

Modelo Empírico da Sonoridade da Clarineta Aplicado como Ferramenta Composicional

Luís Carlos de Oliveira
FEEC (doutorando) – IA(licenciatura) – Bolsista CNPq
e-mail: luis@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Fábio Furlanete
UEL (Professor) – IA (doutorando)
e-mail: ffurlanete@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Ricardo Goldemberg
IA (Professor) e NICS (pesquisador)
e-mail: rgoldem@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Jônatas Manzolli
IA (Professor) e NICS (pesquisador)
e-mail: jonatas@nics.unicamp.br
web: www.nics.unicamp.br

Sumário:

Neste trabalho apresentamos um processo de análise e síntese sonora baseado em modelo empírico. É o desfecho de estudos preliminares que, em conjunto com o ambiente Pd, foi capaz de operar em tempo real. Para a elaboração do modelo utilizou-se o Projeto Fatorial de Experimentos. A sonoridade resultante foi obtida através de síntese aditiva. As medidas empíricas foram realizadas com um aparato experimental que simulou o mecanismo de execução instrumental sem ação de um músico.

Palavras-Chave: Modelagem Empírica, Síntese Sonora, Pd, Projeto Fatorial de Experimentos.

Introdução

Os processos de síntese sonora que são utilizados em computação musical estão relacionados com diversos processos como métodos lineares (síntese aditiva), métodos não-lineares (FM), métodos por distorção (*waveshaping*) ou modelagem física. Todos eles estão vinculados ao conceito de simulação computacional a partir de um modelo heurístico, notadamente matemático. A motivação deste artigo é, justamente, apresentar uma abordagem alternativa que vincula um modelo empírico a um modelo computacional.

Desde o ano de 2003 trabalhamos com um aparato experimental que simula a sonoridade da clarineta através de processos mecânicos, utilizando-se de meios físicos (vide figura 1). Neste artigo reportamos uma idéia recente, na qual estamos interessados em criar um processo híbrido, ou seja, utilizar o aparato experimental juntamente com a simulação computacional. O objetivo desta fase da pesquisa é verificar como poderemos gerar sonoridades similares às notas da clarineta e, depois, utilizar os resultados do experimento no modelo computacional. Pretendemos ainda, levar o aparato experimental a gerar sonoridades inusitadas como *multifônicos*, *glissandos* entre outros, e aplicar os valores experimentais em modelos computacionais. Neste artigo apresentamos a primeira fase do projeto, ou seja, a utilização dos resultados empíricos num modelo de síntese linear.

A compilação do trabalho de Borin et al. (1992) que descreve o panorama da modelagem física de instrumentos musicais, bem como o tutorial de Keefe (1992) e Smith (1996), estimulou-nos a conduzir nossos resultados anteriores em aplicações para síntese sonora, pois nestes trabalhos não observamos síntese a partir de modelo totalmente empírico.

Desde 2003 investigamos a natureza das sonoridades de instrumentos de sopro, principalmente da clarineta, utilizando um mecanismo de simulação experimental que tem comportamento físico análogo ao envolvido na performance de instrumentos de sopro. Durante a nossa pesquisa, percebemos que existem muitos fatores que são determinantes na construção e no entendimento de um modelo que se propõe a elucidar todas as relações e variáveis intrínsecas ao processo de geração sonora dos instrumentos musicais.

Frente a esta complexidade, optamos por utilizar um método de pesquisa denominado de Projeto Fatorial de Experimentos, que possibilitou comparar e verificar a importância relativa dos diversos fatores envolvidos na produção sonora do instrumento analisado. Todavia, ficou claro que o controle de todas as variáveis de um sistema experimental é um problema complexo o que nos estimulou a ampliar o escopo da nossa pesquisa no sentido de utilizar, também, simulação computacional para depois podermos avaliar as medidas do nosso modelo experimental. Neste momento, nos pareceu relevante, iniciar um estudo da síntese sonora que mais se aproxima do nosso modelo experimental.

Utilizando resultados anteriores determinamos um modelo linear de fácil manipulação algébrica e que possibilitou implementarmos o modelo de síntese aditiva. Em conjunto com o emprego do ambiente de linguagem de programação gráfica *Pure Data* (Pd), obtivemos resultados sonoros em tempo real.

As próximas seções deste artigo iniciam-se com a descrição do método experimental utilizado e apresentação do modelo obtido. Segue, uma descrição visual das sub-rotinas em Pd apresentadas paralelamente aos resultados experimentais. Uma rápida descrição dos resultados obtidos e das novas possibilidades musicais atingidas, estão incluídas no final do texto.

