

Análise de Dissonância Sensorial de Espectros Sonoros

Alexandre Torres Porres
Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS)
Departamento de Música, IA - UNICAMP
e-mail: porres@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Fábio Furlanete
Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS)
Departamento de Música, IA - UNICAMP
e-mail: ffurlanete@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Jônatas Manzolli
Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS)
Departamento de Música, IA - UNICAMP
e-mail: jonatas@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Sumário:

Este trabalho apresenta as primeiras investigações feitas com uma ferramenta de análise de dissonância sensorial desenvolvida no software *PureData*. Essa ferramenta permite avaliar a dissonância sensorial de intervalos musicais e acordes, dado o espectro sonoro dos tons envolvidos representado por listas de frequências e suas respectivas amplitudes relativas. Discute-se também a relação entre espectro sonoro e afinação, apresentando um método de investigação que pode ser aplicado como estratégia composicional na construção de escalas com afinações alternativas e manipulação de espectros sonoros.

Palavras-Chave: Percepção, Dissonância Sensorial, Espectro Sonoro, Microtonalidade, Composição.

1 – Introdução

O estudo aqui apresentado é um recorte de pesquisa em andamento (apoio FAPESP) no programa de Mestrado em Música do Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora (NICS) da UNICAMP, na qual investigamos o uso de microtons por compositores do século XX para desenvolver modelos em processos composicionais. O estudo apresentado neste artigo fundamenta o desenvolvimento de um processo composicional próprio, que explora a relação entre afinações alternativas e espectro sonoro no que diz respeito ao controle de dissonância sensorial. Apresentamos a seguir um referencial teórico sobre afinação e psicoacústica, sobre o qual este trabalho se baseia.

2 - Referencial Teórico

2.1 Afinação Justa e Temperamento

As definições fundamentais relacionadas ao nosso trabalho podem ser resumidas da seguinte forma: intervalos justos são aqueles que podem ser representados por proporções de números inteiros, ou seja, frações racionais¹. Já intervalos temperados não podem ser representados por

¹ Ex: [2/1] (oitava), [3/2] (quinta).

proporções de números inteiros, pois são representados por números irracionais². A afinação justa possui apenas intervalos justos, enquanto o temperamento, além de intervalos temperados, pode também conter intervalos justos. Intervalos justos possuem relações harmônicas e são periódicos. Intervalos temperados são inarmônicos e aperiódicos.

2.2 Dissonância Sensorial

Tenney (1988) destaca cinco noções distintas de dissonância no decorrer da história: *melódica, polifônica, funcional, contrapontística e psicoacústica*. A noção mais recente é a psicoacústica, focada em mecanismos perceptuais do sistema auditivo e vinculada ao conceito de dissonância sensorial. A origem deste conceito está na teoria de batimentos de Helmholtz (1877). Segundo ele, a percepção de dissonância ocorre quando há a presença de batimentos entre parciais. Helmholtz considerou que a percepção de dissonância máxima ocorre nos batimentos em torno de 30 e 40Hz, independente do registro. Esta premissa foi revisada pelo trabalho de Plomp e Levelt (1965), que gerou resultados que apontam para a relação entre percepção de dissonância e a banda crítica³.

Em seu experimento, Plomp e Levelt (1965) pediram que voluntários sem treinamento musical avaliassem a consonância entre dois estímulos senoidais e encontraram uma tendência clara: um nível máximo de dissonância nos intervalos em torno de um quarto da banda crítica e um nível mínimo de dissonância para os intervalos que excedem a banda crítica⁴. A *Figura 1* mostra esta tendência em 5 frequências distintas: 100, 200, 400, 600 e 1.000 Hz. O eixo vertical representa a dissonância sensorial, o eixo horizontal representa a diferença em intervalos de semitons temperados. Este gráfico foi gerado a partir do programa desenvolvido e comentado na próxima seção deste artigo.

