

ESTUDO EXPERIMENTAL DA SONORIDADE “CHALUMEAU” DA CLARINETA ATRAVÉS DE PROJETO FATORIAL (II)

Luís Carlos de Oliveira
luis@nics.unicamp.br,
Ricardo Goldemberg
rgoldem@iar.unicamp.br,
Jônatas Manzolli
jonatas@nics.unicamp.br
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Resumo

A sonoridade *chalumeau* da clarineta é novamente investigada de modo empírico através de um método de otimização de experimentos conhecido como *Projeto Fatorial de Experimentos*. Neste trabalho a atenção é voltada para a determinação do efeito de diversas variáveis sobre a *freqüência* do som emitido nesta região. Como resultado paralelo foi investigado se existe interação entre as variáveis estudadas.

Palavras chaves: clarineta, sonoridade, projeto de experimentos

Abstract

The sonority *chalumeau* of a clarinet is investigated empirically once more. As in the first time, a *Factorial Design of Experiments* was used as an important tool of analysis. In this paper the attention is on the effect of the several factors on the *frequency* of the sound produced. As a second result we have investigated if there are interactions between the factors.

1. Introdução

O processo sistemático de investigação científica a respeito dos instrumentos de sopro teve seu início no final do século XIX. Desde então o timbre desses instrumentos é uma preocupação constante. Dentre os autores representativos, destacam-se H. L. F. HELMHOLTZ [1], J. RAYLEIGH, H. BOUASSE, J. BACKUS [2, 3, 4, 5, 6] e mais recentemente, H. BENADE [7, 8, 9, 10, 11]. Ainda que de maneira limitada, as contribuições desses e outros investigadores permitem afirmar que, em nossos dias, existe um corpo de conhecimento teórico e experimental que possibilita descrever e simular razoavelmente o comportamento dos instrumentos musicais de sopro.

Entretanto, devido à complexidade do problema em estudo, várias simplificações são impostas. Deste modo, os resultados obtidos divergem consideravelmente das condições reais, tanto do ponto de vista teórico quanto do experimental. Com relação aos trabalhos empíricos, notamos um elevado grau de preocupação com o sistema oscilador composto pelo conjunto formado pela boquilha e palheta.

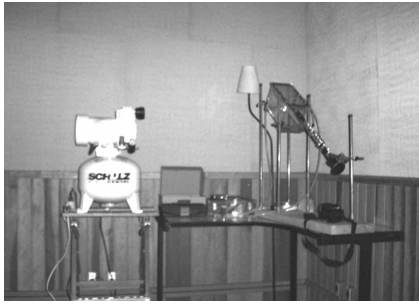
Nossa proposta consiste primeiro, em eliminar a variável subjetiva do músico, segundo, trabalhar simultaneamente com um conjunto maior de variáveis e finalmente, estabelecer se há interação entre estas variáveis. Para tal objetivo tomaremos como ponto de partida uma montagem experimental instalada no estúdio do NICS (Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora). Em seguida, vamos analisar o efeito das variáveis na sonoridade *chalumeau* (região grave) da clarineta.

Para otimizar a análise será utilizado um projeto de experimentos que procura obter o máximo de informação com um mínimo de esforço operacional.

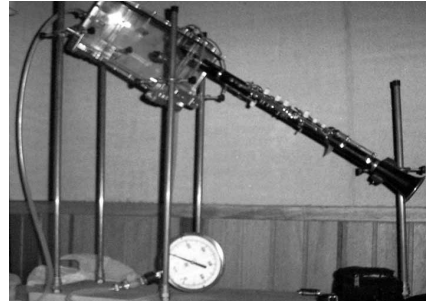
2. Aparato experimental

Montamos no estúdio do NICS um aparato que consiste basicamente de cinco unidades: 1) compressor cujo modelo é utilizado em clínica dentária; 2) tanque “pulmão” que simula o reservatório de ar no corpo humano; 3) unidade de contato com a palheta, que daqui por diante denominaremos por “mordedura”; 4) unidade formada pela clarineta e 5) unidade de captação de dados. Com exceção da unidade 5, as demais podem ser visualizadas nas figuras 1 a 3. Instrumentos de medida como um rotâmetro (medidor da vazão volumétrica de ar que passa pela clarineta) e dois manômetros (para medir a pressão na entrada do tanque e no interior do tanque) complementam o sistema.

