

Parâmetros geométricos do timbre de um tubo de órgão¹

Filipe Scherer Machado²
Maria Luiza Sperb Indrusiak³

Resumo

Este artigo apresenta o estudo experimental da influência da geometria da boca do tubo de órgão no timbre, gerado pelo mesmo. Um microfone foi usado para capturar o sinal de flutuação de pressão gerada pelo escoamento de ar no interior do tubo, sendo, então, realizada uma análise de Fourier. Os resultados mostraram que a geometria da boca tem uma significativa influência na frequência produzida pelo tubo de órgão, embora a modelagem matemática usual estime que as frequências do tubo de órgão sejam apenas função do seu comprimento.

Palavras-chave: Tubo de órgão. Análise de Fourier. Pressão acústica.

Abstract

This paper presents an experimental study about the influence of the geometry of the mouth of a pipe organ on the tone generated by it. A microphone was used for capturing the pressure fluctuation signal generated by the air flow inside the pipe, and a Fourier analysis was performed. The results showed that the geometry of the mouth has a significant influence on the frequency produced by the pipe organ, thus the usual mathematical models estimate that the frequencies of the pipe organ are only functions of the tube length.

Keywords: Pipe organ. Fourier analysis. Acoustic pressure.

1 Resumo de trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil.

2 Engenheiro mecânico pela Engenharia Mecânica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS. E-mail: filipe_scherer@yahoo.com.br

3 Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS e professora da Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS. E-mail: mlsperb@unisinis.br

1 Introdução

Muitos fenômenos que ocorrem nos instrumentos musicais também ocorrem de forma semelhante em outros processos de interesse na engenharia, como na combustão. Por exemplo, nas chamadas *singing flames*, estudadas por Lord Rayleigh (KLEIN, 2000), em 1896, ou, mais recentemente, no estudo de interações entre os fenômenos acústicos e a instabilidade da combustão, desenvolvido por Hedge, Reuter e Zinn (1990). Esse fenômeno é importante em turbinas de aviação, em que o ruído provocado pelos fenômenos acústicos pode, além de provocar desconforto, ser fator de desestabilização do funcionamento da turbina.

Em 2012, Yadav e Kushari realizaram um trabalho experimental, tomando como ponto de partida a premissa de que as oscilações da combustão são governadas pelas oscilações termo-acústicas e pela formação de vórtices. Eles analisaram, em um combustor com a chama estabilizada, o efeito da esteira de vórtices, formada por uma barra de aço fina, posicionada perpendicularmente ao escoamento reativo, realizando medições de flutuação de pressão e filmagem da chama.

A geração de ondas sonoras por chamas pré-misturadas também foi estudada numericamente por Talei, Brear e Hawkes (2012). Eles citam a importância de estudos desse tipo, devido à poluição sonora causada por processos de combustão, por exemplo, em turbinas, e às instabilidades que podem ser causadas pela interação entre as ondas sonoras e as flutuações da combustão.

Trabalhos semelhantes, envolvendo instrumentos musicais, já foram desenvolvidos por Fletcher e Tarnopolsky (1999), pesquisadores da *School of Aerospace and Mechanical Engineering*, da Academia da Força Aérea Australiana que estudaram experimentalmente os sinais de pressão acústica produzidos por trompetes.

A fabricação de órgãos de tubo é feita de forma totalmente artesanal. Até hoje, os componentes de um órgão são produzidos pelas mesmas orientações que eram seguidas pelos antigos mestres organeiros. Pouco material científico publicado existe, tratando da influência de cada fator geométrico

no som produzido pelo instrumento, embora seja sabido que essa influência existe.

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da geometria do tubo de órgão no timbre produzido pelo mesmo, através das variações na frequência do sinal de pressão. Para tal foi construída uma bancada de testes para a captura das ondas de pressão sonora emitidas por cada geometria do tubo.

2 Revisão bibliográfica

O tubo de órgão é um instrumento de sopro que produz apenas uma nota. Quanto à forma, os tubos do órgão podem ser: flautados ou palhetados, abertos ou fechados, retos ou cônicos e secção circular ou retangular. O som é produzido pela vibração da massa de ar originada no instrumento (OLSON, 1967).

