



RODOLFO THOMAZELLI

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MEDIDOR DE  
IMPEDÂNCIA PARA SISTEMAS TUBULARES

CAMPINAS

2013





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

RODOLFO THOMAZELLI

# CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MEDIDOR DE IMPEDÂNCIA PARA SISTEMAS TUBULARES

Orientadora: *Prof.<sup>a</sup>Dr.<sup>a</sup> Stelamaris Rolla Bertoli*

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Arquitetura e Construção.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELO ALUNO RODOLFO THOMAZELLI  
E ORIENTADA PELA *PROF.<sup>a</sup>DR.<sup>a</sup> STELAMARIS ROLLA BERTOLI*

Assinatura do Orientador

---

Campinas

2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

T368c Thomazelli, Rodolfo, 1984-  
Construção e validação de um medidor de impedância para sistemas  
tubulares / Rodolfo Thomazelli. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Impedância acústica. 2. Instrumentos de sopro. 3. Flauta. I. Bertoli,  
Stelamaris Rolla, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Building and validating of an impedance spectrometer for tubular systems

**Palavras-chave em inglês:**

Acoustical impedance

Woodwind instruments

Flute

**Área de concentração:** Arquitetura e Construção

**Titulação:** Mestre em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Stelamaris Rolla Bertoli [Orientador]

Lucila Chebel Labaki

Andrey Ricardo da Silva

**Data de defesa:** 29-08-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MEDIDOR DE  
IMPEDÂNCIA PARA SISTEMAS TUBULARES**

**Rodolfo Thomazelli**

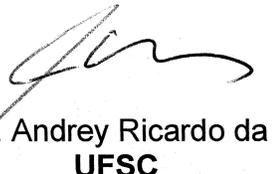
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli  
Presidente e Orientadora/UNICAMP**



**Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki  
UNICAMP**



**Prof. Dr. Andrey Ricardo da Silva  
UFSC**

Campinas, 29 de Agosto de 2013

## RESUMO

A impedância acústica é um dos conceitos importantes para o estudo da propagação de ondas sonoras em dutos, pois por meio de sua determinação, outros parâmetros acústicos são obtidos. É um espectro em frequências, e pode ser obtida experimentalmente através de um medidor de impedância acústica. Na presente pesquisa foi construído e validado um medidor de impedância acústica. Como objeto de estudo foram utilizados os pífanos - instrumentos de sopro da família das flautas. Dentre os métodos experimentais indicados na literatura, optou-se pelo uso do TMTC (*Two Microphones Three Calibrations*), devido à acessibilidade aos requisitos práticos e a possibilidade de investigação das flautas. Foram feitas medidas de impedância de dois dutos cilíndricos, de diferentes comprimentos e diâmetros internos constantes, cujos resultados foram comparados com modelos teóricos (etapa de validação). Determinou-se também a impedância acústica de três pífanos de afinações distintas. Da análise dos resultados, verificou-se a eficácia do método adotado e do aparato construído para a investigação da impedância acústica de dutos simples e, em especial, dos pífanos. Discutiu-se também aspectos importantes da construção do aparato, em termos da acessibilidade e complexidade.

Palavras-chave: *impedância acústica - instrumentos de sopro - flauta*

## ABSTRACT

The acoustical impedance is one of the indissociable factors in the studies of sound wave propagation in ducts, once its measuring provides other acoustical parameters. Its values are frequency-dependent and can be determined with the use of an acoustical impedance spectrometer. For this research an acoustical impedance spectrometer was designed and validated. The research focused on a Brazilian woodwind instrument called "pífano", from the flute family. The experimental method known as TMTC (Two Microphones Three Calibrations) was chosen, for it provides easy access to practical needs and has wide capacity to interact with flutes. The spectrum from two cylindrical ducts were taken, each duct with a different length but equal inner diameters. The spectrum of three "pífanos" with different tunings, was also measured. The results from the cylindrical ducts were later compared to theoretical models (validation stage). From the results it was possible to ascertain the efficiency of the adopted method and apparatus built to investigate acoustical impedance of regular ducts and "pífano" flutes. Other important aspects of the process of building the apparatus were also discussed, in terms of accessibility and complexity.

