opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

# Estudo da Variação do Timbre da Clarineta em Performance através de Análise por Componentes Principais da Distribuição Espectral

***Maurício A. Loureiro***

***Hugo B. de Paula***

**Resumo:** Foram feitas medições da variação temporal das amplitudes e das freqüências dos componentes harmônicos do som produzido por um instrumento musical (clarineta), visando investigar o significado dos parâmetros físicos determinantes da variação do timbre do som produzido numa performance musical em instrumento acústico. As curvas de amplitude obtidas apresentaram um grande grau de correlação, tanto no sentido do tempo ou quanto no sentido da freqüência. A Análise por Componentes Principais (PCA) mostrou-se adequada para identificar padrões de variação da distribuição espectral através de uma redução de dados, visando relacioná-los com as características perceptivas. Este método de análise se mostrou efetivo revelando relações de variação destes parâmetros com características estáticas e dinâmicas do timbre. Resultados mostraram que os 3 primeiros Componentes Principais foram suficientes para representar a variação de timbre dos sons analisados e a trajetória destes Componentes revelaram padrões característicos da evolução temporal do timbre.

**Abstract**: Timbre dynamics content of performed musical sounds are analyzed in this paper. Amplitude and frequency time-varying curves of the partials were measured, in order to investigate intentional expressive timbre changes within a gesture realization in a musical performance on the clarinet. Spectral envelopes showed a high correlation both in frequency and time domain. Principal Component Analysis (PCA) has been proved effective in identifying variation patterns in the spectral distribution. The PCA enabled data reduction and transformation, which made possible to build relations between the Principal Components and perceptual characteristics of sound, establishing consistent relationships between property variations of these parameters and static and dynamic characteristics of timbre. Results showed that the 3 first Principal Components were enough to represent the "timbre variation" of the samples and the trajectories of these Components elucidated some main characteristics of timbre development.

## Introdução

### Conceito de timbre

O conceito de timbre refere-se à cor ou à qualidade do som e está normalmente dissociado dos conceitos de intensidade e altura. Timbre é definido pela ASA (American Standard Association) como "aquele atributo do sentido auditivo em termos do qual o ouvinte pode julgar que dois sons similarmente apresentados e tendo a mesma intensidade e altura, são dissimilares" (RISSET e WESSEL, 1982). Esta vaga definição está relacionada com a multidimensionalidade inerente a este atributo, o qual não pode ser escalonado por quantidades unidimensionais, tal como acontece com o *volume* e *altura*, cujas variações podem ser descritas por escalas entre *fraco-forte* e *grave-agudo*, respectivamente, e que

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

podem por isso ser especificados quantitativamente pelo sistema tradicional de notação musical. As variações de *timbre* são percebidas, por exemplo, como agrupamentos de sons tocados por um mesmo instrumento musical, ou falados por uma mesma pessoa, mesmo que estes sons possam ser bem distintos entre si, de acordo com sua altura, intensidade ou duração.

De fato o conceito de timbre tem sido sempre relacionado com sons de instrumentos musicais ou de voz e é neste âmbito que a maioria das pesquisas em timbre têm se desenvolvido (RISSET, 1966; GREY, 1975, 1978; PLOMB, 1976; GORDON e GREY, 1977, 1978; MCADAMS e BREGMAN, 1979; MCADAMS, 1987). Estes trabalhos identificaram inúmeros fatores que formam o que podemos chamar de percepção do timbre, tais como: o volume do som (intensidade percebida); o envelope de amplitude (evolução da intensidade global), cuja parte inicial (ataque) pode assumir especial importância na discriminação do timbre de um instrumento musical dependendo da duração do som; flutuações de alturas e intensidades devido a vibratos ou tremolos; estruturas dos formantes[1], que assumem maior importância na percepção de sons vocais; distribuição espectral (amplitudes das freqüências dos componentes espectrais); evolução temporal da distribuição espectral.

**Timbre de Instrumentos Musicais**

Inúmeros trabalhos de pesquisa realizados com métodos de análise e síntese de sons de instrumentos musicais mostraram ser bastante adequada a representação destes sons através de curvas de variações temporais das amplitudes e das freqüências dos componentes harmônicos (RISSET, 1966, 1991; STRONG e CLARK, 1967; GORDON e GREY, 1978; GREY, 1975, 1978; MCADAMS e BREGMAN, 1979; MCADAMS, 1987; MASRI, BATEMAN e CANAGARAJAH, 1997a e 1997b). Strong e Clark sintetizaram sons de instrumentos de sopro por síntese aditiva, somando os harmônicos com suas amplitudes controladas por um envelope espectral. Foi utilizado, num primeiro momento, o mesmo envelope para todas as freqüências, e em seguida vários envelopes que variavam de acordo

[1] Formantes são picos de amplitudes de freqüências de componentes espectrais que mantêm uma certa constância, mesmo que a altura (freqüência fundamental) varie.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

com as freqüências dos harmônicos (STRONG e CLARK, 1967). Risset analisou sons de trompete e obteve curvas individuais de evolução temporal das amplitudes e freqüências para cada harmônico. A partir destes dados ele conseguiu imitar os sons do trompete com o sistema de síntese MUSIC V, utilizando um envelope de controle para cada harmônico, construídos a partir de aproximações, por segmentos lineares, das curvas obtidas na análise. Através de testes auditivos, concluiu que certas características timbrísticas do som do trompete obedecem mais a leis de variação do espectro do que a características fixas da estrutura espectral (RISSET, 1966; RISSET e MATHEWS, 1969).

