

Tairone Nunes Magalhães

**Análise do bending e do vibrato na guitarra
elétrica a partir dos descritores de
expressividade da ferramenta Expan**

Belo Horizonte

2015

Tairone Nunes Magalhães

Análise do bending e do vibrato na guitarra elétrica a partir dos descritores de expressividade da ferramenta Expan

Dissertação apresentada ao curso de mestrado da Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em música. Área de concentração: Sonologia.

Orientador: Prof. Mauricio A. Loureiro

Belo Horizonte

2015

M189a Magalhães, Tairone Nunes

Análise do bending e do vibrato na guitarra elétrica a partir dos descritores de expressividade da ferramenta Expan / Tairone Nunes Magalhães. - 2015.
77 fls., enc.; il.

Orientador: Maurício Alves Loureiro.

Área de concentração: Sonologia.

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

Inclui bibliografia.

1. Música para guitarra. 2. Música por computador. 3. Sonologia I. Título. II. Loureiro, Maurício Alves. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Música.

CDD: 785.9

SUBSTITUIR ESSA PÁGINA PELA FOLHA DE APROVAÇÃO

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente com a realização deste trabalho. Ao meu orientador Mauricio Loureiro e a todos os colegas do CEGeME. Aos amigos Aluizio Oliveira e Davi Mota pela ajuda na definição dos rumos da minha pesquisa de mestrado, e ao Thiago Campolina pelo apoio na véspera da entrega. Aos meus pais, Ernane e Vera, pelo apoio ao longo do mestrado. Agradeço também à CAPES pelo auxílio na forma de bolsa de pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Música da UFMG. Por fim, deixo meus agradecimentos aos guitarristas que se disponibilizaram a gravar os trechos analisados neste trabalho, sem os quais a realização do mesmo não teria sido possível.

“Something magic comes out of bending little bits of wire.”
[Algo mágico se revela ao se entortar pequenos pedaços de fio.]
David Gilmour (tradução nossa)

Resumo

Na guitarra elétrica, o bending e o vibrato são técnicas que, de acordo com o senso comum, têm um papel importante na assinatura do guitarrista. Esse trabalho visa investigar essa hipótese por meio da análise das características de execução do bending e do vibrato que podem diferenciar um guitarrista de outro. Para isso, propomos um modelo para a categorização de performances composto de quatro estágios: (1) extração de frequência fundamental; (2) segmentação de notas; (3) definição e extração de descritores de bending e vibrato; (4) análise e categorização das performances com base na parametrização proposta, utilizando KNN (k vizinhos mais próximos) e SOMs (mapas auto-organizativos de Kohonen). Para validar o modelo, analisamos um conjunto de performances, de dois trechos musicais, executadas por oito guitarristas. Os resultados mostram a existência de uma consistência nos dados obtidos aplicando o modelo a performances executadas por um mesmo guitarrista.

Palavras-chaves: guitarra elétrica. bending. vibrato. expressividade musical. musicologia sistemática. computação musical. sonologia.

Abstract

On the electric guitar, bending and vibrato are techniques that, according to common sense, play a key role in a guitarist's playing signature. This work aims at investigating this hypothesis by means of the features of bendings and vibratos that might 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, using KNN (K-Nearest Neighbors) and SOMs (Self-Organizing Maps). In order to validate the model, we analyzed a set of several performances of two short musical excerpts, performed by 8 guitarists. We found that there is a consistency in the data obtained by applying the proposed model to performances executed by the same guitarist.

Key-words: electric guitar. bending. vibrato. musical expressiveness. systematic musicology. computer music. sonology.

Lista de ilustrações

Figura 1 – As partes do violão. Extraído de (ROSSING, 1990).	28
Figura 2 – Modelo de emissão de ondas sonoras pelo violão proposto por (ROSSING, 1990).	28
Figura 3 – Partes da guitarra. Extraído de (ROSSING, 2010)	29
Figura 4 – Os três tipos mais populares de guitarras de corpo sólido: a)Telecaster, b)Stratocaster e c)Les Paul.	30
Figura 5 – Técnica de bending sendo executada por um guitarrista	31
Figura 6 – Trecho 1 com notas numeradas	38
Figura 7 – Trecho 2 com notas numeradas	38
Figura 8 – Diagrama mostrando o fluxo da captação do sinal da guitarra no experimento.	39
Figura 9 – Ilustração representando as curvas de energia (acima) e frequência fundamental (abaixo) de uma nota musical.	43
Figura 10 – Ajuste manual da segmentação através do Sonic Visualizer	45
Figura 11 – Curva de frequência fundamental para a nota 12 do trecho 1.	46
Figura 12 – Curva de frequência fundamental para a nota 22 do trecho 1.	49
Figura 13 – Curva de frequência fundamental da nota 18 do excerto 1 tocada por oito guitarristas.	54
Figura 14 – Gráfico mostrando os resultados do descritor de bending aplicado a todas as execuções da nota 18 do trecho 1.	55
Figura 15 – Gráfico de radar para o bending da nota 4 do trecho 1	56
Figura 16 – Gráfico de radar para o bending da nota 5 do trecho 1	56
Figura 17 – Gráfico de radar para o bending da nota 11 do trecho 1	57
Figura 18 – Gráfico de radar para o bending da nota 12 do trecho 1	57
Figura 19 – Gráfico de radar para o bending da nota 17 do trecho 1	57
Figura 20 – Gráfico de radar para o bending da nota 18 do trecho 1	58
Figura 21 – Gráfico de radar para o bending da nota 4 do trecho 2	58
Figura 22 – Gráfico de radar para o bending da nota 8 do trecho 2	58
Figura 23 – Gráfico de radar para o bending da nota 9 do trecho 2	59
Figura 24 – Gráfico de radar para o bending da nota 17 do trecho 2	59
Figura 25 – Gráfico de radar para o bending da nota 19 do trecho 2	59
Figura 26 – Curvas de frequência fundamental para a nota 22 do trecho 1 (com vibrato)	60
Figura 27 – Curvas da taxa e extensão do vibrato para a nota 22 do trecho 1	61
Figura 28 – Gráfico mostrando os resultados do descritor de vibrato aplicado a todas as execuções da nota 22 do trecho 1.	62

Figura 29 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 7 do trecho 1	63
Figura 30 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 13 do trecho 1	63
Figura 31 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 19 do trecho 1	64
Figura 32 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 22 do trecho 1	64
Figura 33 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 5 do trecho 2	64
Figura 34 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 18 do trecho 2	65
Figura 35 – Gráfico de radar para o vibrato da nota 20 do trecho 2	65
Figura 36 – Mapa auto-organizativo gerado para a nota 18 do trecho 1 a partir dos dados do descritor de bending	70
Figura 37 – Mapa auto-organizativo gerado para a nota 22 do trecho 1 a partir dos dados do descritor de vibrato	70
Figura 38 – Mapa auto-organizativo gerado para o trecho 1 utilizando todas as notas com bending e vibrato	71
Figura 39 – Mapa auto-organizativo gerado para o trecho 2 utilizando todas as notas com bending e vibrato	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais classes do Expan utilizadas neste trabalho	36
Tabela 2 – Dimensões extraídas para o descritor de bending	47
Tabela 3 – Dimensões extraídas para o descritor de vibrato	49
Tabela 4 – Resultados do KNN para as notas com bending do trecho 1.	66
Tabela 5 – Matriz de confusão do KNN para as notas com bending do trecho 1. . .	66
Tabela 6 – Resultados do KNN para as notas com bending do trecho 2.	67
Tabela 7 – Matriz de confusão do KNN para as notas com bending do trecho 2. . .	67
Tabela 8 – Resultados do KNN para as notas com vibrato do trecho 1.	68
Tabela 9 – Matriz de confusão do KNN para as notas com vibrato do trecho 1. . .	68
Tabela 10 – Resultados do KNN para as notas com vibrato do trecho 2.	68
Tabela 11 – Matriz de confusão do KNN para as notas com vibrato do trecho 2. . .	69

Lista de abreviaturas e siglas

CEGeME	Centro de Estudos do Gesto Musical e Expressividade
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
Expan	<i>Expressiveness Analysis</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbors</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
RMS	<i>Root-Mean-Square</i>
SOM	<i>Self-Organizing Maps</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
2	OBJETIVOS	25
3	REFERENCIAL TEÓRICO	27
3.1	Sobre a guitarra	27
3.1.1	Origens dos instrumentos da família das guitarras	27
3.1.2	O violão	27
3.1.3	A guitarra elétrica	28
3.2	O bending	30
3.3	O vibrato	31
3.4	Técnicas expressivas na guitarra e estudos relacionados	33
4	EXPAN	35
4.1	Classes do Expan	35
5	METODOLOGIA	37
5.1	Experimento	37
5.2	Deteccção da frequência fundamental e dos harmônicos	39
5.3	Segmentação	43
5.3.1	Deteccção de início de nota (<i>onset</i>)	44
5.3.2	Deteccção de fim de nota (<i>offset</i>)	45
5.3.3	Ajuste manual	45
5.3.4	Ataque e repouso	46
5.4	Descritor de bending	46
5.4.1	Velocidade média do bending	47
5.4.2	Velocidades instantâneas máximas do bending	47
5.4.3	Centróide temporal da altura no bending	48
5.4.3.1	Extensão do bending	48
5.5	Descritor de vibrato	48
5.5.1	Regularidade do vibrato	50
5.5.1.1	Valores médio, máximo e mínimo do vibrato e instante de extensão máxima	51
5.5.1.2	Perfil da extensão do vibrato ao longo da nota	51
5.5.2	Tempo até o início e o final do vibrato	51
5.6	Análise e categorização das performances	51

5.6.1	K vizinhos mais próximos	51
5.6.2	Mapas auto-organizativos de Kohonen (SOM)	52
6	RESULTADOS	53
6.1	Análise dos descritores extraídos	53
6.1.1	Bending	53
6.1.2	Vibrato	60
6.2	Resultados do KNN	65
6.2.1	Bending	66
6.2.2	Vibrato	67
6.3	Resultados do SOM	69
6.3.1	Análise por nota	69
6.3.2	Análise por trechos	69
7	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	75

1 Introdução

Nas últimas décadas, inúmeros trabalhos têm surgido na área de extração e análise de informação musical, com o objetivo de obter automaticamente informações de alto nível a partir de gravações de instrumentos específicos, grupos musicais ou até mesmo de música eletrônica. As técnicas e ferramentas resultantes destes trabalhos podem ter aplicações em inúmeros campos, como no desenvolvimento de ferramentas para uso na produção musical, reconhecimento automático de gêneros musicais, sugestão musical automática, identificação automática de instrumentos ou músicos, reconhecimento harmônico, transcrição automática, etc.

O estudo sistemático de performances musicais tem se beneficiado enormemente das ferramentas de análise que têm surgido, e as perspectivas trazidas por tais ferramentas nos permite mover de um paradigma baseado em abordagens descritivas de análise para outro em que se busca quantificar, avaliar, medir e extrair informações de forma objetiva. Tais abordagens da musicologia empírica só se tornaram possíveis na virada do século XX, com o surgimento de mecanismos de gravação sonora ou de captura das ações do instrumentista (CLARKE, 2004). Goebel, Dixon e Poli fazem uma revisão bibliográfica extensa sobre o estudo sistemático de performances musicais, e argumentam o seguinte (GOEBL; DIXON; POLI, 2005, tradução nossa)¹:

Milhões de pessoas comparecem regularmente a concertos musicais ou escutam gravações de performances. [...] Enquanto apreciam a música, essas pessoas estão ouvindo (em grande maioria) interpretações musicais que contém uma expressão humana específica, qualquer que seja ela – o que se ouve possui um sentido intuitivo para o ouvinte. Sem tal expressão a música não atrairia as pessoas; é uma parte essencial da música .

Duas palavras que frequentemente vem à tona em discussões sobre performances musicais são: individualidade e expressividade musical. Em um artigo, sobre questões metodológicas pertinentes à quantificação da individualidade musical, WÖLLNER defende que a expressividade indica individualidade em uma performance (WÖLLNER, 2013, tradução nossa)²:

¹ Millions of people are regularly attending live music events or listening to recordings of music performances. [...] While enjoying the music, they are all listening to (mostly) human-made music that contains a specific human expression, whatever kind it might be – what they hear makes intuitive sense to them. Without this expressivity the music would not attract people; it is an integral part of the music.

² In classical genres, emphasis is laid on subtle timing perturbations and fluctuations in dynamic intensity. Sudden delays or changes in intensity that do not conform to prototypical expectations

Na música erudita, a ênfase [da individualidade] se baseia em modificações de tempo sutis e na flutuação da dinâmica. Pequenos atrasos ou mudanças de intensidade que se distanciem das expectativas prototípicas podem causar surpresas ou outras reações emocionais. [...] Apesar de ser possivelmente revelador analisar a duração de notas em um ritardando para diferentes intérpretes [...], não se pode tirar conclusões sobre o grau de individualidade nessas performances. Em outras palavras, a microestrutura expressiva de uma performance não revela por si só se uma performance será percebida como individual.

O autor visa argumentar, através de tais afirmações, que o contexto cultural está fortemente ligado à percepção do caráter individual de uma performance. Segundo ele, uma performance arquetípica, para se tomar como referência, seria composta por valores médios dos parâmetros expressivos manipulados por músicos em um contexto cultural específico.

Ao longo das últimas décadas, vários estudos têm buscado elucidar as diversas características de uma performance que contribuem para seu caráter expressivo, através da utilização de descritores acústicos. Nos trabalhos desenvolvidos por [Park \(2004\)](#), [Maestre et al. \(2009\)](#), [Peeters \(2004\)](#) e [Bogdanov et al. \(2013\)](#), foram catalogados inúmeros descritores para extração e análise de informação musical. Diante do caráter multidimensional da informação musical contida em sinais de áudio, tais descritores são necessários para se extrair as características relevantes para a análise desejada.

1.1 Motivação

Um dos fatores motivadores para o presente trabalho foi minha pesquisa de iniciação científica realizada durante a graduação, em que participei da implementação de uma série de descritores para análise de gravações de clarineta, juntamente aos membros do Grupo de Pesquisa *CEGeME - Centro de Estudo do Gesto Musical e Expressão*, da Escola de Música da UFMG. Criamos um pacote de ferramentas computacionais na plataforma Matlab ao qual demos o nome de Expan (*expressiveness analysis*) ([CAMPOLINA; MOTA; LOUREIRO, 2009](#)).

Meu interesse pela guitarra elétrica, além do fato de ser o instrumento de minha especialidade, sempre me fizeram levantar diversas questões a respeito de como se constrói a expressividade e a individualidade no instrumento. Motivados por tais questões, tomamos a decisão de utilizar o Expan para realizar um estudo sistemático sobre alguns

may cause surprise and other emotional reactions [...]. Although it can be revealing to analyze the lengthening of note values in a final ritard for a number of different performers [...] no statements can be drawn about the degree of individuality in these performances. In other words, an expressive microstructure of a performance does not reveal per se whether the performance will be perceived as being individual.

recursos expressivos na guitarra. Durante o processo de definição do escopo do trabalho, frequentemente discutíamos sobre os recursos de vibrato e bending na guitarra elétrica, e sobre a importância dos mesmos na individualidade de um guitarrista. Isso nos fez tomar a decisão de delimitar nossa investigação e estes dois recursos.

De acordo com Méndez (2012), os 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 específico ouvindo apenas alguns compassos de uma performance. Em estudo recente, Grimes (2014) argumenta que o timbre e o vibrato de um guitarrista podem ser tão intrínsecos ao instrumentista que tornam sua sonoridade distintiva tal qual a de um vocalista para o ouvido bem treinado. Tais observações exprimem o que muitos guitarristas costumam discutir entre si, entretanto, a maior parte da discussão a respeito é fundamentada por opiniões subjetivas, baseadas na experiência musical e na escuta. Os estudos que visam analisar empiricamente a questão da identidade e expressividade musical são relativamente recentes, e ainda há muito a ser explorado.

2 Objetivos

O estudo desenvolvido neste trabalho parte da hipótese de que existe uma assinatura associada à forma com que um músico executa os recursos expressivos bending e vibrato na guitarra elétrica, principalmente em estilos musicais como o rock e o blues, nos quais eles são amplamente utilizados. Propomos avaliar essa hipótese através da análise sistemática desses recursos, a partir de características do bending e do vibrato que possam distinguir guitarristas com base em suas performances. Formalizadas em descritores acústicos extraídos do sinal de áudio das gravações, buscamos validar estas características e avaliar seu potencial para agrupar performances similares e identificar performances de guitarristas específicos.

3 Referencial Teórico

3.1 Sobre a guitarra

3.1.1 Origens dos instrumentos da família das guitarras

Há uma grande discussão a respeito dos instrumentos que deram origem ao violão, que posteriormente viria a originar a guitarra elétrica. Dentre seus possíveis ancestrais, poderíamos citar o alaúde, o tambur e a vihuela. Vários tipos de cordofones eram utilizados nas culturas antigas egípcia, hitita, grega, turca, chinesa e outras (ROSSING, 2010). No Museu Arqueológico do Cairo, é possível se ver um tambur de aproximadamente 1.490 a.C., que pertenceu a um cantor egípcio chamado Har-Mose (SCOTT, 1944; GUY, 2007).

No início do Renascimento, instrumentos constituídos de quatro pares de cordas (cada par afinado em uníssono) passaram a se tornar populares na Europa. Na Itália, acrescentou-se mais um par de cordas ao instrumento, que foi denominado guitarra batente. Gradualmente, esses instrumentos foram dando espaço à configuração de seis cordas (BACON, 2012).

No início do século XIX, o violão começou a tomar a forma atual. O luthier espanhol Antônio Torres aumentou o tamanho do corpo do instrumento e introduziu modificações capazes de ampliar sua projeção sonora, principalmente na região dos graves (BACON, 2012). O surgimento das cordas de nylon possibilitou o aumento da tensão das cordas sem alterar o seu diâmetro, contribuindo para a ampliação do volume do instrumento (NAVEDA, 2002).

Os instrumentos modernos da família das guitarras¹ possuem seis cordas presas a uma ponte, que transmite as vibrações para o corpo do instrumento. As cordas são contidas em um mesmo plano e suas afinações padrão, da corda mais grave para a mais aguda são: mi (82,41 Hz), lá (110 Hz), ré (146,83 Hz), sol (196 Hz), si (246,94 Hz) e mi (329,63 Hz). O braço do instrumento possui trastes para fixar a frequência das notas produzidas ao longo da escala.

3.1.2 O violão

Existem vários tipos de violão diferentes, mas o princípio através do qual eles produzem som é o mesmo. Ao tocar uma corda do instrumento, transmite-se energia à mesma, fazendo-a iniciar um processo de vibração. A vibração da corda, por si só, não

¹ Neste texto, o termo *família das guitarras* será utilizado toda vez que quisermos nos referir a toda a família de instrumentos elétricos ou acústicos provenientes do violão. O termo *guitarra*, por si só, será utilizado para nos referirmos especificamente à guitarra elétrica.

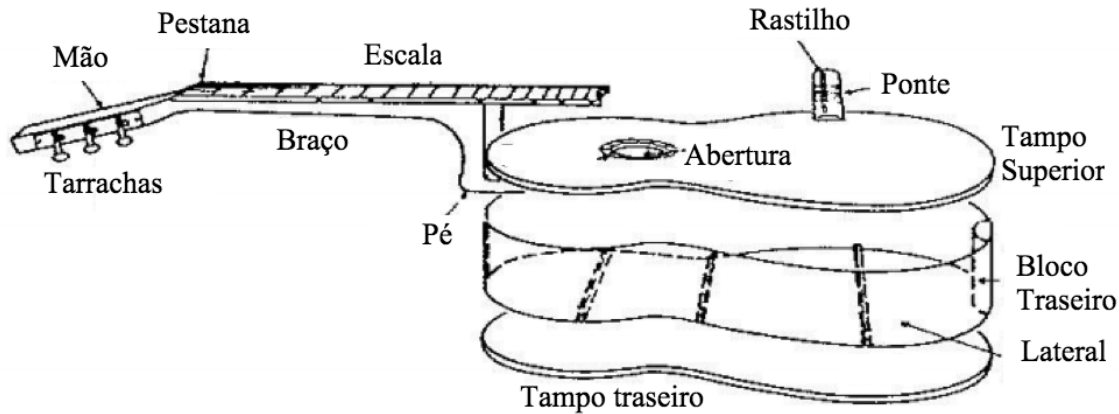


Figura 1: As partes do violão. Extraído de (ROSSING, 1990).