O compressor tem um motor de 0,75 kW, monofásico aberto, com 2 pistões, um único estágio de compressão e um reservatório de 0,03 m³. O tanque pulmão é de material acrílico, com parede de 0,011 m de espessura, 0,300 m de comprimento por 0,170 m de largura e 0,178 m de altura. O seu tampo possui ainda a característica de ser deslizante.

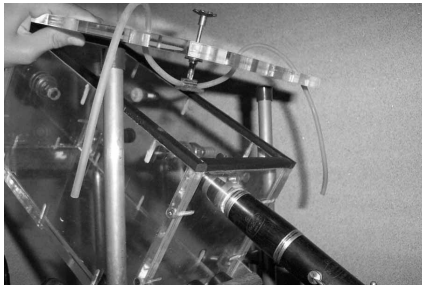


1.

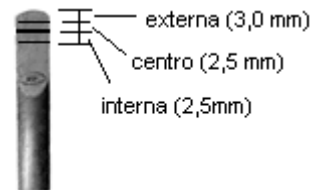


2.

Figuras: 1) Visão geral do aparato experimental; 2) Detalhe do conjunto tanque “pulmão” e clarineta.



3.



4.

Figuras: 3) Detalhe da unidade de contato com a palheta: “mordedura”. 4) Posição da “mordedura” na palheta

O tanque está conectado ao compressor, em uma das faces, por um tubo flexível de 0,120 m de diâmetro através de um sistema de “engate rápido”.

A unidade de captação de dados consiste em um microfone fixado próximo à clarineta e conectado a um computador onde está instalado o software SOUND FORGE 4.5. 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. A placa de som tem entradas analógicas de 18 bits (-10 dBV, conexões RCA desbalanceadas), relação sinal/ruído (A/D/A): 88 dB não ponderada e 90 dB “A” ponderada e limite de banda de 22 a 22000 Hz.

A clarineta é um instrumento cilíndrico com uma única palheta em sua boquilha. É o membro de uma família de 17 instrumentos similares os quais, essencialmente, diferenciam

basicamente em tamanho [12]. O representante líder desta família é a usual clarineta afinada em Si bemol¹ e será utilizada neste projeto. Veja figura 2.

A mordedura consiste de um parafuso que se desloca na direção ortogonal à clarineta e na sua base está fixada uma pequena borracha que efetivamente faz o contato com a palheta. A borracha terá sua área variável para efeito de estudo. Veja figura 3.

3. Procedimento experimental

Primeiro enche-se o compressor. As chaves da clarineta são fechadas com pequenas borrachas que podem alterar a nota desejada. No tanque pulmão o contato com a palheta é mantido fechado, impossibilitando a passagem de ar através da palheta. Abre-se lentamente a válvula de saída do compressor de modo que os manômetros indiquem o aumento gradativo da pressão. Quando os manômetros indicarem a pressão de fundo de escala (9808 Pa) abre-se muito lentamente o contato com a palheta de modo que uma pequena quantidade de ar é injetada no interior da clarineta. As pressões indicadas pelos manômetros começam a diminuir como conseqüência.

Deste momento em diante a clarineta está em estado de emissão sonora. Uma vez emitido o som a gravação é acionada no momento que se percebe que sua intensidade é máxima e constante. A gravação é efetuada por volta de três minutos. Desta gravação apenas 15 segundos são selecionados para a análise.