Keywords: *acoustical impedance - woodwind instruments - flute*

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1	Soluções Analíticas da Equação de Onda . . . . .	4
2.2	Impedância Acústica . . . . .	5
2.3	Ondas Acústicas em Dutos Cilíndricos . . . . .	6
2.4	A Física dos Pífanos . . . . .	8
2.4.1	O Mecanismo de Produção Sonora . . . . .	9
2.4.2	Características do Ressonador . . . . .	10
2.4.3	Orifícios Tonais . . . . .	12
2.4.4	Impedância Acústica dos Pífanos . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Medidores de Impedância</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>22</b>
4.1	Descrição Geral do Método . . . . .	22
4.2	Fundamentação Teórica do Método . . . . .	23
4.2.1	Aquisição da Impedância Acústica . . . . .	23
4.2.2	Impedância Teórica para Validação e Calibração . . . . .	28
4.3	Construção do Aparato . . . . .	29
4.3.1	Cabeça de Impedância e Cavidades de Referência . . . . .	30
4.3.2	Enclausuramento da Fonte e Casamento de Diâmetros . . . . .	37
4.3.3	Sistema de Aquisição de Dados . . . . .	41

4.4	Características do Objeto de Estudo (Pífano) . . . . .	44
4.5	Procedimento . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>47</b>
5.1	Validação . . . . .	47
5.1.1	Duto cilíndrico de $0,5m$ . . . . .	47
5.1.2	Duto cilíndrico de $1,0m$ . . . . .	49
5.2	Medidas com Pífanos . . . . .	54
5.2.1	Pífano afinado em $G$ . . . . .	54
5.2.2	Pífano afinado em $D$ . . . . .	58
5.2.3	Pífano afinado em $A$ . . . . .	61
5.3	Considerações Finais . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>66</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>69</b>
	<b>Apêndice A Programação para Aquisição e Manipulação de Sinais</b>	<b>69</b>
	<b>Apêndice B Frequências das Notas Musicais</b>	<b>70</b>
	<b>Apêndice C Modelo Numérico para Impedância Acústica de Dutos</b>	<b>72</b>

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Maarten Van Walstijn, Jean Kergomard, Hugo Scurto, Matthias Brennwald, Daniel Mack, Felipe Vallini, Igor Alencar e Ivan Seiler, todos pela grande ajuda com as questões técnicas e teóricas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho; Aos "pifeiros" Ton Almeida e Fernando Tocha, pelas sempre prazerosas discussões acerca das artes que envolvem a cultura do pífano; Aos amigos de laboratório, aos técnicos e aos funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, pela convivência harmoniosa e frutífera; Ao professor Ricardo Goldemberg, por ter me apresentado o fascinante mundo da acústica musical; A todos meus amigos, pelos momentos de música, culinária e filosofia, os combustíveis da cognição; À minha professora e orientadora Stelamaris, por ter acreditado nas minhas idéias, viabilizado o nosso trabalho e me auxiliado em todas as questões acadêmicas, sempre de maneira alegre, calma e confiante; À CAPES, pelo apoio financeiro prestado com a concessão da bolsa de estudos. Agradeço principalmente à minha família, por manter a cama extra-acadêmica sempre arrumada.

# Lista de Figuras

2.1	Foto de um pífano. . . . .	8
2.2	Representação esquemática de um pífano. . . . .	8
2.3	Representação do mecanismo de produção sonora dos pifanos na embocadura. Adaptada de Henrique (2009) e Fletcher and Rossing (1998). . . . .	9
2.4	Comportamento da correção do comprimento efetivo de dutos em função da frequência. Extraído de Levine and Schwinger (1948). . . . .	11
2.5	Dimensões reais e virtuais de um pífano. Adaptada de Hopkins (1993). . . . .	12
2.6	De baixo para cima: curvas de impedância acústica de um cilindro simples, uma flauta, um clarinete, um saxofone soprano e um composto de cilíndrico + cone. Extraída de Chen et al. (2009). . . . .	14
3.1	Representação esquemática de um aparato destinado à aquisição da impedância acústica. Adaptada de Dickens et al. (2007). . . . .	16
4.1	Representação esquemática do aparato utilizado no método TMTC. Adaptada de Gibiat and Laloe (1990). . . . .	23
4.2	Cabeça de impedância com legenda para as distâncias $L_1$ e $L_2$ dos microfones ao plano de referência. . . . .	27
4.3	Representação detalhada do aparato experimental usado no método TMTC. Adaptada de Gibiat and Laloe (1990). . . . .	30
4.4	Distância $\Delta L$ entre os microfones e diferença entre os sinais captados. . . . .	31