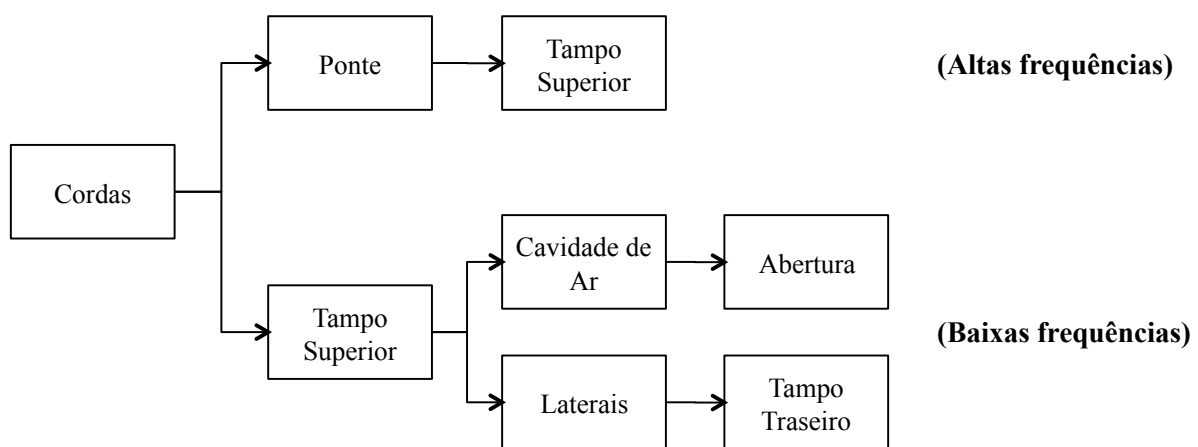


Figura 2: Modelo de emissão de ondas sonoras pelo violão proposto por (ROSSING, 1990).

é suficiente para criar ondas sonoras claramente audíveis no ar ao seu redor. A ponte (onde as cordas são presas, vide figura 1) transmite as vibrações das cordas para a caixa de ressonância (o corpo do instrumento), que por sua vez, é a responsável pela projeção sonora.

Na figura 2 é mostrado um diagrama que exemplifica simplificada a produção sonora no violão. A ressonância das frequências baixas podem ser atribuídas ao movimento acoplado do tampo, do fundo do instrumento e da cavidade de ar. A boca do instrumento tem um papel importante na emissão sonora na região das baixas frequências, juntamente com o tampo e o fundo. Já na região das frequências mais altas, a maior parte do som é irradiada pelo tampo do instrumento, e as propriedades mecânicas da ponte se tornam significativas (ROSSING, 1990).

3.1.3 A guitarra elétrica

As primeiras guitarras elétricas surgiram na década de 1930, nos Estados Unidos, e eram utilizadas principalmente em orquestras de jazz. O violão é um instrumento que

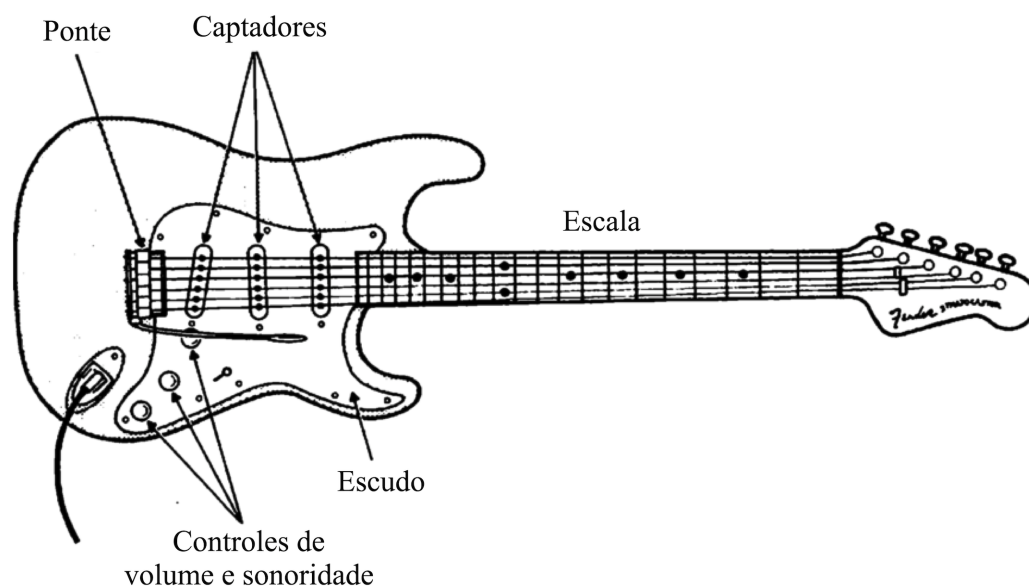


Figura 3: Partes da guitarra. Extraído de (ROSSING, 2010)

sempre passou por melhorias visando aumentar sua projeção sonora, mas ainda assim, não se equiparava a muitos outros instrumentos em termos de volume. O que motivou o desenvolvimento da guitarra foi exatamente a necessidade de aumentar a projeção sonora do instrumento para tocar com grandes grupos e para grandes audiências. Apesar de ser possível utilizar um microfone de contato ou outro tipo de captador acoplado ao corpo de um violão para gerar um sinal elétrico, a guitarra elétrica acabou se desenvolvendo como um instrumento musical distinto (ROSSING, 2010).

A figura 3 mostra algumas das partes que compõem a guitarra. O instrumento mostrado possui três captadores, que podem ser combinados através de uma chave seletora. Três potenciômetros permitem controlar o volume e a sonoridade do instrumento. Os captadores utilizados são geralmente magnéticos², que são constituídos de um ímã com uma bobina enrolada em volta. Os movimentos das cordas do instrumento (que devem ser feitas de material ferromagnético) causam uma alteração de fluxo magnético na bobina, e induzem um campo elétrico nos terminais dos captadores. O sinal elétrico resultante é proporcional à velocidade de deslocamento da corda na direção perpendicular ao captador (WERNECK, 2007).

No ano de 1948, Leo Fender lançou no mercado a primeira guitarra de corpo sólido, que foi batizada com o nome Broadcaster, e logo em seguida (após algumas pequenas modificações) se tornou a Telecaster (figura 4a). No ano de 1954 foi lançada a Stratocaster, que possuía três captadores ao invés de dois (figura 4b). A configuração de três captadores combináveis conferia uma maior versatilidade ao instrumento, por aumentar suas possibilidades timbrísticas. A Stratocaster se tornou um instrumento muito popular,

² Há também guitarras que utilizam captadores piezoelétricos ou óticos, entretanto, os captadores magnéticos ainda são os mais amplamente utilizados.

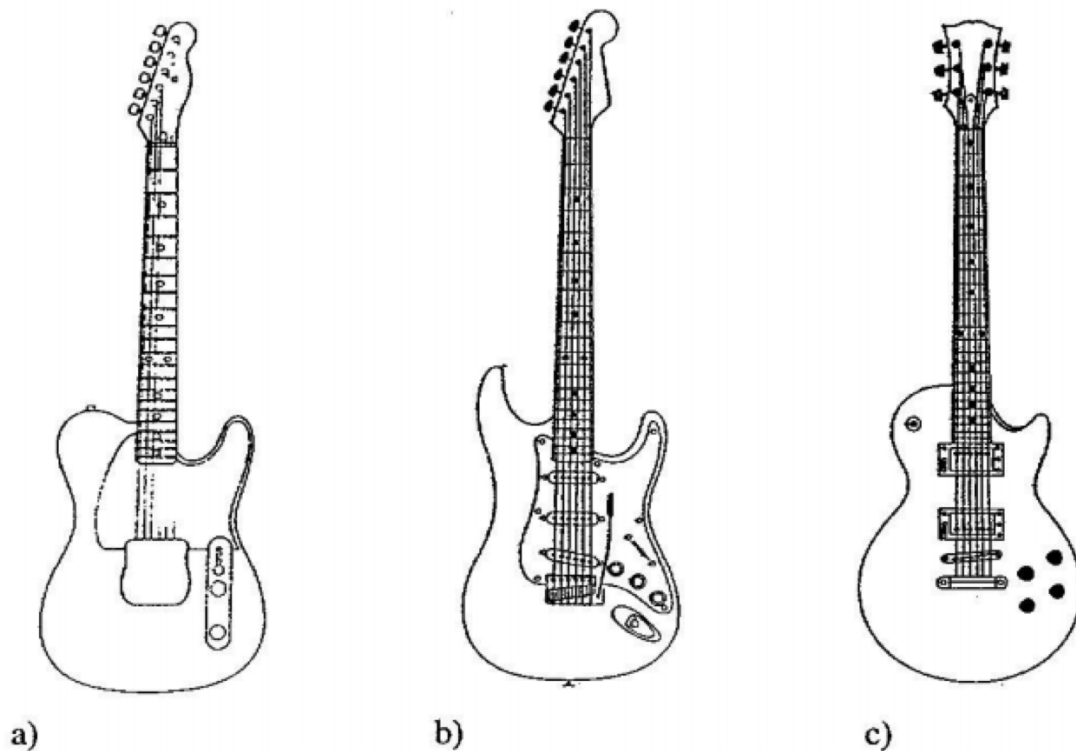


Figura 4: Os três tipos mais populares de guitarras de corpo sólido: a)Telecaster, b)Stratocaster e c)Les Paul.

tendo sido utilizada por grandes ícones do rock, como Jimi Hendrix, David Gilmour e Eric Clapton. É provável que seja o modelo de guitarra mais utilizado no mundo.

A empresa Gibson, em parceria com o guitarrista Les Paul, lançou em 1952 um novo modelo que levava o nome do músico (figura 4c). A Les Paul rapidamente se popularizou, e tornou-se mundialmente famosa.

O advento da guitarra de corpo sólido permitiu que este novo instrumento prescindisse de uma caixa de ressonância acústica, possibilitando uma maior variedade no formato do corpo instrumento, ao contrário dos instrumentos acústicos, nos quais modificações no seu formato influenciam diretamente as propriedades de projeção e qualidade sonora. Em guitarras que possuem caixas de ressonância há uma tendência de se ter mais problemas quando utilizadas ao vivo, devido à realimentação (*feedback*). Por esse motivo existem guitarras híbridas, chamadas de semiacústicas, que possuem cavidades no corpo, combinadas com um bloco central sólido.

3.2 O bending

Utiliza-se o termo *bending*, *pitch bending* ou simplesmente *bend* para se referir a essa técnica. [Chen, Smith e Wolfe](#) definem o bending da seguinte forma ([CHEN; SMITH;](#)



Figura 5: Técnica de bending sendo executada por um guitarrista

WOLFE, 2009, tradução nossa)³:

Pitch bending se refere ao ajuste da altura de uma nota. 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.

Na guitarra, 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 escala entre os trastes do instrumento. Isso gera uma alteração na tensão da corda, e consequentemente, na altura da nota produzida (veja a figura 5). O bending é realizado de forma a se atingir uma altura distinta da altura inicial da nota. A técnica é amplamente utilizada por guitarristas de rock e blues, e possibilita ao músico incorporar características microtonais em uma performance (GRIMES, 2014).

3.3 O vibrato

O vibrato é um tipo de modulação periódica amplamente utilizada na música. Em alguns instrumentos, como flauta, violino e guitarra, o músico consegue manipular o vibrato produzido. Em outros instrumentos, como o piano ou a harpa, por mais que exista um efeito de vibrato nas notas produzidas, ele é uma característica intrínseca da mecânica do instrumento, não sendo possível para o músico ter um controle direto sobre o mesmo.

³ Pitch bending refers to adjusting the musical pitch of a note. Usually it means a smooth variation in pitch and can include portamento and glissando, which refer to continuous variation of pitch from one note to the next.

Segundo Fletcher (2001), em uma nota tocada utilizando vibrato, o som pode variar de três formas: a variação no volume (modulação em amplitude) é denominada *tremolo*^{4,5}; a variação da altura da nota (modulação em frequência) é chamada apenas de vibrato; por último, a variação cíclica na qualidade sonora, ou timbre, não possui uma denominação específica. Em teoria, as três formas de vibrato citadas acima podem existir isoladamente ou combinadas, mas na prática, o que se observa, é que elas ocorrem simultaneamente, cada uma delas em menor ou maior quantidade, dependendo do contexto e do instrumento. As análises a serem realizadas no presente trabalho serão focadas na análise exclusiva da modulação em frequência para o estudo do vibrato.

No vibrato, amplitude, frequência e timbre podem variar através de três parâmetros: taxa, extensão e forma (SEASHORE, 1917). 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; DESAIN, 2000). Além de ser um recurso expressivo muito explorado, o vibrato pode ser utilizado para dar ao som mais 'profundidade' e 'sustentação', e para fazê-lo se destacar do restante do espaço sonoro (JARVELAINEN, 2002).

De acordo com Mellody e Wakefield (2000), no violino, a modulação em frequência produzida através do vibrato faz com que a nota se aproxime ou distancie de determinados modos de ressonância característicos do instrumento, gerando como efeito secundário, uma modulação em amplitude nas suas componentes harmônicas. Em testes perceptivos realizados com tons sintetizados, essa modulação em amplitude se mostrou mais significativa para a percepção do vibrato do que a própria modulação em frequência. Outra observação importante desse estudo é que, em violinos elétricos de corpo sólido, a modulação em amplitude observada não era significativa como em violinos tradicionais.

A existência dos trastes na escala da guitarra faz com que a técnica utilizada para a produção do vibrato seja diferente da técnica no violino, apesar de ambos serem instrumentos de corda. Enquanto no violino o instrumentista consegue modificar arbitrariamente o comprimento efetivo da corda deslocando o dedo longitudinalmente na corda, na guitarra e no violão o traste fixa o comprimento da corda. Nestes instrumentos, o vibrato é produzido através da modificação da tensão da corda. Em seu livro *Escuela de la guitarra*, voltado ao estudo do violão clássico, Carlevaro (1985) ressalta que o vibrato é um recurso importante na expressão musical, e distingue duas formas de executá-lo no instrumento: o *vibrato longitudinal*, produzido através do esticamento da corda na sua direção longitudinal, utilizando o dedo que pressiona a corda; e o *vibrato transversal*,

⁴ Existe um efeito muito comum em pedais e amplificadores que consiste exatamente na modulação da amplitude do sinal de saída da guitarra, por meio de dispositivos eletrônicos, e que utiliza exatamente o nome tremolo.

⁵ A palavra tremolo também é utilizada para denominar uma técnica específica, muito utilizada no violão clássico. Tal técnica será explicada na seção 3.4

produzido através do deslocamento da corda na direção transversal, da mesma forma que se realiza a técnica de bending. O mesmo autor sugere a utilização de uma ou outra técnica de vibrato, dependendo da região da escala do instrumento, recomendando o vibrato longitudinal nas posições mais centrais do braço e o vibrato transversal nas primeiras posições.

3.4 Técnicas expressivas na guitarra e estudos relacionados

A guitarra é um instrumento com enorme potencial expressivo, tendo em vista a quantidade de técnicas à disposição do instrumentista. O fato de ser um instrumento relativamente novo e em constante evolução faz com que as técnicas disponíveis variem muito de acordo com o modelo da guitarra, e as tecnologias que se tem à disposição. Por exemplo, há modelos de guitarra que possuem uma alavanca associada à ponte do instrumento, o que permite ao músico modular a altura da nota tocada de forma distinta do bending e vibrato tradicionais, pois permite realizar modulações em maior extensão, e em várias cordas simultaneamente. Outro exemplo é o tipo de sistema captação utilizado, que influencia as possibilidades de produção de um efeito denominado harmônicos artificiais.

No trabalho desenvolvido por Migneco (2012) são apresentadas inúmeras técnicas para análise e síntese de performances na guitarra voltadas à forma de excitação da corda do instrumento. O seu modelo de análise/síntese visa manipular os seguintes parâmetros: dispositivo de excitação da corda (palheta, dedo ou unha), ponto da corda onde a excitação é realizada e dinâmica da excitação (referente à intensidade da excitação). Tais parâmetros estão fortemente ligados ao período do ataque da nota, e influenciam a percepção do timbre produzido. Erkut e Välimäki (2000) desenvolvem um trabalho similar voltado ao violão clássico. Porém, além da forma de excitação da corda, os autores extraem características referentes ao vibrato e às variações dinâmicas.

Em um trabalho feito por Freire e Nézio (2013), é desenvolvido um sistema para análise de técnicas de mão direita no violão clássico utilizando um sistema de captação hexafônico (capaz de captar cada uma das seis cordas separadamente), e são apresentados os resultados preliminares na análise de uma técnica conhecida como *tremolo*⁶. Os resultados sugerem que há uma relação entre a regularidade do tremolo e o nível de expertise do instrumentista. Posteriormente, Freire e Cambraia (2015) apresentam uma série de descritores para identificar a utilização de técnicas como *hammer on* (legato ascendente), *pull off* (legato descendente), vibrato e bending. Tais descritores são utilizados para analisar texturas tocadas no violão.

⁶ No violão clássico, o nome tremolo é utilizado para denominar uma técnica específica, que consiste em tocar rápida e repetidamente a mesma nota (na mesma corda) com o objetivo de gerar uma sensação de sustentação, visto que o decaimento das notas no instrumento é extremamente rápido.

Méndez (2012) desenvolve em seu trabalho de mestrado um sistema de modelagem expressiva para a guitarra voltada ao gênero jazz. A primeira etapa do modelo é denominada representação simbólica, e extrai de performances informações sobre energia, durações de nota e ornamentos. A segunda etapa é o modelo expressivo, gerado a partir da análise dos dados da primeira etapa, utilizando *machine learning*. A terceira etapa é a síntese concatenativa, que sintetiza performances com base no modelo expressivo das etapas anteriores.

Reboursiere et al. (2012) trabalham com a identificação de diferentes técnicas de articulação na guitarra. As diversas técnicas analisadas compreendem: hammer on, pull off, *slide*⁷, bending, abafamento da corda (realizado com a palma da mão direita) e harmônicos⁸. As técnicas detectadas são utilizadas para controlar parâmetros da performance, criando assim formas estendidas de expressão no instrumento. A extração de informações do bending nesses trabalhos são feitas somente com o objetivo de distingui-la de outras técnicas utilizadas no instrumento. Não é feito nenhum tipo de análise detalhada do perfil do bending em performances.

Um estudo sobre os diferentes tipos de vibrato existentes no violão clássico é realizado por Rodrigues (2014) que analisa três guitarristas tocando notas com vibratos transversais e longitudinais. Também são analisadas as técnicas vibrato de tampo, vibrato de boca e vibrato de corda solta. Essas três últimas são consideradas técnicas estendidas no instrumento.

Dentre os trabalhos levantados nessa revisão bibliográfica, aqueles que abordam a técnica do bending o fazem com o objetivo de detectar o seu emprego, sem abranger sua caracterização (por exemplo, avaliar diferentes perfis de curvas de bending). O vibrato já é uma técnica mais analisada, e é possível encontrar um volume significativo de trabalhos caracterizando-o, seja em instrumentos (MELLODY; WAKEFIELD, 2000) (GILBERT; SIMON; TERROIR, 2005) (ERKUT; VÄLIMÄKI, 2000) ou na voz humana (VIEIRA; SILVA; YEHIA, 2011).

⁷ A técnica *slide* é produzida deslizando-se o dedo através dos trastes do instrumento, o que gera um perfil de variação de altura discreto entre a nota inicial e a nota final.

⁸ Produzidos através do posicionamento de um dedo da mão esquerda sobre um dos nós da corda, o que reduz a energia de certos modos de vibração

4 Expan

O Expan é um conjunto de ferramentas para análise de sinais de áudio e extração de descritores acústicos, desenvolvido na plataforma Matlab[®]. Seu desenvolvimento foi iniciado em 2008 nos laboratórios do CEGeME (Centro de Estudos do Gesto Musical e Expressividade) (CAMPOLINA; MOTA; LOUREIRO, 2009). Inicialmente, o Expan foi desenvolvido para extrair informações apenas de gravações de clarineta, mas em estudos recentes surgiu a necessidade de ampliação e flexibilização para possibilitar a parametrização com outros instrumentos musicais como flauta, viola, fagote, guitarra elétrica e harpa.

