontos da segmentação.

### 2.1. Experimento

O experimento contou com a participação de oito guitarristas, tocando dois excertos de duas composições distintas. O primeiro excerto, extraído de *Still Got The Blues*, de Gary Moore (figura 2), foi escolhido por possuir notas executadas com vibratos e bendings de diferentes durações, compreendendo intervalos distintos. O excerto possui ainda ocorrências de notas finalizadas no meio do bending (com a corda ainda esticada) enquanto outras só terminam quando a corda retorna à sua posição inicial (e consequentemente à altura inicial). O segundo excerto (figura 3), composto pelo autor TNM, contém cinco notas de diferentes durações com bendings de um e meio tom, e três notas com vibrato.

<sup>1</sup>Em teoria, as três formas de vibrato citadas acima podem existir isoladamente ou combinadas, mas na prática o que se observa, em geral, é que elas ocorrem simultaneamente, cada uma delas em menor ou maior quantidade, dependendo do contexto e do instrumento.

<sup>2</sup>O vibrato longitudinal é mais comumente utilizado no violão clássico.

Os guitarristas gravaram quatro vezes cada um dos excertos. As partituras foram enviadas com antecedência aos sujeitos para o seu estudo. Todos os músicos tocaram no mesmo instrumento e utilizaram a mesma configuração para captura e monitoração da performance. Foi utilizado um *direct box*, que possibilita o envio do sinal direto da guitarra para a interface de áudio, ao mesmo tempo que ele é enviado para um pedal de *overdrive*, e em seguida para o amplificador de guitarra. Assim, capturamos o som limpo da guitarra enquanto o músico ouvia o som processado pelo pedal. A decisão de utilizar o pedal de *overdrive* foi tomada por este ser um efeito muito utilizado no rock e no blues.

Figura 2: Excerto 1 - *Still Got The Blues*, de Gary Moore

Figura 3: Excerto 2 - composto pelo autor TNM

## 2.2. Detecção da frequência fundamental e dos harmônicos

A detecção de frequências foi feita utilizando uma FFT (*Fast Fourier Transform*) de 65536 pontos ( $2^{16}$ ) utilizando uma janela de *hamming* de tamanho 2048 aplicada ao sinal de áudio com um salto de 512 amostras. Todos os sinais de áudio analisados foram gravados à taxa de amostragem de 44100 Hz, o que resulta em uma resolução de frequência de aproximadamente 0.67 Hz.

Para cada quadro de análise  $k$ , o algoritmo de detecção de frequência fundamental busca os picos proeminentes no espectro do sinal, que são escolhidos como candidatos à frequência fundamental. Para cada candidato, são calculados e localizados os seus prováveis harmônicos dentro de uma faixa de tolerância de 6%. O candidato que possuir

a maior energia harmônica  $E_H$  (equação 1) é escolhido como o candidato mais provável à frequência fundamental do quadro.

$$E_H(k) = \sum_{h=1}^N a_h(k)^2 \quad (1)$$

onde  $a_h$  é a magnitude da  $h$ -ésima componente harmônica (para um total de  $N$  harmônicos) e  $Re_i$  a magnitude da  $i$ -ésima componente espectral do quadro (para uma FFT de tamanho  $L$ ).

Calcula-se em seguida, utilizando o candidato escolhido, a ruídosidade  $R(k)$  do quadro (tradução do termo *noisiness*, do inglês) [Peeters et al., 2011] e realiza-se uma última verificação:  $R(k)$  deve estar abaixo de um limiar estabelecido empiricamente para que o candidato seja selecionado como a frequência fundamental. Caso ele não cumpra esse requisito, considera-se que o quadro não possui uma frequência fundamental definida. O descritor de ruídosidade  $R(k)$  é calculado, para o  $k$ -ésimo quadro de análise através da equação:

$$R(k) = \frac{E_N(k)}{E_T(k)} \quad (2)$$

$$E_N(k) = E_T(k) - E_H(k) \quad (3)$$

$$E_T = \sum_{i=1}^L Re_i^2 \quad (4)$$

onde,  $E_N(k)$  é a energia do ruído existente e  $E_T(k)$  a energia total para o mesmo quadro de análise. A energia total  $E_T$  é a soma das energias de todas as componentes da FFT. A energia do ruído  $E_N$  é a energia das componentes não-harmônicas do sinal, ou seja, a energia total da FFT menos a energia das componentes harmônicas  $E_H$ .