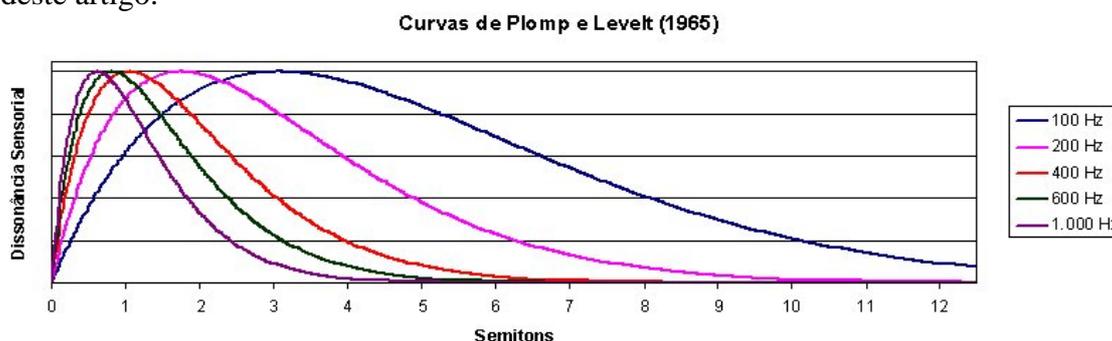


Figura 1: Curvas de Dissonância Sensorial baseadas nos resultados de Plomp e Levelt (1965). As curvas variam de acordo com a banda crítica, a curva de 1.000 Hz apresenta um nível baixo de dissonância antes de uma quarta justa, enquanto a curva de 100 Hz ainda possui um nível alto de dissonância após o intervalo de uma quinta justa.

Pitágoras foi o primeiro a apontar para a relação entre consonância e razões de números inteiros pequenos, como $[2/1]$ e $[3/2]$. A explicação psicoacústica de Helmholtz é a coincidência dos parciais⁵, que não geram batimentos. Plomp e Levelt revisaram esta explicação por meio de suas

² Ex: $[2^{1/2}/1] = 1.4142...$ (trítone temperado).

³ Banda crítica é a diferença em frequência entre dois tons puros onde a sensação de rugosidade (batimentos rápidos) desaparece. Quando dois tons puros estão muito próximos ocorrem batimentos lentos, percebidos como tremolo, e, na medida que se afastam, ocorrem batimentos rápidos que tendem a ser rugosos e incômodos. A banda crítica varia em torno de uma segunda maior e uma terça menor de acordo com o registro. No grave (abaixo de 500 Hz) a banda crítica é maior que uma terça maior.

⁴ Como valores para a banda crítica, e sua divisão, Plomp e Levelt se basearam nos resultados de Zwicker, Flottorp e Stevens (1957). Como já explicado, a banda crítica varia de acordo com o registro, logo, dependendo do registro, a mesma divisão da banda crítica corresponde a intervalos diferentes.

⁵ A coincidência dos parciais ocorre na medida em que os intervalos são formados por razões de números inteiros pequenos, desde que os tons sejam formados por parciais harmônicos.

conclusões, pois seus resultados demonstraram como a percepção de dissonância não depende de razões de números inteiros pequenos em tons senoidais (sem componentes harmônicos) – o que está demonstrado nas curvas da *Figura 1*: intervalos que excedem a banda crítica soam no mesmo nível de dissonância, independente das razões numéricas.

Partindo do conceito que podemos decompor os parciais de um espectro sonoro em ondas senoidais, Plomp e Levelt especularam que a dissonância das relações entre os parciais de tons complexos pode ser somada, gerando então curvas de dissonância de um dado espectro sonoro. Tais curvas são apresentadas nas análises deste artigo.

3 – Análises com a Ferramenta em Pd (*PureData*)

William Sethares (1999), baseado no resultado de Plomp & Levelt (1965), elaborou um algoritmo para calcular e gerar curvas de dissonância de um dado espectro sonoro, representado por uma lista de frequências e outra de amplitudes relativas dos componentes espectrais (como na *Figura 2*). Sethares disponibilizou o código de programação deste algoritmo para o software *MatLab*, que nos serviu de base para uma implementação em Pd⁶.