4.5	Fotos dos detalhes das cabeças de impedância confeccionadas: (a) Rosca para conexão com a caixa acústica; (b) Orifícios de conexão dos microfones; (c) e (d) Conexão com a caixa acústica. . . . .	33
4.6	Fotos das cavidades confeccionadas para referência e validação: (a) Todas as cavidades; (b) Detalhes das terminações. . . . .	34
4.7	Fotos do mecanismo de conexão entre os microfones e a cabeça de impedância: (a) Visão geral; (b) Microfones conectados. . . . .	35
4.8	Foto da conexão entre uma das cavidades de referência e a cabeça de impedância. . .	36
4.9	Fotos do mecanismo de conexão entre o pífano e a cabeça de impedância: (a) Visão geral; (b) e (c) Mecanismo conectado à um pífano; (d) Pífano conectado à cabeça de impedância. . . . .	37
4.10	Fotos das caixas acústicas: (a) Visão geral, com legenda e vista para o termômetro utilizado; (b) Detalhe do painel para saída da fiação. . . . .	38
4.11	Foto do interior da caixa acústica voltada para o alto-falante, com vista para a borracha que veda as entre-partes. . . . .	39
4.12	Fotos da caixa acústica voltada para o cone: (a) Visão geral; (b) Detalhe da folha de borracha que veda o sistema. . . . .	40
4.13	Foto do <i>matching cone</i> preso à tampa da caixa acústica. . . . .	40
4.14	Foto dos analisadores utilizados para conectar os microfones à interface de áudio. . .	42
4.15	Fotos da visão geral do aparato: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral, com detalhe da interface e o amplificador de áudio utilizados. . . . .	44
5.1	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de $0,5m$ , na faixa de $50$ a $200Hz$ . . . . .	48
5.2	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de $0,5m$ , na faixa de $200$ a $800Hz$ . . . . .	48
5.3	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de $0,5m$ , na faixa de $800$ a $2500Hz$ . . . . .	49
5.4	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de $1,0m$ , na faixa de $50$ a $200Hz$ . . . . .	50
5.5	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de $1,0m$ , na faixa de $200$ a $800Hz$ . . . . .	50

5.6	Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de 1,0m, na faixa de 800 a 2500Hz. . . . .	51
5.7	Espectros teórico e experimental do coeficiente $\tau_0$ para $L_1 = 2,5cm$ e $L_2 = 5,5cm$ . . .	52
5.8	Espectros teórico e experimental do coeficiente $\tau_0$ para $L_1 = 2,5cm$ e $L_2 = 12,5cm$ . .	52
5.9	Foto dos três pífanos utilizados nas medições, com legenda para as respectivas afinações.	54
5.10	Impedância obtida com o pífano afinado em $G$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 200 a 800Hz. . . . .	55
5.11	Impedância obtida com o pífano afinado em $G$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 800 a 2500Hz. . . . .	55
5.12	Impedância obtida com o pífano afinado em $D$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 200 a 800Hz. . . . .	58
5.13	Impedância obtida com o pífano afinado em $D$ , para a digitação OXXXXX, medida na faixa de 200 a 800Hz. . . . .	59
5.14	Impedância obtida com o pífano afinado em $D$ , para a digitação OXXXXX, medida na faixa de 800 a 2500Hz. . . . .	60
5.15	Impedância obtida com o pífano afinado em $A$ , para a digitação OOXXXX, medida na faixa de 800 a 2500Hz. . . . .	62
5.16	Impedância obtida com o pífano afinado em $A$ , para a digitação OOOXXX, medida na faixa de 800 a 2500Hz. . . . .	63