### 2.3. Segmentação

Para a análise pretendida do vibrato e do bending, as gravações realizadas no experimento foram segmentadas a partir da detecção dos instantes de início (*onset*) e fim (*offset*) de cada nota, assim como dos períodos de estabilidade da frequência (sustentação da nota).

#### 2.3.1. Início e fim de nota

Para detecção dos inícios de nota, foi desenvolvido um algoritmo de segmentação utilizando valores de *ruídosidade* e *energia RMS* do sinal. A curva  $R$  do descritor de ruídosidade (equação 2) tende a ficar próxima de 1 quando o conteúdo harmônico do sinal é baixo, como por exemplo, em instantes de silêncio ou de transição entre notas. Ao longo da sustentação da nota, o valor da ruídosidade do sinal deverá diminuir, devido à energia harmônica mais significativa nesta região. Portanto, a curva  $R$  é eficaz para detectar os transientes do sinal, desde que os trechos de baixa energia, correspondentes às pausas, sejam descartados. Para isso, utilizamos a curva de RMS:

$$RMS(k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x(n)^2} \quad (5)$$

Ao invés de trabalhar com um limiar fixo na curva de RMS, utilizamos o próprio valor de RMS para modular o descritor de ruidosidade, obtendo assim a curva  $S$ :

$$S(k) = RMS(k) \times R(k) \quad (6)$$

Os candidatos prováveis de instantes de início de nota são estimados pelos picos da curva da derivada de  $S$ . Para a detecção dos instantes de fim de nota, utilizamos um algoritmo simples aplicado à informação de energia RMS do sinal.

### 2.3.2. Região de sustentação da nota

No início de uma nota existe um curto período de transientes (ataque) em que há um alto grau de componentes não-periódicas. Nessa região, a curva da frequência fundamental tende a ser ruidosa e imprecisa. O mesmo tende a ocorrer próximo ao final da nota, principalmente quando se executam notas ligadas (muitas vezes devido a notas consecutivas apresentarem uma leve superposição, por serem tocadas em cordas diferentes). Para contornar este problema, convencionamos que o início da região de sustentação é o instante em que a frequência fundamental se estabiliza, após o início da nota. Similarmente, o final da sustentação se dá quando a curva de frequência fundamental se torna instável, antes do final da nota. Verificamos que, nos períodos de instabilidade da curva de frequência fundamental, geralmente frequências bem mais baixas do que a da fundamental são detectadas. Assim, definimos um limiar de desvio de frequência para garantir que o algoritmo não descartasse regiões de bending. Os instantes de início e final da região de sustentação foram estimados pelo primeiro e o último ponto da curva de frequência fundamental em que o desvio em relação à frequência da nota tocada  $f_n$  é menor do que 3 semitons. Neste estudo, as análises dos dados obtidos das curvas de frequência fundamental consideram apenas as regiões de sustentação da nota.

### 2.4. Descritor de vibrato

Para calcular a extensão e taxa do vibrato, foi desenvolvido um algoritmo baseado na detecção de regularidade dos picos da curva de frequência fundamental de uma nota. O período de um ciclo de vibrato é o intervalo de tempo entre dois picos locais consecutivos na curva, e a extensão a diferença de altura entre pontos de mínimo e máximo consecutivos. A existência de vibrato foi considerada quando a taxa estiver entre 2 e 10 Hz e a extensão acima de um limiar de 0.5% do mínimo local de frequência. O valor de 0.5% foi escolhido por aproximação à curva do limiar de discriminação de modulação em frequência, que na região de médios gira entre 0.4% e 0.6%, de acordo com [Sek and Moore, 1995].