As pressões na entrada da boquilha (interna) e na entrada da caixa acrílica (externa) são anotadas. A vazão volumétrica de ar correspondente também é anotada.

Depois de uma bateria de testes, estabelecemos que as variáveis que poderiam estabelecer certa influência na sonoridade da clarineta foram: i) volume do tanque pulmão; ii) dureza da palheta; iii) posição de contato da mordedura na palheta; iv) ângulo de abertura da boquilha; v) Tipo de mordedura (área de contato com a palheta) vi) quantidade de material absorvente sonoro (estopa) no tanque pulmão. A figura 4 é esclarecedora sobre a variável correspondente à posição da mordedura na palheta.

Uma vez que o volume do tanque foi variado colocando-se uma placa de isopor em seu interior para separar uma região de circulação de ar e outra isenta de circulação, pensamos em

¹ A clarineta afinada em Si bemol significa que suas notas soam um tom abaixo daquelas descritas pelo piano.

colocar um material dentro da caixa para verificar se teria alguma influência. Daí a justificativa da sexta variável.

Nesta concepção experimental, a vazão volumétrica de ar e a pressão na entrada da boquilha não são variáveis independentes. Observamos também que a produção sonora existe apenas para uma faixa de valores de pressão. Uma visão esquemática do aparato experimental está apresentada na figura 5.

Para o estudo destas variáveis utilizamos um método estatístico conhecido por *Projeto Fatorial de Experimentos*. Ele possibilita determinar quais destas variáveis efetivamente têm influência no estudo e ainda se existe interação entre elas. Esta metodologia utiliza pequenas perturbações das variáveis independentes e reduzido número de experimentos além de fornecer um modelo linear nas variáveis envolvidas. O modelo linear não será apresentado aqui.

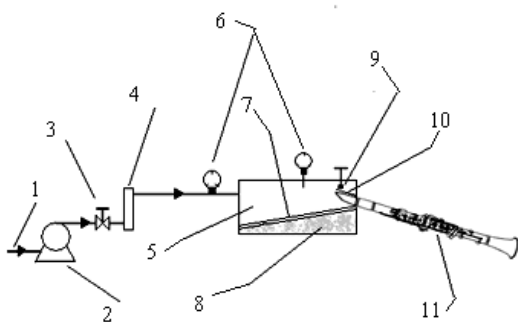


Figura 5: Visão esquemática do aparato experimental: 1) Entrada de ar; 2) Compressor; 3) Válvula; 4) Rotâmetro; 5) Volume Vazio; 6) Manômetros; 7) Placa de isopor; 8) Material para absorção sonora (estopa); 9) Mordedura; 10) Palheta; 11) Clarinete

3.1 Projeto Fatorial de Experimentos

Preliminarmente, *fator* será tratado como sinônimo de *variável*. Neste projeto os fatores variam entre dois níveis (-1 e $+1$), além de um ponto central (0). Grosseiramente, um projeto fatorial é uma expansão por Taylor, no nosso caso linear, a partir do ponto central nos diversos fatores (variáveis). Como respostas, (Y), analisaremos a frequência da nota fundamental emitida (D_3) e de seus componentes espectrais.

A elaboração de um Projeto Fatorial de Experimentos está minuciosamente detalhada em BOX [13]. Aqui mencionamos apenas que foi utilizado um **Projeto Fatorial Fracionado** com **Resolução III**. Ser fracionado significa que realizaremos parte ($1/8$) de um Projeto Fatorial Completo, que no nosso caso para 6 fatores variando em dois níveis seriam $2^6=64$ expe-

rimentos. Então, realizaremos $(1/8)*64=2^{6-3}=8$ experimentos. A resolução indica que ao realizarmos parte do projeto completo nossa “perda” de informação está em fundir o efeito de um fator principal (I) com interações entre dois fatores (II), $I+II=III$.

Na tabela 1 estão descritos os níveis dos fatores utilizados neste experimento. A boquilha **A** tem a menor abertura enquanto a **C**, a maior.