# Lista de Tabelas

3.1	Classificação das montagens experimentais dos medidores de impedância acústica mais comuns, com as singularidades e algumas notas. Adaptada de Dickens et al. (2007).	19
3.2	Classificação dos métodos de calibração, com algumas notas. Adaptada de Dickens et al. (2007).	20
4.1	Primeira proposta para posições dos microfones e tamanhos das cavidade de referência, para cada faixa de frequência.	32
4.2	Segunda proposta para posições dos microfones e tamanhos das cavidade de referência, para cada faixa de frequência.	32
5.1	Digitações diretas e respectivas notas e frequências padronizadas para um pífano afinado em $A$ .	61
B.1	Frequências das notas musicais com padrão referente ao temperamento igual e base em $A_4 = 400Hz$ . Adaptada de Suits (2013).	71

# Capítulo 1

## Introdução

As ondas sonoras podem se manifestar de diversas maneiras, dependendo do modo que são excitadas, do meio em que são propagadas e das condições impostas à propagação. O entendimento dos diferentes fenômenos que governam a propagação dessas ondas é essencial quando se deseja controlar seus efeitos, como acontece na atenuação de ruído, no tratamento acústico de edificações e na confecção de instrumentos musicais. Dentre as diversas condições que podem ser impostas às ondas sonoras, uma bastante presente na acústica arquitetônica, na acústica veicular e na acústica musical é o enclausuramento por um duto cilíndrico. Desde sistemas de ventilação até corpos de instrumentos de sopro, o comportamento acústico presente está sujeito às condições de contorno impostas principalmente pela geometria tubular, tornando importante a pesquisa sobre o assunto.

Um conceito indispensável no entendimento da acústica de dutos, tanto para o desenvolvimento teórico quanto para a descrição do sistema, é o de impedância acústica. A impedância acústica representa a resistência que o sistema oferece à propagação das ondas, e o conhecimento de sua variação em frequência (espectro) auxilia o entendimento do comportamento acústico de instrumentos de sopro, silenciadores, absorvedores, tratos vocais e canais auditivos. Seus valores dependem da pressão acústica e da velocidade volumétrica do fluido. Obtém-se a impedância de sistemas acústicos por meio de medições experimentais utilizando um medidor de impedância.

O medidor de impedância pode ser construído baseado em métodos experimentais que vêm sendo apresentados na literatura. O padrão mais utilizado atualmente baseia-se no uso apenas de transdutores de pressão. Esse padrão foi concebido em 1975, quando a computação digital facilitou a manipulação

dos dados experimentais, e vem sendo melhorado até os dias atuais (Dalmont, 2001a).

Dentre os métodos estudados na revisão bibliográfica desta pesquisa, destaca-se o método TMTC (Two Microphones Three Calibrations), destinado à aquisição da impedância de instrumentos de sopro. Medidores de impedância constituídos de dois microfones são usados desde 1970, na obtenção de coeficientes de absorção sonora de materiais (Dalmont, 2001a). Os autores do método TMTC, porém, desenvolveram e publicaram em 1990 (Gibiat and Laloe, 1990) o sistema de calibração total que, unido ao uso de dois microfones, garante a qualidade das medições da impedância de sistemas acústicos. O método foi aprimorado posteriormente por Bruneau (1987), Dalmont (2001b) e van Walstijn et al. (2005), aprimoramento que aumenta a complexidade de construção do aparato e necessita de menor controle do ambiente experimental. O método TMTC, por sua vez, utiliza-se de montagens simplificadas, fato que não diminui a qualidade dos resultados, desde que os devidos cuidados experimentais sejam tomados.

Esta pesquisa tem como objetivo construir e validar um medidor de impedância acústica baseado no método TMTC. Para a aplicação do medidor, são utilizados como objetos de estudo os pífanos, que são instrumentos de sopro da família das flautas. A escolha de um instrumento da família das flautas ocorreu pela diversidade e complexidade de fenômenos acústicos que estão envolvidos e que são de importante compreensão, tanto para pesquisadores da acústica musical quanto para construtores dos instrumentos, o que torna rica a bibliografia sobre o assunto. A escolha específica do píforo deu-se por conta das características de confecção do instrumento artesanal e pela pouca ou ausente pesquisa científica relacionada. De acordo com a revisão bibliográfica, as exigências para se obter a impedância de flautas que forneçam informações relevantes são atendidas pelo método TMTC. Os objetivos específicos da pesquisa são: verificar a eficácia do método para a investigação da impedância acústica de dutos simples e dos pífanos; e discutir os aspectos da construção do aparato em termos da acessibilidade e da complexidade.