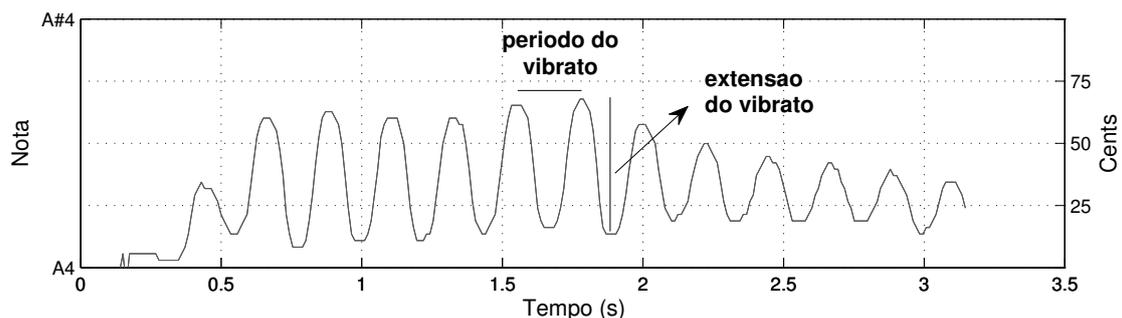


Figura 4: Curva de frequência fundamental para uma nota com vibrato tocada na guitarra.

Para caracterizar o vibrato foi definido um descritor multidimensional de 12 dimensões, estimadas como se segue:

1. regularidade da taxa do vibrato;
2. regularidade da extensão do vibrato.
3. média da taxa do vibrato;
4. média da extensão do vibrato.
5. máximo da taxa do vibrato;
6. mínimo da taxa do vibrato;
7. máximo da extensão do vibrato;
8. mínimo da extensão do vibrato;
9. instante em que a extensão do vibrato atinge seu máximo<sup>3</sup>;
10. tempo até o início do vibrato<sup>3</sup>;
11. tempo até o final do vibrato<sup>3</sup>;
12. perfil da extensão do vibrato.

#### 2.4.1. Regularidade do vibrato

A regularidade do vibrato representa o quanto a extensão e a taxa de oscilação se mantêm regulares ao longo da nota. Sejam as curvas  $r_v(l)$  e  $d_v(l)$  que representam a taxa e extensão do vibrato, respectivamente, para cada ciclo de vibrato  $l$ , sendo  $1 \leq l \leq C$ , sendo  $C$  o número de ciclos do vibrato. A regularidade da taxa e da extensão do vibrato foram estimadas pelas equações (7) e (8) respectivamente.

$$R_d = 1 - \frac{\sum_{l=2}^C |d_v(l) - d_v(l-1)|}{\sum_{l=1}^C d_v(l)} \quad (7)$$

$$R_r = 1 - \frac{\sum_{l=2}^C |r_v(l) - r_v(l-1)|}{\sum_{l=1}^C r_v(l)} \quad (8)$$

Os valores de  $R_d$  e  $R_r$  tendem a 1 para vibratos regulares em extensão e taxa, respectivamente, enquanto que para vibratos irregulares, estes valores tendem a zero.

#### 2.4.2. Valores médio, máximo e mínimo do vibrato

Os valores médio, máximo e mínimo da taxa e extensão do vibrato foram estimados nos trechos onde a existência de vibrato foi detectada, assim como o instante em que a extensão do vibrato atinge seu valor máximo.

#### 2.4.3. Tempo até o início e o final do vibrato

Os tempos até o início e o fim do vibrato foram definidos como os intervalos de tempo entre o início da nota e o início e o final do vibrato, respectivamente.

#### 2.4.4. Perfil da extensão do vibrato ao longo da nota

O perfil da extensão do vibrato definido como o coeficiente angular  $\alpha$  da regressão linear da curva da extensão do vibrato, descreve a evolução temporal da extensão do vibrato. Valores positivos correspondem a vibratos com extensão crescente e negativos para extensão decrescente.

<sup>3</sup>Normalizados em relação à duração do período de sustentação da nota.