O algoritmo calcula a somatória da dissonância sensorial de dois tons com os mesmos componentes espectrais, mantendo fixo um tom e variando o outro do uníssono até um intervalo especificado, gerando resultados para cada passo determinado. Em nossa análise, medimos a dissonância sensorial de intervalos musicais entre dois tons a cada *cent*⁷, em um registro de uma oitava mais um quarto de tom (1.250 cents). Com os valores geramos os gráficos (em formas de curvas) que apresentam o valor da dissonância sensorial em função do intervalo musical.

3.1 Análise de uma onda quadrada com 15 parciais

Uma onda quadrada contém apenas parciais harmônicos ímpares, cujas amplitudes relativas decaem na taxa de $1/p$ (onde “p” corresponde ao número do parcial). Calculamos a curva de dissonância sensorial de tons com o espectro de uma onda quadrada com 15 parciais – uma onda quadrada fixa em 500 Hz e a outra variando de 500 Hz até uma oitava mais um quarto de tom. Vemos na *Figura 2* o programa em Pd após o cálculo.

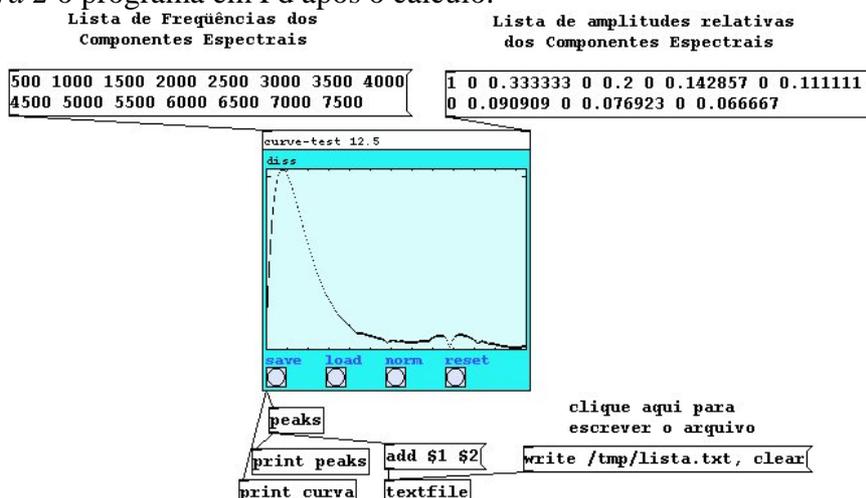


Figura 2: Tela do Programa em Pd após o cálculo de dissonância sensorial de uma onda quadrada com 15 parciais.

Além desta tela, o programa imprime os valores em uma janela auxiliar de todos os pontos da curva, e ainda destaca os picos e vales de dissonância, que são considerados como pontos

⁶ PureData é um software livre disponível em: <<http://puredata.info/>>.

⁷ Um *cent* equivale a um centésimo de um semitom. Uma oitava, por exemplo, possui 1.200 *cents*.

máximos e mínimos de uma determinada região. Com os dados extraídos do Pd podemos gerar gráficos em outros programas, apresentamos, na *Figura 3*, um gráfico elaborado no *Excell*.