Neste projeto em particular, o padrão de fusão (*confounding patterns*) é **4=12**, **5=13** e **6=23**. Isto significa que o efeito do fator **4** será confundido com a interação **12** (entre os fatores **1** e **2**), o efeito do fator **5** será confundido com a interação **13** (entre os fatores **1** e **3**), etc.

Na região grave da clarineta, também denominada *chalumeau*, escolhemos a nota com a clarineta totalmente fechada, correspondendo à nota **D₃**. Esta nota refere-se à do piano, portanto para a clarineta corresponde à nota **E₃**.

No ponto central serão realizados mais três experimentos que terão a finalidade de determinar o erro experimental. Teremos, então, apenas 11 experimentos. Os experimentos foram sorteados para determinar a ordem de execução. A tabela 2 resume o que foi mencionado anteriormente.

A título de exemplo, a tabela 2 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 feita através do SOUND FORGE 4.5 foram testados vários “janelamentos” e o de Blackmann-Harris mostrou ser o mais adequado pois apresentou maior nitidez de visualização dos picos dos componentes espectrais na análise espectral. Em todas as análises os dados foram normalizados em **-3,0 dB**.

A tabela 3 apresenta os valores de pressão e vazão utilizadas para os diversos ensaios. Na tabela 4 estão indicados, em **Hz**, os valores das frequências da nota fundamental (**D₃**) e de seus componentes espectrais.

Na tabela 4 estão indicados, em **Hz**, os valores das frequências da nota fundamental (**D₃**) e de seus componentes espectrais.

4. Análise dos resultados

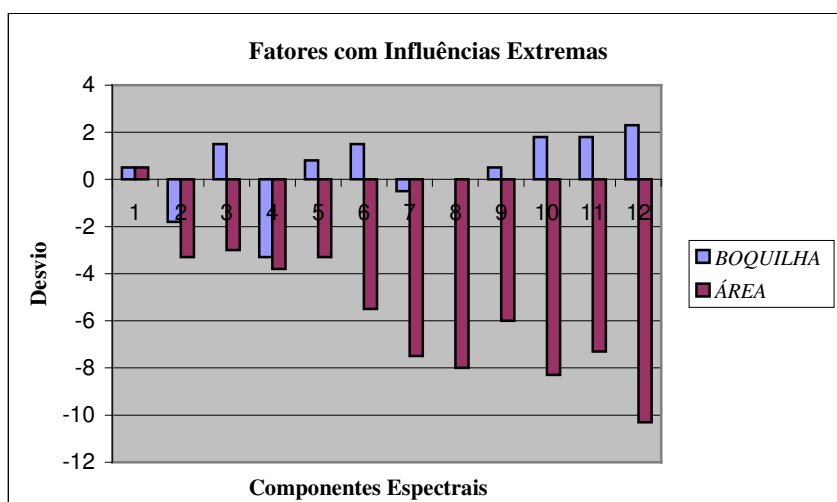


Figura 6: Comparação entre os Fatores de Maior e Menor Influências

A influência de cada fator sobre a frequência da clarineta na região “chalumeau” pode ser obtida da tabela 5. Os valores acima do desvio padrão (σ) indicam os fatores significativos. Para uma maior clareza a figura 6 destaca as influências dos fatores com maior e menor efeito sobre a frequência, área de contato com a palheta e abertura da boquilha, respectivamente.

Uma análise preliminar mostra que a área de contato da mordedura com a palheta (*variável 5*) é o fator mais importante na determinação da frequência. Nem tanto da nota fundamental mas principalmente dos componentes espectrais (exceção para o 4º). O aumento da área de contato de 0,3 cm² para 1,4 cm² *diminui* a frequência dos componentes espectrais. Notamos que nesta região o 2º e o 4º componentes espectrais têm intensidade relativamente mais baixa que os demais componentes espectrais, conforme segunda linha da tabela 5. O aumento da área de contato com a palheta provoca uma diminuição da área de vibração da palheta proporcionando assim, provavelmente, a queda das frequências dos componentes espectrais.