## 2.5. Descritor de bending

Para extrairmos informações referentes ao bending, é necessário detectar quando um bending é realizado em uma nota, e determinar o seu início e fim. Seja  $\mathcal{P}(k)$  o valor da frequência fundamental do quadro  $k$ . Primeiramente, arredonda-se cada valor  $\mathcal{P}$  para a altura temperada mais próxima, obtendo-se a curva  $\mathcal{P}_r$ . A partir dessa curva arredondada, detecta-se o ponto  $k_s$  em que ocorre a primeira transição de altura no sentido ascendente ( $\mathcal{P}_r(k) > \mathcal{P}_r(k-1)$ ) e o ponto  $k_d$  da última transição no sentido descendente ( $\mathcal{P}_r(k) < \mathcal{P}_r(k-1)$ ). Aplica-se então à curva  $\mathcal{P}$  um filtro passa-baixas com frequência de corte em 20 Hz, e obtém-se a curva  $\mathcal{P}_f$ . Para detectar os instantes de início e final da subida do bending, localiza-se o primeiro ponto à esquerda e à direita de  $k_s$  em que a derivada de  $\mathcal{P}_f$  inverte de sinal. A mesma abordagem é adotada para a descida do bending, partindo do ponto  $k_d$ .

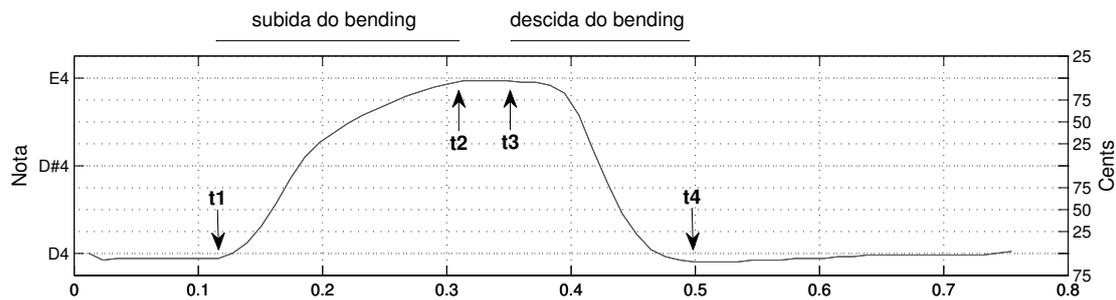


Figura 5: Curva de frequência fundamental para uma nota tocada com bending na guitarra.

Para caracterizar o bending foi também definido um descritor multidimensional de 12 dimensões, estimadas como se segue:

1. velocidade média do bending na subida;
2. velocidade média do bending na descida;
3. valor da velocidade instantânea máxima do bending na subida;
4. instante da velocidade instantânea máxima do bending na subida<sup>4</sup>;
5. valor da velocidade instantânea máxima do bending na descida;
6. instante da velocidade instantânea máxima do bending na descida<sup>4</sup>;
7. centróide temporal da altura na subida do bending;
8. centróide temporal da altura na descida do bending;
9. instante de início da curva de subida do bending<sup>4</sup>;
10. instante de fim da curva de subida do bending<sup>4</sup>;
11. instante de início da curva de descida do bending<sup>4</sup>;
12. instante de fim da curva de descida do bending<sup>4</sup>.

### 2.5.1. Velocidade média do bending e velocidade instantânea máxima do bending

A velocidade média do bending pode ser calculada tanto para a subida quanto para a descida da curva de frequência fundamental através da equação:

$$v = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (9)$$

Para o cálculo da velocidade instantânea máxima do bending primeiramente aplicamos um filtro passa-baixas a 20 Hz na curva de frequência fundamental  $f(t)$ , onde  $t$

<sup>4</sup>Normalizados em relação à duração do período de sustentação da nota.

representa o número da amostra. Calculamos então a derivada para obtermos a taxa de variação instantânea da frequência fundamental  $i(t)$ .

$$i(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (10)$$

O pico da curva  $i(t)$  é o ponto de velocidade máxima do bending na sua subida. O vale da mesma curva é o ponto de velocidade máxima na descida. O valor da velocidade máxima na descida é o módulo da taxa encontrada para este ponto.