A motivação de todos estes trabalhos em tomarem como ponto de partida sons de instrumentos musicais tradicionais procurando imitá-los com a maior fidelidade possível, certamente não está limitada somente ao propósito de duplicar eletronicamente estes sons. A busca maior destas investigações está voltada para a exploração do mundo desconhecido desta propriedade do som que chamamos de timbre, procurando entender como ouvimos os sons destes instrumentos e principalmente como ouvimos a música produzida com eles. Investigações mais extensivas nessa área se mostram cada vez mais necessárias, depois do surgimento da música eletroacústica, que deixa de focalizar o aspecto global da nota para explorar o comportamento de sua estrutura interna, já que este novo meio viabiliza a composição, decomposição e o desenvolvimento dos interiores espectrais. Esta nova abordagem composicional desperta ainda mais a busca pela compreensão do controle dinâmico e instantâneo que os instrumentistas detêm sobre o som produzidos por seus instrumentos (acústicos).

**Variação Temporal do Timbre**

O conceito de timbre torna-se ainda mais impreciso quando consideramos que num mesmo instrumento musical, o intérprete pode produzir timbres diferentes, dependendo da altura da nota e da maneira como é tocada. Apesar dos instrumentos acústicos tradicionais oferecerem possibilidades de produzir e controlar com precisão uma vasta gama de timbres, não existe para este atributo um sistema de classificação de seus estados de evolução ao longo do tempo. A especificação deste atributo no sistema tradicional de notação musical

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

não oferece escalonamentos gradativos de qualidade e quantidade, tornando mais complexa a utilização deste parâmetro numa composição musical.

A grande maioria dos estudos realizados sobre o timbre de instrumentos musicais tem se restringido à análise de notas musicais isoladas, ou seja, sem variações radicais de freqüência da fundamental, em geral abordando comparações entre diferentes instrumentos musicais e fora de qualquer contexto musical, focalizando apenas a discriminação entre instrumentos. Muito pouco foi realizado em relação à variação de timbre num mesmo instrumento, seja em passagens musicais ou mesmo dentro do âmbito de uma mesma nota. Strawn e Piszczalski estudaram a transição entre as notas de um trecho musical, investigando amostras que incluíam mais de uma nota (STRAWN, 1985a, 1986 e 1987a; PISZCZALSKI, 1979 e 1981). Trabalhos mais recentes têm investigado a variação dos parâmetros do som em performances musicais procurando compreender o controle dinâmico e instantâneo que os instrumentistas detêm sobre o som de seus instrumentos (MASRI e BATEMAN, 1996; DUBNOV e RODET, 1997; ARCOS, MÁNTARAS e SERRA, 1998; DANNENBERG e DERENYI, 1998; FRIBERG, BRESIN, FRYDÉN e SUNDBERG, 1998; DE POLI, RODA e VIDOLIN, 1998).

**Abordagem do Problema**

**Análise Proposta**

Ao invés de tratar notas isoladas e quase-estáticas, tal como na maioria dos estudos em timbre de instrumentos musicais já realizados, este trabalho busca estudar a variação do timbre de uma ou mais notas ao longo de execuções de frases musicais representativas do repertório do instrumento analisado, visando identificar o significado de parâmetros físicos determinantes da variação do timbre de um instrumento, na realização de um gesto "expressivo" numa interpretação musical. Esta investigação foi feita através da análise das funções de variação temporal das amplitudes e das freqüências dos componentes harmônicos dos sons amostrados em gravações de alta qualidade destas passagens musicais. A partir dos dados de análise, os sons foram ressintetizados em diferentes níveis de simplificação de dados e processados por métodos de *Análise Estatística de Multivariados*.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

**Dados Utilizados**

A clarineta foi utilizada neste estudo. As amostras analisadas foram tomadas de passagens que caracterizam vários aspectos timbrísticos do instrumento, e que inclui sobretudo frases com grande teor expressivo, como por exemplo, frases que envolvem uma larga extensão de alturas e variação dinâmica acentuada. A melodia da abertura do Quinteto op. 115 em Si menor para clarineta e quarteto de cordas de J. Brahms serviu perfeitamente aos propósitos desta análise. Brahms explora nesta obra a diferenciação timbrística da clarineta através da construção das frases e da organização da partitura. O Fá sustenido do sexto compasso, por exemplo, tem seu valor triplicado em relação ao tema original, apresentado cinco compassos antes pelos violinos, permitindo e induzindo o intérprete a uma evolução temporal mais consciente da variação dinâmica da intensidade e do timbre. A indicação de variação de intensidade (><), a pulsação harmônica e o movimento ascendente do cello ressaltam a intencionalidade deste gesto dinâmico (LOUREIRO, 1996). Esta nota específica foi utilizada neste texto para exemplificar os procedimentos de análise além de outros exemplos tomados de passagens do Quinteto Kv. 588 em Lá Maior de Mozart e do *Grand Quintetto* op. 34 de K. M. von Weber, ambos escritos para a mesma instrumentação. Cada nota analisada foi repetida isoladamente fora do contexto musical para elaborar as amostras de controle. As gravações foram feitas nos estúdios da Escola de Música da UFMG e executadas por Maurício Loureiro.

**Metodologia**

***Transformada de Fourier***

A *Transformada de Fourier*, propõe a decomposição de qualquer função periódica em uma série de senóides harmonicamente relacionadas, ou seja, com freqüências que se relacionam por múltiplos inteiros. Um som pode assim ser representado por uma soma ponderada de vibrações acústicas elementares, múltiplas entre si. Apesar de contarmos hoje com vários outros métodos e tecnologias, incluindo novas técnicas não baseadas na Teoria de Fourier, a Transformada de Fourier ainda responde pela grande maioria das aplicações em análise, síntese e processamento de sinais por sua versatilidade e facilidade de utilização.