Um tubo de órgão pode ser dividido em três partes principais: corpo, onde o ar vibrará, quando o tubo for acionado; pé do tubo (reservatório) de ar, para manter o som por alguns instantes; e a boca do tubo onde ocorre o escape do ar (figura 1). Os outros três componentes que constituem a boca do tubo de órgão são: lábio superior, lábio inferior e alma (chapa que separa o corpo do tubo do pé do tubo).

2.1 Funcionamento do tubo de órgão flautado, aberto, reto e de secção circular

Segundo Serway e Jewett Jr. (2011), nos tubos flautados e retos, a principal característica geométrica é o comprimento do tubo. A frequência correspondente ao tubo é determinada pelo seu comprimento. A coluna de ar no interior desses tubos possui uma frequência natural de vibração dada pela equação 1:

$$f = \frac{NV}{2L} \quad (1)$$

onde f é a frequência, N é o harmônico em questão, V é a velocidade do som no ar, e L é o comprimento do tubo.

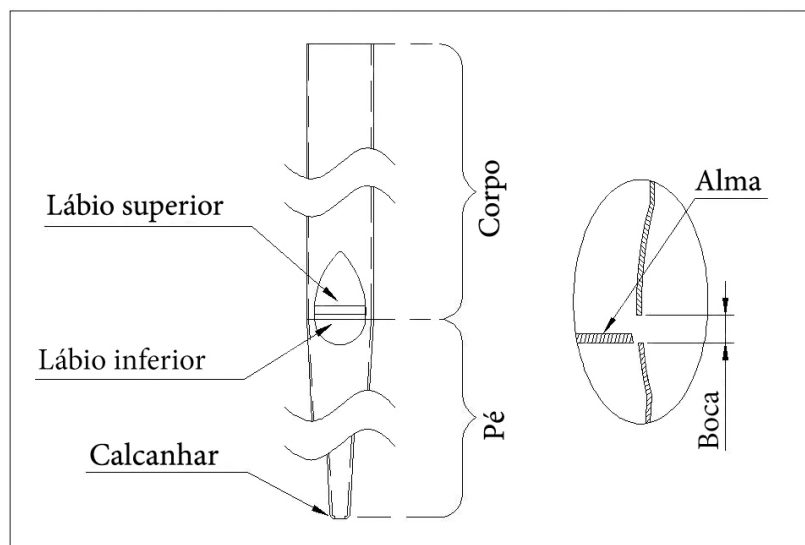


Figura 1: Principais partes de tubo de órgão
Fonte: Olson (1967).

Cada tubo de órgão produz, quando acionado, vários harmônicos ao mesmo tempo. Cada um desses harmônicos possui uma determinada amplitude. A maior amplitude se dá no primeiro harmônico e, à medida que o número do harmônico aumenta, a amplitude da respectiva onda diminui (OLSON, 1967).

Quando o organista aperta uma tecla do órgão, é liberada a passagem do ar para o pé do tubo. Após o preenchimento de ar no pé do tubo, o ar é forçado a sair pela folga existente entre a alma do tubo e o lábio inferior (figura 2a). Devido ao fato dessa folga ser muito pequena, ocorre um estrangulamento do fluxo

de ar, aumentando significativamente a velocidade do escoamento. Segundo a equação de Bernoulli (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006), quando há um aumento na velocidade de um escoamento, ocorre uma diminuição da pressão (mesmo efeito ocorrido no medidor Venturi). Como o jato de ar exerce uma pressão menor que a pressão atmosférica, o mesmo é empurrado para dentro do tubo (figura 2b). Após alguns instantes, o ar é empurrado para fora do tubo pelo mesmo motivo citado anteriormente (figura 2c). Assim, inicia-se um ciclo que se mantém, enquanto o organista estiver pressionando a tecla.

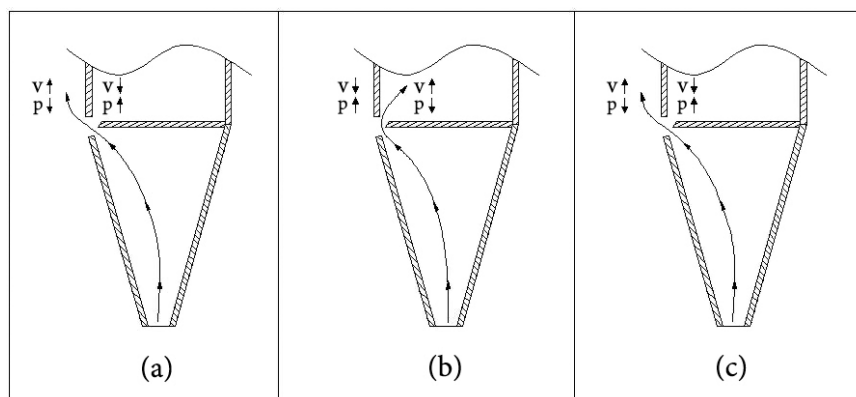


Figura 2: Princípio de funcionamento do tubo de órgão
Fonte: Henrique (2004).