O desenvolvimento deste texto começa pelo capítulo de fundamentação teórica, no qual são discutidas teorias da acústica geral, da acústica de dutos e, especificamente, da acústica dos pífanos. São abordadas as questões fundamentais à compreensão e ao desenvolvimento da pesquisa. No capítulo 3 apresenta-se o levantamento de métodos experimentais para a aquisição da impedância acústica de elementos, mais especificamente dos instrumentos de sopro da família das flautas. Nesse mesmo

capítulo justifica-se a escolha do método utilizado na pesquisa. No capítulo 4, é apresentada a metodologia empregada, desde questões teóricas que envolvem o método utilizado, até questões práticas da construção do aparato experimental. São introduzidos também conceitos da música que facilitam a exposição e análise dos resultados experimentais obtidos com os pífanos, e que não são usuais na linguagem científica. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões referentes à pesquisa.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Todo o desenvolvimento teórico aqui exposto baseou-se nos trabalhos de Butkov (1968), Kinsler et al. (1982), Fletcher and Rossing (1998), Henrique (2009) e Wolfe et al. (2001).

### 2.1 Soluções Analíticas da Equação de Onda

A teoria acústica de fluidos tem como base a equação de onda acústica, que descreve o comportamento de fluidos invíscidos perante às oscilações de baixa amplitude. A partir das soluções analíticas para ondas planas, pode-se obter as Equações 2.1 e 2.2, que descrevem respectivamente os comportamentos da pressão  $p$  e da velocidade de partícula  $u$ , para o caso unidimensional e independente do tempo.

$$p(x) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \quad (2.1)$$

$$u = \frac{1}{\rho_0 c} [Ae^{-ikx} - Be^{ikx}] \quad (2.2)$$

Nessas equações,  $A$  e  $B$  são constantes,  $\rho_0$  é a densidade de equilíbrio do fluido,  $c$  é a velocidade de

propagação do som e  $k$ , o número de onda, é definido como  $k = \omega/c$ , onde  $\omega$  é a frequência angular de oscilação. Multiplicando a velocidade de partícula  $u$  do fluido pela área  $S$  na qual ele oscila, obtém-se velocidade volumétrica, Equação 2.3.

$$U = uS = \frac{S}{\rho_0 c} [Ae^{-ikx} - Be^{ikx}] \quad (2.3)$$

## 2.2 Impedância Acústica

Define-se a impedância acústica  $Z$  como a razão entre a pressão  $p$  e a velocidade volumétrica  $U$  de um fluido, de acordo com a Equação 2.4. É uma ferramenta física, dependente da frequência (é um espectro em frequências), que fornece informações acerca do grau de resistência imposto pelo sistema acústico à propagação das ondas.

$$Z = p/U \quad (2.4)$$

A impedância acústica específica  $z$  é definida pela razão entre a pressão  $p$  e a velocidade de partícula  $u$ . Utilizando as Equações 2.1 e 2.2, obtém-se a Equação 2.5.

$$z = p/u \quad (2.5)$$

A impedância característica  $z_{car}$  é uma propriedade exclusiva do fluido, dependente da densidade de equilíbrio  $\rho_0$  e da velocidade de propagação do som  $c$ , de acordo com a Equação 2.6.

$$z_{car} = \rho_0 c \quad (2.6)$$

## 2.3 Ondas Acústicas em Dutos Cilíndricos

Para se obter as equações que descrevem o comportamento acústico de fluidos contidos em dutos cilíndricos, toma-se como exemplo um duto finito disposto ao longo do eixo  $x$ , de área de seção transversal  $S$  e comprimento  $L$ . Assume-se que o ar em seu interior é excitado em  $x = 0$ , e que em  $x = L$  exista uma impedância de terminação  $Z_L$ . Assume-se também que, como resultado da excitação, apenas ondas planas sejam produzidas. Assim, através das Equações 2.1 e 2.3, obtém-se a Equação 2.7.