### 2.5.2. Centróide temporal da altura no bending

O centróide temporal da energia de uma nota é um descritor bastante utilizado em pesquisas de timbre. Neste trabalho, propomos a utilização de um centróide de altura, que é o centro de gravidade da curva de altura da nota. Seja  $p(t)$  uma curva da frequência fundamental ao longo do tempo  $t$ . O centróide temporal da altura  $c$  calculado para tal curva entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  será:

$$c = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} p(t)t}{\sum_{t=t_1}^{t_2} p(t)}, \quad (11)$$

Para calcular o centróide temporal da altura para os trechos de subida e descida do bending, basta utilizar a equação 11 duas vezes: uma limitada pelos pontos de início e fim da subida e outra pelos pontos de início e fim da descida do bending.

### 2.5.3. Extensão do bending

A extensão do bending é calculada a partir da diferença de altura entre o ponto que o bending termina e o ponto em que ele se inicia.

## 2.6. Análise e categorização dos dados

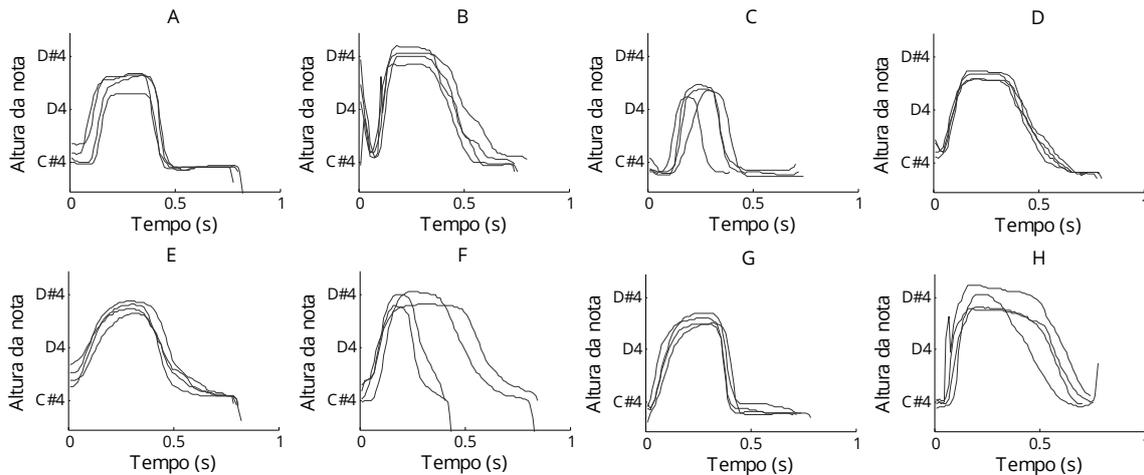
Mapas Auto-Organizativos de Kohonen (SOM - Self-Organizing Maps) são um tipo de redes neurais não-supervisionadas capazes de realizar um mapeamento de dados de entrada de grandes dimensões em espaços de baixa dimensão, preservando as relações topológicas dos dados originais. Assim, dados de entrada com maior grau de similaridade são exibidos próximos uns aos outros no mapa. Por ser um método de classificação não-supervisionado, pode ser utilizado para classificar e agrupar dados de entrada desconhecidos [Kohonen, 1995]. Utilizamos neste trabalho uma implementação do SOM na plataforma Matlab chamada *SOM Toolbox* [Vesanto et al., 1999], desenvolvida no Laboratório de Computação e Ciência da Informação (CIS) da Universidade de Tecnologia de Helsinki, na Finlândia.

Para realizar a análise e categorização dos dados, foram gerados Mapas Auto-Organizativos a partir dos parâmetros extraídos das performances gravadas. O objetivo foi criar um mapa que represente a similaridade na forma de se realizar bending e vibrato nas diferentes performances.

## 3. Resultados

A figura 6 mostra as curvas de frequência fundamental das quatro execuções da nota 18 do excerto 1, realizadas por cada um dos oito guitarristas gravados (cada letra de A a

H representa um músico). As curvas revelam a consistência na maneira de realizar o bending, sugerindo a existência de uma assinatura associada ao perfil do bending de cada guitarrista.