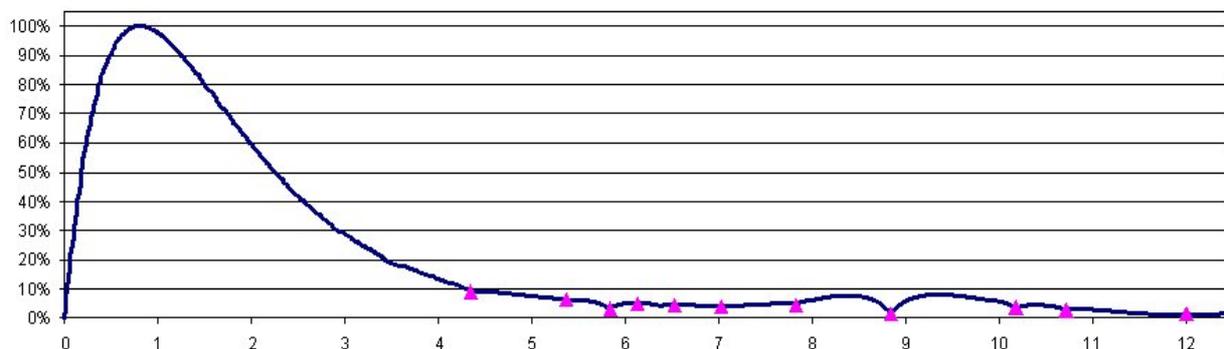


Figura 3: Curva de dissonância sensorial de 500 Hz a 1.030 Hz de uma onda quadrada com 15 parciais. Triângulos representam os vales. Dissonância Sensorial no eixo vertical em porcentagem relativa, intervalo no eixo horizontal em semitons do sistema temperado.

A *Tabela 1* traz os valores em *cents* dos vales (níveis mínimos de dissonância), que ocorrem quando os parciais dos tons envolvidos coincidem. Como os componentes espectrais da onda quadrada são harmônicos, os vales devem coincidir com intervalos justos formados pelas relações numéricas destes harmônicos. A *Tabela 1* dispõe em ordem crescente de dissonância sensorial (em porcentagem relativa) os intervalos que representam os valores mínimos de dissonância obtidos, representados como razões de números inteiros.

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Razão	[2/1]	[5/3]	[13/7]	[7/5]	[9/5]	[3/2]	[13/9]	[11/7]	[15/11]	[9/7]
Cents	1.200	884	1.072	583	1.018	702	637	782	537	435
DS	1,27	1,49	2,89	3,37	3,47	4,12	4,21	4,64	6,24	9,09

Tabela 1: Tabela de intervalos justos correspondentes aos vales no gráfico da Figura 3, distribuídos em ordem crescente de dissonância sensorial (DS).

3.2 Análise de uma onda dente-de-serra com 16 parciais

A onda dente-de-serra possui parciais harmônicos cujas amplitudes decaem na taxa de $1/p$ (onde “p” corresponde ao número do parcial). Apresentamos na *Figura 4* um gráfico semelhante ao da *Figura 3* (com níveis mínimos de dissonância em intervalos justos tal qual a onda quadrada); e na *Tabela 2* o mesmo princípio apresentado na *Tabela 1*.

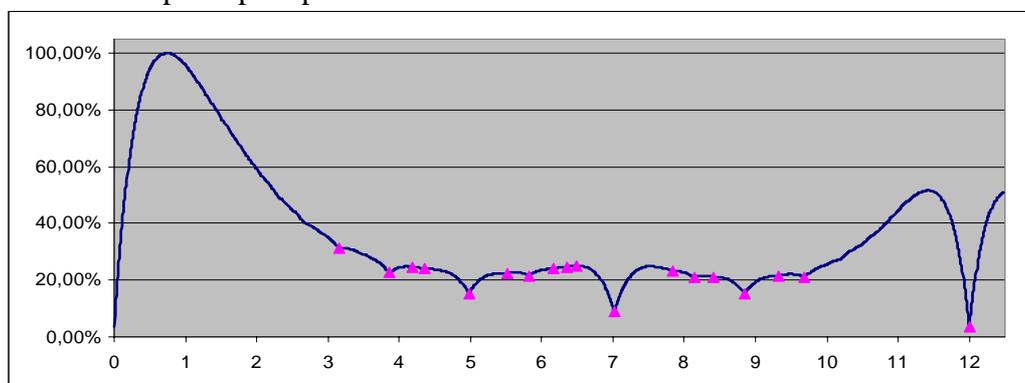


Figura 4: Curva de dissonância sensorial de 500 Hz a 1.030 Hz de uma onda dente-de-serra com 16 parciais. Triângulos representam os vales. Dissonância Sensorial no eixo vertical em porcentagem relativa, intervalo no eixo horizontal em semitons do sistema temperado.