$$Z_L = \frac{p(L,t)}{U(L,t)} = \frac{\rho_0 c}{S} \left[ \frac{Ae^{-ikL} + Be^{ikL}}{Ae^{-ikL} - Be^{ikL}} \right] \quad (2.7)$$

Manipulando-se matematicamente a Equação 2.7 e utilizando a definição de impedância característica, Equação 2.6, obtém-se a Equação 2.8.

$$\frac{B}{A} = e^{-2ikL} \frac{Z_L - Z_{car}}{Z_L + Z_{car}} \quad (2.8)$$

A Equação 2.9 descreve a impedância de entrada  $Z_{IN}$ , obtida através das Equações 2.1, 2.3 e 2.4, com  $x = 0$ .

$$Z_{IN} = Z_{car} \frac{A+B}{A-B} \quad (2.9)$$

Utilizando a relação  $B/A$  da Equação 2.8, obtém-se a relação entre impedância de entrada  $Z_{IN}$  e a impedância de terminação  $Z_L$ , descrita pela Equação 2.10.

$$Z_{IN} = Z_{car} \frac{Z_L \cos(kL) + iZ_{car} \sin(kL)}{iZ_L \sin(kL) + Z_{car} \cos(kL)} \quad (2.10)$$

Discute-se agora as ressonâncias acústicas que ocorrem em dutos fechados e abertos. Primeiramente, analisa-se o caso ideal no qual uma abertura em  $x = 0$  e um fechamento rígido  $x = L$  implicam, respectivamente, em  $Z_{IN} = 0$  e  $Z_L = \infty$ . Da Equação 2.10, tem-se que  $\cot(kL) = 0$ , o que resulta na Equação 2.11, na qual  $n \in N^*$  (lembrando que  $k = \omega/c$ ).

$$\omega_n^{fechado} = \frac{(2n-1)\pi c}{2L} \quad (2.11)$$

Pode-se também analisar o caso ideal no qual aberturas em  $x = 0$  e  $x = L$  implicam em  $Z_{IN} = Z_L = 0$ . Pela Equação 2.10, tem-se que  $\tan(kL) = 0$ , o que resulta na Equação 2.12.

$$\omega_n^{aberto} = \frac{n\pi c}{L} \quad (2.12)$$

As Equações 2.11 e 2.12 fornecem as frequências de ressonância dos dutos em cada uma das situações ideais. Para o duto aberto-fechado, conclui-se que são formadas frações ímpares de um quarto de comprimento de onda (já que  $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f$

é a frequência linear). Isso porque a abertura faz com que haja um nó de pressão acústica (anti-nó de deslocamento de matéria) em  $x = 0$ , exatamente o oposto que ocorre com o fechamento. Para o duto aberto-aberto, a presença de nós de pressão acústica em ambas extremidades faz com que formem-se múltiplos pares de um quarto de comprimento de onda (ou múltiplos inteiros da metade do comprimento de onda).

## 2.4 A Física dos Pífanos

O pífano é constituído de um duto cilíndrico, feito de variações de bambu, fechado em uma extremidade e aberto em outra, em seção transversal. Próximo à extremidade fechada localiza-se o orifício de embocadura, por onde o jato de ar proveniente do sopro do músico é inserido. Ao longo do duto distribuem-se os orifícios tonais, cujas manipulações (abertura ou fechamento) caracterizam a resposta sonora. A figura 2.1 mostra a foto de um pífano, e a Figura 2.2 ilustra de maneira esquemática a estrutura do instrumento.



Figura 2.1: Foto de um pífano.

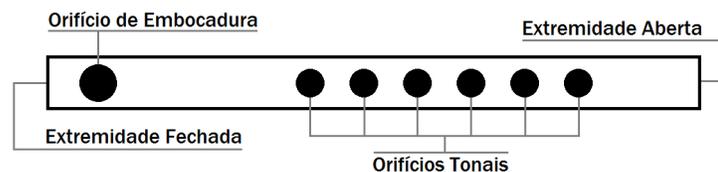


Figura 2.2: Representação esquemática de um pífano.

## 2.4.1 O Mecanismo de Produção Sonora

Por serem constituídos de um duto cilíndrico, o mecanismo de produção sonora nos pífanos conta com o fenômeno da ressonância acústica. Para se atingir as frequências de ressonância, porém, o ar no interior do instrumento deve ser excitado. A produção dos movimentos oscilatórios deve-se à interação jato-embocadura-ressonador.