Num primeiro momento, a ampliação do Expan se mostrou um processo difícil, devido à forma não-modular em que ele havia sido inicialmente desenvolvido. Tomamos então a decisão de reestruturar completamente o seu código utilizando o paradigma de programação orientada a objetos, o que já era interesse de vários membros do CEGeME. Tal reestruturação trouxe como benefícios:

- maior facilidade de se trabalhar com a ferramenta, possibilitando ao usuário final manipular objetos ao invés de lidar com uma enorme quantidade de variáveis e funções;
- modularização da aplicação, que possibilitou maior agilidade no desenvolvimento;
- reutilização de código por meio da herança de classes, o que facilita muito a criação de novos descritores ou outras novas funcionalidades que possuam características em comum com classes já implementadas.

Para fazer essa reestruturação foi necessário reescrever uma parte significativa do código do Expan. Além disso o código da ferramenta foi completamente revisado, e novos descritores foram desenvolvidos.

4.1 Classes do Expan

O novo Expan utiliza o conceito de *objeto* para tratar e manipular diferentes tipos de dado, como: sinal de áudio, energia RMS ou nota musical. Tais objetos são definidos através de *classes*, que especificam propriedades (escalares, vetores ou matrizes) e comportamentos (métodos e funções). As classes também especificam relacionamentos de herança de características entre tipos de objeto distintos.

Tabela 1 – Principais classes do Expan utilizadas neste trabalho

Nome da classe	Descrição
ExpanAudioSignal	Carrega arquivos de áudio (formato Wave) e os armazena juntamente com seus metadados (taxa de amostragem, taxa de bits, etc).
ExpanBending	Extraí e armazena informações sobre o bending.
ExpanFFT	Extraí e armazena a transformada de Fourier, obtida a partir de objetos de áudio.
ExpanFile	Armazena informações referentes a uma performance (uma gravação), como descritores, notas, metadados, etc.
ExpanFilter	Aplica filtros a diversos tipos de séries temporais do Expan.
ExpanGraph	Gera gráficos para os diversos tipos de objeto do Expan.
ExpanHarmonics	Extraí e armazena os harmônicos de sinais de áudio a partir da sua transformada de Fourier.
ExpanNoisiness	Extraí e armazena o índice de ruidosidade de sinais a partir de seus harmônicos e da sua transformada de Fourier.
ExpanNote	Armazena informações sobre notas musicais, obtidas por meio dos algoritmos de segmentação do Expan.
ExpanRMS	Extraí e armazena a energia RMS de sinais de áudio.
ExpanSegmentation	Aplica métodos de segmentação a arquivos de áudio.
ExpanVibrato	Extraí e armazena informações sobre o vibrato.

Não pretendemos nos aprofundar nos detalhes de implementação ou nos recursos do Expan. Entretanto, devido à sua importância neste trabalho, achamos conveniente citar as principais classes que utilizamos¹ na análise do bending e do vibrato. A tabela 1 mostra tais classes e suas descrições.

Utilizando essas classes, o Expan é capaz de carregar arquivos de áudio, executar métodos de segmentação para separar as diferentes notas de uma performance, e extrair diversos tipos de informação por meio de descritores. No nosso caso foram utilizados os descritores de bending e vibrato, desenvolvidos especificamente para este estudo. Os métodos de extração de informação pertinentes a este trabalho serão detalhados no capítulo 5.

¹ O Expan possui um total de 35 classes no momento em que este texto é escrito. Algumas são utilizadas para reuso de código e modularização, por meio de herança. Outras para implementar descritores que não são utilizados neste trabalho.

5 Metodologia

O estudo proposto neste trabalho englobou as seguintes etapas:

1. realização de um experimento envolvendo a gravação de dois trechos musicais sendo tocados por vários guitarristas, em que se aplicam as técnicas de vibrato e bending, alvos de análise deste estudo;
2. extração da frequência fundamental e dos harmônicos com uma resolução alta o suficiente para as análises de vibrato e bending pretendidas;
3. segmentação das gravações efetuadas em diferentes eventos: início e final de nota, início e fim da região de sustentação da nota;
4. parametrização do bending através da definição e extração de um descritor que represente o perfil da subida e descida da curva de frequência fundamental por nota;
5. parametrização do vibrato através da definição e extração de um descritor que represente bem sua taxa e extensão ao longo da nota;
6. análise e categorização das performances gravadas tendo como objetivo discriminar intérpretes a partir do seu estilo individual de executar vibratos e bendings.

O processamento do sinal de áudio das gravações para a segmentação de notas e extração de descritores foram realizadas utilizando a ferramenta Expan. Nas seções a seguir a metodologia será discutida detalhadamente.

5.1 Experimento

Após a realização de um primeiro experimento piloto envolvendo dois sujeitos, tomamos a decisão de realizar o experimento definitivo deste trabalho com oito guitarristas ao todo, tocando dois trechos de peças distintas. A primeira peça escolhida foi *Still Got The Blues*, de *Gary Moore*, cujo trecho selecionado é mostrado na figura 6. Tal escolha foi feita pelo fato de o trecho possuir notas executadas com vibrato, e bendings de diferentes durações, compreendendo intervalos distintos. Além disso, há casos de notas que são finalizadas no meio do bending (com a corda ainda esticada) enquanto outras só terminam quando a corda retorna à sua posição inicial (e conseqüentemente à altura inicial).

Devido ao fato de ser uma peça popular muito conhecida entre guitarristas, tomamos como hipótese que a execução do primeiro trecho poderia vir a ser influenciada pelo

Figure 6 shows a musical score for a guitar piece. It consists of two systems. The first system covers measures 1 to 12, and the second system covers measures 13 to 22. The tempo is marked as $\text{♩} = 48$. The score includes a standard musical staff and a guitar tablature staff. The tablature is numbered 1 through 22. Annotations include "1/2" for half-bendings and "full" for full bends. The melody consists of eighth notes and quarter notes with various bends and vibrato.

Figura 6: Trecho 1 com notas numeradas

Figure 7 shows a musical score for a guitar piece. It consists of a single system covering measures 1 to 20. The tempo is marked as $\text{♩} = 82$. The score includes a standard musical staff and a guitar tablature staff. The tablature is numbered 1 through 20. Annotations include "full" for full bends, "1/2" for half-bendings, and wavy lines for vibrato. The melody features a mix of eighth and sixteenth notes with various bends and vibrato.

Figura 7: Trecho 2 com notas numeradas

conhecimento prévio da peça. Isso poderia fazer com que diferentes sujeitos tocassem o trecho copiando algumas características da execução original, e assim, tocassem a mesma de forma similar. Compusemos então um segundo trecho para a execução desse experimento, mostrado na figura 7. O trecho composto possui, ao todo, cinco notas de diferentes durações com bendings de um e meio tom, e três notas com vibrato.

Foram realizadas quatro gravações para cada trecho, por cada um dos oito guitarristas. Assim, obtivemos ao todo 64 arquivos de áudio para análise. As partituras foram enviadas com antecedência aos sujeitos para que eles pudessem estudá-las. Todos os guitarristas foram gravados utilizando o mesmo instrumento e a mesma configuração para captura e monitoração da performance. A lista a seguir mostra o equipamento utilizado na gravação do experimento, enquanto o diagrama da figura 8 mostra o fluxo para a captação

do sinal da guitarra.

- guitarra Fender Stratocaster Deluxe equipada com captadores Fender Noiseless e cordas Elixir calibre 0.010;
- pedal MJM Phantom Overdrive;
- amplificador valvulado Peavey Classic 50;
- interface de áudio / mesa digital Behringer X32 Producer equipada com pré-amplificadores Midas;
- *direct box* ativo para captação da saída direta da guitarra.

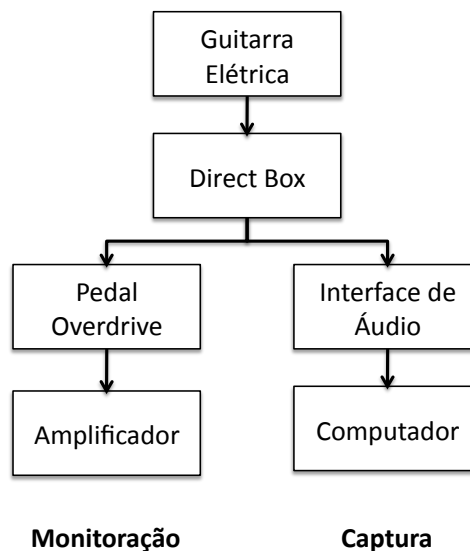


Figura 8: Diagrama mostrando o fluxo da captação do sinal da guitarra no experimento.

O esquema de gravação foi feito pensando em se captar o som direto da guitarra para ser utilizado na análise. Foi utilizado um direct box, que possibilita o envio desse sinal para a interface de áudio, ao mesmo tempo que ele é enviado para o pedal de *overdrive* e amplificador de guitarra. Dessa forma, foi possível capturar o som limpo da guitarra enquanto o músico o ouvia processado pelo pedal, através do amplificador. A decisão de utilizar o pedal de overdrive foi tomada por este ser um efeito muito comumente utilizado na guitarra, principalmente nos estilos rock e blues.

5.2 Detecção da frequência fundamental e dos harmônicos

Para se trabalhar com descritores de vibrato e bending, é crucial ter à disposição um método de extração de frequência fundamental com boa resolução em frequência e

tempo. Para este trabalho utilizamos uma FFT (*Fast Fourier transform*) de 65536 pontos (2^{16}) aplicada a cada quadro de análise utilizando uma janela de hamming de tamanho 2048, com um salto de 512 amostras. Além disso, é aplicado um preenchimento com zeros (*zero-padding*) a cada quadro de análise. 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.

O algoritmo de extração de harmônicos e frequência fundamental utilizado foi criado pelos membros do CEGeME em 2008, no início do desenvolvimento do Expan. Sua detecção é boa o suficiente para trabalhar com sinais monofônicos, porém haviam alguns pontos que poderiam ser melhorados, e as modificações a seguir foram implementadas para este estudo.

- O algoritmo foi modificado para receber como argumentos as frequências f_{0min} e f_{0max} , que representam o intervalo no qual se deseja buscar a frequência fundamental do sinal.
- O princípio de funcionamento do algoritmo se baseia na busca dos picos proeminentes no espectro do sinal, que são escolhidos como candidatos à frequência fundamental. Em seguida, busca-se os harmônicos de cada candidato dentro de uma faixa de tolerância. Essa faixa de tolerância era proporcional ao número do harmônico, o que causava algumas detecções errôneas nos harmônicos superiores. O algoritmo foi modificado para utilizar uma tolerância fixa por candidato, o que melhorou significativamente as detecções dos harmônicos. Devido a essa tolerância fixa, o algoritmo não é robusto para se trabalhar com sons que possuem alto índice de inarmonicidade. Porém, como nesse trabalho o interesse maior é em se analisar a frequência fundamental, isso não é um problema.
- Foi incluído um limiar de ruídos como parâmetro para o algoritmo. Se a ruídosidade do sinal para a frequência fundamental escolhida estiver acima do limiar, considera-se que o sinal não possui altura definida.

Segue abaixo os passos do funcionamento do algoritmo:

1. Seja $x(n, k)$ um sinal de áudio correspondente a um quadro de análise k sobre o qual foi aplicada uma janela de hamming e um preenchimento com zeros (*zero-padding*) para se obter uma série discreta de N amostras. Primeiramente, aplica-se ao a sinal a transformada discreta de Fourier de N pontos, que é dada por:

$$X(b, k) = \sum_{n=1}^N x(n, k) e^{-2\pi i(n-1)(b-1)/N} \quad (5.1)$$

O índice b , da fórmula acima está associado a regiões de frequência (*bins*) bem definidas. Assim, para obtermos a frequência correspondente a cada região b , poderemos utilizar a fórmula

$$f(b) = \frac{bf_s}{N} \quad (5.2)$$

2. Para a detecção de harmônicos, o primeiro passo é encontrar as componentes de magnitude proeminentes no resultado da FFT. Para isso, extraímos sua parte real:

$$Re(b, k) = |X(b, k)| \quad (5.3)$$

3. Detecta-se então os picos locais em $Re(b, k)$, limitando a busca no intervalo $f_{0min}N/f_s \leq b \leq f_{0max}N/f_s$, em que f_{0min} e f_{0max} são os valores mínimo e máximo de frequência fundamental que se deseja buscar, e f_s a frequência de amostragem do sinal.
4. Seleciona-se os n_{cand} picos de maior magnitude dentre os picos encontrados no espectro do sinal no passo anterior. Assim teremos n_{cand} candidatos à frequência fundamental do sinal. Seja $f_{0,i}$ os índices de cada candidato encontrado, com $1 \leq i \leq n_{cand}$.
5. Para cada índice candidato $f_{0,i}$, calculamos os índices das frequências mais prováveis de seus harmônicos, dados por:

$$p(j, i) = jf_{0,i}, 2 \leq j \leq n_{harm} \quad (5.4)$$

6. Para cada candidato, define-se um valor Δf_i de tolerância, que será utilizado para definir uma região em torno de seus prováveis harmônicos.

$$\Delta f_i = f_{0,i}I_{tol}, 1 \leq i \leq n_{cand} \quad (5.5)$$

O valor I_{tol} é o valor do percentual de tolerância, que é parâmetro do algoritmo¹.

7. Obtemos assim as regiões de tolerância para cada harmônico de cada frequência candidata.

$$r(j, i) = p(j, i) \pm \Delta f_i, 2 \leq j \leq n_{harm} \quad (5.6)$$

8. Em seguida deve-se buscar os picos globais dentro de cada região de tolerância $r(j, i)$, para $1 \leq i \leq n_{cand}, 2 \leq j \leq n_{harm}$. Os índices desses picos correspondem aos índices das componentes harmônicas $f_{j,i}, 2 \leq j \leq n_{harm}$ de cada candidato.

¹ Neste trabalho utilizamos o valor de 4%.

9. As magnitudes $a_{j,i}$ de cada componente harmônica e da frequência fundamental serão então:

$$a_{j,i} = Re(f_{j,i}, k), 1 \leq i \leq n_{cand}, 1 \leq j \leq n_{harm} \quad (5.7)$$

10. Calcula-se em seguida a *energia harmônica* $E_H(i)$ de cada candidato, dada por:

$$E_H(i_v, k) = \sum_{i=1}^{n_{harm}} a_{j,i}^2 \quad (5.8)$$

11. Escolhe-se como vencedor o candidato que possuir o maior valor de energia harmônica. Chamemos de i_v o índice do harmônico vencedor encontrado. Sua frequência f_v pode ser facilmente encontrada através da fórmula:

$$f_v = \frac{i_v f_s}{N} \quad (5.9)$$

12. Em trechos de silêncio ou de ruidosidade alta, pode ser que não exista uma frequência fundamental tão proeminente no sinal, e os resultados do algoritmo tendem a se tornar aleatórios. Por isso, foi criado um limiar de ruidosidade t_r fixo para o algoritmo. O descritor de ruidosidade² \mathcal{R} calculado para o k -ésimo quadro de análise é mostrado na equação 5.10 (PEETERS et al., 2011):

$$\mathcal{R}(k) = \frac{E_N(k)}{E_T(k)} \quad (5.10)$$

$E_T(k)$ é a energia total do quadro k , calculada a partir das magnitudes de todas as componentes da FFT:

$$E_T(k) = \sum_{k=1}^N Re(k)^2 \quad (5.11)$$

e $E_N(k)$ é a energia do ruído para o mesmo quadro:

$$E_N(k) = E_T(k) - E_H(i_v, k) \quad (5.12)$$

A equação 5.10 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathcal{R}(k) = 1 - \frac{E_H(i_v, k)}{E_T(k)} \quad (5.13)$$

O valor de \mathcal{R} estará entre sempre 0 e 1, sendo 1 para um sinal completamente ruidoso e 0 para um sinal completamente harmônico.

² Tradução do termo *noisiness*, do inglês.

13. O último passo do método é verificar se o valor de $\mathcal{R}(k)$ está acima ou abaixo do limiar t_r . Caso ele esteja abaixo do limiar, o sinal é considerado suficientemente harmônico, e a frequência do vencedor f_v é escolhida como a frequência fundamental do quadro; caso contrário, o sinal é considerado demasiadamente ruidoso, e a frequência do vencedor é então descartada. Retorna-se nesse caso o valor 0, que representa frequência fundamental indefinida.

5.3 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). No início de uma nota existe um período curto de transientes (ataque) em que há um alto grau de componentes não-periódicas, portanto, a curva da frequência fundamental tende a ser ruidosa e imprecisa durante este período. O mesmo ocorre em várias situações próximo ao final da nota, principalmente quando se executa notas ligadas, situação em que se torna difícil definir o momento exato de fim da nota e início da nota seguinte (muitas vezes devido a notas consecutivas apresentarem uma leve superposição, por serem tocadas em cordas distintas).

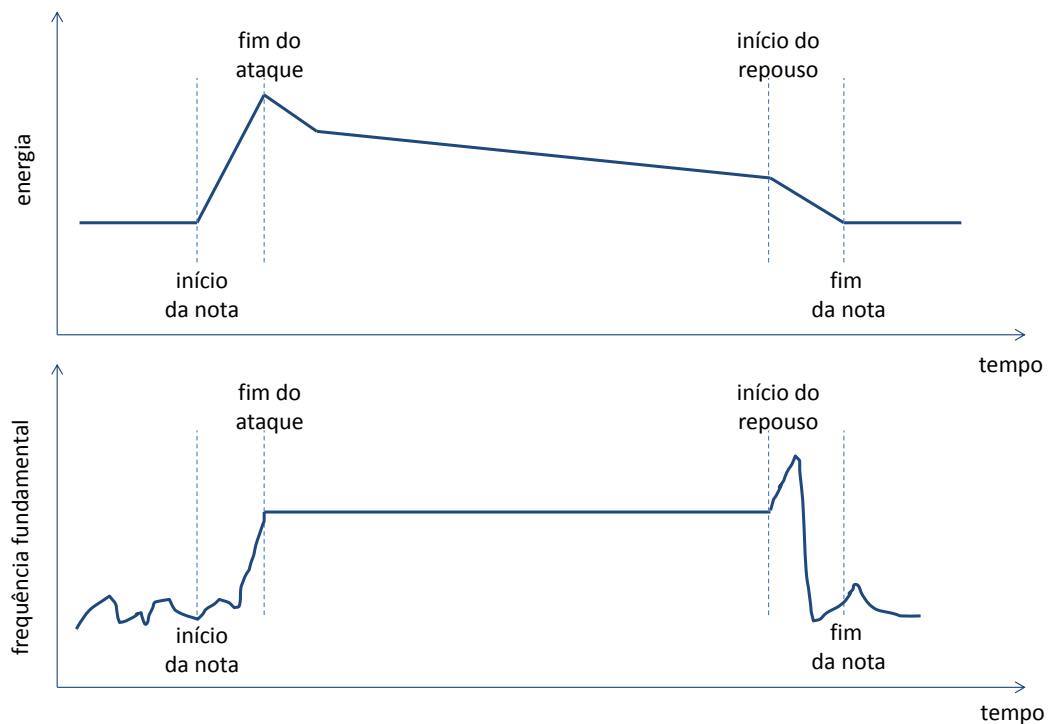


Figura 9: Ilustração representando as curvas de energia (acima) e frequência fundamental (abaixo) de uma nota musical.

Assim, após definidos os instantes de início e fim da nota, é necessário definir os pontos em que a curva da frequência fundamental se encontra estável, próximo aos limites da nota tocada. Convencionamos chamar estes dois pontos de fim de ataque e início do repouso, conforme se utiliza em síntese sonora para representar diferentes regiões no envelope de energia de uma nota musical. Nesse trabalho convencionamos que o fim do ataque é o instante após o início da nota que a frequência fundamental se estabiliza, e o início do repouso³ é o início do período de instabilidade antes do final da nota, conforme mostrado na figura 9. É importante ressaltar que os instantes de fim de ataque e início do repouso detectados através da curva de frequência fundamental não são necessariamente os mesmos que os detectados através do envelope de energia RMS, mas provavelmente estão fortemente relacionados.