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

A *Transformada Discreta de Fourier de Curta Duração* (DSTFT - Discrete Short-Time Fourier Transform), utilizada neste estudo, implementa computacionalmente a Transformada de Fourier em segmentos sucessivos do sinal de áudio analisado. A DSTFT pode ser resumida como uma técnica de análise de sinais digitais que aplica um banco de filtros, centrados em diferentes freqüências, a segmentos sucessivos de curta duração extraídos do sinal, resultando, para cada segmento, numa série de valores de amplitudes e fases para cada freqüência correspondente aos filtros. O conjunto destas séries de valores constitui a variação temporal do espectro. Primeiramente cada um dos segmentos do sinal é multiplicado por uma função janela de suporte finito[2]. Estes segmentos passam então seqüencialmente por um banco de filtros passa-faixa, com freqüências igualmente espaçadas de zero até o valor igual à metade da taxa de amostragem[3]. Em seguida a janela é deslocada sobre o sinal por um valor de tempo devidamente selecionado de maneira a resultar numa umbricação dos segmentos e o processo de análise é repetido. Deste modo a DSTFT fornece uma sucessão de espectros instantâneos que acompanham a evolução temporal da composição espectral, ou seja, os valores das amplitudes e fases das freqüências que compõem o sinal. Assim a DSTFT torna-se adequada, dentro de uma certa medida, à análise de sinais não estacionários, desde que as freqüências não variem bruscamente. Um resumo do desenvolvimento matemático da DSTFT é apresentado no APÊNDICEI.

*Obtenção dos Parâmetros Acústicos*

Cada nota foi analisada isoladamente, calculando-se seu espectrograma (curvas de amplitude) com um número significativo de harmônicos, dependendo da altura da nota. Quanto mais aguda a nota, menor o número de harmônicos considerado, pois os valores destas amplitudes caem significativamente para altas freqüências. Foram considerados apenas os harmônicos cujo pico de amplitude estivesse a uma distância menor que 60 decibéis do valor máximo medido para cada som, o que corresponde aproximadamente 0,1% da intensidade máxima.

---

[2] Funções que possuem valores nulos fora de um determinado intervalo.

[3] Respeitando o Teorema de Nyquist, que diz que a máxima freqüência possível de ser amostrada tem o valor menor que a metade da taxa de amostragem.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

O método *MQ Analysis* de McAuly e Quartieri foi utilizado para o mapeamento do valor instantâneo de freqüência dos parciais (MCAULY e QUARTIERI, 1984 e 1986). O algoritmo de McAulay & Quartieri determina o valor das freqüências dos harmônicos buscando pelos picos de valores ("peak detection") dentro de uma região pré-estimada e os associa com o valor do próximo pico ("peak continuation"), obtendo assim os valores de freqüência de cada harmônico, mesmo que estes variem ao longo do tempo. O algoritmo é utilizado em alguns softwares distribuídos comercialmente, tais como o Audiosculp e o SMS de Xavier Serra (SERRA, 1991). O cálculo da DSTFT assim como o algoritmo de McAuly e Quartieri foram implementados neste projeto utilizando-se a plataforma do MATLAB (Signal Processing Toolbox).

*Simplificação dos dados*

Após as medições, as curvas de magnitude do espectro mostraram pequenas variações em curtos espaços de tempo. Vários trabalhos de pesquisa propõem métodos de simplificação de modo a obter um espectro suavizado. De uma maneira geral, estes trabalhos conduziram a conclusões de que certas micro-flutuações de amplitudes e freqüências não são percebidas e podem ser simplificadas por aproximação de segmentos lineares (CHABORNNEAU, 1981; STRAWN, 1980). Num dos estudos mais exaustivos jamais realizados com timbre de instrumentos musicais, J. Grey elaborou testes de audição que mediram graus de discriminação auditiva em comparações de sons originais gravados contra diferentes versões de sons sintetizados, cada uma contendo níveis distintos de simplificação de dados. Grey concluiu que uma redução de dados da ordem de 20:1 a 50:1 pode ser alcançada com um índice mínimo de perda de significado de informação (GREY, 1975).

Os métodos de simplificação devem maximizar a eliminação das variações de pequena duração dos parâmetros espectrais, mas garantir a retenção de qualquer informação relevante para a percepção. A metodologia aqui adotada está fundamentada num estudo de Beauchamp, de 1996, que compara a eficiência de vários métodos de aproximação linear para este tipo de aplicação (HORNER e BEAUCHAMP, 1996). O mesmo autor mostra que simplificações desta curvas podem ser melhoradas através de um pré-processamento dos

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

envelopes por um filtro passa-baixa com uma freqüência de corte de aproximadamente de 10 Hz (HORNER e BEAUCHAMP, 1998). Valores mais exatos da freqüência de corte do filtro pode ser determinado empiricamente ou por estimativa da concentração da densidade de potência dos envelopes[4]. Uma redução significativa no volume de dados foi alcançada, resultando não apenas numa menor demanda de armazenamento, mas também facilitando a análise dos dados.

*Análise dos Parâmetros Acústicos*

A partir de uma primeira análise destas curvas percebeu-se que uma característica comum a dados de síntese aditiva: os envelopes de amplitude apresentaram um grande grau de correlação seja no sentido do tempo, como no sentido da freqüência, sugerindo a aplicação de métodos de *Análise Estatística de Multivariados*. Desde a década de 60, pesquisas em timbre musical procuraram desenvolver métodos de escalonamento multidimensional para o timbre de diferentes instrumentos musicais, através de métodos de *Análise Estatística de Multivariados*. Alguns destes trabalhos propuseram espaços timbrísticos multidimensionais, nos quais diferentes "valores multidimensionais" de percepção de timbre seriam dispostos em pontos diferentes do espaço e pontos intermediários entre estes valores representariam interpolações entre timbres conhecidos. Estes métodos, dentre eles a *Análise por Componentes Principais* (PCA), têm se mostrado eficiente no estudo de parâmetros perceptivos do timbre medidos por testes auditivos (PLOMB, 1970 e 1982; GREY, 1975; RISSET e WESSEL 1982; WESSEL, 1979; RISSET, 1991). Trabalhos mais recentes adotaram esta mesma metodologia, utilizando, no entanto medições de parâmetros físicos do som como dados de análise, com o objetivo de relacioná-los com características perceptivas (SANDELL e MARTENS, 1995; CHARBONNEAU et al, 1997a e 1997b).