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	16°	17°	18°
Razão	[2/1]	[3/2]	[4/3]	[5/3]	[8/5]	[7/4]	[13/8]	[12/7]	[7/5]	[11/8]	[5/4]	[11/7]	[9/7]	[10/7]	[14/11]	[13/9]	[16/11]	[6/5]
Cents	1.200	702	498	884	814	969	841	933	582	551	386	783	435	617	418	636	649	316
DS	3,58	9,04	15,28	15,36	20,94	21,05	21,15	21,48	21,66	22,45	22,68	23,41	23,91	23,96	24,64	24,75	24,99	31,28

Tabela 2: Tabela de intervalos justos correspondentes aos vales no gráfico da figura 4, distribuídos em ordem crescente de dissonância sensorial (DS).

3.3 Análise de um espectro sonoro com 16 parciais harmônicas de mesma amplitude

A forma de onda deste espectro sonoro é representada pela Figura 5. A Figura 6 traz o gráfico tal qual nas Figuras 4 e 3, e a Tabela 3 assim como as Tabelas 1 e 2.

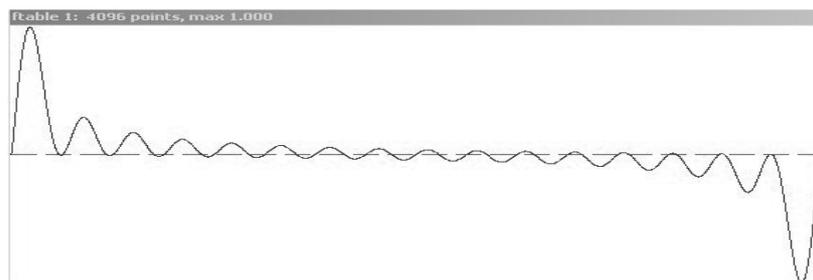


Figura 5: Forma de onda de um Espectro com 16 parciais harmônicas, todos com a mesma amplitude relativa.

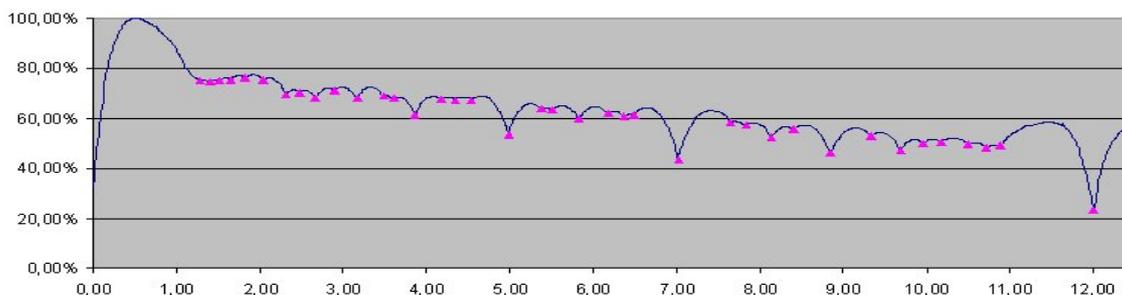


Figura 6: Curva de dissonância sensorial de 500 Hz a 1.030 Hz de um espectro sonoro com 16 parciais harmônicas com a mesma amplitude relativa. Triângulos representam os vales. Dissonância Sensorial no eixo vertical em porcentagem relativa, intervalo no eixo horizontal em semitons do sistema temperado.

Ordem	Razão	Cents	DS	Ordem	Razão	Cents	DS
1°	[2/1]	1.200	23,12	20°	[10/7]	618	62,24
2°	[3/2]	702	43,65	21°	[11/8]	551	63,38
3°	[5/3]	884	46,19	22°	[15/11]	537	63,63
4°	[7/4]	969	47,51	23°	[9/7]	435	67,27
5°	[13/7]	1.072	48,06	24°	[13/10]	454	67,35
6°	[15/8]	1.088	48,99	25°	[14/11]	418	67,52
7°	[11/6]	1.049	49,39	26°	[16/13]	360	67,94
8°	[16/9]	996	49,87	27°	[7/6]	267	68,12
9°	[9/5]	1.018	50,39	28°	[6/5]	316	68,27
10°	[8/5]	814	52,47	29°	[11/9]	348	69,17
11°	[12/7]	933	53,16	30°	[8/7]	231	69,55
12°	[4/3]	498	53,63	31°	[15/13]	248	70,39
13°	[13/8]	840	55,47	32°	[13/11]	289	71,22
14°	[11/7]	783	57,18	33°	[13/12]	139	74,67