5.3.1 Detecção de início de nota (*onset*)

Para a detecção dos inícios de nota, foi desenvolvido um algoritmo de segmentação baseado nos valores de ruidosidade e *energia RMS* do sinal. A curva \mathcal{R} do descritor de ruidosidade (equação 5.13) tende a ficar próxima de 1 quando o conteúdo harmônico do sinal é baixo; por exemplo, em instantes de silêncio, quando uma nova nota é tocada (durante o seu ataque) ou na região de transição entre notas. Por outro lado, ao longo da sustentação da nota, o valor da ruidosidade do sinal deverá diminuir, devido à energia harmônica mais significativa nesta região. A curva de R se mostrou eficaz para detectar os transientes do sinal, desde que trechos de baixa energia, correspondentes às pausas, sejam descartados, já que o valor de R também cresce nestas regiões. Para isso, utilizamos a curva de RMS para considerar apenas os pontos em que houvesse uma energia significativa no sinal. A energia RMS do k -ésimo quadro de um sinal é dada por:

$$RMS(k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L x(j, k)^2} \quad (5.14)$$

Ao invés de utilizar um limiar fixo na curva do RMS, utilizamos a própria curva do RMS para modular a curva do descritor de ruidosidade, obtendo assim a curva \mathcal{D} :

$$\mathcal{D}(k) = RMS(k) \times \mathcal{R}(k) \quad (5.15)$$

Por fim, basta extrair a derivada da curva \mathcal{D} e encontrar os picos da curva resultante para se obter os prováveis pontos de início de nota ao longo do sinal.

³ No inglês utiliza-se o termo *release* para denominar o trecho final do envelope de uma nota musical. Adotamos o termo repouso para nos referirmos a este trecho.

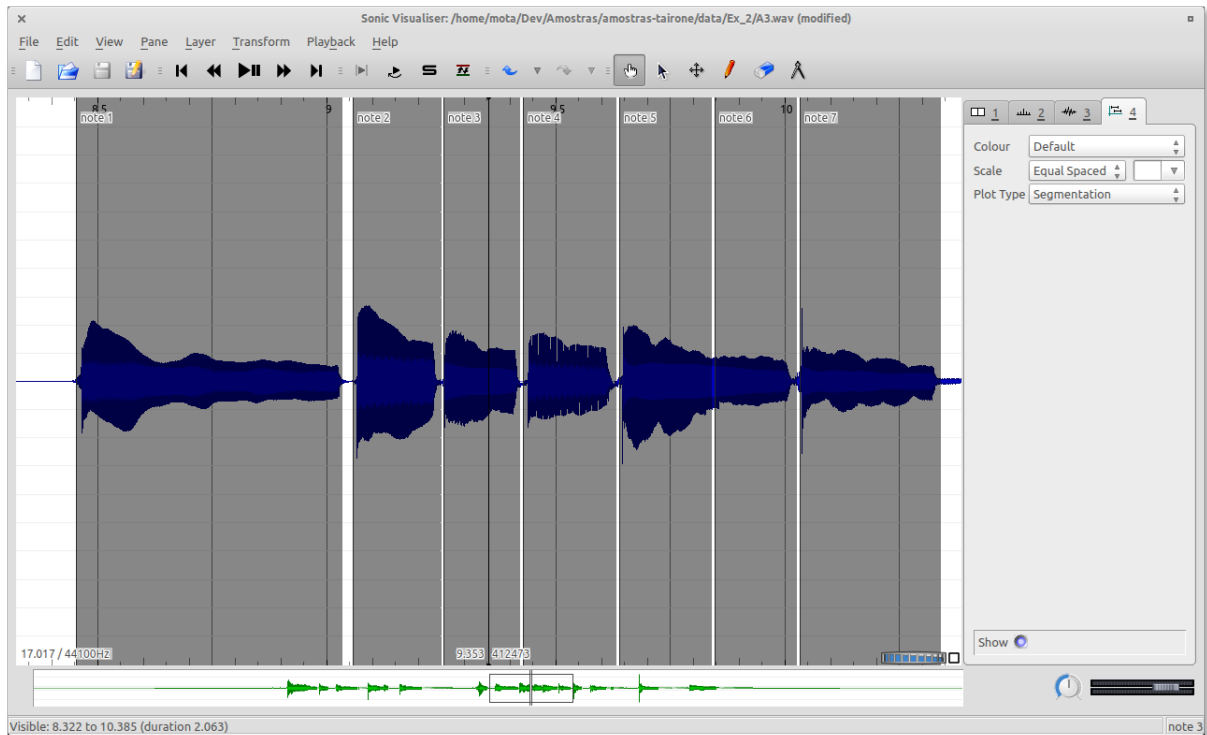


Figura 10: Ajuste manual da segmentação através do Sonic Visualizer

5.3.2 Detecção de fim de nota (*offset*)

Para a detecção dos instantes de fim de nota, utilizamos um algoritmo que utiliza a informação da energia RMS do sinal. Após definidos os instantes de início de todas as notas musicais de um trecho, o algoritmo busca, no intervalo entre dois inícios de nota consecutivos, pelo instante de fim da primeira. Neste intervalo, calcula-se a derivada da curva de energia RMS (equação 5.14), e em seguida o último mínimo local dessa curva, ou seja, o último ponto em que a energia do sinal cai rapidamente. O ponto encontrado é considerado instante de fim da nota.

5.3.3 Ajuste manual

Os métodos de segmentação desenvolvidos se mostraram razoavelmente precisos na detecção do início e final de notas em gravações de guitarra, entretanto foi necessário uma etapa de ajuste manual dos pontos detectados pelo algoritmo. Esse ajuste consistiu, principalmente, na exclusão de detecção redundantes de notas. A correção manual das segmentações foi realizada utilizando o software Sonic Visualizer (CANNAM; LANDONE; SANDLER, 2010). Este software facilita a navegação pelos arquivos de áudio e marcação dos pontos da segmentação (figura 10). Para a troca de informações entre as ferramentas utilizadas, foram desenvolvidos módulos de importação/exportação de dados de segmentação através de arquivos de texto CSV (valores separados por vírgula).

5.3.4 Ataque e repouso

Verificamos que, nos períodos de instabilidade da curva de frequência fundamental, geralmente aparecem detecções de frequências muito mais baixas do que as da nota tocada, e a curva apresenta um perfil bastante aleatório. Esses períodos geralmente ocorrem no início e no final da curva de frequência fundamental para cada nota. Assim, definimos um limiar de 3 semitons de desvio em relação à frequência da nota tocada. Para encontrarmos o fim de ataque e início do repouso, calcula-se o 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. Escolheu-se trabalhar com o limiar de 3 semitons para garantir que o algoritmo não descartasse erroneamente trechos de bending da curva.

Para determinar a frequência f_n da nota tocada, os pontos da curva de frequência fundamental são primeiramente arredondados para a frequência temperada mais próxima. Em seguida, calcula-se a moda da curva (valor mais frequente) para obter a frequência fundamental da nota musical predominante no trecho.

5.4 Descritor de bending

Para extrairmos informações referentes ao bending, é necessário detectar quando um bending é realizado em uma nota e determinar o seus instantes de início e fim. Seja $\mathcal{P}(k)$ o valor da frequência fundamental estimado para o quadro k . O método desenvolvido primeiramente arredonda cada valor \mathcal{P} para a altura temperada mais próxima, obtendo assim 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 em que ocorre a última transição no sentido descendente ($\mathcal{P}_r(k) < \mathcal{P}_r(k-1)$). Em seguida, aplica-se à curva \mathcal{P} original um filtro passa-baixas *butterworth* de ordem 6, com frequência de corte em 20 Hz, obtendo-se a curva \mathcal{P}_f .

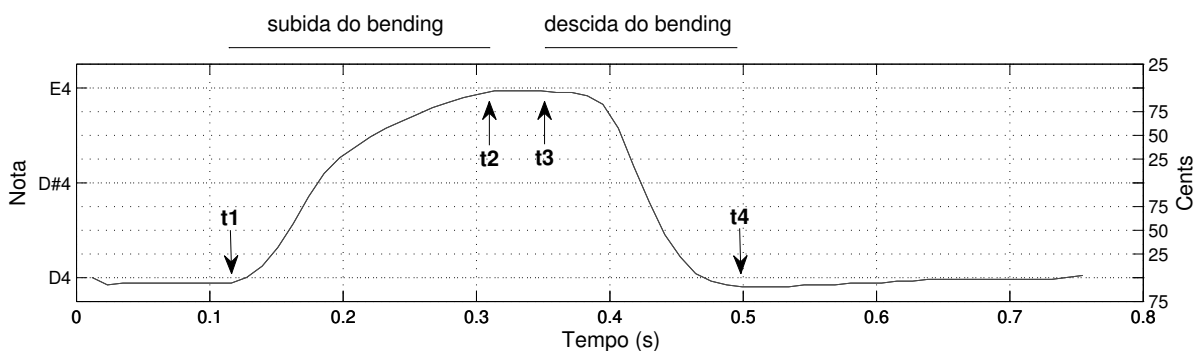


Figura 11: Curva de frequência fundamental para a nota 12 do trecho 1.

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 da curva \mathcal{P}_f inverte de sinal.

Estes pontos são o instante de início e fim da subida do bending. A mesma abordagem é adotada para os pontos de início e fim da descida do bending, a partir do ponto k_d .

Para caracterizar o bending foi definido um descritor multidimensional composto por 13 dimensões, mostradas na tabela 2. As variáveis marcadas com um asterisco (*) são normalizadas em relação à duração da região de sustentação da nota.

Tabela 2 – Dimensões extraídas para o descritor de bending

	Dimensão	Nome da variável
1	Duração do bending na subida	BendingUpDur*
2	Instante de fim da curva de subida do bending	BendingUpEnd*
3	Centróide temporal da altura na subida do bending	BendingUpCentroid
4	Extensão do bending na subida	BendingUpExtension
5	Duração do bending na descida	BendingDownDur*
6	Instante de início da curva de descida do bending	BendingDownStart*
7	Centróide temporal da altura na descida do bending	BendingDownCentroid
8	Velocidade média do bending na subida	AvgBendingUpSpeed
9	Velocidade média do bending na descida	AvgBendingDownSpeed
10	Valor da velocidade instantânea máxima do bending na subida	MaxBendingUpSpeed
11	Instante da velocidade instantânea máxima do bending na subida	MaxBendingUpSpeedTime*
12	Valor da velocidade instantânea máxima do bending na descida	MaxBendingDownSpeed
13	Instante da velocidade instantânea máxima do bending na descida	MaxBendingDownSpeedTime*

5.4.1 Velocidade média 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:

$$v_m = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (5.16)$$

Veja a curva de bending da figura 11. Na subida se tem $\Delta f_s = f_2 - f_1$ e $\Delta t_s = t_2 - t_1$, enquanto na descida $\Delta f_d = f_4 - f_3$ e $\Delta t_s = t_4 - t_3$.

5.4.2 Velocidades instantâneas máximas do bending

A velocidade máxima do bending foi estimada a partir da curva da taxa de variação instantânea da frequência fundamental $v_i(k)$, obtida pela derivada da curva de frequência

fundamental, suavizada por um filtro passa-baixas *butterworth* de ordem 6 e frequência de corte 20 Hz:

$$v_i(k) = \frac{d\mathcal{P}_f(k)}{dk} \quad (5.17)$$

onde \mathcal{P}_f é a curva suavizada da frequência fundamental. O instante de velocidade máxima do bending na subida é estimado pelo pico da curva $v_i(t)$ e o instante de velocidade máxima do bending na descida pelo vale (ponto de mínimo). Os valores das velocidades máximas na subida e na descida é o módulo da taxa encontrada para estes pontos, respectivamente.

5.4.3 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 $\mathcal{P}(k)$ a frequência fundamental de uma nota para o quadro k . Seu centróide temporal da altura c , calculado entre os quadros k_1 e k_2 será dado por:

$$c(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n=k_1}^{k_2} \mathcal{P}(n)n}{\sum_{n=k_1}^{k_2} \mathcal{P}(n)} \quad (5.18)$$

Para calcular o centróide temporal da altura para os trechos de subida e descida do bending, basta utilizar a equação 5.18, uma vez limitada pelos pontos de início e fim da subida e outra pelos pontos de início e fim da descida do bending.

5.4.3.1 Extensão do bending

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

5.5 Descritor de vibrato

Para caracterizar o vibrato foi também definido um descritor multidimensional de 12 dimensões, listadas na tabela 3 e estimadas como detalhado a seguir. As variáveis com um asterisco (*) são normalizadas em relação à duração da região de sustentação da nota.

Para extrair a extensão e taxa do vibrato, foi desenvolvido um algoritmo baseado na detecção de regularidade dos picos da curva de frequência fundamental. A figura 12, mostra a curva de frequência fundamental de uma nota tocada com vibrato. O período de um ciclo de vibrato é a distância (em segundos) entre dois picos locais consecutivos da curva. Neste algoritmo, considera-se um trecho como sendo vibrato quando a oscilação

Tabela 3 – Dimensões extraídas para o descritor de vibrato

	Dimensão	Nome da variável
1	Média da extensão do vibrato	MeanVibratoDepth
2	Regularidade da extensão do vibrato	DepthRegularity
3	Máximo da extensão do vibrato	MaxVibratoDepth
4	Instante em que a extensão atinge seu máximo	MaxVibratoDepthTime*
5	Mínimo da extensão do vibrato	MinVibratoDepth
6	Média da taxa do vibrato	MeanVibratoRate
7	Regularidade da taxa do vibrato	RateRegularity
8	Máximo da taxa do vibrato	MaxVibratoRate
9	Mínimo da taxa do vibrato	MinVibratoRate
10	Instante do início do vibrato	VibratoStartTime*
11	Instante do fim do vibrato	VibratoEndTime*
12	Perfil da extensão do vibrato (inclinação)	DepthInclination

da curva estiver entre 2 e 10 Hz, o que corresponde a períodos entre 0.1 e 0.5 segundos. Além disso, estabeleceu-se que a diferença de altura entre pontos de mínimo e máximo consecutivos deve ser de pelo menos 0.5% da menor frequência. Este valor foi escolhido como uma 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; MOORE, 1995).

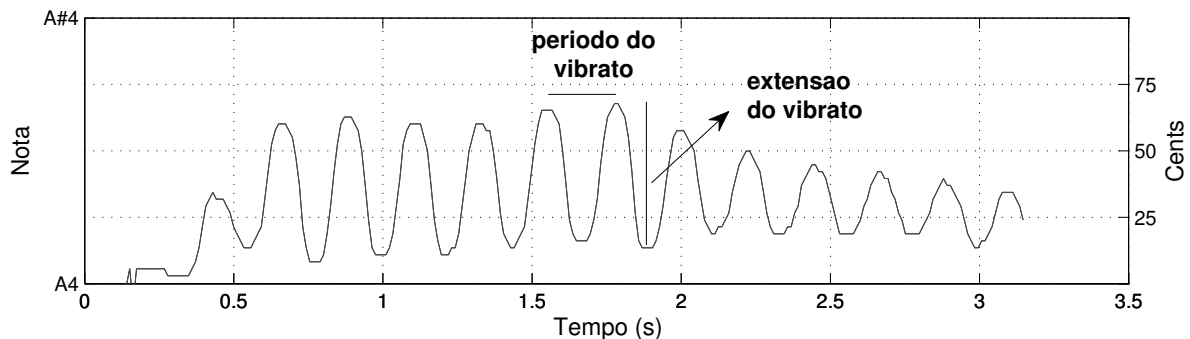


Figura 12: Curva de frequência fundamental para a nota 22 do trecho 1.

O algoritmo desenvolvido baseia-se nos seguintes passos:

1. Calcula-se todos os pontos de máximo local (picos) ao longo da curva de frequência fundamental.
2. Seja N_p o número de picos encontrados e p_n o valor da frequência fundamental em cada ponto de máximo n encontrado. Para cada valor $2 \leq n \leq N_p$, são feitos os seguintes passos:
 3. a) Calcula-se a distância (em segundos) entre o pico n atual e o anterior $n - 1$. Denominemos o valor encontrado Δt_n .

- b) Se o valor de Δt_n estiver entre 0.1 e 0.5 segundos, seguir os passos abaixo; caso não esteja, voltar ao passo 2 e partir para o próximo pico encontrado.
- c) Calcula-se o valor da frequência fundamental mínima entre os picos n e $n - 1$. Denominemos o valor encontrado v_n .
- d) Calcula-se a diferença no valor da frequência fundamental entre o pico e o vale em questão:

$$\Delta f_n = p_n - v_n \quad (5.19)$$

- e) Caso o valor de Δf_n seja maior do que 0.6% do valor de v_n , considera-se o intervalo entre os picos n e $n - 1$ como candidato a ciclo de vibrato. Caso o valor seja inferior, voltar ao passo 2 e partir para o próximo pico encontrado.
- f) Se o intervalo encontrado para o pico imediatamente anterior (entre $n - 1$ e $n - 2$) também tiver sido selecionado como candidato, significa que o intervalo em questão é a segunda repetição de um ciclo de modulação de frequência, portanto, ele é escolhido como um trecho onde há vibrato. Caso contrário, voltar ao passo 2 e partir para o próximo pico encontrado.
- g) Calcula-se o valor da taxa de oscilação do vibrato $r_v(n)$:

$$r_v(n) = \frac{1}{\Delta t_n} \quad (5.20)$$

- h) O valor da extensão do vibrato $d_v(n)$, é exatamente o valor Δf_n encontrado anteriormente:

$$d_v(n) = \Delta f_n \quad (5.21)$$

O algoritmo dificilmente erra em notas com bending, visto que só considera uma modulação como vibrato a partir da segunda repetição de um ciclo.

5.5.1 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 5.22 e 5.23 respectivamente.

$$R_d = 1 - \frac{\sum_{l=2}^C |d_v(l) - d_v(l-1)|}{\sum_{l=1}^C d_v(l)} \quad (5.22)$$

$$R_r = 1 - \frac{\sum_{l=2}^C |r_v(l) - r_v(l-1)|}{\sum_{l=1}^C r_v(l)} \quad (5.23)$$

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.

5.5.1.1 Valores médio, máximo e mínimo do vibrato e instante de extensão máxima

Os valores médio, máximo e mínimo da taxa e extensão do vibrato são escalares que representam diversas características distintas do vibrato executado. O instante em que a extensão do vibrato atinge seu valor máximo pode também ser interessante do ponto de vista musical. Estes valores foram estimados nos trechos onde a existência de vibrato foi detectada.

5.5.1.2 Perfil da extensão do vibrato ao longo da nota

O perfil da extensão do vibrato definido como o coeficiente angular α 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.

5.5.2 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.

5.6 Análise e categorização das performances

5.6.1 K vizinhos mais próximos

O algoritmo k vizinhos mais próximos, mais conhecido como KNN, é um método de classificação supervisionado e não paramétrico. Métodos de classificação supervisionados são aqueles que necessitam receber como entrada um conjunto de vetores de treinamento $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ e as classes $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ associadas a cada vetor. O método é dito não paramétrico pois não faz nenhum tipo de suposição em relação à distribuição dos dados de entrada.

Tendo como base os dados de treinamento, o objetivo do algoritmo é gerar como saída um vetor com a classe mais provável $\mathbf{y}' = \{y'_1, y'_2, \dots, y'_n\}$ dos dados de entrada que se deseja classificar $\mathbf{X}' = \{\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_n\}$.

O princípio de funcionamento do algoritmo é extremamente simples. Dado um parâmetro k inteiro, o algoritmo busca para cada valor \mathbf{x}'_i quais são os seus k vizinhos mais

próximos. Ao encontrar esses vizinhos, é feita uma verificação de suas respectivas classes; aquela que for mais frequente entre os vizinhos é selecionada como a classe mais provável correspondente à observação \mathbf{x}'_i . Outra possibilidade bastante utilizada é de ponderar a influência de cada vizinho encontrado utilizando o inverso da distância entre eles e a observação em questão; assim os vizinhos mais próximos terão uma maior influência na definição da classe de \mathbf{x}'_i .

A definição de um valor razoável para k é importante para se garantir bons resultados com o algoritmo. Neste trabalho o valor $k = 3$ foi adotado após serem testados empiricamente diversos valores distintos. A taxa de acerto para k foi a melhor dentre os valores testados $1 \leq k \leq 10$.

5.6.2 Mapas auto-organizativos de Kohonen (SOM)

Conhecidos como SOM (Self-Organizing Maps), os Mapas Auto-Organizativos de Kohonen são um tipo de rede neural não-supervisionada capaz de realizar um mapeamento de dados de entrada de grandes dimensões em espaços de baixa dimensão, preservando as relações topológicas dos dados originais.

Ou seja, dados de entrada com maior grau de similaridade geralmente são exibidos no mapa próximos uns dos outros. Por ser um método de classificação não-supervisionado, pode ser utilizado para classificar dados de entrada desconhecidos e agrupá-los (KOHONEN, 1995). Utilizamos neste trabalho uma implementação do SOM na plataforma Matlab - *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.