*Análise por Componentes Principais*

A *Análise por Componentes Principais* (PCA) aplicada a um conjunto multidimensional de variáveis calcula uma base ortogonal determinada pelas direções da máxima variância dos

[4] O filtro é aplicado ao envelope de amplitude e não diretamente ao sinal; do mesmo modo as densidades de potência são calculadas em relação à função dos envelopes de amplitude e freqüência.

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

dados analisados. As projeções dos dados originais nesta base, denominadas *Componentes Principais* descrevem trajetórias que acumulam em si a máxima variância dos dados em ordem decrescente, possibilitando uma representação aproximada dos dados a partir de um número reduzido de dimensões desta base (JOHNSON e WICHERN, 1998; RENCHER, 1995; ROCHEBOIS e CHARBONEAU, 1997). A porcentagem da variância total do sinal "explicada" por um subconjunto de Componentes Principais é dada pela soma acumulada dos *auto-valores* correspondentes àqueles Componentes Principais retidos na reconstrução.

Os valores das amplitudes dos harmônicos foram colocados numa matriz $\mathbf{X}_{[p \times n]}$ de dimensões igual a $p$x$n$, sendo $p$ o número de harmônicos utilizados e $n$ o número de valores medidos pela Transformada de Fourier (número de quadros de tempo). Cada coluna desta matriz representa uma mediação no tempo $i$ ($i$ = 1, 2, ..., $n$) das amplitudes de cada harmônico. A cada tempo $i$ os $p$ harmônicos podem ser considerados como coordenadas de um ponto em um espaço de dimensão $p$. Após calcular-se os Componentes Principais, reconstruiu-se o sinal por síntese aditiva, utilizando os espectros calculados a partir de um número reduzido de Componentes Principais. Testes auditivos foram suficientes para validar esta representação do sinal com a retenção de 3 a 5 Componentes Principais, dependendo da altura da nota. O APÊNDICE II, descreve suscintamente o cálculo os Componentes Principais.

**Resultados**

A *Análise por Componentes Principais* revelou características importantes da distribuição espectral, que puderam ser relacionadas com características perceptivas referentes ao timbre. Através de testes auditivos foi observado que os sons reconstruídos com semelhanças em torno de 90% em relação ao som original, não apresentaram perdas significativas de informação perceptiva. Reconstruções a partir de 3 a 6 Componentes Principais apresentaram semelhanças entre 85 e 95%, dependendo da altura da nota analisada, o que garantiu uma redução significativa de dados: a dimensão da representação do som original foi assim drasticamente reduzida, passando de 16 a 30 (número de harmônicos medidos) para 3 a 6 (número de Componentes Principais retidos na

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

reconstrução). Na reconstrução das notas mais agudas atingiu-se semelhanças satisfatórias com um número menor de Componentes Principais (em torno de 3) se comparado com sons mais graves (em torno de 6), o que garantiu o mesmo nível de redução de dados para qualquer altura, já que o número de harmônicos considerados para as notas agudas foi bem menor (em torno de 16) do que para notas mais graves (em torno de 32). Para notas gravadas fora de contextos musicais, observou-se um menor grau de semelhança para o mesmo número de Componentes Principais retidos, se comparadas com notas com variação dinâmica (notas extraídas de frases musicais). Estes valores, no entanto crescem mais rapidamente, praticamente igualando seus valores quando 6 Componentes Principais são utilizados. Este fato sugere uma relação com as flutuações de curta duração que assumem menor importância nos Componentes Principais de ordem inferior para sinais com maior variação dinâmica.

O procedimento de cálculo dos Componentes Principais acima descrito foi inicialmente aplicado individualmente para diversas notas de diferentes registros do instrumento. Para cada nota amostrada, projetou-se em um gráfico o primeiro Componente Principal em função do segundo. Estes gráficos passam assim a representar em um plano (duas dimensões), mais de 90% da informação da distribuição espectral originalmente armazenada em variáveis definidas em um espaço de dimensão igual ao número de harmônicos. Pontos representados neste plano correspondem a características timbrísticas de um determinado som e as trajetórias percorridas por estes pontos descrevem a variação dinâmica do timbre destes sons. A Figura 1 mostra apresenta um exemplo destes gráficos para um som amostrado a uma taxa de 44.1 kHz, em 16 bits, PCM linear mono, correspondente ao Fá sustenido (749 Hz) sustentado pela clarineta ao longo do 8º e metade do 9º compassos do Quinteto op. 115 de J. Brahms. Neste exemplo os valores de amplitude dos 12 primeiros harmônicos foram medidos e a matriz de dados submetida à PCA, de dimensão 12x156, contém 156 valores de amplitude de cada harmônico, medidos a cada 23 milisegundos (duração dos quadros de tempo). O início e o fim do som estão marcados no gráfico.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

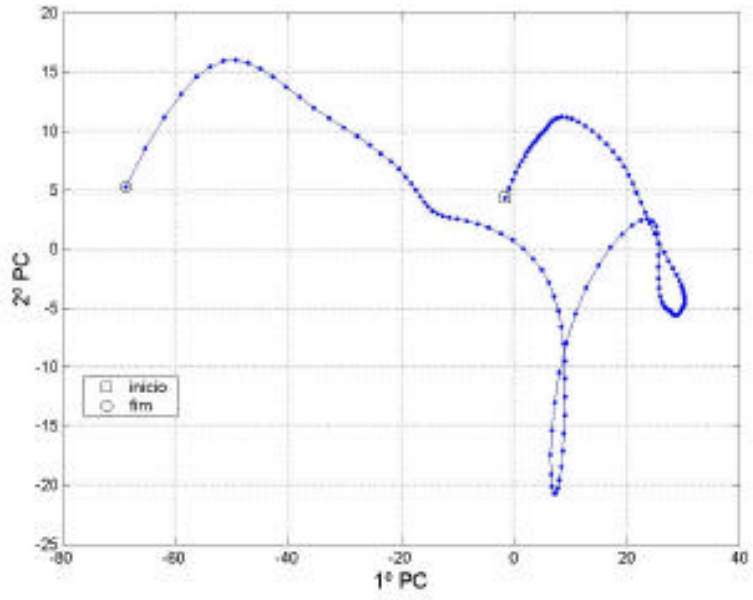


***Figura 1:*** *Dois primeiros Componentes Principais do Fá # (749 Hz) tocado pela clarineta no 8º e 9º compassos do 1º mov. do* Quinteto op. 115 *de Brahms.*