**Figura 6: Curva de altura da nota 18 do excerto 1 tocada por oito guitarristas.**

Aplicamos o descritor de bending proposto à nota 18 do excerto 1, e geramos em seguida um mapa (SOM) com o objetivo de avaliar como o sistema categoriza as diferentes execuções de tal nota pelos sujeitos gravados. Os resultados são mostrados na figura 7. Como se pode ver, as notas executadas por um mesmo sujeito tendem a se posicionar na mesma região do mapa. Os sujeitos G e E por exemplo, tiveram suas execuções agrupadas em uma única célula do mapa.

Para avaliar a categorização do vibrato, aplicamos o descritor de vibrato proposto à nota 22 do mesmo excerto. A figura 8 mostra o mapa gerado para a nota 22. Os sujeitos C, D e E tiveram seus vibratos agrupados em uma mesma unidade do mapa, enquanto os sujeitos B, F e G apresentaram um espalhamento significativo. Os sujeitos A e H tiveram três notas agrupadas em regiões próximas, e um valor atípico cada (A1 e H3).

Tais gráficos sugerem que o sistema é capaz de representar razoavelmente as similaridades entre bendings e vibratos de notas tocadas em um mesmo contexto musical. Pelo fato de tais gráficos terem sido gerados para notas isoladas de uma performance, é de se esperar que hajam valores atípicos e que os agrupamentos não representem exatamente a assinatura musical dos indivíduos. Afinal, uma nota isolada pode não ser suficiente para se identificar a assinatura de um sujeito.

Processamos então todas as notas que possuem vibrato ou bending nos excertos 1 e 2, e após extrair os descritores referentes a cada técnica, geramos um mapa com as suas informações combinadas. Portanto, o mapa gerado para cada excerto representa a caracterização das performances gravadas com base nos descritores de bending e vibrato, conjuntamente. Como já se esperava, a integração de ambos os descritores e a aplicação dos mesmos a várias notas de uma performance, tendem a gerar representações muito mais razoáveis das assinaturas dos sujeitos do que se tinha com notas isoladas (figuras 9 e 10).

#### 4. Conclusão

Os resultados deste trabalho reforçam a hipótese de que a forma de se realizar o bending e o vibrato exercem um papel fundamental na assinatura de um guitarrista. Afinal, o sistema desenvolvido se mostrou capaz de agrupar performances com perfis similares de execução dessas técnicas a partir dos parâmetros extraídos, e em alguns casos, de agrupar

performances do mesmo sujeito em uma única unidade dos mapas gerados. Os próximos passos deste trabalho serão: (1) avaliar a possibilidade de aplicar outros métodos de agrupamento e classificação aos dados; (2) investigar quais as dimensões dos descritores são mais importantes na separação de indivíduos; (3) avaliar a robustez dos descritores desenvolvidos e o quanto eles são generalizáveis para diferentes contextos musicais; (4) avaliar se os mapas de gerados possuem relação com a percepção de similaridade entre as diferentes performances; e (5) melhorar o método de detecção de frequência fundamental com o objetivo de reduzir os valores atípicos encontrados.

## 5. Agradecimentos

Agradecemos às agências brasileiras de fomento à pesquisa, CAPES, CNPq e FAPEMIG, e também ao Programa de Pós-Graduação em Música da UFMG pelo apoio.