A dureza da palheta é o fator com a segunda maior influência sobre a frequência nesta região. Diferentemente do efeito da área de contato, o aumento da dureza da palheta de N^o 2 para 3, *faz aumentar* o valor das frequências dos componentes espectrais. Resultado análogo é percebido quando passamos de uma posição mais interna para uma mais externa na palheta. A figura 7 apresenta simultaneamente estes resultados.

Percebemos, porém com menor influência, que o volume vazio da caixa e a quantidade de estopa para absorção sonora tendem a diminuir o valor da frequência dos componentes espectrais. A abertura da boquilha praticamente não modifica as frequências dos componentes espectrais, resultado que é esperado do ponto de vista musical.

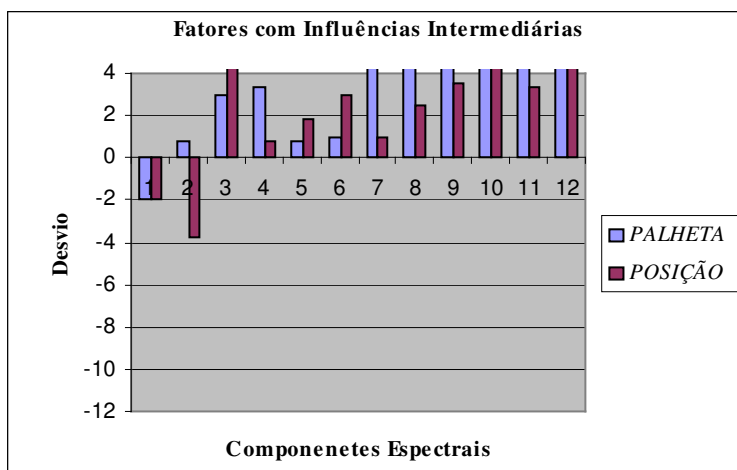


Figura 7: Comparação entre os Fatores com Influências Intermediárias.

Após a análise das variáveis resta mencionar o efeito da interação entre elas. Esta interação, na realidade, é a soma do efeito das interações **16+25+34**, isto é, corresponde à *soma* do efeito das interações entre as variáveis **1 e 6**, **2 e 5** e finalmente **3 e 4**. Sendo a soma de três interações, em qualquer experimento desta região, dividindo os valores por 3, estes serão sempre menores que o desvio padrão, com exceção para o segundo componente espectral. Este resultado é adequado, pois não se espera uma interação muito grande entre as variáveis.

5. Conclusão

Este estudo é a continuação da análise de algumas variáveis sobre a sonoridade da clarinete na região “chalumeau”. No primeiro trabalho o foco incidiu sobre a energia sonora, isto é, sobre a intensidade do som produzido. Neste, a atenção voltou-se sobre a frequência do som emitido. Portanto, os resultados podem ser discutidos, num primeiro momento a partir deste trabalho, e num segundo momento, os resultados podem ser abordados em conjunto.

Observamos, inicialmente, uma grande aproximação das frequências obtidas experimentalmente com aquelas da série de Fourier. A tabela 4 agrupa os resultados atingidos.

Assim como no estudo da energia sonora, observamos que a área de contato com a palheta mostrou ser a variável de maior influência. No entanto, como já foi observado em OLIVEIRA et al. [16], a variação da área de contato (mais de 450%) é muito grande com relação às demais variáveis. Como consequência, a magnitude de seu efeito é bastante superior. Por isso não devemos descartar a influência das demais variáveis sem realizar novos experimentos. A dureza da palheta foi a variável com a segunda maior influência sobre a frequência da sonoridade na região abordada. O aumento da dureza da palheta eleva a frequência dos componentes espectrais superiores. Resgatando os resultados do trabalho anterior, nesta região o 2º e o 4º componentes espectrais têm intensidade bastante baixas, porém, para os componentes espectrais superiores, tanto os pares como os ímpares possuem intensidades da mesma ordem de grandeza, aproximadamente. Este resultado vai de encontro aos apresentados por HALL [14] e FLETCHER e ROSSING [15].