**Análise dos Componentes Principais**

A redução de dados promovida pela PCA e as representações gráficas permitidas por ela, possibilitaram inferências a respeito das características do timbre de cada nota, assim como da evolução temporal destas características, quando esta nota é dinamicamente modificada em uma performance musical (LOUREIRO, DE PAULA e YEHIA, 2000):

1. Intervalos constantes de tempo, representados por cada ponto, mostram a taxa de variação do timbre ao longo da nota através da distância entre eles: quanto mais próximos os pontos, menor é a variação de timbre ocorrida entre eles.

2. Variações de timbre relacionadas a variações de intensidade não mantêm uma correspondência temporal: observou-se variações de timbre bem mais acentuadas nos finais de *diminuendi*.

3. A variação de timbre é mais lenta ao longo de um *crescendo* se comparado com o *diminuendo*.

4. Variações mais acentuadas foram observadas na direção do 1º Componente Principal.

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

5. As curvas individuais de cada Componente Principal mostraram que o 1º acompanha a variação de intensidade dos sons, indicando uma relação estreita com a quantidade de energia total do sinal; os pesos aplicados a este Componente Principal "*moldam*" os harmônicos na reconstrução, com suas respectivas intensidades, mantendo assim para todos os harmônicos uma variação temporal uniforme e que se assemelha ao envelope de amplitude do som.
6. As variações no 2º Componente Principal parecem se relacionar com configurações localizadas do espectro que, possivelmente, representam nuanças timbrísticas.

A fim de isolar e analisar a evolução dos parâmetros ao longo de variações timbrísticas conferidas à nota dentro do contexto de uma frase musical, as mesmas notas foram amostradas isoladamente fora de um contexto musical e com o mínimo de variação de intensidade e timbre. Estas amostras, denominadas *notas planas*, foram submetidas ao mesmo método de análise e os resultados foram comparados com as amostras extraídas das execuções de frases musicais, denominadas *notas expressivas*.

No entanto, a metodologia de análise individual de cada amostra, tal como foi aplicada, deixa de ser consistente para comparações de timbre, seja estático ou dinâmico, entre sons distintos, já que o cálculo dos Componentes Principais gera uma base de *auto-vetores* específica para cada amostra analisada. Desta maneira, os pontos que representam as características instantâneas de timbre estão representados em espaços distintos definidos por bases específicas calculadas para cada amostra. A distância entre os pontos, assim como as trajetórias descritas por eles só podem ser consistentemente interpretadas se todos os sons forem representadas no mesmo sistema de coordenadas. Os Componentes Principais foram então calculados para uma base de dados constituída pela concatenação de espectros distintos de uma mesma nota tocada em vários níveis de intensidade, com e sem variação dinâmica de timbre. A base de coordenadas assim gerada busca "explicar" todas os sons possíveis de uma mesma nota, criando o que pode ser chamado de *Espaço*

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

*Timbrístico* desta nota, no qual cada nuance timbrística ocupará uma posição específica neste espaço de acordo com suas características.

A Figura 2 mostra a projeção do 1º Componente Principal em função do 2º, para dois sons de mesma duração (3.666 ms) e freqüência (749 Hz). Um deles, *nota expressiva* (em azul), é o mesmo som da Figura 1 e o outro (em vermelho) é a *nota plana* deste mesmo Fá sustenido, gerado como mencionado acima. O início e o fim das notas estão marcados no gráfico.

As variações mais ordenadas dos Componentes Principais observadas em apenas uma direção e sub-divididas em poucos segmentos, observadas na curva correspondente à *nota plana*, comprovam a menor riqueza de desenvolvimento timbrístico contidas neste som. A curvas evidenciam também que a faixa de variação no sentido do 1º Componente Principal, é bem menor para a *nota plana*, confirmando que este Componente esteja relacionado com a variação de energia total do som. (Flutuações de curta duração parecem assumir menor importância nos Componentes Principais de ordem inferior para sinais com maior variação dinâmica).

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

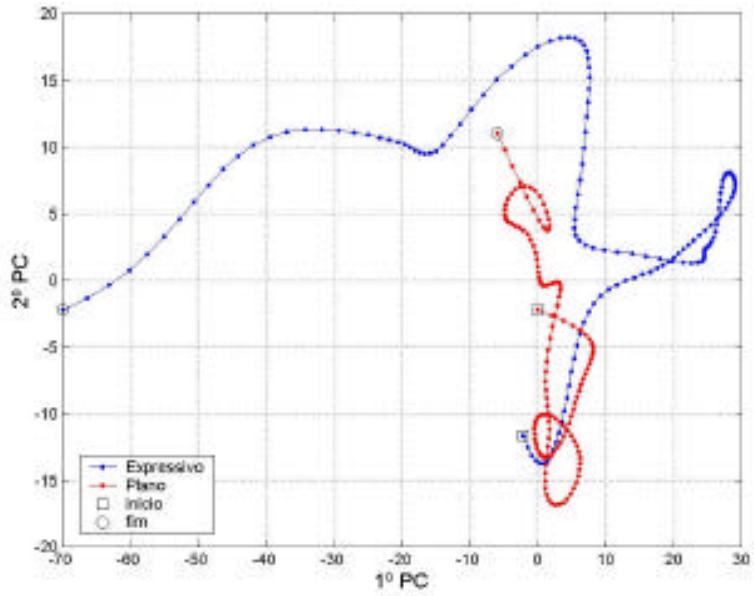


***Figura 2:*** *Dois primeiros Componentes Principais do Fá # (749 Hz): nota expressiva (8º e 9º compassos do 1º mov. do Quinteto op. 115 de Brahms) e nota plana.*