Aparato e procedimento experimentais

Optamos em não utilizar um clarinetista para obter dados experimentais, pois sua experiência profissional poderia interferir na coleta dos mesmos. Construímos, então, um aparato experimental descrito em Oliveira et al (2005a, 2005b, 2006), cujos elementos principais estão apresentados nas figuras 1 a) e b).

O procedimento adotado, também indicado nas referidas publicações, pode ser resumido da seguinte forma: A partir de uma nota a ser produzida pelo aparato, vedamos os furos do instrumento com pequenas borrachas. Inicialmente, a “mordedura” é posicionada de modo a bloquear a saída do ar transmitido pelo compressor. Lentamente a pressão sobre a “mordedura” é aliviada possibilitando a saída do ar através da palheta. Quando a nota emitida está estabilizada procede-se à medida da frequência e amplitude durante alguns segundos (mais ou menos 30 a 40 s).

A unidade de captação de dados consiste em um microfone colocado próximo à clarineta e conectado a um computador onde está instalado um software de análise espectral. O microfone é unidirecional dinâmico (cardióide) e tem resposta de frequência de 50 a 15000 Hz. A taxa de amostragem utilizada foi de 44 kHz e a configuração utilizada foi de 16 bits.

Projeto Fatorial de Experimentos

Denominaremos fator como sinônimo para variável independente e resposta para dependente. Neste projeto os fatores variam entre dois níveis (-1 e +1), além de um ponto central (0). Grosseiramente, um Projeto Fatorial pode ser interpretado através de um modelo de aproximação matemático denominado de é uma expansão por Série de Taylor (Box, 1978), no nosso caso linear, a partir do ponto central nos diversos fatores.

Os fatores de nosso Projeto Fatorial foram: 1) Volume vazio do tanque pulmão (x_1), que corresponde à caixa de ressonância proporcionada pelo instrumentista. 2) Dureza da palheta (x_2), 3) Posição de contato na palheta (x_3), 4) Abertura da boquilha (x_4), 5) Área de contato com a palheta (x_5) e 6) Quantidade de material absorvente sonoro (x_6).

Como respostas, (Y_f e Y_a), foram analisadas as frequências e amplitudes da fundamental e respectivos componentes espectrais de três notas da clarineta: E_2 , C_3 e D_5 , correspondendo às regiões chalumeau, intermediária e clarino, respectivamente. (Considerando o C_3 como o dó central do piano).

A elaboração de um Projeto Fatorial de Experimentos está minuciosamente detalhada em Box (1978). Na **tabela 1** estão descritos os níveis dos fatores utilizados neste experimento. A boquilha A tem a menor abertura enquanto a C, a maior.

Na região grave da clarineta, também denominada de *chalumeau*, escolhemos a nota com a clarineta totalmente fechada, correspondendo à nota E2. Esta nota refere-se à clarineta, portanto para o piano corresponde à nota D2. Para cada região, no ponto central foram realizados mais três experimentos que tiveram a finalidade de determinar o erro experimental. Realizamos, então, apenas 11 experimentos para verificar a influência de seis fatores. Os experimentos foram sorteados para determinar a ordem de execução.

A título de exemplo, apresentamos o projeto para a região *chalumeau* (nota E2). Para as demais regiões os procedimentos foram análogos. A **tabela 2** resume o que foi mencionado anteriormente. Ela indica que o primeiro ensaio realizado foi o ensaio no 5. Sendo seguido pelo ensaio no 7, no 6 e assim sucessivamente. No ensaio no 5 o fator 1 apresenta nível -1, e consultando a tabela 1 sabemos que o volume vazio do tanque pulmão corresponde a 60% do volume total. Para o fator 2 o nível também é -1 e a tabela 1 indica que a palheta utilizada foi de no 2. Analogamente, a posição da mordedura na palheta é a mais externa; a boquilha utilizada foi a C; a área de contato da mordedura com a palheta foi de 0,3 cm² e não foi utilizada estopa para absorção sonora.

Na análise espectral foram testados vários “janelamentos” e o de Blackmann-Harris mostrou ser o mais apropriado. Em todas as análises os dados foram normalizados em -3,0 dB.