A Figura 2.3 ilustra um músico inserindo um jato de ar contínuo em um pífano, situação representada em corte transversal na região do orifício de embocadura. O jato adquire instabilidade quando atinge a aresta oposta da embocadura. Esse fenômeno é complexo para ser discutido em seus pormenores, porém pode-se resumir que a instabilidade gerada é caracterizada por oscilações entre o interior e o exterior do instrumento, e que a frequência dessas oscilações depende das características do ressonador: de acordo com a geometria do duto que constitui o instrumento e, conseqüentemente, com as ressonâncias que podem ser criadas, o jato é "forçado" a oscilar nas frequências correspondentes.

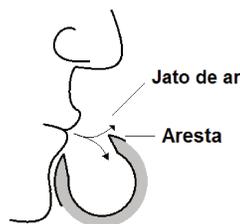


Figura 2.3: Representação do mecanismo de produção sonora dos pífanos na embocadura. Adaptada de Henrique (2009) e Fletcher and Rossing (1998).

A manipulação dos orifícios tonais (abertura ou fechamento) permite ao músico "controlar" a geometria do instrumento e, conseqüentemente, quais ressonâncias serão criadas. Ao conjunto das condições de cada um dos seis orifícios tonais (aberto ou fechado) dá-se o nome de digitação.

Para exemplificar, toma-se o caso de um músico executando um pífano, com todos orifícios tonais fechados. Supõe-se que essa condição geométrica implica na possibilidade de se produzir ressonâncias cuja frequência fundamental de oscilação é em torno de  $400\text{Hz}$ . Para ocorrer a produção sonora, o jato de ar inserido pelo músico vai ser forçado a oscilar em tal frequência, e assim as ressonâncias no duto do instrumento podem ser criadas. As características do jato inserido (velocidade, direção e espessura) definem o conteúdo espectral resultante: se o som produzido vai ser mais próximo de

oscilações puramente senoidais (apenas a fundamental) ou se vai apresentar riqueza espectral (fundamental e diversos harmônicos - sendo a fundamental predominante). Ainda para a mesma digitação (todos orifícios tonais fechados), ao variar as características do jato, o músico é capaz de tornar predominantes ressonâncias em frequências maiores, porém pertencentes ao espectro de harmônicos. Assim, ao invés de ser produzido um som cuja predominante seja a frequência fundamental referente a tal condição geométrica (no caso desse exemplo,  $400\text{Hz}$ ), o músico é capaz tornar predominante o segundo harmônico, terceiro harmônico, e assim por diante, até atingir o limite prático da execução ou do instrumento em si. As possíveis frequências de ressonância atingidas para uma mesma digitação vão ser discutidas na próxima seção. Esses fenômenos discutidos se aplicam também para outras digitações, sendo que a variável é condição geométrica do ressonador, e conseqüentemente a frequência fundamental e os harmônicos que podem caracterizar a ressonância.

## 2.4.2 Características do Ressonador

Para se discutir as ressonâncias criadas no duto que constitui o pífano, parte-se de uma aproximação pela qual considera-se o orifício de embocadura como sendo uma abertura na extremidade inicial do instrumento, em corte transversal. Essa aproximação permite comparar o instrumento com um duto cilíndrico aberto-aberto, cujas ressonâncias são descritas pela Equação 2.12. Essa equação, porém, descreve o comportamento acústico no qual a impedância das extremidades é considerada nula. Na prática, a geometria dessas extremidades implica na existência de impedâncias não nulas nas regiões, denominadas impedâncias de radiação. O desenvolvimento teórico que culmina nas correções para o caso real é deveras complexo. Porém, para a análise acústica dos pífanos é suficiente colocar que, como consequência da impedância de radiação nas extremidades, perante às ressonâncias o duto apresenta um comprimento efetivo sutilmente maior do que o seu comprimento real. Ou seja, os nós de pressão se localizam deslocados do plano das terminações. Para dutos cujas espessuras são tidas como nulas, considera-se que o comprimento efetivo é o comprimento real acrescido de uma correção  $\Delta$ , cujos valores são dependentes do raio interno  $a$  do duto, e da frequência de ressonância, de acordo com o gráfico da Figura 2.4 (lembrando-se que  $k = \omega/c$ ).