Notas de diferentes registros da clarineta foram submetidas à mesma metodologia de análise. As Figuras 3 e 4 apresentam curvas comparativas entre *notas expressivas* e *notas planas* de diferentes registros da clarineta. As *notas expressivas* foram extraídas de outras passagens do mesmo Quinteto de Brahms e do Quinteto Kv. 588 para clarineta e cordas de Mozart.

A diversidade de formas das trajetórias gerada por cada nota sugere uma relação destas formas com as diferentes evoluções timbrísticas percebidas ao longo da extensão do instrumento. No entanto, a comparação entre as *notas expressivas* e *planas* mostra um comportamento global da variação de timbre semelhante àquele observado para o Fá sustenido discutido acima.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

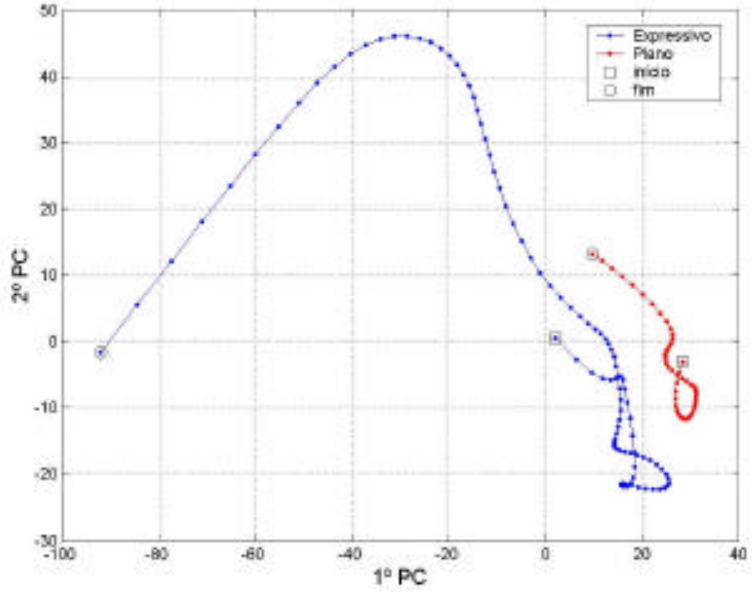


***Figura 3:*** *Dois primeiros Componentes Principais do Fá # (186 Hz): nota expressiva (15º compasso do 1º mov. do Quinteto op. 115 de Brahms) e nota plana.*

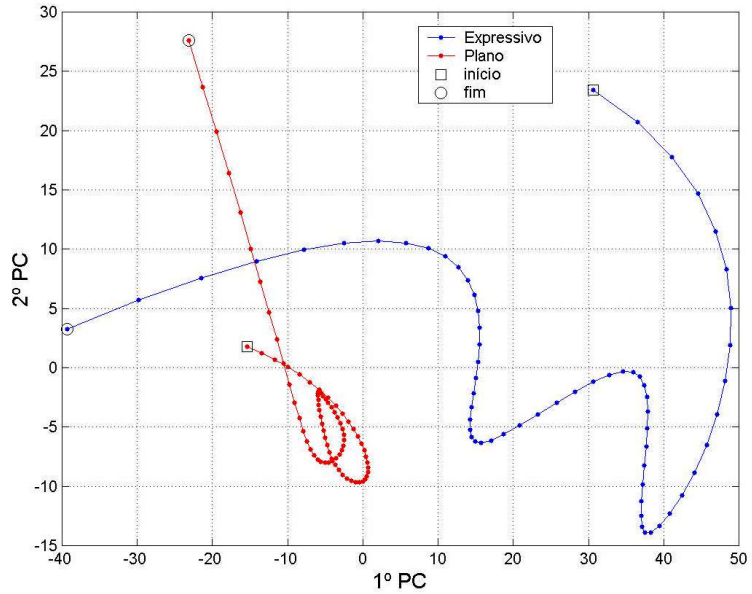


***Figura 4:*** *Dois primeiros Componentes Principais do Si bemol (938 Hz): nota expressiva (compasso 129 do 1º mov. do Quinteto op. 115 de Brahms) e nota plana.*

opus 7
setembro 2000
issn – 1517 – 7017

**Conclusão**

Os resultados obtidos até o momento evidenciaram o potencial dos métodos utilizados para o estudo das características estáticas e dinâmicas do timbre de instrumentos musicais. Com vistas a uma classificação das características estáticas e dinâmicas ao longo de toda a extensão do instrumento, notas pertencentes a regiões que apresentam características semelhantes de timbre foram agrupadas para gerar espaços timbrísticos específicos destas regiões. O conjunto destes espaços constituirá o que podemos chamar de *Espaço Timbrístico da Clarineta*, onde todas as notas do instrumento em suas configurações mais variadas possam ser representadas de maneira a situar timbres semelhantes em regiões próximas deste espaço. Esta representação gráfica do timbre e de sua evolução temporal, oferece caminhos para a compreensão do controle dinâmico e instantâneo que o instrumentista detêm sobre o som dos instrumentos acústicos e de como este controle é percebido pelo ouvinte, o que pode nos conduzir a formulações de plataformas que forneçam outros tipos de controle de outros tipos de estruturas musicais, "… o futuro da performance ao vivo depende de novos instrumentos" [SMALLEY, 1986].