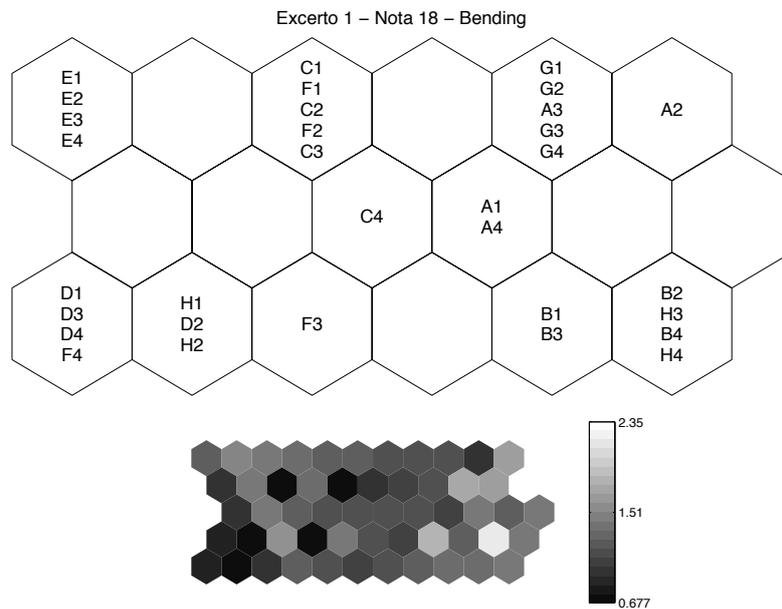


Figura 7: Mapa das diferentes execuções da nota 18 do excerto 1 (nota com bending).

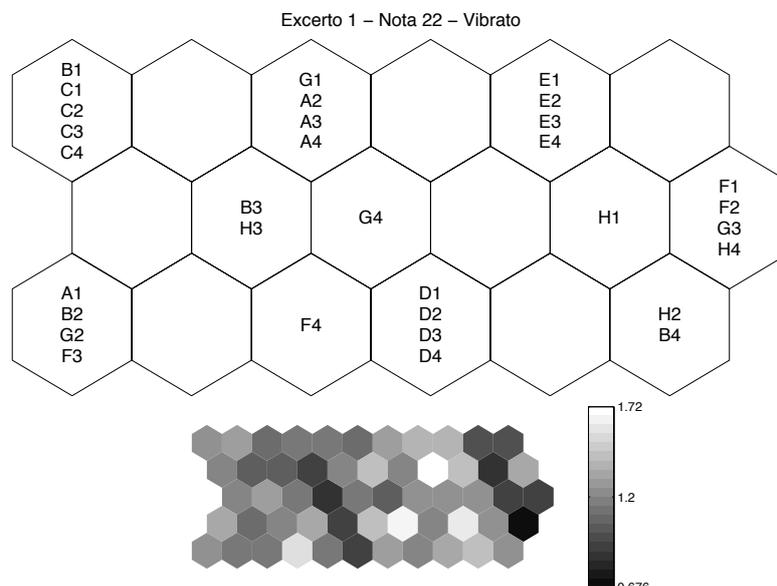
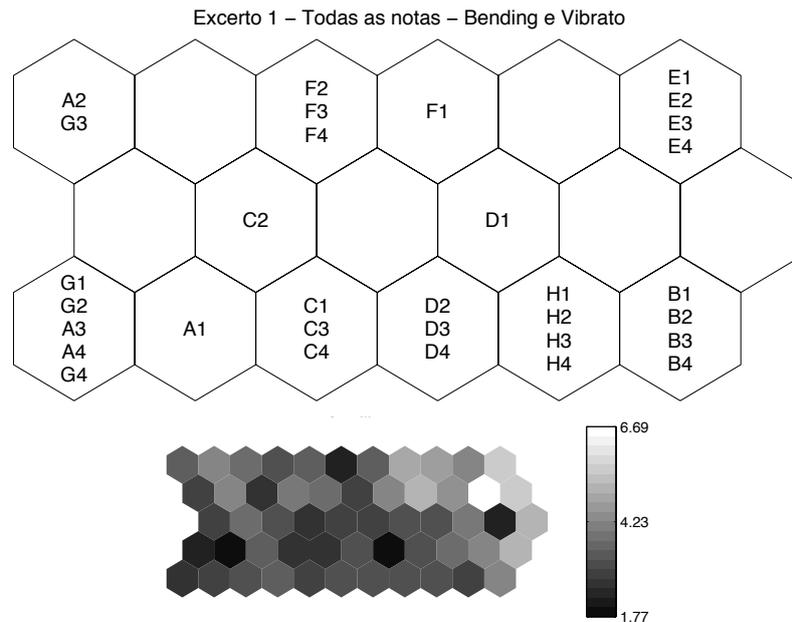
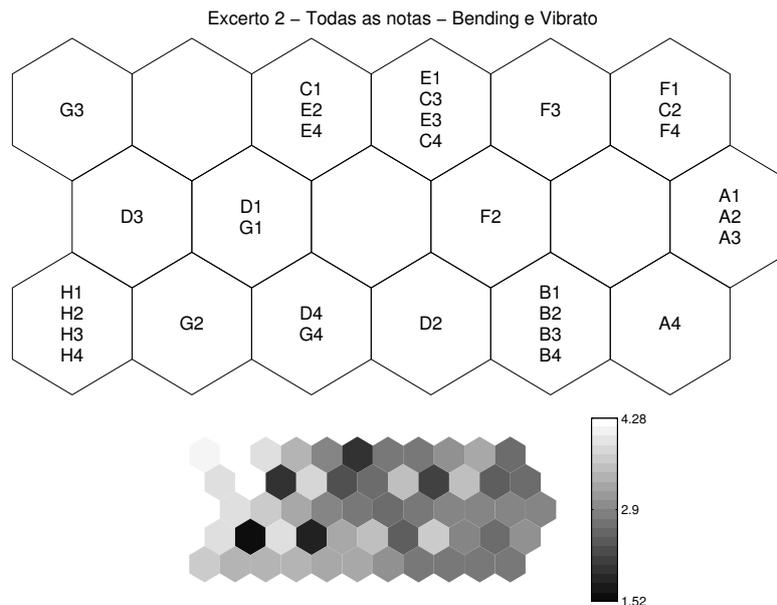