Quando um instrumento musical é tocado ou algum ser vivo emite algum som, vários harmônicos são produzidos simultaneamente pelo instrumento ou pelas pregas vocais. Considerando-se o princípio da superposição, desenvolvido por Fourier, a presença de várias ondas, sendo propagadas simultaneamente no mesmo meio, resultará em uma onda resultante que será descrita pela soma algébrica das ondas relativas aos harmônicos produzidos pela fonte sonora (FOURIER *apud* SERWAY; JEWETT, 2011). Essa configuração da onda resultante é chamada de timbre (OLSON, 1967). É o timbre, ou seja, uma soma de inúmeras ondas, que nos faz diferenciar o som produzido por um piano do som de uma flauta ou da voz de uma determinada pessoa de outra.

Devido a fenômenos como refração, reflexão e absorção, as ondas sonoras raramente são ondas periódicas perfeitas (OLSON, 1967). Neste artigo, esses fenômenos serão desconsiderados.

Entre os principais fatores geométricos do tubo de órgão que podem influenciar o timbre estão: altura e diâmetro do corpo do tubo, largura e altura da boca do tubo, folga entre a alma

do tubo e o lábio inferior, além, é claro, da forma construtiva de cada tubo (cilíndrico, cônico, flautado, palhetado, etc.).

2.2 Análise de sinais

Existem dois tipos de sinais: os sinais de tempo contínuo e os sinais de tempo discreto. Os sinais de tempo contínuo são definidos para todo e qualquer instante de tempo. Um exemplo de sinal de tempo contínuo pode ser visto em uma música gravada em um disco de vinil, pois o disco plástico possui uma ranhura espiralada que é varrida continuamente por uma pequena agulha. As vibrações mecânicas sofridas por essa agulha são transformadas em sinais elétricos, amplificados e transformados em ondas sonoras. Os sinais de tempo discreto são definidos apenas para alguns instantes de tempo. Um exemplo de sinal de tempo discreto pode ser visto em uma música gravada em um CD, pois o sinal de tempo contínuo é decodificado, gerando um sinal binário, e depois convertido em sinais digitais de tempo discreto. Exemplos de gráficos de sinais de tempo contínuo e discreto podem ser vistos na figura 3.

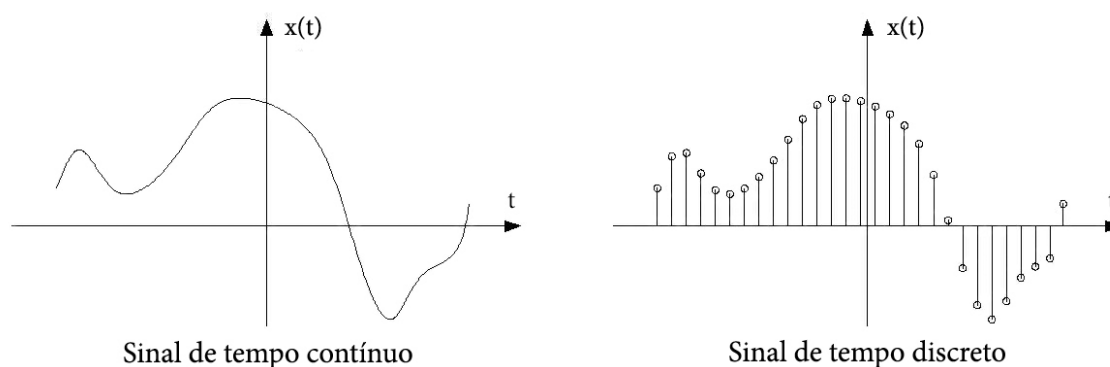


Figura 3: Sinais de tempo contínuo e discreto
Fonte: Haykin e Van Veen (2001).