Certamente uma nova seqüência de experimentos deve ser elaborada. Porém nesta nova etapa devemos diminuir a variação da área de contato e aumentarmos a variação do volume do tanque pulmão. A abertura da boquilha, para a análise das frequências, é uma variável que não precisaria ser estudada neste novo conjunto de experimentos, assim como o material de absorção sonora pode ser dispensado no estudo da intensidade. Porém, podemos confirmar estes resultados utilizando boquilhas com grande variação de abertura e diferentes materiais de absorção sonora.

Este novo conjunto de experimentos poderá ser efetuado em uma outra região do espaço dos fatores. Ressaltando que o Projeto Fatorial de Experimentos aqui implementado é uma expansão *linear* do ponto central (ensaios 9 a 11) por série de Taylor, assim, os coeficientes lineares são proporcionais à derivada de primeira ordem. Deste fato podemos eleger a nova região de estudo otimizando alguma variável, por exemplo, afinação máxima (maior concordância das frequências com a série de Fourier) ou intensidade máxima.

6. Referências bibliográficas

- [1] HELMHOLTZ, H.L.F. (1877). On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music. 4th ed., trad. ELLIS, A.J. (Dover, New York, 1954)
- [2] BACKUS, J. (1985). The effect of the player's vocal tract on the woodwind instrument tone. J. Acoust. Soc. Am. **78**, 17-20.
- [3] BACKUS, J. (1978). Multiphonic tones in the woodwind instruments. J. Acoust. Soc. Am. **63**, 591-599.

- [4] BACKUS, J. (1974). Input impedance curves for the reed woodwind instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* **56**, 1266-1279.
- [5] BACKUS, J. (1963). Small-vibration theory of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.* **35**, 305-313; erratum (1977) **61**, 1381-1383.
- [6] BACKUS, J. (1961) Vibrations of the reed and air column in the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 806-809.
- [7] BENADE, A.H. e KOUZOUPIS, S.N. (1988). The clarinet spectrum: Theory and experiment. *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 292-304.
- [8] BENADE, A.H. e LARSON, C.O. (1985). Requirements and Techniques for measuring the musical spectrum of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 1475-1498.
- [9] BENADE, A.H. (1976). *Fundamentals of Musical Acoustics*. Oxford University Press, New York.
- [10] BENADE, A.H. e GANS, D.J. (1968). Sound Production in wind instruments. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **155**, 247-263.
- [11] BENADE, A.H. (1966). Relation of air-column resonances to sound spectra produced by wind instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* **40**, 247-249.
- [12] NEDERVEEN, C.J. (1998). *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Northern Illinois University Press, DeKalb, Illinois.
- [13] BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. (1978). *Statistics for Experimenters – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. John Wiley & Sons, NY.
- [14] HALL, D.E. (1990). *Musical Acoustics*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing Monterey: Brooks/Cole.
- [15] FLETCHER, N.H.; ROSSING, T.D. (1998). *The Physics of Musical Instrument*. Springer-Verlag, 2nd ed., NY.
- [16] OLIVEIRA, Luis Carlos de; GOLDEMBERG, Ricardo; MANZOLLI, Jônatas. Estudo Experimental da Sonoridade “Chalumeau” da Clarineta através de Projeto Experimental. *Anais da IX Convenção Nacional da Sociedade de Engenharia de Áudio*, São Paulo, SP, 2005.