Figura 8: Mapa das diferentes execuções da nota 22 do excerto 1 (nota com vibrato).



**Figura 9:** Mapa gerado para as performances do excerto 1 utilizando todas notas com bending (4, 5, 11, 12, 17 e 18) e todas com vibrato (7, 13, 19 e 22).



**Figura 10:** Mapa gerado para as performances do excerto 2 utilizando todas as notas com bending (4, 8, 9, 17 e 19) e todas com vibrato (5, 18 e 20).

## Referências

- Campolina, T., Mota, D., and Loureiro, M. (2009). Expan: a tool for musical expressiveness analysis. In Naveda, L., editor, *Proceedings of the 2nd International Conference of Students of Systematic Musicology*, pages 24–27. IPEM.
- Cannam, C., Landone, C., and Sandler, M. (2010). Sonic visualiser an open source application for viewing, analysing, and annotating music audio files. In *Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference*, pages 1467–1468.
- Chen, J.-M., Smith, J., and Wolfe, J. (2009). Pitch bending and glissandi on the clarinet: roles of the vocal tract and partial tone hole closure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3):1511–1520.

- Desain, P., Henkjan, H., Rinus, A., and Renee, T. (1999). Rhythmic aspects of vibrato. In Desain, P. and Windsor, L., editors, *Rhythm Perception and Production*, number 2000, pages 203–216. Swets & Zeitlinger.
- Fletcher, N. (2001). Vibrato in music. *Acoustics Australia*.
- Grimes, D. R. (2014). String theory - the physics of string-bending and other electric guitar techniques. *PloS one*, 9(7):e102088.
- Jarvelainen, H. (2002). Perception-based control of vibrato parameters in string instrument synthesis. *Proc. International Computer Music Conference*, (September):287–294.
- Kohonen, T. (1995). *Self-Organizing Maps - Springer Series in Information Sciences*. Springer Verlag.
- Méndez, S. I. G. (2012). *Modeling Embellishment , Duration and Energy Expressive Transformations in Jazz Guitar*. PhD thesis.
- Peeters, G., Giordano, B., Susini, P., Misdariis, N., and McAdams, S. (2011). The timbre toolbox: extracting audio descriptors from musical signals. 130(5).
- Seashore, C. (1917). The natural history of the vibrato. 3:141–147.
- Sek, A. and Moore, B. C. (1995). Frequency discrimination as a function of frequency, measured in several ways. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(4):2479–2486.
- Timmers, R. and Desain, P. (2000). Vibrato: questions and answers from musicians and science. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Music Perception and Cognition*, volume 2.
- Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., and Parhankangas, J. (1999). Self-organizing map in matlab: The som toolbox. *Proceedings of the Matlab DSP conference*, 99.