Quando se executa a aquisição de um sinal, usa-se uma determinada frequência de aquisição. Essa frequência de aquisição representa o intervalo de tempo entre as medições feitas pelo instrumento de captação do fenômeno que será,

posteriormente, transformado em sinal. Caso o valor da frequência de aquisição seja menor que o valor da frequência medida, o sinal será mascarado. Esse mascaramento do sinal é chamado de dobramento (*aliasing*) (HAYKIN, 1983). Na

figura 4, o fenômeno de dobramento encontra-se ilustrado claramente.

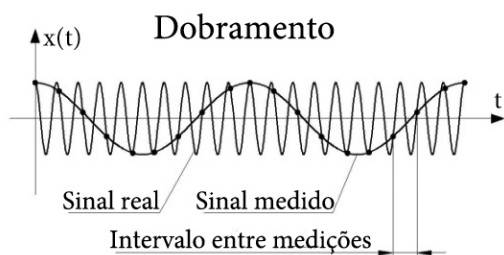


Figura 4: Representação do fenômeno de dobramento
Fonte: Haykin e Van Veen (2001).

Para evitar o dobramento, deve-se usar uma frequência de amostragem acima da frequência de Nyquist, ou seja, o dobro do valor da frequência que se deseja medir. Usualmente,

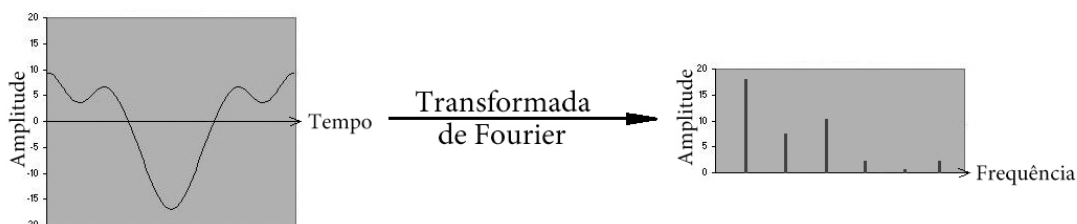


Figura 5: Transformada de Fourier
Fonte: Haykin e Van Veen (2001).

A transformada discreta de Fourier é a aplicação da Transformada de Fourier para sinais discretos e é definida pela equação 2:

$$X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\Omega n} \quad (2)$$

A transformada descreve o sinal $x(n)$ como função de frequência senoidal Ω e é denominada representação no domínio de frequências de $x(n)$. O módulo ou magnitude de $X(e^{j\Omega})$ é conhecido como espectro de magnitude. Similarmente, a fase de $X(e^{j\Omega})$ é conhecida como espectro de fase (HAYKIN; VAN VEEN, 2001).

também se aplica um filtro passa baixa para eliminar as frequências acima da frequência de Nyquist ou, na ausência desse, usa-se uma frequência de aquisição bem acima daquela que se deseja medir.

2.3 Transformada de Fourier

Um sinal periódico pode ser decomposto em uma soma de diferentes senóides, de amplitudes e frequências variadas. Assim, um determinado timbre pode ser decomposto em ondas aproximadamente senoidais. O resultado dessa decomposição é chamado de Transformada de Fourier. A Transformada de Fourier altera o domínio do sinal de “tempo” para “frequência”, como é ilustrado na figura 5.

3 Trabalho experimental

Para fazer as medições dos timbres dos tubos de órgão foi construída uma bancada de teste tal como apresentada na figura 6. As ondas sonoras, emitidas pelo tubo de órgão na bancada de teste, foram capturadas pelo microfone e enviadas, analogicamente, para a placa de aquisição de dados. A placa de aquisição converte o sinal analógico em um sinal digital e o envia para o computador, onde o mesmo foi processado pelo software Cool Edit Pro 2.1. Pode-se dizer que o local em que a bancada foi construída se aproxima de um ambiente classificado como campo aproximadamente livre, devido à existência de uma parede localizada na retaguarda da instalação, a uma distância de 0,4 m.