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

## Referência Bibliografica

ARCOS, J. L.; DE MÁNTARAS, R. L. e SERRA, X. "SaxEx: A Case-Based Reasoning System for Generating Expressive Musical Performances," *Journal for New Music Research*. Swets & Zeitlinger, v.27, n.3, 1998.

CHABORNNEAU, G. "Timbre and the Perceptual effects of Three Types of Data Reduction," *Computer Music Journal*, v. 5, n.2, p.10-19, 1981.

CHABORNNEAU, G.; HOURDIN. C. e MOUSSA, T. "A Multidimensional Scaling Analysis of Musical Instrument's Time-Varying Spectra," *Computer Music Journal*, v.21, n.2, p.40-55, 1997.

CHABORNNEAU, G.; HOURDIN. C. e MOUSSA, T. "A Sound Synthesis Technique Based on Multidimensional Scaling of Spectra," *Computer Music Journal*, v.21, n.2, p.56-68, 1997.

DANNENBERG, R. B. e DERENYI, I. "Combining Instrument and Performance Models for High-Quality Music Synthesis," *Journal for New Music Research*. Swets & Zeitlinger, v.27, n.3, 1998.

DE POLI, G.; RODA, A. e VIDOLIN, A. "Note-by-Note Analysis of the Influence of Expressive Intentions and Musical Structure in Violin Performance," *Journal for New Music Research*. Swets & Zeitlinger, v.27, n.3, 1998.

DUBNOV, S. e RODET, X. "Statistical Modeling of Sound Aperiodicities," *Proceedings of International Computer Music Conference*, Tessaloniki, Grece, 1997.

FRIBERG, A.; BRESIN, R.; FRYDÉN, L. e SUNDBERG, J. "Musical Punctuation on the Microlevel: Automatic Identification and Performance of Small Melodic Units," *Journal for New Music Research*. Swets & Zeitlinger, v.27, n.3, 1998.

GORDON, J. E GREY, J. M. "Perceptual Effects of Spectral Modifications on Music Timbres," *Journal of the Acoustics Society of America*, v.63, p.1493-1500, 1978.

GREY, J. M. *An Exploration of Musical Timbre*. Ph.D. Dissertation, Department of Psychology, Stanford University, Department of Music Report STAN-M-2, Palo Alto, CA, 1975.

GREY, J. M. "Timbre Discrimination in Musical Patterns," *Journal of the Acoustics Society of America*, v.64, p.467-472, 1978.

HORNER, A. E BEAUCHAMP, J. "Piecewise Linear Approximation of Additive Synthesis Envelopes: A Comparison of Various Methods," *Computer Music Journal*, v.20, n.2, p.72-95, 1996.

HORNER, A. e BEAUCHAMP, J. "Spectral Moddeling and Timbre Hybridisation Programs for Computer Music," in *Organised Sound*. Cambridge University Press, v.2, n.3, p.253-262, 1998.

JONHNSON, R. e WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Upper Sadlle, NJ: Prentice-Hall, 1998.

LOUREIRO, M. A. "Ilustrando na Clarineta a Variação e o Contrôle do Timbre na Realização do Pensamento Musical," in Ulhôa, M. T, ed. *Anais do IX Encontro Anual da ANPPOM*. Rio de Janeiro, p.276-283, 1996.

LOUREIRO, M. A.; DE PAULA, H. B. & YEHIA, H. C. "Study of the Timbre Dynamics of an Expressive Performance Using Principal Component Analysis of Spectral Parameters", in C. Palombini, ed. *Anais do VII Simpósio de Computação e Música*. PUC-PR, Curitiba, 2000.

MASRI, P. & BATEMAN, A. "Improved Modelling of Attack Transients in Music Analysis-Resynthesis," in *Proc. of International Computer Music Conference (ICMC96)*. The International Computer Music Association (ICMA), p.100-103, ago. 1996.

MASRI, P.; BATEMAN, A. & CANAGARAJAH, C. N. "A Review of Time-Frequency Representations, with Application to Sound/Music Analysis-Resynthesis," in *Organised Sound*. Cambridge University Press (CUP), v.2, n.3, p.193-205, 1997.

MASRI, P.; BATEMAN, A. e CANAGARAJAH, C. N. "The Importance of the Time-Frequency Representation for Sound/Music Analysis-Resynthesis," in *Organised Sound*. Cambridge University Press, v.2, n.3, p.207-214, 1997.

MCADAMS, S. E BREGMAN, A. "Hearing Musical Streams," *Computer Music Journal*, v.3, n.4, p.26-44. Reimpresso em C. Roads e J. Strawn, eds. *Foundations of Computer Music*. Cambridge, Massachussets: MIT Press, p.658-698, 1979.

MCADAMS, S. "Music: A Science of Mind?," *Contemporary Music Review*, v.2. n.1, p.1-61, 1987.

MCAULAY, R. J. e QUARTIERI, T. F. "Magnitude-Only Reconstruction Using a Sinusoidal Speech Model," in *Proceedings of the 1984 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. New York: IEEE Press, 1984.

MCAULAY, R. J. e QUARTIERI, T. F. "Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation." *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. New York: IEEE Press, v.34, n.4, p.744-754, 1986.

PISZCZALSKI, M. "Spectral Surfaces from Performed Music, Part 1; Part 2," *Computer Music Journal*, v.3, n.1, p.18-24; v.3, n.3, p.25-27, 1979.

PISZCZALSKI, M.; GALLER, B.; BOSSEMEYER, R.; HATAMIAN, M. E LOOFT, F. "Performed Music: Analysis Synthesis and Display by Computer," *Journal of the Audio Engeneering Society*, v.29, p.38-46, 1981.

PLOMB, R. "Timbre as a Multidimensional Attribute of Complex Tones," in *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing*. R. Plomb e G. F. Smoorenburg, eds. Leiden: A. W. Sijthoff, 1970.

PLOMB, R. *Aspects of Ton Sensation*. New York: Academic Press, 1976.