6 Resultados

Os resultados deste trabalho serão apresentados em três partes. Na primeira, apresentamos uma análise preliminar a partir das curvas de frequência fundamental, além de uma inspeção gráfica dos valores extraídos para os descritores (seção 6.1). Na segunda parte, serão apresentados os resultados do algoritmo KNN na identificação de sujeitos através da análise de notas separadas (seção 6.2). Por fim iremos mostrar os mapas auto-organizativos (SOM) gerados com o objetivo de representar a similaridade entre as performances distintas (seção 6.3).

6.1 Análise dos descritores extraídos

6.1.1 Bending

Na figura 13 são exibidas as curvas de frequência fundamental extraídas para a nota 18 do excerto 1. Em cada gráfico são mostradas quatro execuções diferentes de uma mesma nota, pelo mesmo guitarrista. É possível perceber, através dos gráficos, que o mesmo músico tende a fazer o bending da nota de forma bastante similar, em todas as quatro execuções. Isso sugere a existência de uma assinatura associada ao perfil do bending do sujeito.

A figura 14 mostra, os valores das dimensões do descritor de bending para as quatro execuções da nota 18 do trecho 1, por cada guitarrista¹. Cada gráfico corresponde aos resultados para uma dimensão distinta. As letras de A a H representam, cada uma, um dos oito guitarristas gravados. Para várias dimensões do descritor de bending, foram observadas diferenças acentuadas entre os sujeitos. É possível prever que uma combinação de um subconjunto de dimensões resultaria em uma classificação capaz de identificar o sujeito com uma boa taxa de acerto.

Uma forma intuitiva para se visualizar dados multidimensionais, é através dos gráficos de radar (JOHNSON; WICHERN, 2007). Um gráfico de radar é gerado por meio de um círculo de referência, em que se pode traçar p segmentos a partir do centro, tendo cada um desses p segmentos representando uma dimensão, com comprimento proporcional ao seu valor. As extremidades dos segmentos são conectadas por linhas retas, obtendo-se uma forma geométrica única para cada observação. Os comprimentos dos segmentos são normalizados para cada representação².

¹ A descrição de cada dimensão mostrada nos gráficos da figura 14 pode ser consultada na tabela 2.

² As notas mostradas em uma figura podem ser comparadas entre si, mas não se deve comparar notas de duas figuras distintas, afinal a normalização é feita para cada figura mostrada

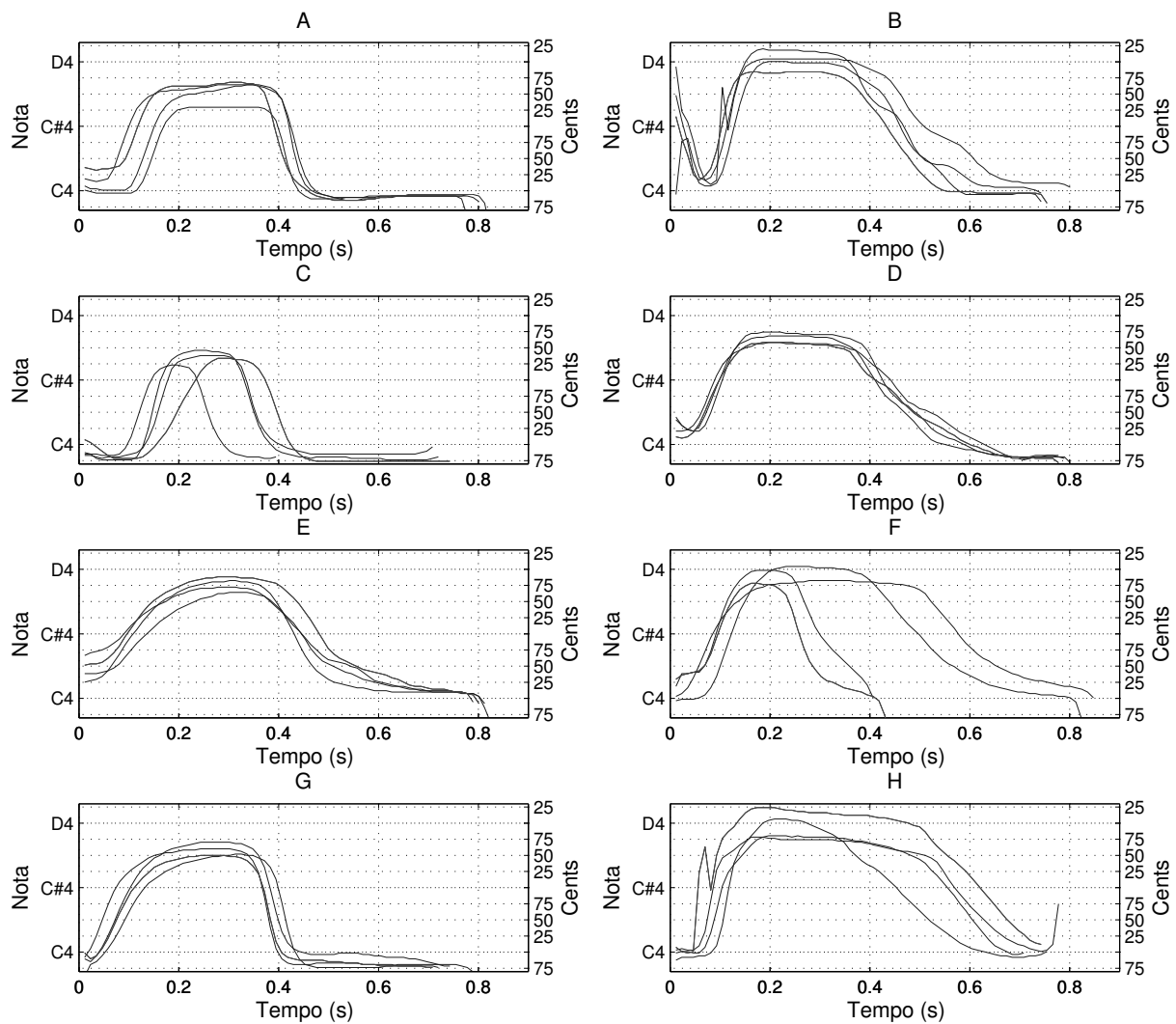


Figura 13: Curva de frequência fundamental da nota 18 do excerto 1 tocada por oito guitarristas.

As figuras 15 a 25 mostram os gráficos de radar gerados a partir de todas as notas com bending. Em cada figura, os gráficos em uma mesma coluna mostram quatro diferentes execuções da nota por uma mesmo guitarrista. As letras de A a H representam os diferentes guitarristas gravados, e o número mostrado à direita da letra (de 1 a 4) representa as quatro diferentes performances gravadas para o guitarrista. O segmento horizontal traçado a partir do centro círculo para a direita representa a primeira dimensão do descritor de bending, mostrada na tabela 2. As dimensões seguintes mostradas nessa tabela podem ser encontradas seguindo o diagrama no sentido anti-horário.

Mesmo considerando uma certa subjetividade na avaliação das diferentes formas geométricas, esta representação pode revelar, a grosso modo, similaridades e dissimilaridades na distribuição dimensional do descritor de bending entre diferentes observações. É possível observar que, para muitas das notas mostradas nestes gráficos, quando tocadas por um mesmo sujeito, apresentam mais similaridade do que aquelas tocadas por sujeitos

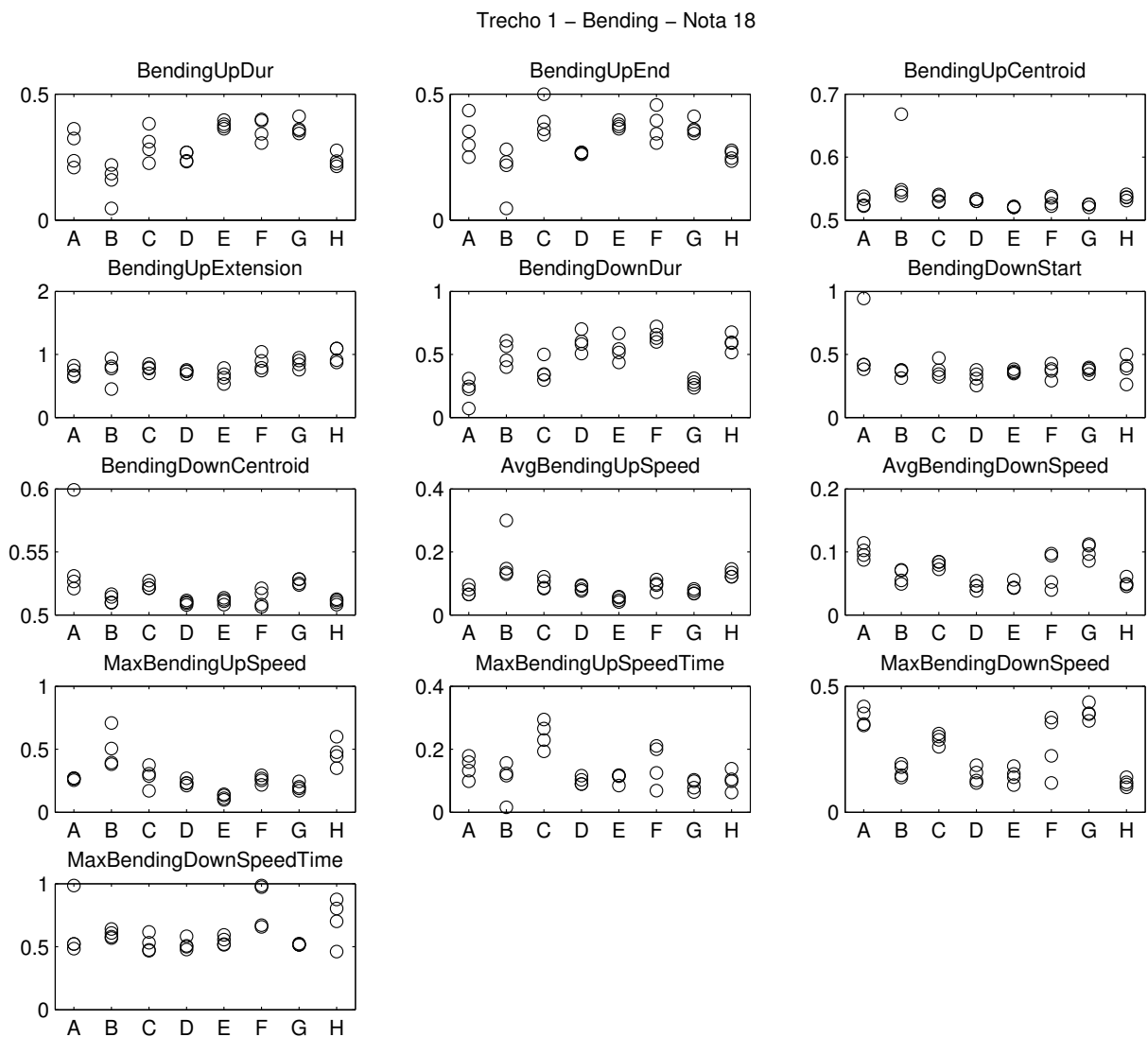


Figura 14: Gráfico mostrando os resultados do descritor de bending aplicado a todas as execuções da nota 18 do trecho 1.

distintos. No gráfico 15 por exemplo, que mostra as execuções da nota 4 do trecho 1, é possível perceber que as notas tocadas pelo sujeito E são muito similares, e se diferem completamente das notas tocadas pelo sujeito H ou C. Alguns sujeitos como o B e o H já são mais similares, e é difícil distinguir as representações dos seus bendings.

Alguns gráficos de radar possuem formas geométricas completamente diferentes das outras mostradas. Tais gráficos provavelmente representam valores atípicos do descritor de bending, que podem ter duas possíveis causas: (1) o músico executou a nota de forma totalmente diferente das outras ou (2) o descritor falhou na extração dos dados para a nota em questão. Avaliando mais uma vez o gráfico 15, é possível perceber que G1 possui um formato de ponto, totalmente diferente das outras formas mostradas. Para este caso em particular, o sistema não conseguiu detectar o bending corretamente. Houve uma preocupação em se corrigir tais valores atípicos, e a visualização destes gráficos foi

extremamente útil em estágios anteriores deste trabalho para detectar problemas com os descritores desenvolvidos. Apesar de vários deles terem sido solucionados, os descritores implementados ainda falham para algumas situações. Entretanto, assumiu-se que isso não viria a ser um problema para o sistema, afinal, por mais que um descritor possa vir a apresentar falhas de detecção para uma nota em particular, essa taxa é relativamente pequena em relação ao total de notas representadas corretamente.