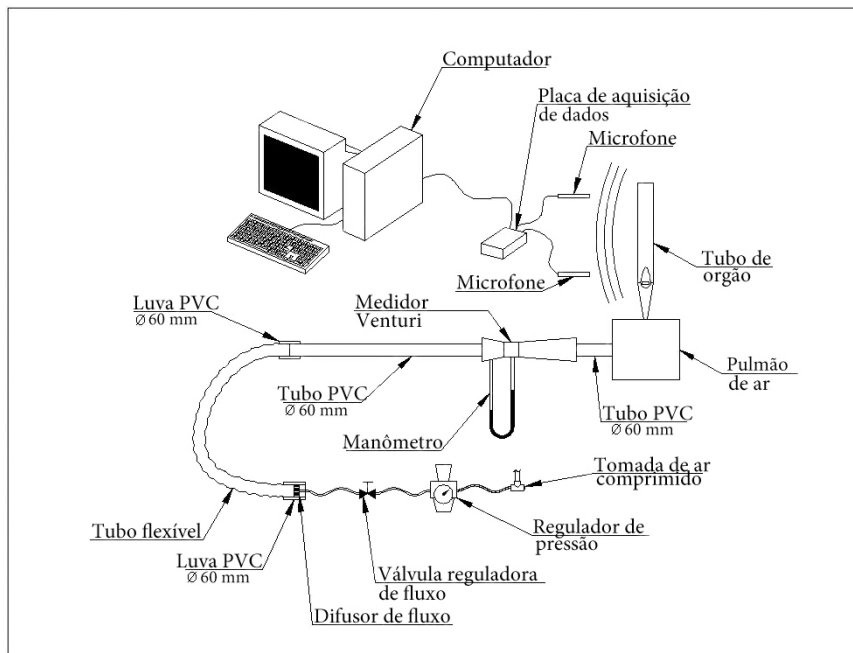


Figura 6: Principais componentes da bancada de testes
Fonte: Os autores (2013).

Devido ao fato de se desejar medir frequências de até 12000 Hz, aproximadamente, utilizando o critério de Nyquist com segurança, foi utilizada uma frequência de amostragem de 44100 Hz.

O tubo de órgão utilizado neste trabalho, para a determinação do timbre, foi um tubo flautado aberto, reto e de seção circular, $Fá_5$, ou seja, possui frequência fundamental de 698,46 Hz. O estudo foi realizado com um tubo $Fá_5$, pois esse foi o tubo doado pela empresa WOMA (fabricante de tubos de órgão).

O corpo do tubo tem 205 mm de comprimento e 25,5 mm de diâmetro interno. A boca do tubo possui 20,8 mm de largura por 5,7 mm de altura. A folga existente entre o a alma e o lábio inferior é de 1 mm. Essas medidas do tubo

e as demais estão esquematizadas na figura 7a.

O parâmetro analisado neste trabalho é a largura da boca do tubo de órgão. Para que se altere o parâmetro em questão, dois pares de calços foram fabricados para que, após instalados nos cantos da boca, a largura da boca do tubo de órgão seja diminuída. Cada peça do primeiro par de calços possui 1,4 mm de largura, enquanto as peças do segundo par de calços possuem 3,1 mm de largura. Assim, a boca do tubo pode ter três larguras: 20,8 mm; 18,0 mm e 16,4 mm.

Foi utilizado silicone para a vedação das folgas existentes entre os calços e as paredes do tubo, para garantir que o ar passasse apenas pela boca do tubo. Essa montagem é mostrada na figura 7b.

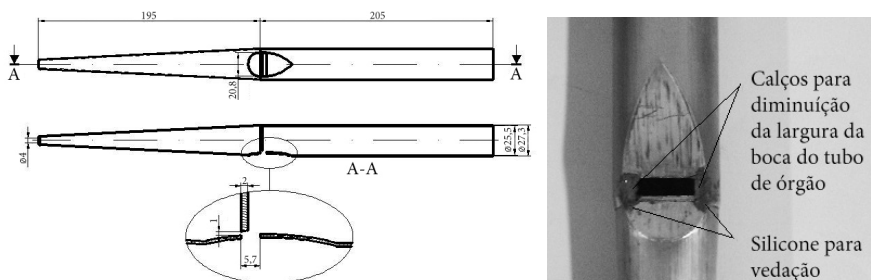


Figura 7: a) Desenho de detalhamento do tubo de órgão utilizado; b) Modificações na boca do tubo
Fontes: a) Olson (1967); b) Os autores (2013).