FATORES	-1	0	+1
1) Volume Vazio do Tanque Pulmão(%)	60	65	70
2) Dureza da Palheta (Nº)	2	2,5	3
3) Posição da Mordedura na Palheta	Interna	Centro	Externa
4) Boquilha	A	B	C
5) Área de Contato com palheta (m ²)	3×10^{-5}	1×10^{-4}	$1,4 \times 10^{-4}$
6) Quantidade de Estopa (kg)	0	0,015	0,030

Tabela 1: Níveis dos Fatores Utilizados nos Experimentos

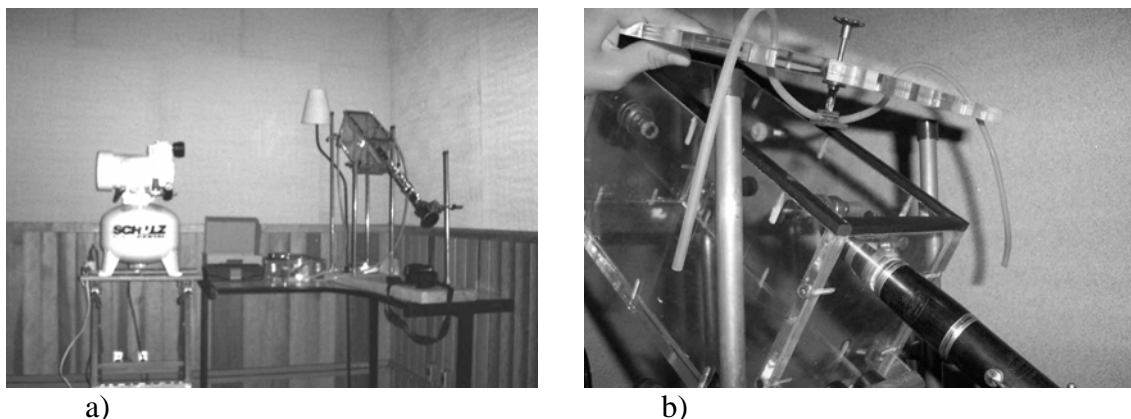


Figura 1: Na figura 1a) está apresentado o conjunto formado pelo compressor, caixa acrílica, clarineta, manômetros e tubulações de conexão. Na figura 1b) está indicado o detalhe do mecanismo de contato com a palheta (“mordedura”).

ENSAIO N°	FATORES						Ordem
	1	2	3	4	5	6	
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	7
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	8
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	11
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	3
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	2
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	10
9	0	0	0	0	0	0	5
10	0	0	0	0	0	0	9
11	0	0	0	0	0	0	6

Tabela2: Projeto Fatorial de Experimentos Fracionado com Resolução III para a região chalumeau

Tanto para a frequência (Hz), Y_f , como para a amplitude (dB), Y_a , o modelo linear obtido é da forma:

$$Y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6$$

$i = f, a$

Equação 1: Modelo linear obtido empregando o Projeto Fatorial Fracionado

\$1: a1, \$2: a2, \$3: a3, \$4: a4, \$5: a5, \$6: a0 dev

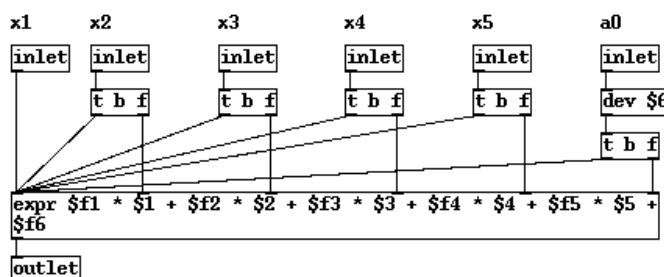


Figura 2: “Patch” correspondente ao cálculo da frequência e amplitude de cada componente espectral (parameter.Pd)

As tabelas 3 e 4 mostram os coeficientes (a_i) obtidos para a região *chalumeau*. Resultados análogos foram obtidos nas duas regiões subsequentes: a) intermediária e b) *clarino*.

Y_f	$-a_0$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
E_2	146±2	-0,2	-1,0	-1,0	0,2	0,2	1,0
2	295±4	2,4	0,4	-1,9	-0,9	-1,6	0,4
3	440±4	-1,5	1,5	2,2	0,8	-1,5	0,0
4	588±4	0,9	1,6	0,4	-1,6	-1,9	0,4
5	735±2	-1,6	0,4	0,9	0,4	-1,6	0,4
6	885±4	0,0	0,5	1,5	0,8	-2,8	-0,8
7	1031±5	-0,2	2,5	0,5	-0,2	-3,8	-1,0
8	1178±5	-1,5	2,8	2,2	0,0	-4,0	-1,2
9	1325±4	-1,0	2,5	1,8	0,2	-3,0	-1,0
10	1473±6	-0,6	2,9	3,4	0,9	-4,2	-2,2
11	1620±5	-1,2	2,2	1,6	0,9	-3,6	-0,4
12	1770±7	-0,4	2,4	3,2	1,2	-5,2	-0,9