8. Anexos

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	Ínterna	Centro	Externa
4) Boquilha	A	B	C
5) Área de Contato com palheta (m ²)	3x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁴	1,4x10 ⁻⁴
6) Quantidade de Estopa (kg)	0	0,015	0,030

Tabela 1: Níveis dos fatores envolvidos na experiência.

ENSAIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P_{ext} (Pa)	7453	6276	5492	7257	7257	6080	7649	7649	6276	6472	6472
P_{int} (Pa)	6865	5492	4119	6668	6767	5296	7355	7453	5296	5688	5688
Vazão ($10^{-4} m^3/s$)	1,97	2,36	1,97	1,97	2,28	3,30	1,89	3,15	2,20	2,20	2,36

Tabela 3: Valores da pressão externa, interna e vazão de todos ensaios.

ENSAIO Nº	FATORES						Ordem
	1	2	3	4	5	6	Y_G
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

Tabela 2: Níveis dos fatores envolvidos na experiência.

Simulação da nota D_3 (valores em Hz)												
ENSAIO	(D_3)	(D_4)	(A_4)	(D_5)	($F\#_5$)	(A_5)	(C_6)	(D_6)	(E_6)	($F\#_6$)	($G\#_6$)	(A_6)
Fourier	147	294	440	587	740	880	1047	1175	1319	1481	1661	1760
1	150	295	436	581	734	878	1022	1170	1319	1461	1617	1761
2	148	300	436	589	734	886	1033	1175	1322	1469	1617	1769
3	145	292	439	586	734	883	1033	1178	1325	1472	1617	1766
4	145	303	439	589	734	886	1036	1183	1330	1478	1627	1777
5	145	289	445	584	739	892	1036	1183	1330	1483	1625	1780
6	145	297	436	586	731	881	1025	1172	1322	1469	1617	1766
7	145	297	445	592	739	886	1036	1186	1333	1480	1630	1780
8	145	292	442	586	734	886	1031	1175	1325	1475	1619	1772
9	148	295	439	586	736	883	1028	1175	1325	1472	1617	1766
10	145	295	442	589	734	886	1031	1180	1325	1472	1619	1766
11	148	295	436	595	736	883	1025	1183	1322	1467	1614	1764

Tabela 4: Frequências, em Hz, da fundamental e de seus componentes espectrais para a região “chalumeau”. Acompanha os valores em Hz da série de Fourier para D_3 .

<i>Série de Fourier</i>	(D3)	(D4)	(A4)	(D5)	(F#5)	(A5)	(C6)	(D6)	(E6)	(F#6)	(G#6)	(A6)	
<i>Intensidade Média (dB)</i>	-21±1	-59±1	-23±1	-47±3	-32±2	-34±1	-35±2	-28±1	-42±7	-36±1	-41±5	-36±1	
FATORES e INTERAÇÃO	1	-0,5	4,8	-3,0	1,8	-3,3	0	-0,5	-3,0	-2,0	-1,3	-2,3	-0,8
	2	-2,0	0,8	3,0	3,3	0,8	1,0	5,0	5,5	5,0	5,8	4,3	4,8
	3	-2,0	-3,8	4,5	0,8	1,8	3,0	1,0	2,5	3,5	6,8	3,3	6,3
	4	0,5	-1,8	1,5	-3,3	0,8	1,5	-0,5	0	0,5	1,8	1,8	2,3
	5	0,5	-3,3	-3,0	-3,8	-3,3	-5,5	-7,5	-8,0	-6,0	-8,3	-7,3	-10,3
	6	2,0	0,8	0	0,80	0,8	-1,5	-2,0	-2,5	-2,0	-4,3	-0,8	-1,8
	16+25+34	-0,5	-4,8	1,5	-0,8	0,8	4,0	3,5	0	-0,5	2,8	-3,3	0,8
	σ	1,7	0	3,0	4,6	1,2	1,7	3,0	4,0	1,7	2,9	2,5	1,2

Tabela 5: Efeito das variáveis e interação entre elas para a região “chalumeau”.