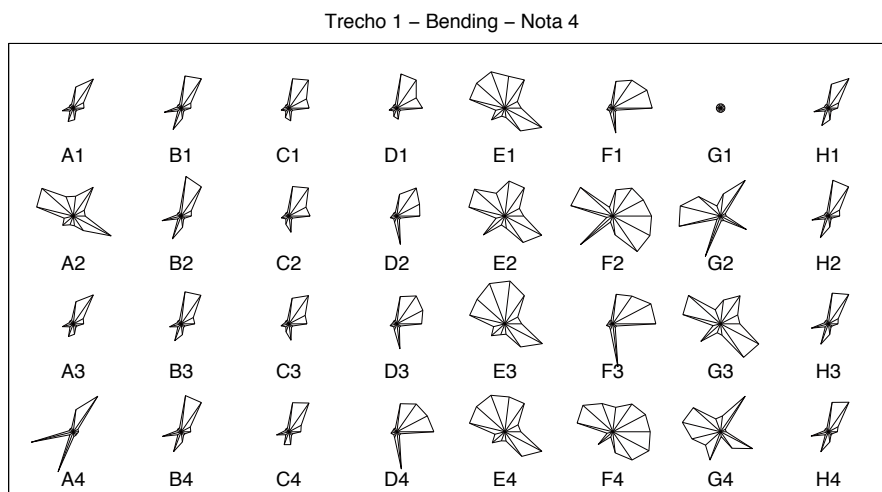


Figura 15: Gráfico de radar para o bending da nota 4 do trecho 1

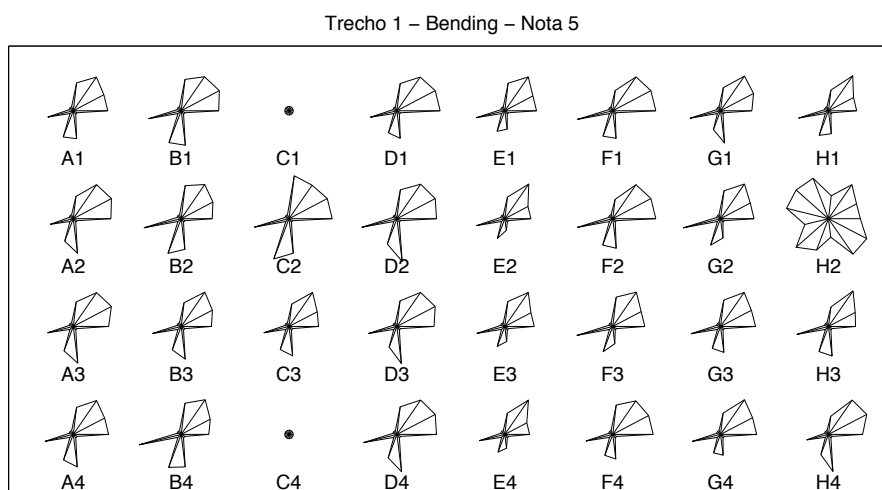


Figura 16: Gráfico de radar para o bending da nota 5 do trecho 1

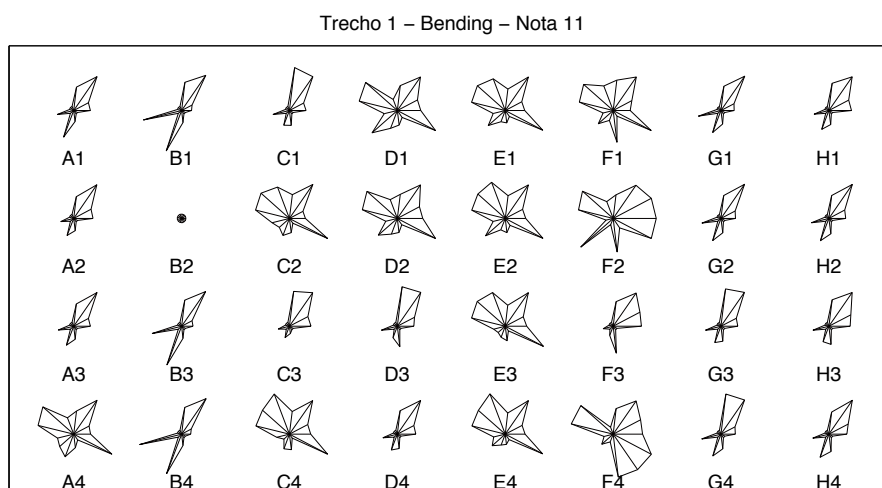


Figura 17: Gráfico de radar para o bending da nota 11 do trecho 1

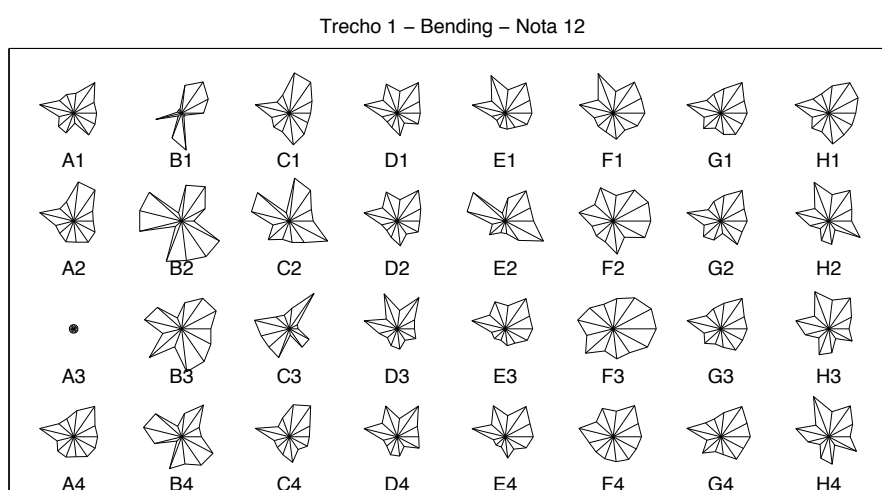


Figura 18: Gráfico de radar para o bending da nota 12 do trecho 1

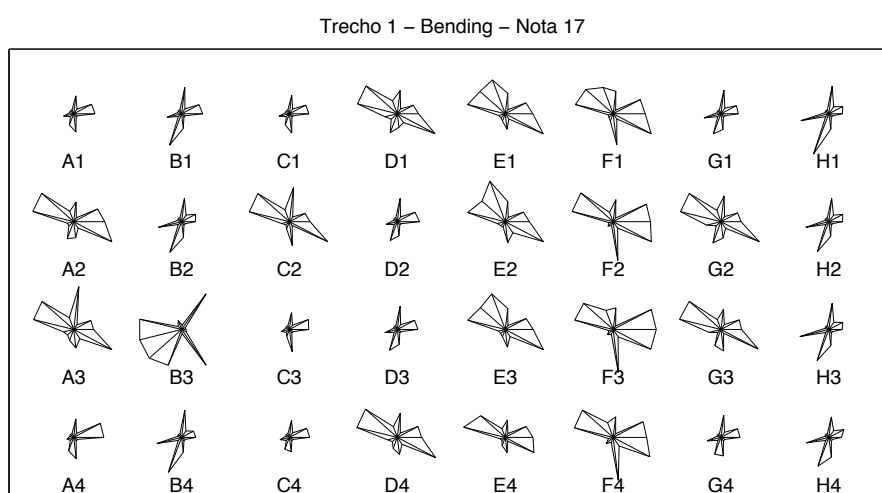


Figura 19: Gráfico de radar para o bending da nota 17 do trecho 1

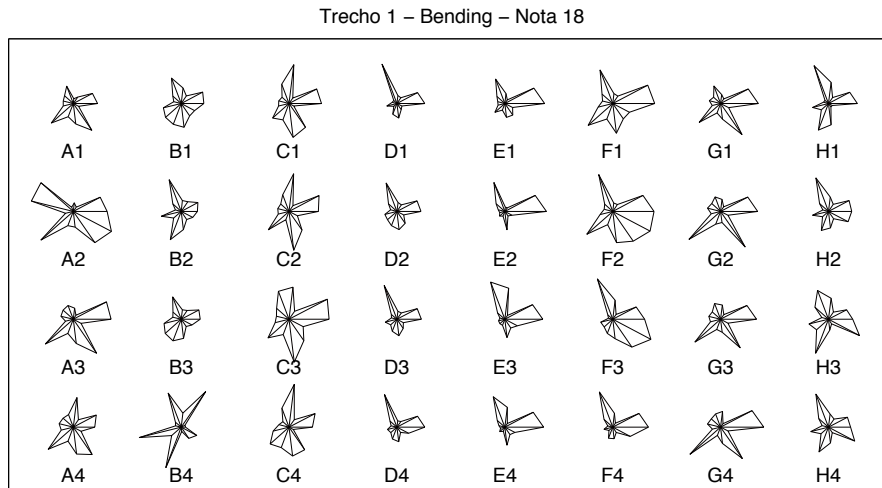


Figura 20: Gráfico de radar para o bending da nota 18 do trecho 1

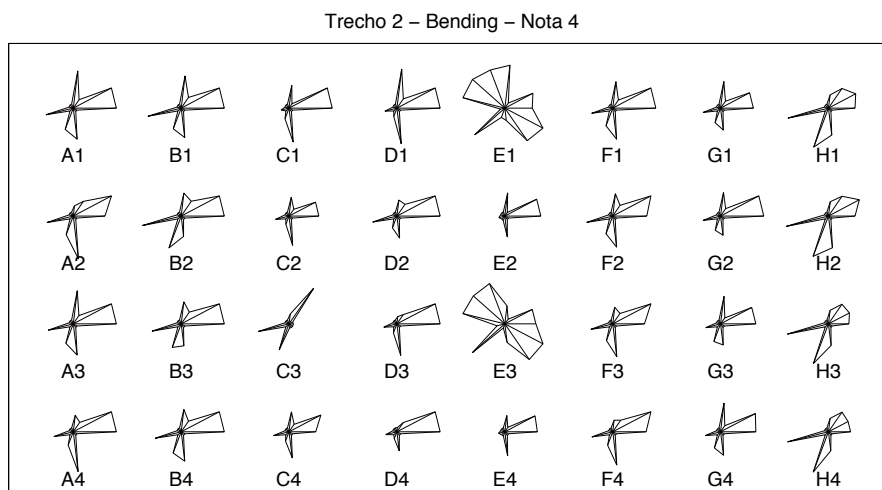


Figura 21: Gráfico de radar para o bending da nota 4 do trecho 2

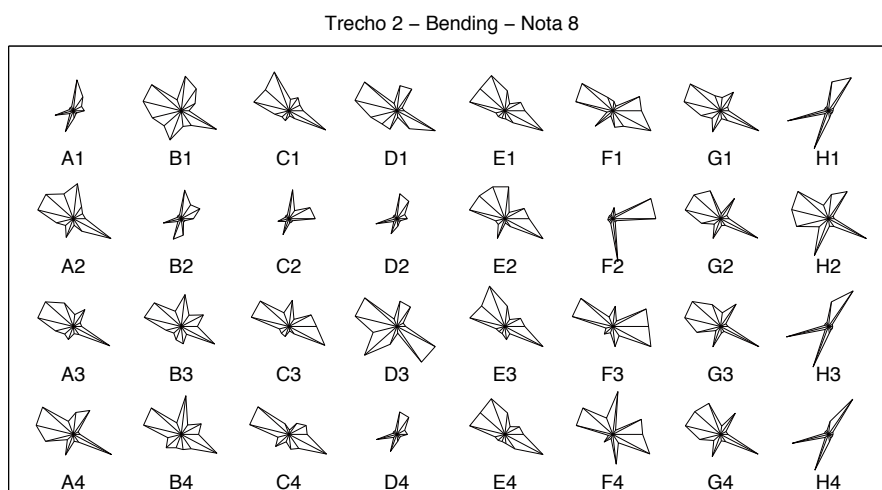


Figura 22: Gráfico de radar para o bending da nota 8 do trecho 2

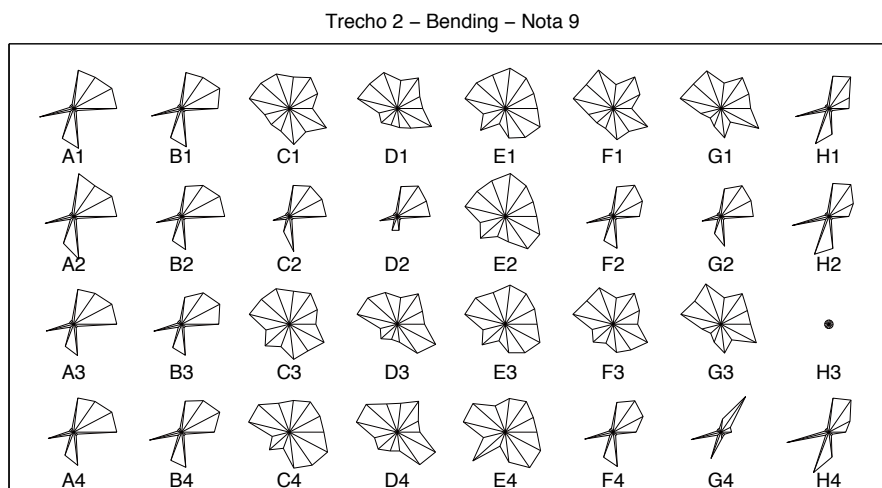


Figura 23: Gráfico de radar para o bending da nota 9 do trecho 2

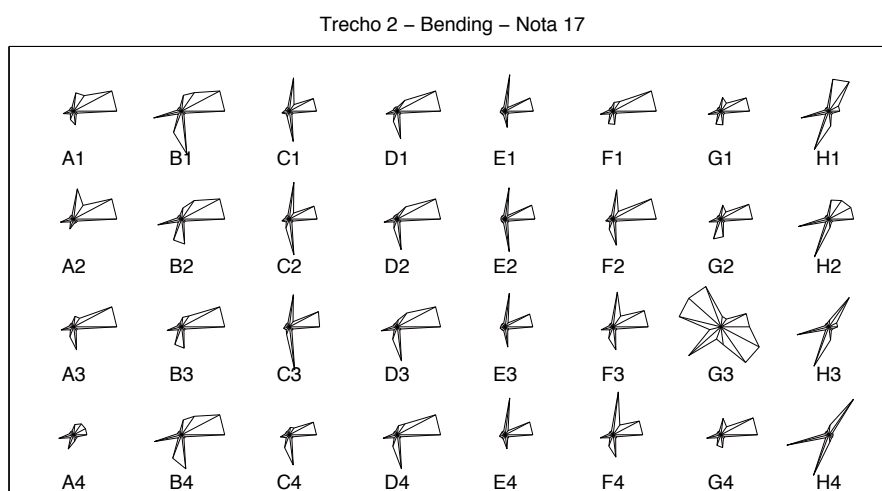


Figura 24: Gráfico de radar para o bending da nota 17 do trecho 2

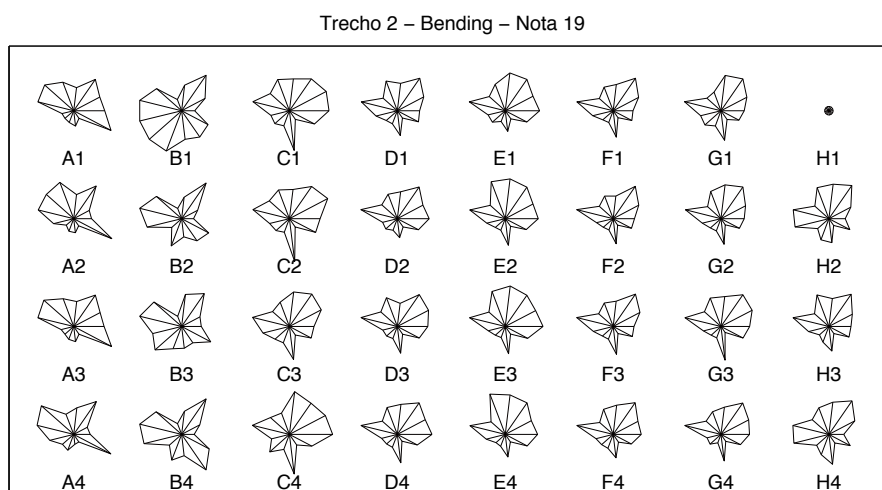


Figura 25: Gráfico de radar para o bending da nota 19 do trecho 2

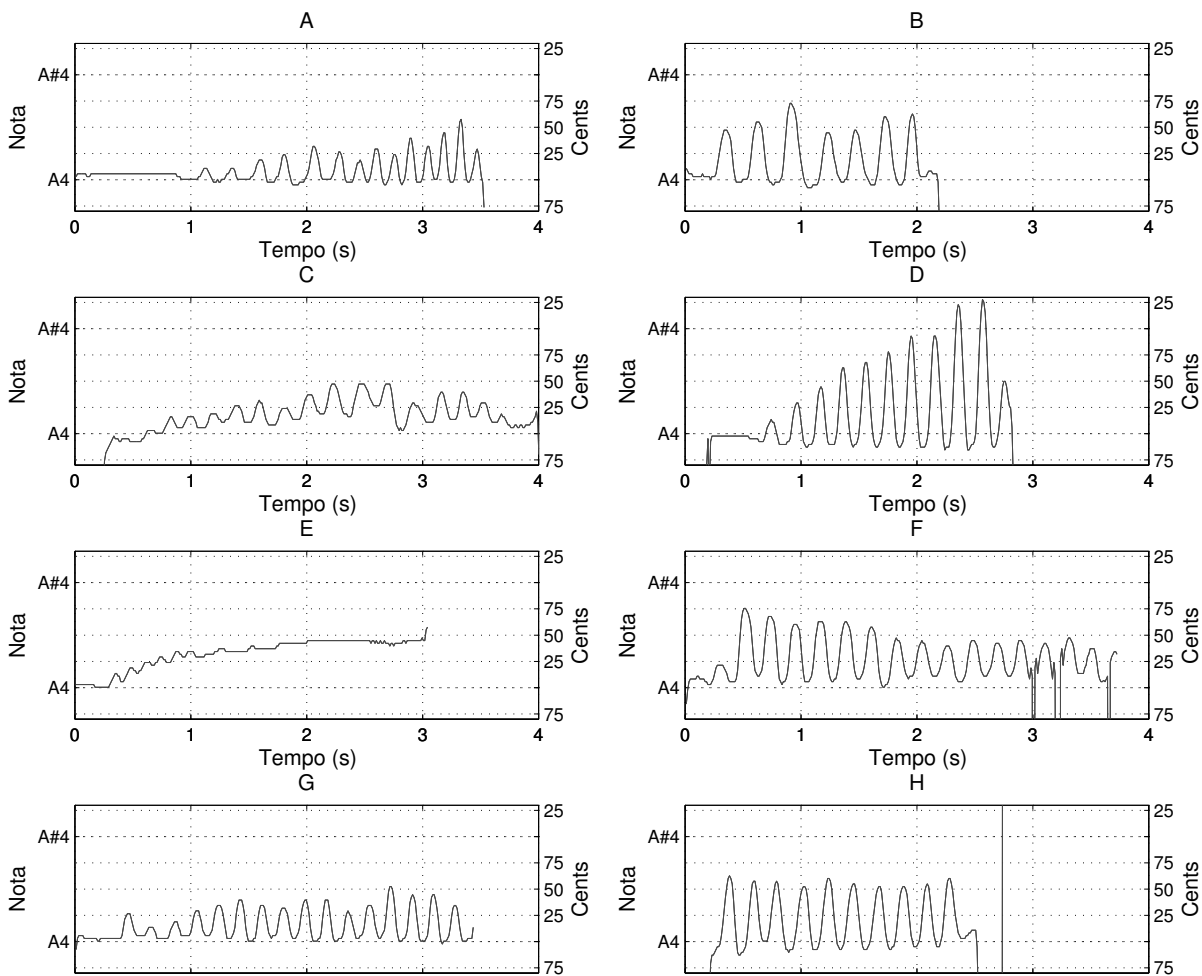


Figura 26: Curvas de frequência fundamental para a nota 22 do trecho 1 (com vibrato)

6.1.2 Vibrato

Na figura 26 são mostradas as curvas de frequência fundamental extraídas para a nota 22 do trecho 1, tocada pelos oito guitarristas gravados. As curvas da taxa extensão do vibrato extraídas para as notas correspondentes são mostradas na figura 27. Escolhemos mostrar a nota 22 nestes gráficos por ser uma nota longa com vibrato, e por ser a última nota do trecho 1. Portanto, se pode esperar que os sujeitos realizem vibratos bastante expressivos. Os dados mostrados são referentes à última performance gravada para o trecho 1 no experimento.

Como se pode observar através destes gráficos, para esta nota, o sujeito D executa um vibrato com perfil de extensão crescente, e seu crescimento a cada ciclo é feito de forma muito regular. O vibrato se inicia com a extensão de aproximadamente 20 cents, atingindo cerca de 140 cents no seu ponto de máximo (quase um semitom e meio). Para os sujeitos A e C, também é possível identificar um perfil crescente, mas as extensões máximas alcançadas são mais moderadas. Enquanto isso, o sujeito E executa um vibrato de perfil decrescente. No caso da nota tocada pelo sujeito B, há uma falha na detecção

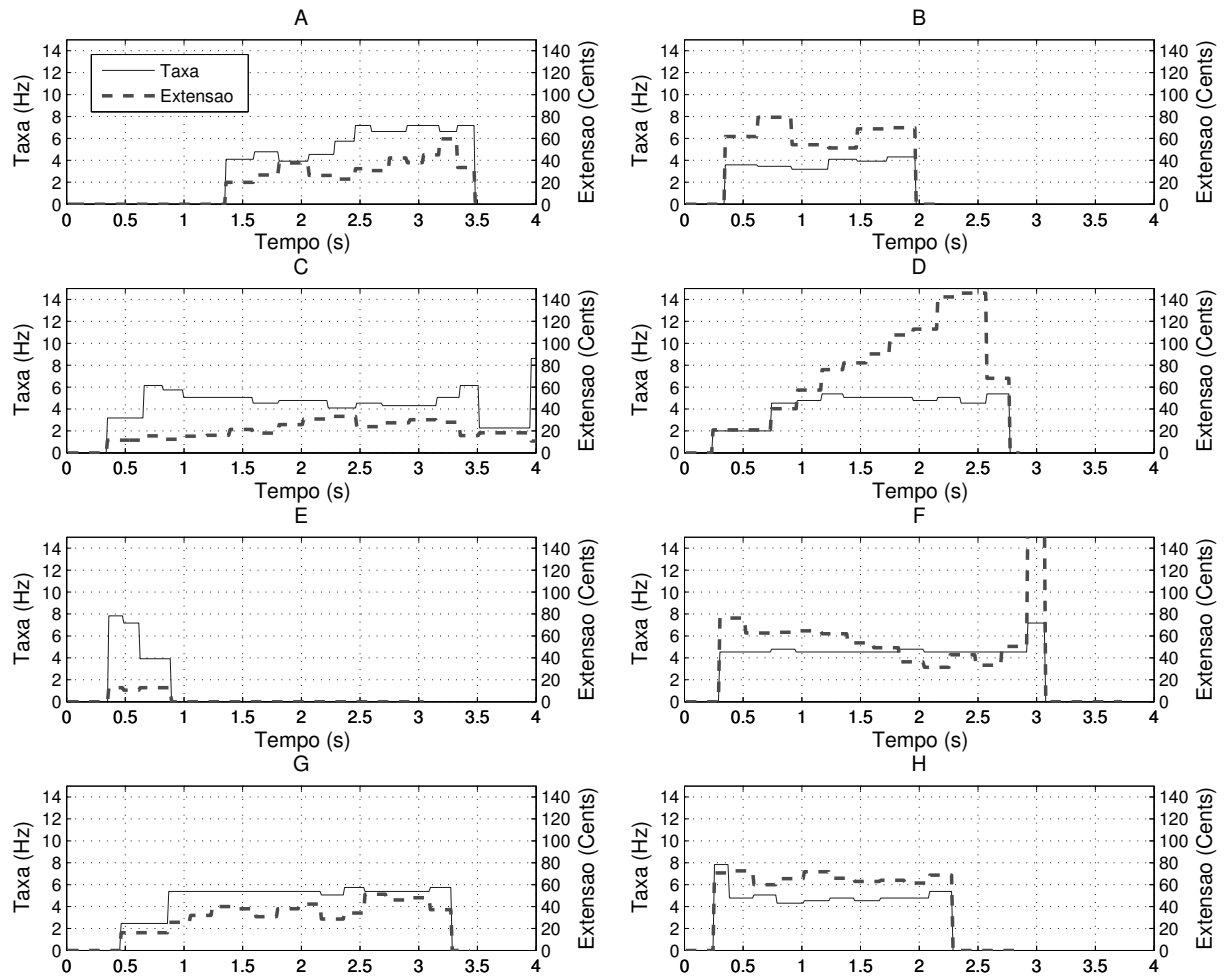


Figura 27: Curvas da taxa e extensão do vibrato para a nota 22 do trecho 1

exata da frequência fundamental na região de fim da nota, que causa um erro da detecção da extensão do vibrato na região. Isso foi constatado em alguns casos de notas longas com vibrato, e acontece porque o atrito entre a corda e o traste do instrumento gera transientes que se sobressaem quando o guitarrista executa o vibrato por períodos prolongados. Essa falha em particular gera um valor atípico para essa nota, que pode ser visualizado na figura 32 (F4). Por fim, o sujeito H executa um vibrato mais regular, mantendo a extensão sempre entre 60 e 80 cents.

A figura 28 mostra um gráfico distinto para cada dimensão do descritor de vibrato, referentes às quatro execuções da nota 22 do trecho 1, por cada guitarrista ³. Mais uma vez, cada letra (de A a H) corresponde a um guitarrista.

A dimensão extensão média do vibrato (*MeanVibratoDepth*), mostrada no primeiro gráfico apresenta uma diferença notável entre sujeitos distintos. O mesmo pode ser observado para a média da taxa do vibrato (*MeanVibratoRate*), para a qual o espalhamento

³ A descrição de cada dimensão mostrada nos gráficos da figura 28 pode ser consultada na tabela 3.

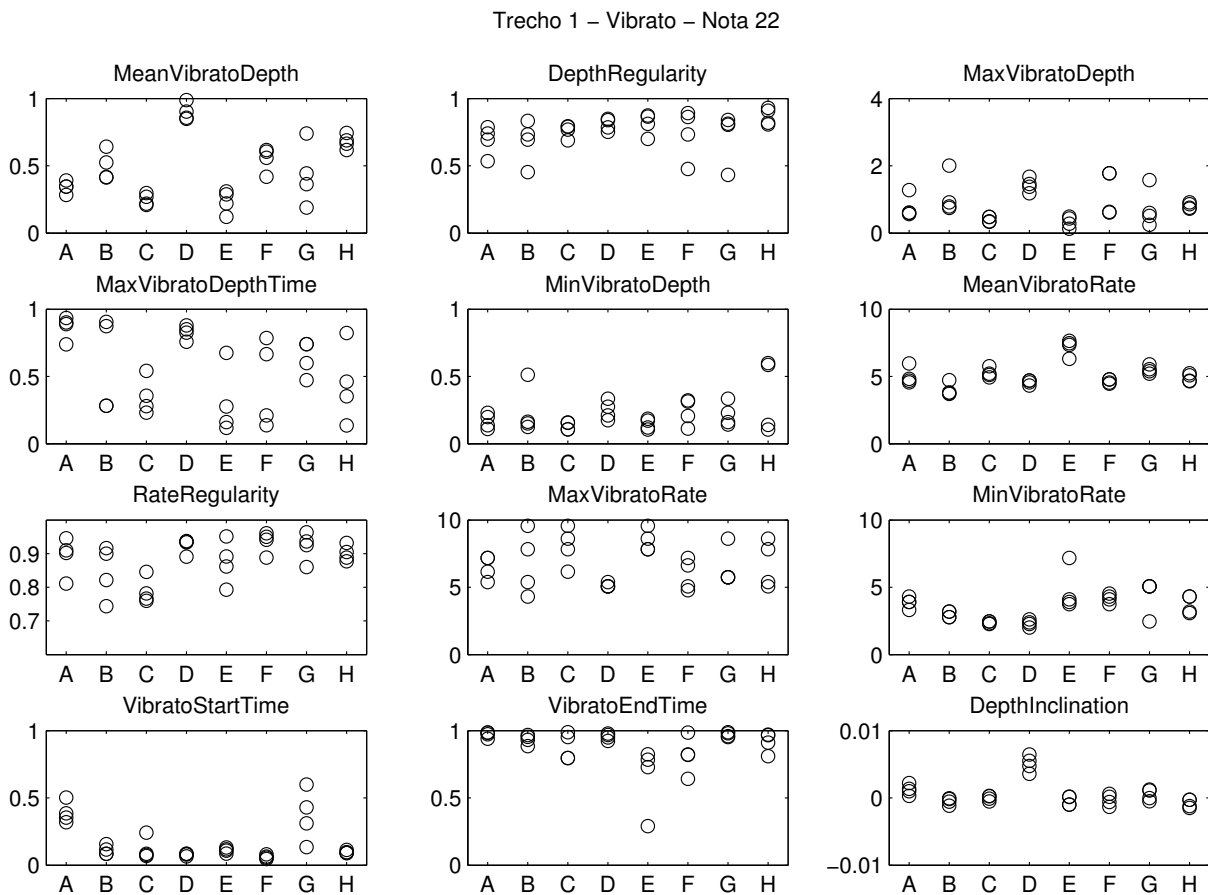


Figura 28: Gráfico mostrando os resultados do descritor de vibrato aplicado a todas as execuções da nota 22 do trecho 1.

avaliado através do gráfico aparenta ser baixo. A inclinação do perfil da extensão do vibrato para o sujeito D foi diferente dos valores obtidos para os outros sujeitos, o que condiz com as curvas crescentes mostradas nas figuras 26 e 27, e parece apontar para uma assinatura característica deste sujeito. Assim como para o descritor de bending, é possível prever que uma combinação dessas dimensões resultaria em uma classificação capaz de identificar o sujeito com uma boa taxa de acerto.