Tabela 3: Coeficientes do modelo empírico da frequência da nota E_2 (clarineta) e frequência de seus componentes espectrais

Y_a	$-a_0$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
E_2	21	-1,6	1,4	0,2	-0,9	-3,2	-0,2
2	59	0,4	-0,2	1,6	-2,6	-6,4	-0,4
3	23	-0,3	1,0	-0,8	-0,3	-2,0	-0,3
4	47	0,5	1,8	-0,3	-0,3	-3,2	-1,0
5	32	0,8	-1,0	-1,5	-1,6	2,8	1,0
6	34	0,6	1,9	-1,9	-1,2	-0,4	0,9
7	35	0,6	-0,9	-0,2	-1,2	0,6	0,2
8	28	-1,6	0,6	-0,4	1,6	-1,4	-0,2
9	42	1,0	-1,8	-0,3	-2,0	1,0	1,8
10	36	1,5	-1,0	-1,8	0,3	2,5	0,5
11	41	2,5	-2,2	-0,2	-0,5	-3,0	1,2
12	36	2,2	0,6	-2,2	0,4	4,2	0,6

Tabela 4: Coeficientes do modelo empírico da amplitude da nota E_2 (clarineta) e amplitude de seus componentes espectrais

Síntese Sonora através de Modelo Empírico usando Pd

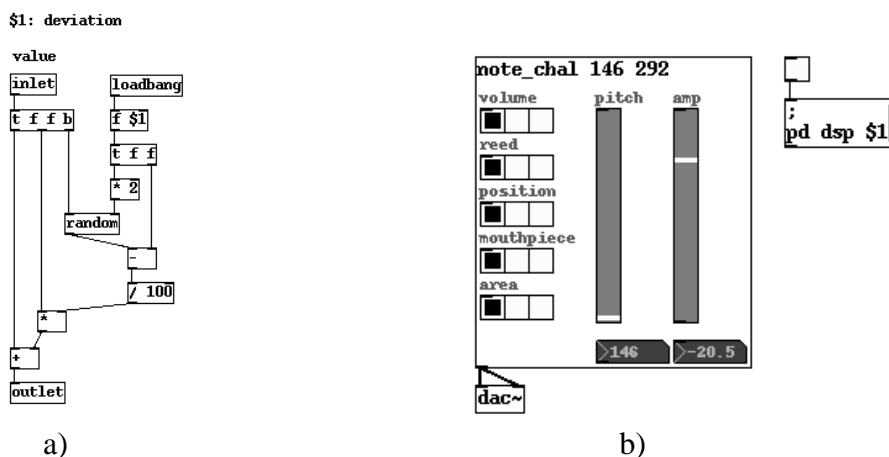
A ferramenta computacional Pure-Data, abreviadamente Pd, é um ambiente de programação gráfica em tempo real adequado para aplicação em áudio, vídeo e processamento gráfico. É um ramo da família de linguagem de programação Max (Max/FTS, ISPW Max, Max/MSP, jMax, etc.) originalmente desenvolvido por Miller Puckette e outros pesquisadores do IRCAM. O Pd possui um conjunto de *patches* disponíveis para áudio, tal como o oscilador aqui empregado como unidade do processo de síntese.

Para a síntese sonora empregamos o método de síntese aditiva usando o modelo empírico obtido pela equação 1. A figura 2 mostra o *patch* em Pd onde foi implementado os coeficientes obtidos através da aplicação da Equação 1 para o cálculo da frequência e amplitude de cada componente espectral. Os valores dos parâmetros a_i para a frequência e para a amplitude estão indicados nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Um ponto importante da modelagem computacional foi incorporar na *patch* o desvio (erro experimental) para cada frequência. Assim, quando o usuário deseja tocar a nota E_2 , um conjunto de parâmetros (os a_i da frequência e amplitude) é acionado. A frequência da fundamental assim como a frequência dos componentes espectrais será um valor no interior do desvio de cada frequência central. Por exemplo, o terceiro componente espectral da nota E_2 terá um valor entre (440 ± 18) Hz. Neste exemplo, o valor 18 Hz é aproximadamente 4% de 440 Hz. Este valor é calculado no *patch* dev.Pd, mostrado na figura 3a.