15°	[14/9]	765	58,49	34°	[12/11]	151	75,01
16°	[7/5]	583	59,91	35°	[14/13]	128	75,05
17°	[13/9]	637	60,81	36°	[11/10]	165	75,52
18°	[5/4]	386	61,19	37°	[9/8]	204	75,53
19°	[16/11]	648	61,20	38°	[10/9]	182	76,11

Tabela 3: Tabela de intervalos justos correspondentes aos vales no gráfico da figura 6, distribuídos em ordem crescente de dissonância sensorial (DS).

4 - Objetivos e Conclusões

Nessa fase inicial, analisamos formas de ondas sintéticas. Para o próximo estágio, implementaremos uma transformada de Fourier para obtermos dados do espectro sonoro de instrumentos acústicos e analisá-los. Os primeiros testes descritos neste trabalho procuraram avaliar a capacidade analítica da ferramenta, principalmente no sentido de apontar os vales. Analisando ondas sintéticas de componentes espectrais harmônicos, pudemos constatar facilmente se os vales apontados pela ferramenta coincidem com os intervalos justos esperados.

Os espectros analisados contêm apenas 16 parciais harmônicos (sendo que a onda quadrada possui apenas harmônicos ímpares). Esperávamos, por isso, obter níveis mínimos de dissonância em intervalos justos representados somente pelas razões de números inteiros que correspondessem aos parciais existentes (por exemplo: [7/5] e não [19/15], uma vez que o 19° parcial não está presente).

Os únicos intervalos inesperados se mostram presentes na análise da onda quadrada: [2/1] e [3/2]. Uma vez que a onda quadrada não possui harmônicos pares, não há coincidência nenhuma entre os parciais nestes intervalos, fato que a princípio contraria as conclusões de Plomp e Levelt (vide parágrafo final da seção 2). De qualquer maneira, a distribuição dos parciais nestes intervalos ocorre de tal maneira que estão distantes entre si o suficiente para evitar batimentos. Inclusive o intervalo de oitava [2:1] aparece como consonância mais forte por este motivo, já o intervalo de quinta [3:2], normalmente seguido da oitava nos outros casos, aparece mais distante (sexta posição).

Em todo caso, é curioso que o espaçamento entre os parciais que resulta em um ponto mínimo de dissonância ocorra exatamente nas proporções de números inteiros pequenos como [2/1] e [3/2], e não em outro intervalo qualquer. Acreditamos que isto merece uma investigação, resultando em uma provável revisão das considerações de Plomp e Levelt.

A onda dente-de-serra apresenta um nível médio de dissonância maior que a da onda quadrada, pois possui os harmônicos pares (e um nível de energia mais alto), e assim também encontramos mais vales (todos aqui representados por intervalos justos esperados). Os vales mais significativos na curva da *Figura 4* aparecem nas primeiras posições da *Tabela 2*: oitava [2/1], quinta [3/2], quarta [4/3] e sexta maior [5/3] (razões de números inteiros pequenos).

Nem todas as relações possíveis entre os componentes espectrais (intervalos justos) aparecem como vales nas análises de onda quadrada e dente-de-serra. Essas relações não estão presentes por causa da baixa amplitude de alguns componentes espectrais, o que fica claro quando comparamos com a análise do espectro sonoro formado por 16 parciais possuindo a mesma amplitude relativa: uma vez que todos os parciais estão presentes com a mesma energia, praticamente todas as relações entre os parciais foram apontadas como vales.