Nas figuras 29 a 35 são mostrados os gráficos de radar gerados para todas as dimensões do descritor de vibrato. As figuras geométricas geradas no trecho 1 são muito características de cada sujeito, para a maior parte das observações. A análise visual desses gráficos gera indícios de que o descritor de vibrato possui maior potencial para representar a assinatura do sujeito do que o do bending, devido à recorrência de formas similares para as notas tocadas por um mesmo sujeito. É difícil comparar a similaridade entre sujeitos distintos, pois existe o risco de se estabelecer conclusões baseadas em uma interpretação subjetiva. Isso não invalida a observação, através destes gráficos, que o vibrato de um mesmo sujeito assume padrões muito característicos.

Como se pode verificar nos gráficos de radar das figuras 33 e 34, uma parte das

observações apresentou um formato bastante característico (um círculo central com um único segmento na diagonal - similar a um microfone). A análise destes dados revelou que durante a gravação do trecho 2, boa parte dos músicos não executou o vibrato que estava indicado para essas notas. Tal problema pode ter ocorrido pelo fato de os músicos não serem tão familiares com o trecho, já que foi composto especificamente para este experimento. Certamente, o fato dessas notas serem bastante curtas dificulta a execução do vibrato nas mesmas, e isso provavelmente influenciou o resultado obtido.

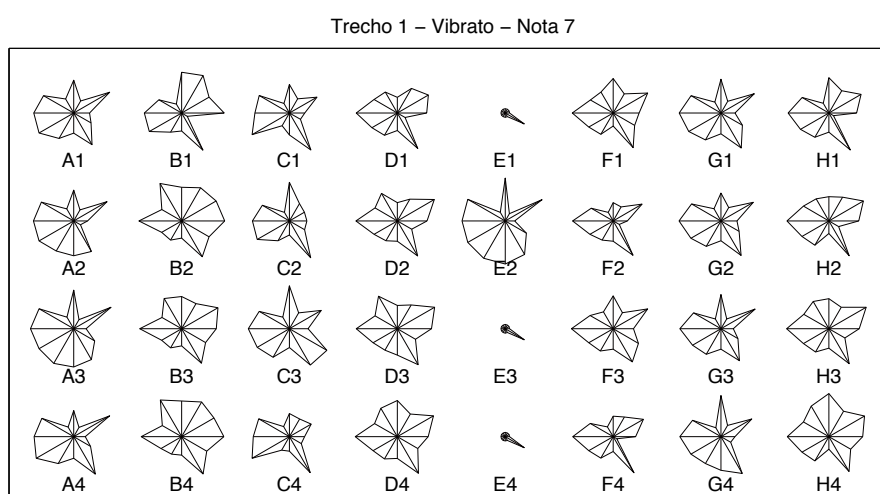


Figura 29: Gráfico de radar para o vibrato da nota 7 do trecho 1

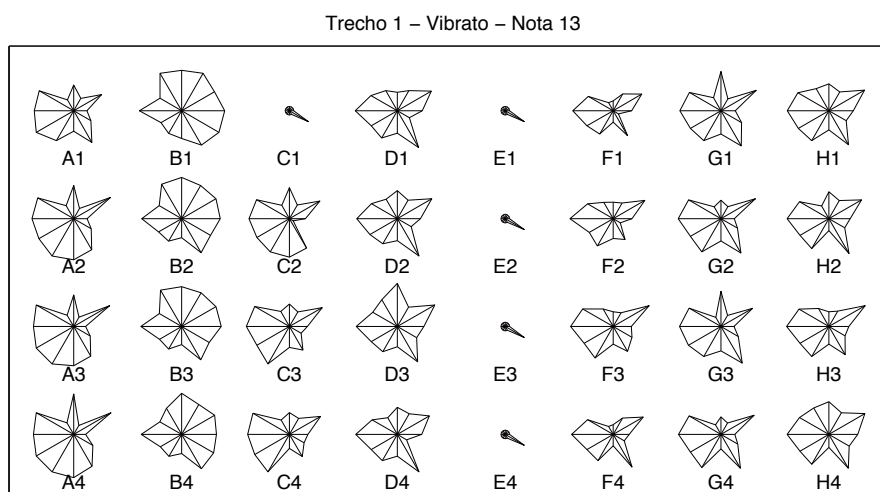


Figura 30: Gráfico de radar para o vibrato da nota 13 do trecho 1

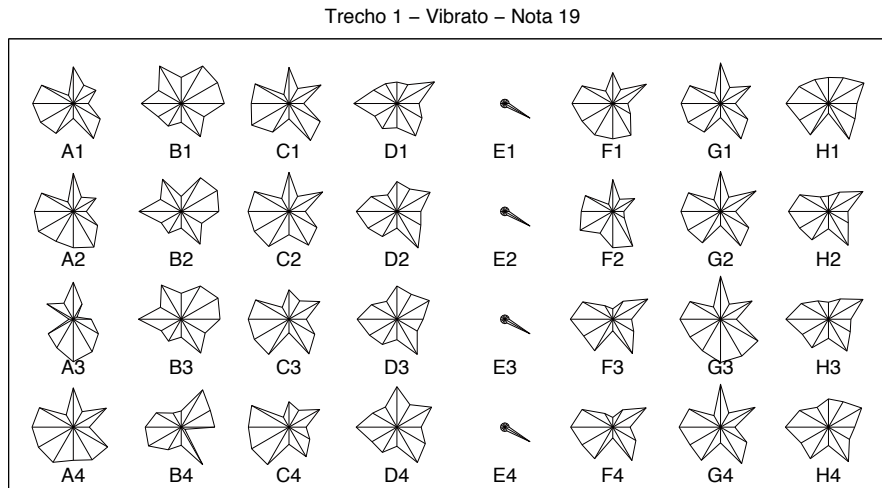


Figura 31: Gráfico de radar para o vibrato da nota 19 do trecho 1

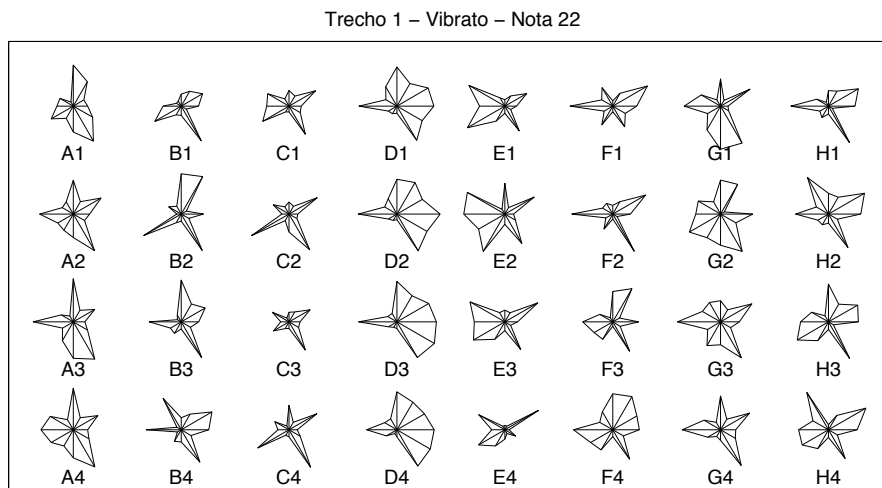


Figura 32: Gráfico de radar para o vibrato da nota 22 do trecho 1

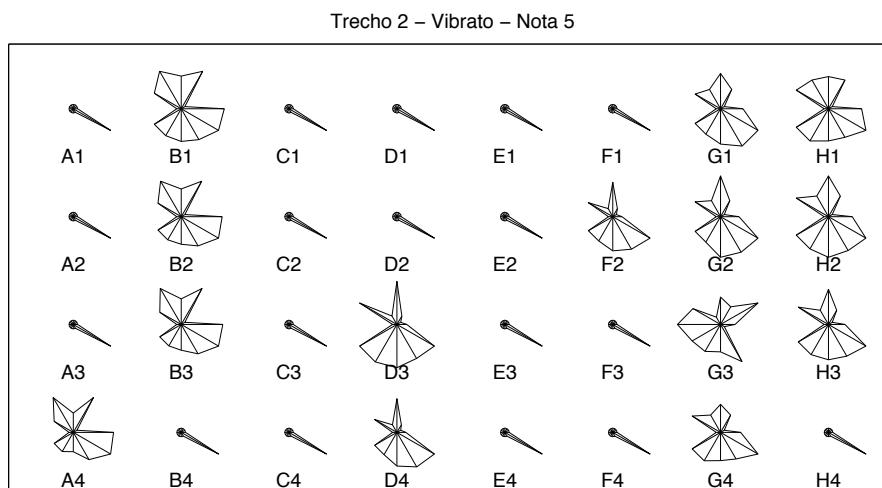


Figura 33: Gráfico de radar para o vibrato da nota 5 do trecho 2

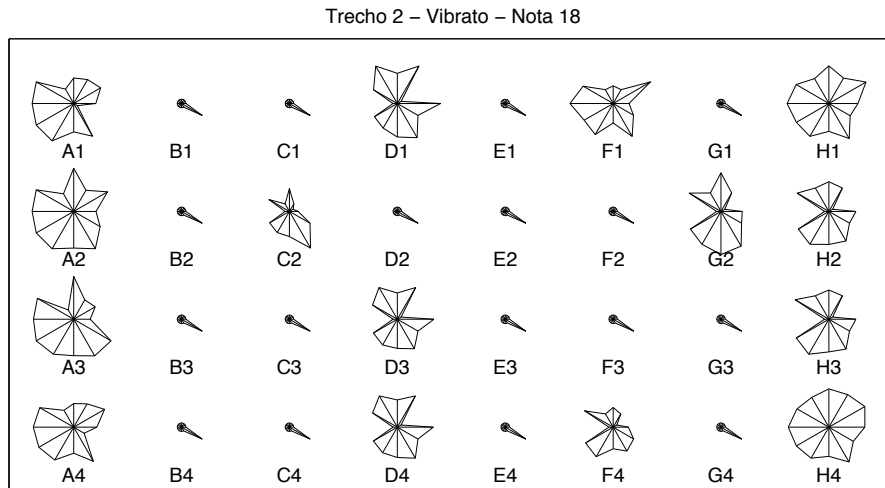


Figura 34: Gráfico de radar para o vibrato da nota 18 do trecho 2

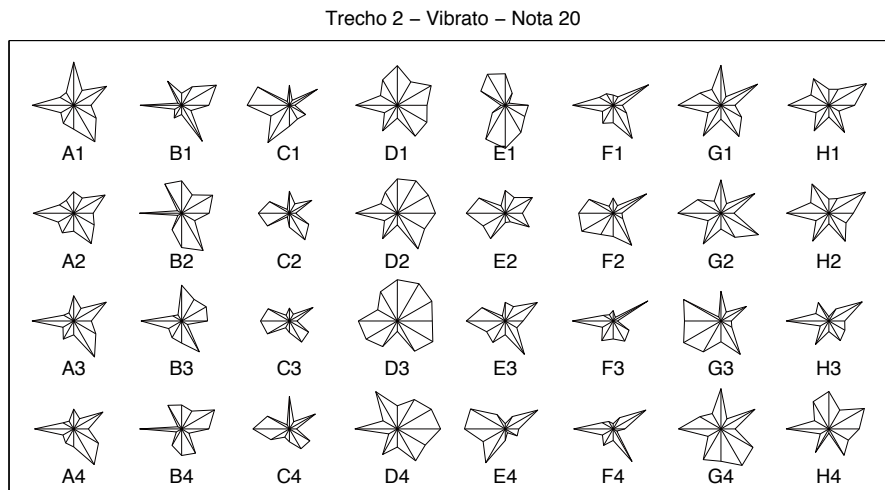


Figura 35: Gráfico de radar para o vibrato da nota 20 do trecho 2

6.2 Resultados do KNN

Nas subseções a seguir são mostrados os resultados obtidos através da aplicação do algoritmo KNN aos dados de bending e vibrato extraídos para todas as notas. O objetivo de tal classificação é identificar qual foi o sujeito que tocou uma determinada nota. Para isso, todas as notas de um mesmo trecho são avaliadas conjuntamente. Ou seja, notas diferentes são comparadas entre si (o treinamento é realizado com todas as notas de todas as performances, para cada trecho). Foi utilizado o valor $k = 3$ (número de vizinhos) como parâmetro em todas as execuções do algoritmo. Tal valor foi selecionado empiricamente após se testar diversos valores de k . Além disso, o método de validação do classificador utilizado consistiu em executar o algoritmo N vezes, em que N é o número total de observações no conjunto de dados utilizado. Em cada execução, uma observação distinta é mantida fora do treinamento (ou seja, o treinamento é realizado com $N - 1$ observações) e utilizada para o teste do classificador. Assim é possível avaliar a taxa de

Tabela 4 – Resultados do KNN para as notas com bending do trecho 1.

Sujeito	Taxa de acerto	Acertos	Total
A	50,0%	12	24
B	58,3%	14	24
C	25,0%	6	24
D	58,3%	14	24
E	95,8%	23	24
F	54,2%	13	24
G	50,0%	12	24
H	25,0%	6	24
Total	52,1%	100	192

Tabela 5 – Matriz de confusão do KNN para as notas com bending do trecho 1.

		Previsto							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Real	A	12	1	5	3	1	0	2	0
	B	3	14	2	0	0	0	0	5
	C	12	1	6	0	1	2	2	0
	D	5	0	4	14	0	1	0	0
	E	0	0	0	1	23	0	0	0
	F	3	2	1	2	2	13	0	1
	G	4	1	4	0	3	0	12	0
	H	2	9	1	3	0	1	2	6

acerto do classificador para cada uma das N observações do conjunto de dados, e agrupar tais informações de acordo com as classes reais de cada uma delas. Em todos os casos, dado que temos um total de oito sujeitos, a probabilidade de acerto é de $1/8 = 12,5\%$.

6.2.1 Bending

Os resultados obtidos para o trecho 1 com o algoritmo KNN aplicado à classificação das notas através do bending são mostrados na tabela 4. Obteve-se a taxa de acerto 52,1% para o total das notas avaliadas. O resultado para cada sujeito varia muito, sendo que o sujeito E obteve a maior taxa (95,8%), enquanto os sujeitos C e H obtiverem o menor valor (ambos 25,0%).

A matriz de confusão da Tabela 5 mostra que várias execuções de notas dos sujeitos A e C foram confundidas entre si. Ao todo, 12 notas tocadas pelo sujeito C foram classificadas erroneamente como pertencentes ao sujeito A, e 5 tocadas pelo sujeito A foram classificadas como pertencentes ao sujeito C. O sujeito H, que também teve uma taxa de acerto baixa, teve 9 notas classificadas como pertencentes ao sujeito B. O sujeito B, por sua vez, teve 5 notas classificadas como pertencentes ao sujeito H.

Tabela 6 – Resultados do KNN para as notas com bending do trecho 2.

Sujeito	Taxa de acerto	Acertos	Total
A	55,0%	11	20
B	60,0%	12	20
C	55,0%	11	20
D	45,0%	9	20
E	65,0%	13	20
F	25,0%	5	20
G	50,0%	10	20
H	75,0%	15	20
Total	53,8%	86	160

Tabela 7 – Matriz de confusão do KNN para as notas com bending do trecho 2.

		Previsto							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Real	A	11	2	0	2	0	3	2	0
	B	4	12	2	1	0	1	0	0
	C	0	4	11	1	3	0	0	1
	D	4	2	0	9	1	3	1	0
	E	2	0	2	3	13	0	0	0
	F	2	2	5	4	0	5	2	0
	G	1	0	2	4	2	1	10	0
	H	0	0	1	2	0	1	1	15

Os resultados da classificação através do bending para o trecho 2 foram ligeiramente melhores do que para o para trecho 1. Conforme mostrado na tabela 6 a taxa de acerto para o total dos dados foi de 53,8%. A maior taxa de acerto obtida por classe foi para o sujeito H (75,0%), e a menor para o sujeito F (25,0%).

6.2.2 Vibrato

Os resultados da classificação através do descritor de vibrato obtidos para o trecho 1 foram melhores do que os resultados obtidos para o bending. A taxa de acerto para o total das notas analisadas foi de 66,4%. O sujeito D obteve a maior taxa de acerto (87,5%). A menor taxa de acerto foi para o sujeito F (43,8%).

O trecho 2 analisado a partir das informações do vibrato apresentou o pior resultado da taxa de acerto para a classificação através do KNN. O total obtido foi de 34,4%. Tais resultados se devem ao problema ocorrido na execução do experimento, em que não foram executados os vibratos de diversas notas do trecho.

Tabela 8 – Resultados do KNN para as notas com vibrato do trecho 1.

Sujeito	Taxa de acerto	Acertos	Total
A	62,5%	10	16
B	56,2%	9	16
C	62,5%	10	16
D	87,5%	14	16
E	75,0%	12	16
F	43,8%	7	16
G	68,8%	11	16
H	75,0%	12	16
Total	66,4%	85	128

Tabela 9 – Matriz de confusão do KNN para as notas com vibrato do trecho 1.

		Previsto							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Real	A	10	0	2	0	0	0	4	0
	B	0	9	1	3	0	1	1	1
	C	3	0	10	0	1	0	2	0
	D	0	0	0	14	0	0	0	2
	E	2	0	2	0	12	0	0	0
	F	1	2	1	2	0	7	0	3
	G	4	0	0	0	0	1	11	0
	H	0	1	0	2	0	1	0	12

Tabela 10 – Resultados do KNN para as notas com vibrato do trecho 2.

Sujeito	Taxa de acerto	Acertos	Total
A	41,7%	5	12
B	41,7%	5	12
C	25,0%	3	12
D	41,7%	5	12
E	8,3%	1	12
F	33,3%	4	12
G	25,0%	3	12
H	58,3%	7	12
Total	34,4%	33	96

Tabela 11 – Matriz de confusão do KNN para as notas com vibrato do trecho 2.

		Previsto							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Real	A	5	4	0	0	0	0	3	0
	B	4	5	0	2	0	0	0	1
	C	1	6	3	0	0	2	0	0
	D	0	5	1	5	0	0	0	1
	E	3	7	0	0	1	0	1	0
	F	0	5	1	0	2	4	0	0
	G	3	3	1	0	1	1	3	0
	H	0	1	0	1	1	1	1	7

6.3 Resultados do SOM

6.3.1 Análise por nota

O descritor de bending proposto foi aplicado à nota 18 do excerto 1, e geramos então um mapa (SOM) para avaliar como as execuções por diferentes guitarristas são representadas. Os resultados são mostrados na figura 36. As notas executadas por um mesmo sujeito tenderam a se distribuir em torno da mesma região no mapa. Para os sujeitos D, E e G, já foi possível agrupar todas as suas execuções da nota em uma única unidade do mapa.

A distância entre unidades vizinhas no SOM não é constante. Nas figuras a seguir o mapa da direita mostra a matriz U (U -matrix), com as distâncias de referência entre unidades adjacentes do mapa. Os tons mais escuros mostrados na matriz U representam distâncias menores.