4 Resultados e discussões

Foram feitas três análises com os resultados obtidos para cada uma das configurações de boca do tubo de órgão analisado neste trabalho. A primeira análise foi a verificação da equação de determinação dos harmônicos de tubos de órgão. A segunda análise foi a comparação dos harmônicos medidos com os harmônicos teóricos, para que se saiba a real importância da largura da boca de um tubo de órgão. A terceira e última análise foi sobre a influência da largura da boca de tubo de órgão no nível de intensidade sonora.

Essas análises foram feitas, a partir dos dados obtidos pelas Transformadas de Fourier, executadas para cada uma das configurações de geometria.

As figuras 8, 9 e 10 ilustram os espectros de magnitude do som emitido respectivamente pelos tubos com 20,8 mm, 18,0 mm e 14,6 mm de

largura de boca. O eixo horizontal representa as frequências em hertz e o eixo vertical representa o nível de pressão sonora (NPS) em decibel. Foi usado como referência (zero) o NPS do laboratório em condição de silêncio.

Segundo a equação 1, a frequência fundamental de um tubo aberto é determinada, predominantemente, pelo comprimento do tubo. Tomando como base essa afirmação e, considerando a velocidade de propagação do som no ar de 340 ms^{-1} , infere-se que a frequência fundamental desse tubo seria de 829,27 Hz. No entanto, pela análise de Fourier, foram obtidos valores diferentes desses. A tabela 1 apresenta a frequência teórica para um tubo afinado em $F\acute{a}_5$, a frequência teórica, utilizando a equação 1 em um tubo com 205 mm de comprimento, e as frequências obtidas com os testes feitos com as diferentes configurações de boca de tubo de órgão.

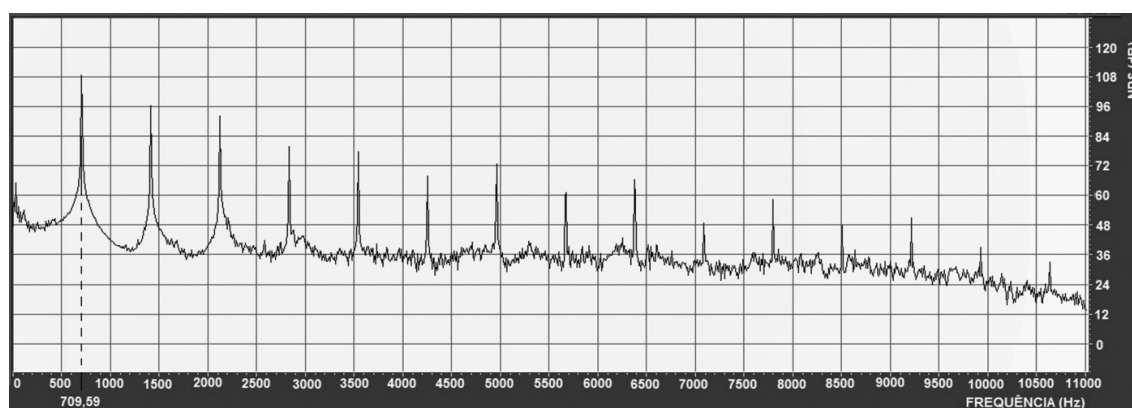


Figura 8: Espectro de magnitude do tubo de 20,8 mm de largura de boca

Fonte: Os autores (2013).

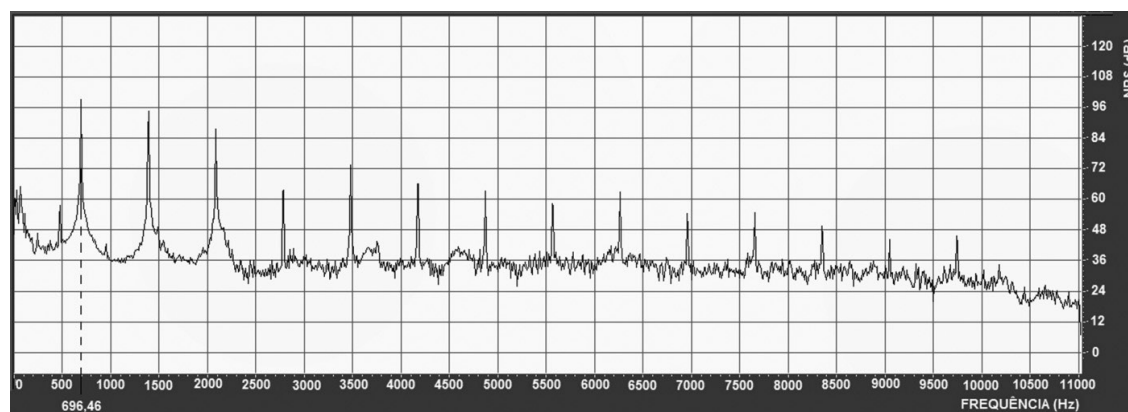


Figura 9: Espectro de magnitude do tubo de 18,0 mm de largura de boca

Fonte: Os autores (2013).