O instrumento computacional, denominado de “júnior” está configurado no *patch* junior.Pd, indicado na figura 3b. Nele podemos alterar os valores dos fatores conforme indicados na tabela 1 e ouvir a sonoridade resultante.

Como os parâmetros obtidos são válidos apenas para a nota E_2 (146 Hz) da região *chalumeau*, supomos que os mesmos são constantes para esta região e extrapolamos uma oitava acima apenas para ilustração de um novo registro para aplicação em composição. Hipótese similar foi aplicada às demais regiões.



Figuras 3: a) Patch correspondente ao cálculo da frequência no interior de cada desvio (*dev.Pd*); b) Patch do controle do instrumento composicional (*junior.Pd*).

Uma vez determinado o valor da frequência e amplitude de cada componente espectral, estes valores são conduzidos ao oscilador de cada componente espectral para posterior soma no ambiente PdD. A figura 4 ilustra este resultado com o *patch partial.Pd*.

As relações entre as frequências de cada componente espectral pela com a fundamental, e suas respectivas amplitudes, da nota E2 (146 Hz), foram extrapoladas para uma oitava acima pelo mesmo motivo descrito acima. Este critério pode ser visualizado na figura 5 correspondendo no PD ao *patch note_chal.Pd*.

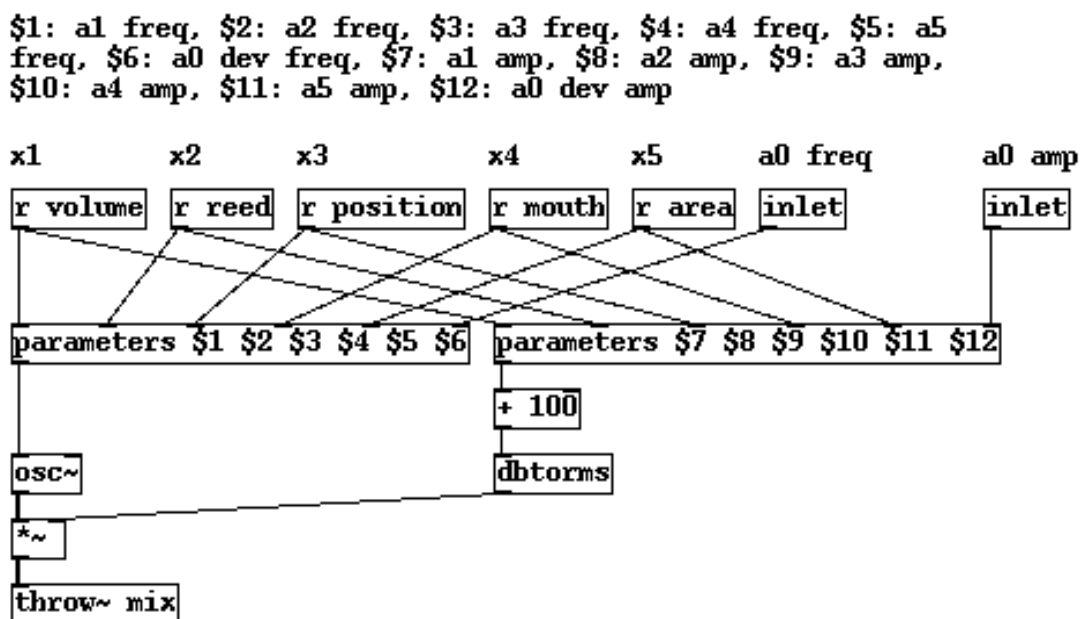


Figura 4: Patch correspondente ao cálculo da frequência e amplitude de cada componente espectral para a entrada do oscilador (*partial.Pd*)