PLOMB, R. "The Perception of Musical Tones," in D. Deutsch, ed. *Psychology of Music*. San Diego, California: Academic Press, p.1-24, 1982.

RENCHER, A. C. *Methods of Multivariate Analysis*. New York: John Wiley & sons: New York, 1995.

RISSET, J.-C. "Computer Study of Trumpet Tones," *Journal of the Acoustics Society of America*. (Abstracts). Bell Laboratories Report, Murray Hill, NJ, v.38, p.912, 1966

RISSET, J.-C. e MATHEWS, M. "Analysis of Musical Instrument Tones," *Physics Today*, v.22, n.2, p.23-40, 1969.

RISSET, J.-C., & D. WESSEL. "Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis," in D. Deutsch, ed. *Psychology of Music*. San Diego, California: Academic Press, p.25-58, 1982.

RISSET, J.-C. "Timbre Analysis by Synthesis: Representations, Imitations and Variants for Musical Composition," in G. De Poli, A. Piccialli e C. Roads, eds. *Representation of Musical Signals*. Cambridge, Massachussets: MIT Press, p.7-43, 1991.

ROCHEBOIS, T. & G. CHARBONNEAU. "Cross-Synthesis Using Interverted Principal Harmonic Sub-Spaces," in M. Leman ed. *Music, Gestalt and Computing: Studies in Cognitive and Systematic Musicology*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, p.375-385, 1997.

SANDELL, G. J. E MARTENS, W. "Perceptual Evaluation of Principal-Component-Based Synthesis of Musical Timbres," *Journal of the Audio Engeneering Society*, v.43, n.12, p.1013-1028, 1995.

opus 7
setembro 2000
issn - 1517 - 7017

SERRA, X. “Musical Sound Modeling with Sinusoids plus Noise,” in A. Piccialli e C. Roads, S. Pope eds. *Musical Signal Processing*. Swets & Zeitlinger Publishers, 1997.

SMALLEY, D. “Spectro-morphology and Structuring Processes,” in S. Emmerson, ed. *The Language of Electroacoustic Music*. London: The Macmillan Press, p.61-93, 1986.

STRAWN, J. “Approximation and Syntactic Analysis of Amplitude and Frequency Functions for Digital sound Synthesis,” *Computer Music Journal*, v.4, n.3, p.3-24, 1980.

STRAWN, J. *Modeling Musical Transitions*. Ph.D. Dissrtation, CCRMA, Stanford University, Department of Music Report. STAN-M-26, Palo Alto, CA, 1985.

STRAWN, J. “Orchestral Instruments: Analysis of Performed Transitions,” *Journal of the Audio Engeneering Society*, v.34, p.867-880, 1986.

STRAWN, J. “Analysis and Synthesis of Musical Transitions Using the Discrete Short-Time Fourrier Transform,” *Journal of the Audio Engeneering Society*, v.35, p.3-14, 1987.

STRONG, W. E CLARK, M. “Synthesis of Wind-Instrument Tones,” *Journal of the Acoustics Society of America,* v.41, n.1, p.39-52, 1967.

WESSEL, D. “Timbre Space as a Musical Control Structure,” *Computer Music Journal*, v.3, n.2, p.45-52. Reprint in C. Roads e J. Strawn, eds. *Foundations of Computer Music*. Cambridge: MIT Press, p.640-657, 1979.

**Hugo de Paula Bastos** - Bacharel em Ciência da Computação pela UFMG, estudou clarineta durante 3 anos com Walter Alves de Souza, primeiro clarinetista da Orquestra Sinfônica de Minas Gerais e música na Fundação de Educação artística. Teve seu primeiro contato com a área de Computação Musical no projeto *“necSO - Uma Linguagem de Composição Implementada num Sistema de Síntese e Processamento de Som do Tipo MUSIC V (Csound)”*, em 1996 sob a orientação do Prof. Maurício Loureiro, professor de clarineta da Escola de Música da UFMG e participou do projeto *“Estudo da Variação do Timbre e seu Significado Musical na Interpretação de Frases Selecionadas Executadas na Clarineta através de Análise das Variações das Amplitudes e Freqüências dos Componentes Harmônicos, Ressíntese e Testes Auditivos”* em 1998. Em 2000, Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações com a dissertação *“Análise e Re-síntese de som natural de clarineta usando Análise por Componentes Principais (PCA)”*, sob a orientação do Prof. Hani Yehia, do Departamento de Eletrônica da UFMG. É aluno de Doutorado em Engenharia Elétrica da UFMG e membro do grupo de pesquisa CEFALA – Centro de Estudos da Fala Acústica Linguagem e Música da UFMG.

**Maurício Alves Loureiro** - Engenheiro Aeronáutico formado pelo ITA, iniciou seus estudos de clarineta com o Professor Dieter Klöcker na Staatliche Hochshule für Musik Freiburg, Alemanha, com bolsa de estudos do DAAD, graduando-se em 1983. Obteve o título de Doutor em Música pela Universidade de Iowa, em 1991, onde estudou também música eletrônica e computação musical. Em 1985 assumiu o posto de assistente de primeira clarineta na ORQUESTRA SINFÔNICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Atuou como solista junto a inúmeras orquestras, assim como junto a renomados conjuntos de câmara. Participou como artista e professor de inúmeros festivais de música no Brasil e exterior e tem desenvolvido intensa atividade como solista e camerista. Foi membro integrante de vários conjuntos de música contemporânea e fundador do *GRUPO DE MÚSICA CONTEMPORÂNEA DA UFMG*. Foi professor adjunto no Instituto de Artes da UNESP (1984-1992) e atualmente é professor titular da Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. É pesquisador em Tecnologia Musical, membro do grupo de pesquisa CEFALA – Centro de Estudos da Fala Acústica Linguagem e Música da UFMG e atua como intérprete de música eletroacústica e computacional.