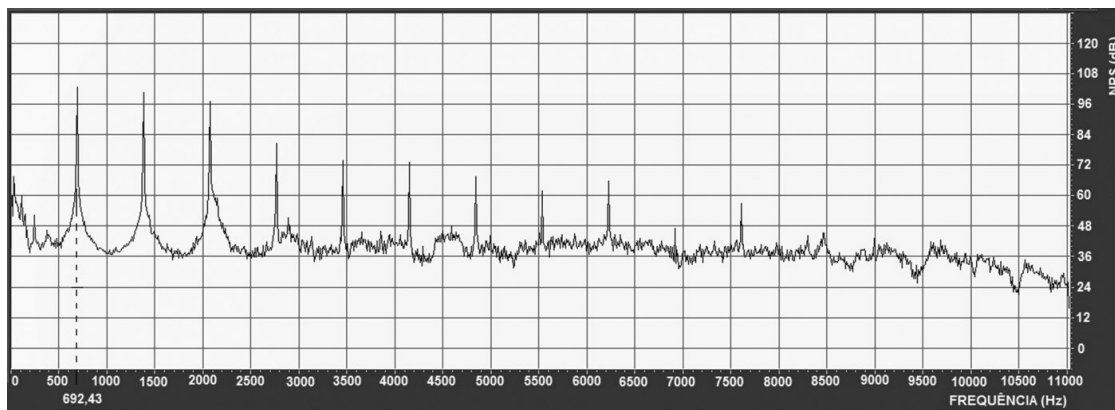


Figura 10: Espectro de magnitude do tubo de 14,6 mm de largura de boca
 Fonte: Os autores (2013).

Tabela 1: Comparativo entre frequências fundamentais teóricas e medidas

Frequência [Hz] Fá ₅ teórico, obtida pela teoria musical	Frequência [Hz] Tubo 205 mm obtida pela equação 1	Frequência [Hz] Boca 20,8 mm	Frequência [Hz] Boca 18,0 mm	Frequência [Hz] Boca 14,6 mm
698,46	829,27	709,59	696,46	692,43

Fonte: Os autores (2013).

Nota-se que existe uma grande diferença entre o valor encontrado através da equação 1 e os demais valores da tabela. Comparando a frequência calculada com a frequência medida do tubo com boca de 20,8 mm de largura (tubo original fornecido pela empresa WOMA), observa-se uma diferença de 16,87%.

Os dados obtidos pela Transformada de

Fourier foram analisados e os picos de frequência foram identificados. Esses picos de frequência são denominados harmônicos. Em um tubo aberto, os harmônicos são todos múltiplos da frequência fundamental. A tabela 2 mostra todos os valores dos primeiros 11 harmônicos de um tubo teórico afinado em Fá₅ e os 11 primeiros harmônicos dos tubos medidos.

Tabela 2: Comparativo entre frequências teóricas e frequências medidas

Harmônico	Frequência [Hz] Tubo teórico Fá ₅ obtida pela teoria musical	Frequência [Hz] Boca 20,8 mm	Frequência [Hz] Boca 18,0 mm	Frequência [Hz] Boca 14,6 mm
1°	698,46	709,59	696,46	692,43
2°	1396,92	1419,17	1393,27	1384,85
3°	2095,38	2128,42	2089,73	2077,28
4°	2793,84	2838,01	2786,53	2769,71
5°	3492,30	3547,60	3483,00	3462,14
6°	4190,76	4257,18	4179,46	4154,56
7°	4889,22	4966,43	4876,26	4846,99
8°	5587,68	5676,02	5572,39	5539,42
9°	6286,14	6385,60	6268,85	6231,84
10°	6984,60	7094,85	6965,32	6924,61
11°	7683,06	7804,44	7661,78	7616,70

Fonte: Os autores (2013).