Das 40 relações possíveis entre os harmônicos, apenas não aparecem nesta análise os intervalos [16/15] e [15/14] (112 cents e 119 cents respectivamente), isto se dá porque a diferença em frequências destes intervalos é pequena, e ainda sofre forte influência da banda crítica. Muitos intervalos aparecem como vales mesmo apesar das diferenças dos valores de dissonância em determinadas regiões não serem muito significativos, ou seja, a eficácia da ferramenta foi aprovada segundo o referencial teórico, pois mesmo até em casos de sutis diferenças, os vales corresponderam a intervalos justos esperados, e não um intervalo outro qualquer.

Afinações justas buscam minimizar a dissonância de intervalos musicais. Pelo exposto neste artigo, podemos verificar que níveis mínimos de dissonância dependem dos componentes espectrais dos sons. Desta forma, o uso de afinações justas se baseia em um conceito que considera o comportamento espectral dos instrumentos musicais como sendo idealmente harmônico e estático. Todavia, quando se trata de instrumentos musicais acústicos, há sempre um índice de inarmonicidade associado, principalmente em instrumentos de percussão como sinos e de barras de metais. Instrumentos de corda e sopro são os que possuem o menor índice de inarmonicidade, e de fato um nível mais baixo de dissonância pode ser obtido no uso de sistemas de afinação justa nestes instrumentos. Todavia, há um limiar de percepção onde as vantagens de uma afinação justa não prevalecem sobre o uso de intervalos temperados. Isto se apresenta em muitos dos vales apontados nas *Figuras 3, 4 e 6*, que não são significativamente menos dissonantes do que outros possíveis intervalos temperados próximos. Por isso, intervalos temperados são usados como uma solução mais prática e alternativa ao ideal de afinação justa em determinados casos, o que esta ferramenta de análise tem a capacidade de medir.

5 – Projeções

Estes testes iniciais nos forneceram resultados que comprovam a eficácia desta ferramenta de análise em Pd para apontar níveis mínimos de dissonância de acordo com os componentes espectrais. Após essa fase inicial poderemos aprimorar o software, incluindo a análise de sons acústicos inclusive para interação em tempo real. As curvas de dissonância sensorial subsidiam uma abordagem que vincula intervalos musicais ao comportamento espectral dos sons, numa aplicação, portanto, similar à da música espectral, que adota o uso de microintervalos para interferir no comportamento espectral de uma massa sonora. As ferramentas aqui apresentadas serão utilizadas principalmente para composição musical interativa onde o compositor poderá manipular afinações e dissonância sensorial como fator de interação com o intérprete.

Ainda são poucos os estudos focados na medida de dissonância sensorial como apresentados neste trabalho. Os modelos e métodos disponíveis são, inevitavelmente, simples para tratar de um objeto complexo como o timbre de instrumentos. Uma modelagem mais aprimorada pode ser o fruto de uma pesquisa mais detalhada do estudo de percepção de timbre e dissonância sensorial, que infelizmente não faz parte do projeto atual de mestrado.

6 – Agradecimentos

O mestrando Alexandre Torres Porres tem o apoio da FAPESP, processo 04/12405-6. As ferramentas tecnológicas estão sendo elaboradas em parceria com o doutorando Fábio Furlanete. O trabalho está sob a orientação do Prof. Dr. Jônatas Manzolli, que tem o apoio de projeto de produtividade do CNPq, projeto 308765/2003-6.

7 – Referências Bibliográficas

- Helmholtz, Hermann L.F. von (1877) *On the Sensations of Tone as a Psychological basis for the Theory of Music*. New York, NY: Dover Publications. 2ª edição em inglês trad. por Alexander John Ellis, baseada na 4ª edição em alemão de 1877. Re-edição de Dover Publications, 1954.
- Plomp, Renier e Willem J.M. Levelt (1965). Tonal Consonance and Critical Bandwidth. *Journal of the Acoustical Society of America* N° 38, 548-568.
- Sethares, William A. (1999) *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. London: Springer-Verlag. 2ª Edição (2005) com CD-ROM.
- Tenney, James (1988). *A History of 'Consonance' and 'Dissonance'*. White Plains, NY: Excelsior.
- Zwicker, Flottorp e Stevens (1957). Critical Band Width in Loudness Summation. *Journal of The Acoustical Society of America* N° 29, 548-557.