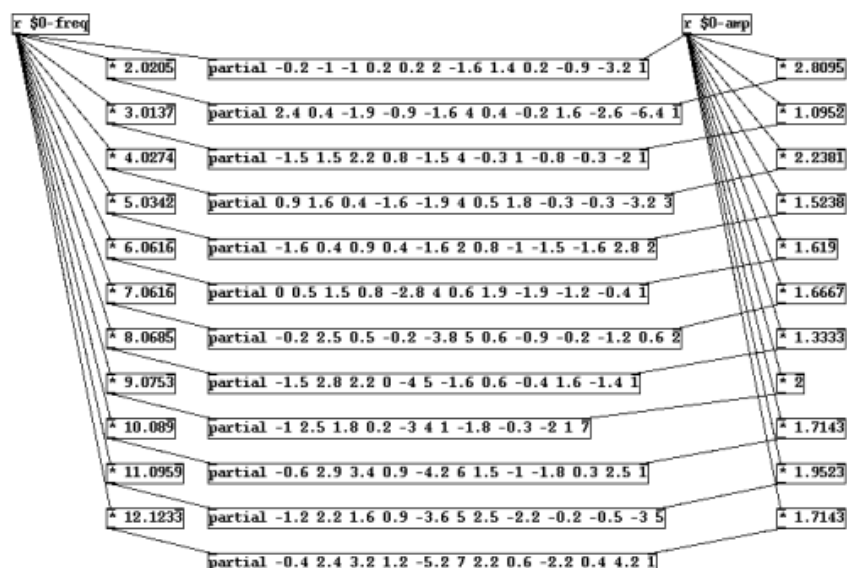


Figura 5: Patch correspondente ao cálculo da resultante da síntese aditiva na região chalumeau (note_chal.Pd)

Conclusão

Este trabalho está vinculado a uma série de resultados anteriores e deverá agora fomentar um conjunto de novos resultados. Ele revela a possibilidade de levar a cabo o procedimento experimental para a construção de um instrumento sintético. Ainda temos que eliminar algumas dificuldades encontradas durante o percurso. Por exemplo, observamos que as amplitudes das componentes espectrais de maior frequência apresentaram um ganho relativamente alto levando a um desvio na sonoridade desejada.

Apesar deste problema que encontramos podemos destacar a validade do modelo empírico na síntese sonora e a potencialidade do ambiente Pd para síntese sonora em tempo real. A seqüência deste trabalho deverá incluir:

- refinamento do modelo empírico, ampliando-o para outras notas das regiões consideradas e possivelmente comparar com modelos de segunda ordem;
- obtenção de novas sonoridades no aparato empírico e sua aplicação composicional direta, como material para criação de amostras para tapes no contexto de música eletroacústica;
- construção de novos modelos computacionais que possam simular as sonoridades inusitadas obtidas com o aparato experimental;
- exploração dos modelos computacionais desenvolvidos como sintetizadores digitais para interação em tempo real;

Finalmente, o nosso objetivo central é que os resultados aqui obtidos possibilitem um caminho na solução do difícil problema de integração entre sons de instrumentos acústicos e material sintético, no domínio da música contemporânea. Esperamos também que a utilização de modelos experimentais como o aqui descrito, possam ser utilizados em processos de análise e síntese de outros instrumentos musicais. Todavia, é uma tarefa árdua a construção do aparato experimental em si - o que nos proporciona desafios constantes.

Há aqui um vínculo interessante entre o artesanato e o empirismo do pensamento do laboratório com a abstração da modelagem digital. Num nível o pesquisador está trabalhando com o processo mecânico e físico no outro com a representação numérica que não tem a materialidade do primeiro, mas tem a precisão da modelagem computacional e a possibilidade de se fazer generalizações. Para nós, trata-se de duas faces de uma mesma moeda, a qual gostaríamos de continuar estudando dado o potencial que vislumbramos nesta abordagem híbrida.

Referências Bibliográficas

- [1] Borin, G., G. De Poli, A. Sarti (1992). Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models. *Computer Music Journal*. 16(4): 30-42.
- [2] Keefe, D.H. (1992). Physical Modeling of Wind Instruments. *Computer Music Journal*. 16(4): 57-73.
- [3] Smith, J.O. (1996). Physical Modeling Synthesis UPdate. *Computer Music Journal*. 20(2): 44-56.
- [4] Box, G. E. P.; W. G. Hunter, J. S. Hunter, J.S. (1978). *Statistics for Experimenters – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. John Wiley & Sons, NY.
- [5] Oliveira, L.C, Ricardo Goldemberg, Jônatas Manzolli. (2005a). Estudo Experimental da Sonoridade Chalumeau da Clarineta através de Projeto Fatorial (I), *Anais da IX Convenção Nacional da AES, SP*.
- [6] Oliveira, L.C, Ricardo Goldemberg, Jônatas Manzolli. (2005b). Estudo Experimental da Sonoridade Chalumeau da Clarineta através de Projeto Fatorial (II), *Anais do XV Congresso da ANPPOM, RJ*
- [7] Oliveira, L.C, Ricardo Goldemberg, Jônatas Manzolli. (2006). Estudo Experimental da Sonoridade Chalumeau da Clarineta através de Projeto Fatorial (I), *Anais da IX Convenção Nacional da AES, SP*.