A largura da boca do tubo de órgão causa uma alteração nos harmônicos medidos. É possível observar que, quanto maior o número do harmônico, maior é a diferença entre os valores teóricos e os valores medidos.

Mesmo que as maiores diferenças entre as frequências medidas ocorram nos harmônicos

de maior número, ou seja, os harmônicos com menor intensidade, nota-se a diferença entre os timbres de cada configuração de tubo de órgão.

O nível de pressão sonora (NPS) de cada harmônico foi obtido através da Transformada de Fourier. Esses dados são apresentados na tabela 3, a seguir.

Tabela 3: Comparativo entre os NPS medidos

Harmônico	NPS [dB(A)] Tubo 20,8 mm	NPS [dB(A)] Tubo 18,0 mm	NPS [dB(A)] Tubo 14,6 mm
1°	108,62	99,11	98,29
2°	96,12	94,29	96,90
3°	92,09	87,34	93,65
4°	79,80	63,36	77,10
5°	77,50	73,33	70,38
6°	67,58	65,78	70,37
7°	72,47	62,98	65,79
8°	60,92	58,26	61,16
9°	66,40	62,81	64,90
10°	48,75	54,28	43,84
11°	57,98	53,18	56,11

Fonte: Os autores (2013).

Analisando os valores obtidos, percebe-se que a diminuição da boca do tubo causou uma pequena queda nos valores de NPS. Porém, essa característica não obedece a um padrão linear, pois, para cada configuração nova, alguns harmônicos têm seu NPS diminuído e outros harmônicos têm seu NPS aumentado.

5 Conclusões

Neste trabalho, foi possível verificar a real influência da largura da boca do tubo de órgão no timbre gerado. Isso possibilitou levantar uma importante questão que é a aplicabilidade da equação que determina os harmônicos dos tubos à fabricação de tubos. Segundo as medições feitas, verificou-se que existem outros parâmetros geométricos que influenciam na frequência fundamental do tubo de órgão além do comprimento de tubo.

A redução da frequência produzida pelo tubo de órgão em decorrência da diminuição da largura da boca do tubo de órgão é, possivelmente, explicada pelo acréscimo de perda de carga no escoamento de ar através do tubo, o que causaria uma pequena variação virtual no comprimento do tubo.

A diferença máxima encontrada entre as frequências fundamentais medidas foi de 17 Hz. Essa variação de frequência dificilmente seria percebida por pessoas que não pertencem à área musical. Músicos, afinadores e outros profissionais da música em geral percebem essa diferença.

A realização deste trabalho também possibilitou um grande embasamento para um futuro estudo sobre instabilidade em combustão, pois a flutuação da onda de pressão sonora que ocorre na música também ocorre no processo de combustão.

Embora a largura do tubo de órgão já tenha sido testada neste trabalho, ainda existem vários fatores que deveriam ser analisados. Sugere-se, para trabalhos futuros, a verificação da influência de outros parâmetros geométricos no timbre gerado pelo tubo.

Referências

FLETCHER, N. H.; TARNOPOLSKY, A. Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing. **Journal of Acoustic Society of America**, v. 105, n. 2, p. 875-881, 1999.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, J. P. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HAYKIN, S. **Communication systems**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1983.

_____; VAN VEEN, B. **Sinais e sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HEDGE, U. G.; REUTER, D. M.; ZINN B. T. Frequency control in unstable and pulse

combustors. **Symposium (International) on Combustion**, v. 23, n. 1, p. 859-865, 1990.

HENRIQUE, L. L. **Instrumentos musicais**. 4. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.

KLEIN, S. A. **On the acoustics of turbulent non-premixed flames**. Tese (Doutorado). University of Twente. 2000. Disponível em: <<http://purl.utwente.nl/publications/32033>>. Acesso em: 27 fev. 2014.

OLSON, H. F. **Music, physics and engineering**. 2. ed. New York: Dover Publications, 1967.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR, J. W. **Princípios de física: movimento ondulatório e termodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TALEI, M., BREAR, M. J.; HAWKES, E. R. A parametric study of sound generation by pre-mixed laminar flame annihilation. **Combustion and Flame**, v. 159, p. 757-769, 2012.

YADAV, N. P.; KUSHARI, A. Passive control of premixed lifted flame in a dump combustor. **Fuel**, v. 93, p. 67-74, 2012.