A nota 22 do exemplo 1 foi escolhida para avaliar como são representadas no mapa várias execuções de uma mesma nota com vibrato. O mapa gerado para essa nota, a partir da informação do descritor de vibrato, é mostrado na figura 37. Os sujeitos C, D e E tiveram todas as execuções da nota agrupadas em uma única unidade. Os outros sujeito tiveram um espalhamento maior pelo mapa, tendo se misturado em diversas unidades.

Conforme mostrado nos gráficos 36 e 37, o sistema foi capaz de discriminar os guitarristas, em certo grau, a partir das similaridades dos bending e vibratos de suas execuções representadas no mapa. Considerando que estes mapas foram gerados para notas isoladas de uma performance, é de se esperar a ocorrência de valores atípicos, sugerindo que uma nota isolada não seja suficiente para se identificar a assinatura de um sujeito.

6.3.2 Análise por trechos

Processamos 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 informações

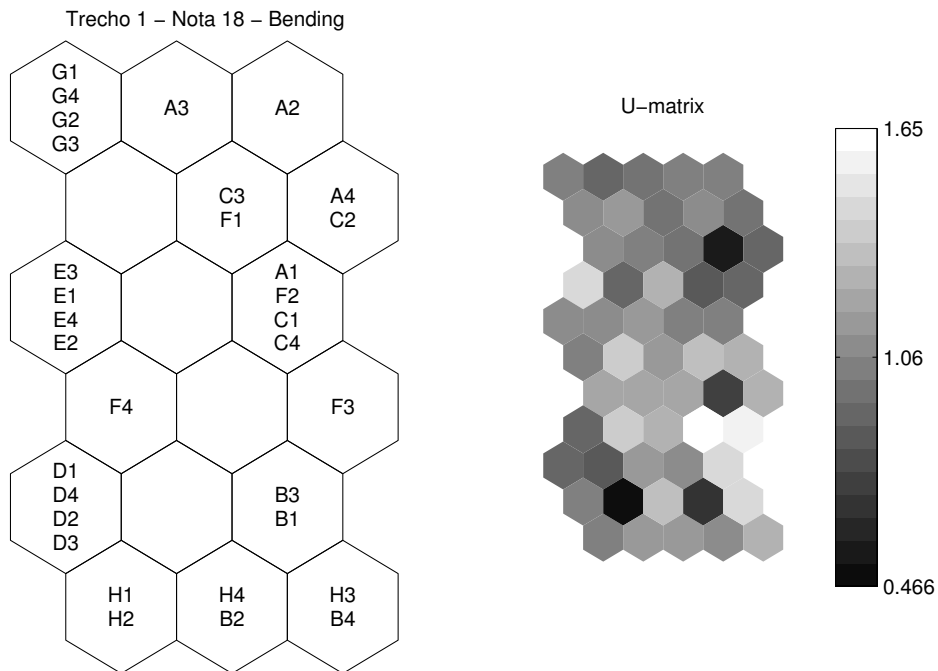


Figura 36: Mapa auto-organizativo gerado para a nota 18 do trecho 1 a partir dos dados do descritor de bending

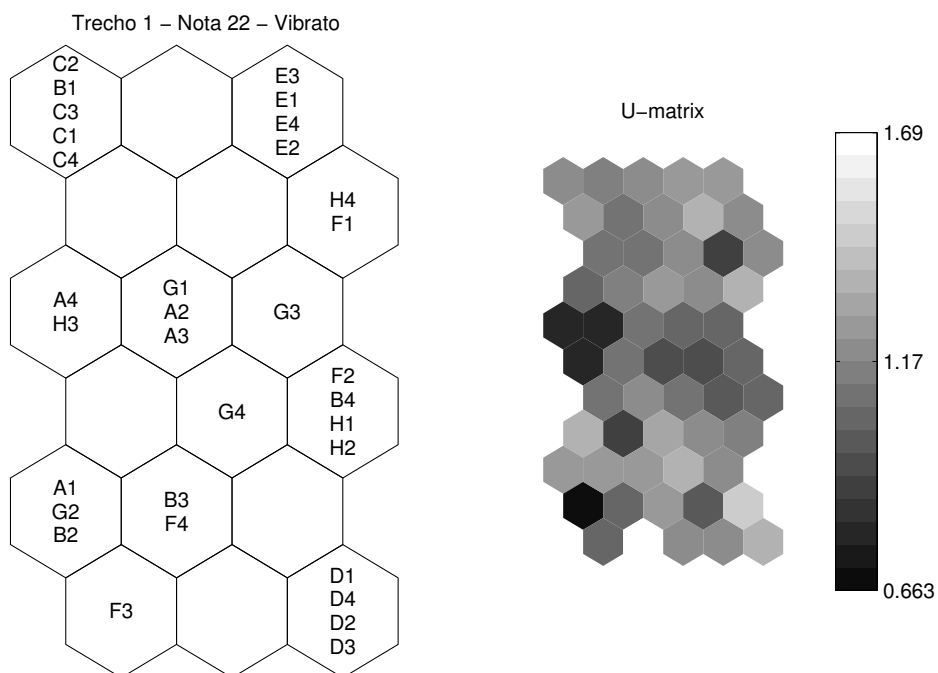


Figura 37: Mapa auto-organizativo gerado para a nota 22 do trecho 1 a partir dos dados do descritor de vibrato

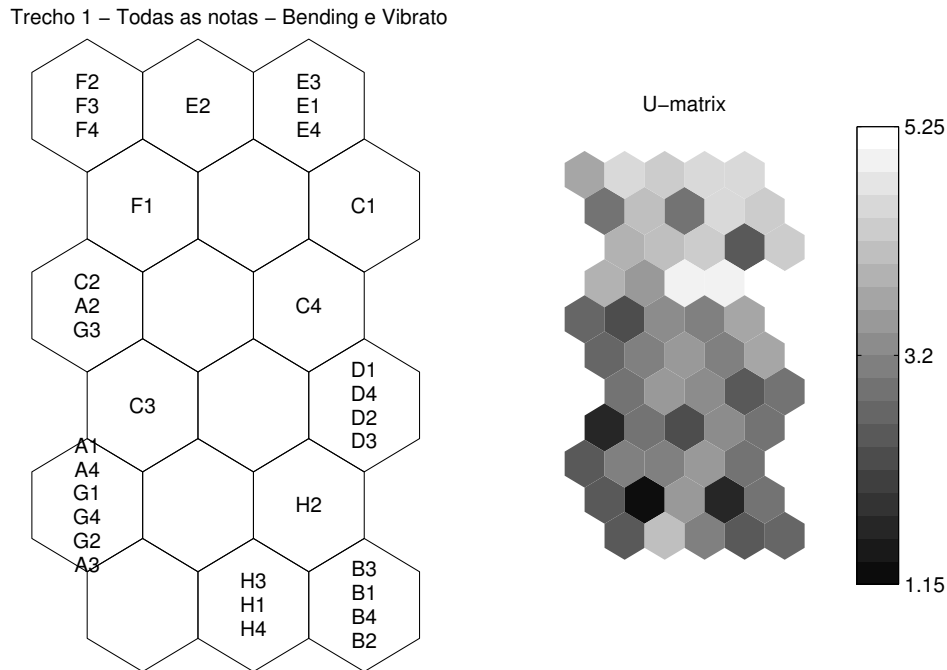


Figura 38: Mapa auto-organizativo gerado para o trecho 1 utilizando todas as notas com bending e vibrato

combinadas das duas técnicas. Para combinar essas informações, foi realizada uma concatenação das informações obtidas por meio dos descritores de bending e vibrato para todas as notas de uma mesma performance. Para cada trecho temos o seguinte número de dimensões:

- Trecho 1: 6 (notas com bending) x 13 (dimensões do descritor) + 4 (notas com vibrato) x 12 (dimensões do descritor) = 126 dimensões
- Trecho 2: 5 (notas com bending) x 13 (dimensões do descritor) + 3 (notas com vibrato) x 12 (dimensões do descritor) = 101 dimensões

Assim, o mapa gerado para cada excerto representa a caracterização das performances gravadas com base nos descritores de bending e vibrato, conjuntamente. A integração de ambos os descritores e a aplicação dos mesmos a várias notas de uma performance melhora consideravelmente as representações das assinaturas dos sujeitos em relação aos mapas gerados para notas isoladas, tendo como base o critério de que performances de um mesmo guitarrista devem, a princípio, ser agrupadas pelo sistema em uma mesma região. Apesar de o número de sujeitos agrupados em uma mesma unidade do mapa ter sido menor nestes gráficos, o espalhamento das performances de um mesmo sujeito foi bem menor. Os resultados são mostrados nas figuras 38 e 39.

Trecho 2 – Todas as notas – Bending e Vibrato

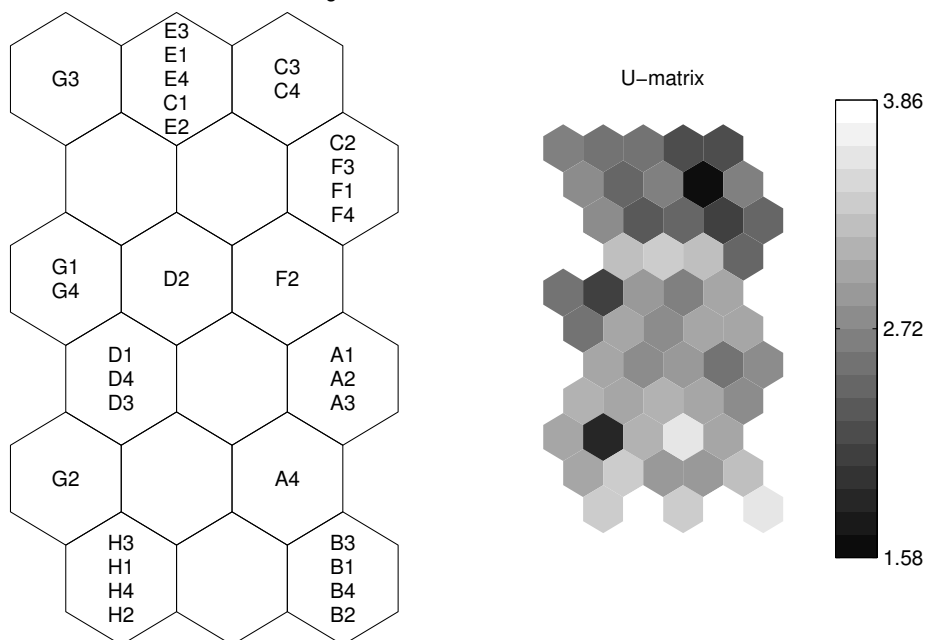


Figura 39: Mapa auto-organizativo gerado para o trecho 2 utilizando todas as notas com bending e vibrato

7 Conclusão

Este trabalho buscou investigar a hipótese de que existe uma assinatura associada à forma de executar o bending e vibrato na guitarra. Foram adotadas três abordagens para a análise dos dados obtidos por meio dos descritores implementados: análise baseada em gráficos, classificação utilizando KNN e mapas de similaridade (SOM).

A análise visual realizada por meio dos gráficos apresentados mostrou uma tendência de recorrência nos valores dos descritores obtidos para um mesmo guitarrista. Uma breve análise das curvas de altura obtidas já sugerem a recorrência na forma de um mesmo músico executar o bending e o vibrato em uma mesma nota. Nos gráficos de radar, para grande parte das notas analisadas, pudemos constatar a existência de um alto grau de similaridade entre as figuras obtidas para notas executadas por um mesmo sujeito.

Os resultados do KNN mostram que apesar de o sistema não ser capaz de identificar de forma robusta o sujeito que toca uma nota isolada, a partir dos dados de bending ou vibrato de todas as notas tocadas por todos os sujeitos, já é possível obter uma taxa de acerto considerável nessas condições. Há de se levar em consideração que, do ponto de vista da percepção, uma nota isolada geralmente não contém informação suficiente para a identificação de um instrumentista. Talvez para um músico cujas performances tenham um alto grau de individualidade até seja possível identificá-lo por meio de uma única nota, mas isso dependeria de um contexto musical muito específico. No geral, são necessários pelo menos alguns segundos para identificar um instrumentista. As taxas de acerto do KNN para o bending foram de 52,1% no trecho 1 (tabela 4) e 53,2% no trecho 2 (tabela 6), enquanto a probabilidade de acerto para oito guitarristas é de 12,5%. Já as taxas de acerto para o vibrato foram de 66,4% no trecho 1 (tabela 8) e 34,4% no trecho 2 (tabela 10). A baixa taxa de acerto para o o vibrato no trecho 2 se deve ao fato de o vibrato não ter sido realizado em duas notas do trecho, por vários dos guitarristas.

Os resultados obtidos para o SOM mostram que o sistema é capaz de agrupar nos mapas notas tocadas por um mesmo guitarrista ao processar a informação dos descritores obtidos para notas isoladas. Apesar da existência de alguns valores atípicos, os mapas das figuras 36 e 37 mostram que notas executadas por um mesmo sujeito tenderam a se distribuir em torno da mesma região.

Os mapas obtidos para avaliar as performances como um todo, utilizando as informações de bending e vibrato de todas as notas, também mostraram a tendência de agrupamento das performances executadas por um mesmo guitarrista (figuras 38 e 39). Em alguns casos, o sistema agrupa performances do mesmo sujeito em uma única unidade dos mapas gerados.

Portanto, os resultados obtidos neste trabalho corroboram com a hipótese de que existe uma assinatura ou consistência associada à forma de executar o bending e o vibrato na guitarra elétrica. Vale ressaltar que essa consistência é baseada na recorrência de padrões interpretativos referentes ao bending e o vibrato em uma mesma peça (visto que não comparamos dados de peças diferentes entre si). A respeito da possibilidade de generalização da assinatura de um indivíduo em outros contextos musicais, incluindo diferentes composições e gêneros, não é possível fazer qualquer tipo de afirmação positiva com base nos resultados do presente trabalho. Para isso seria necessário realizar um experimento mais amplo envolvendo a gravação de várias trechos de diferentes gêneros musicais. O fato de o descritor de bending, em particular, ser sensível à duração da nota (notas mais curtas exigem a execução do bending de forma mais rápida, o que influencia mais o valor do descritor do que o indivíduo por si só) traz uma dificuldade metodológica para que esse descritor seja aplicado de forma a generalizar uma assinatura. Para possibilitar tal tipo de análise seria necessário desenvolver algum tipo de normalização do valor do descritor de acordo com a duração da nota.

Referências

- BACON, T. *The Ultimate Guitar Sourcebook*. [S.l.]: Race Point Publishing, 2012. 288 p. Citado na página 27.
- BOGDANOV, D. et al. Essentia: an audio analysis library for music information retrieval. In: *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 493–498. Citado na página 22.
- CAMPOLINA, T.; MOTA, D.; LOUREIRO, M. Expan: a tool for musical expressiveness analysis. In: *Proceedings of the 2nd International Conference of Students of Systematic Musicology*. [S.l.]: IPEM, 2009. p. 24–27. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- CANNAM, C.; LANDONE, C.; SANDLER, M. Sonic visualiser an open source application for viewing, analysing, and annotating music audio files. In: *Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1467–1468. Citado na página 45.
- CARLEVARO, A. Vibrato. In: *Escuela de la guitarra: exposición de la teoría instrumental*. [S.l.]: Dacisa, 1985. p. 113–117. Citado na página 32.
- CHEN, J.-M.; SMITH, J.; WOLFE, J. 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*, v. 126, n. 3, p. 1511–1520, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- CLARKE, E. Empirical methods in the study of performance. *Empirical musicology: Aims, methods, prospects*, p. 77–102, 2004. Citado na página 21.
- DESAIN, P. et al. Rhythmic aspects of vibrato. In: DESAIN, P.; WINDSOR, L. (Ed.). *Rhythm Perception and Production*. [S.l.]: Swets & Zeitlinger, 1999. p. 203–216. Citado na página 32.
- ERKUT, C.; VÄLIMÄKI, V. Extraction of physical and expressive parameters for model-based sound synthesis of the classical guitar. *Audio Engineering Society*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- FLETCHER, N. Vibrato in music. *Acoustics Australia*, 2001. Citado na página 32.
- FREIRE, S.; CAMBRAIA, P. Analysis of musical textures played on the guitar by means of real-time extractions of mid-level descriptors. In: *Proceedings of the 12th Music Computing Conference*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 33.
- FREIRE, S.; NÉZIO, L. Study of the tremolo technique on the acoustic guitar : Experimental setup and preliminary results on regularity. *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013, SMC 2013*, p. 329–334, 2013. Citado na página 33.
- GILBERT, J.; SIMON, L.; TERROIR, J. Vibrato of saxophones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 118, n. October 2005, p. 2649–2655, 2005. Citado na página 34.

- GOEBL, W.; DIXON, S.; POLI, G. D. Sense in expressive music performance: Data acquisition, computational studies, and models. *Sound to Sense – Sense to Sound: A State of the Art in Sound and Music Computing*, p. 195–242, 2005. Citado na página 21.
- GRIMES, D. R. String theory - the physics of string-bending and other electric guitar techniques. *PloS one*, v. 9, n. 7, p. e102088, 1 2014. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.
- GUY, P. *A Brief History of the Guitar*. 2007. Disponível em: <<http://www.guyguitars.com/eng/handbook/BriefHistory.html>>. Citado na página 27.
- JARVELAINEN, H. Perception-based control of vibrato parameters in string instrument synthesis. *Proc. International Computer Music Conference*, n. September, p. 287–294, 2002. Citado na página 32.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007. Citado na página 53.
- KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps - Springer Series in Information Sciences*. [S.l.]: Springer Verlag, 1995. Citado na página 52.
- MAESTRE, E. et al. Expressive concatenative synthesis by reusing samples from real performance recordings. *Computer Music Journal*, p. 23–42, 2009. Citado na página 22.
- MELLODY, M.; WAKEFIELD, G. H. The time-frequency characteristics of violin vibrato: Modal distribution analysis and synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, n. 1, p. 598, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- MÉNDEZ, S. I. G. *Modeling Embellishment , Duration and Energy Expressive Transformations in Jazz Guitar*. Tese (Doutorado), 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- MIGNECO, R. V. *Analysis and Synthesis of Expressive Guitar Performance*. Tese (Doutorado), 2012. Citado na página 33.
- NAVEDA, L. *O Timbre e o Volume Sonoro do Violão*. Tese (Doutorado), 2002. Citado na página 27.
- PARK, T. *Towards automatic musical instrument timbre recognition*. Tese (Doutorado), 2004. Citado na página 22.
- PEETERS, G. A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the cuidado project. n. 0, p. 1–25, 2004. Citado na página 22.
- PEETERS, G. et al. The timbre toolbox: extracting audio descriptors from musical signals. v. 130, n. 5, 2011. Citado na página 42.
- REBOURSIERE, L. et al. Left and right-hand guitar playing techniques detection. *NIME 2012 Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, p. 7–10, 2012. Citado na página 34.
- RODRIGUES, M. A. *O vibrato no violão : aspectos qualitativos e quantitativos*. [S.l.], 2014. Citado na página 34.
- ROSSING, T. D. *The Science of Sound*. 2. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. v. 29. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.

- ROSSING, T. D. *The Science of String Instruments*. [S.l.]: Springer, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 13, 27 e 29.
- SCOTT, N. The lute of the singer har-mose. *The Metropolitan Museum of Art Bulletin*, v. 2, p. 159–163, 1944. Citado na página 27.
- SEASHORE, C. The natural history of the vibrato. v. 3, p. 141–147, 1917. Citado na página 32.
- SEK, A.; MOORE, B. C. Frequency discrimination as a function of frequency, measured in several ways. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 97, n. 4, p. 2479–2486, 1995. Citado na página 49.
- TIMMERS, R.; DESAIN, P. Vibrato: questions and answers from musicians and science. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Music Perception and Cognition*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2. Citado na página 32.
- VESANTO, J. et al. Self-organizing map in matlab: The som toolbox. *Proceedings of the Matlab DSP conference*, v. 99, 1999. Citado na página 52.
- VIEIRA, M. N.; SILVA, J. E. D. C.; YEHA, H. C. Vibrato and tremor extent spectrum: algorithm and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 130, n. July 2011, p. EL1–L7, 2011. Citado na página 34.
- WERNECK, N. L. *Análise da distorção musical de guitarras elétricas*. Tese (Doutorado), 2007. Citado na página 29.
- WÖLLNER, C. How to quantify individuality in music performance? studying artistic expression with averaging procedures. *Frontiers in Psychology*, v. 4, n. FEB, p. 1–3, 2013. Citado na página 21.