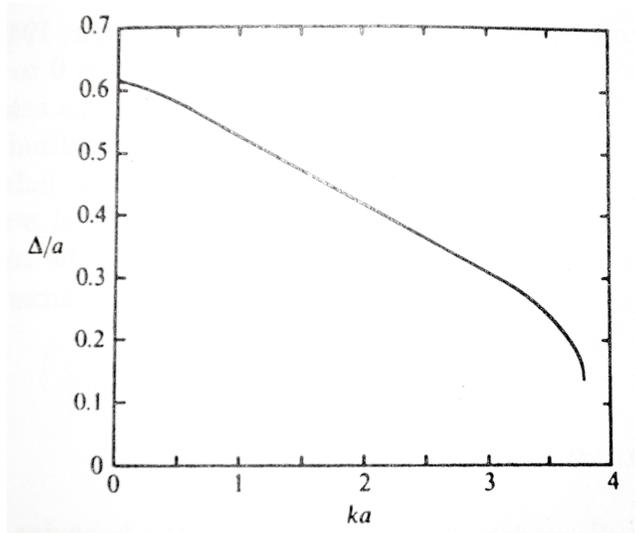


Figura 2.4: Comportamento da correção do comprimento efetivo de dutos em função da frequência. Extraído de Levine and Schwinger (1948).

Com isso, para o limite de baixas frequências ( $ka \ll 1$ ), as ressonâncias de um duto aberto-aberto de espessura nula podem ser descritas pela Equação 2.13.

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L + 0,61a} \quad (2.13)$$

Para um duto real, cuja espessura é não nula, outros valores de correção são necessários. Estudos sobre os fenômenos decorrentes podem ser encontrados no trabalho de Ando (1969). Além disso, considerar o orifício de embocadura como um corte transversal no duto torna as previsões teóricas ainda mais distantes do caso real. Por outro lado, a modelagem matemática dos fenômenos que descrevem o comportamento acústico da embocadura do instrumento e seu entorno é também deveras complexa. Com isso, discute-se tais fenômenos apenas em termos qualitativos.

A impedância de radiação é inversamente proporcional ao tamanho dos orifícios. Consequentemente, a impedância de radiação no orifício de embocadura é maior do que na abertura da extremidade final do instrumento. Esse fato somado às implicações acústicas do ar presente entre o orifício de embocadura e a extremidade inicial (fechada) do instrumento, implica em uma nova e mais expressiva

correção para o comprimento efetivo do duto. As correções das extremidades inicial e final determinam o comprimento efetivo total do instrumento, como ilustrado pela Figura 2.5.

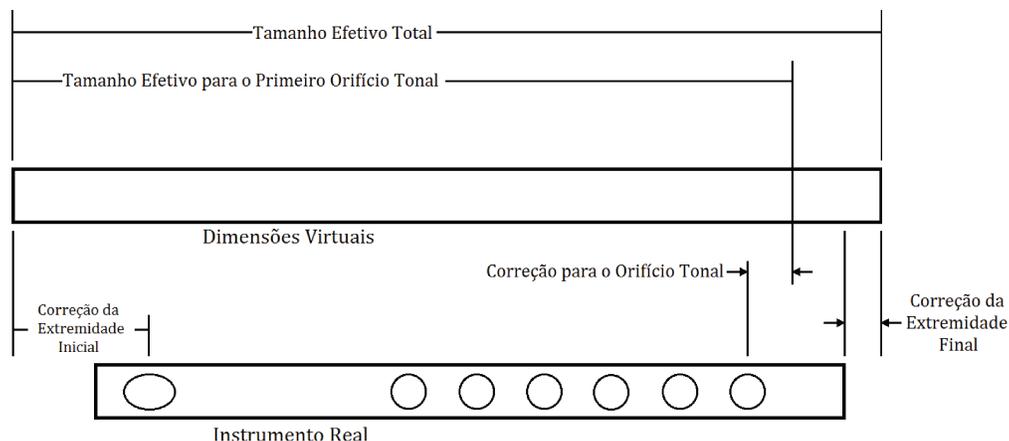


Figura 2.5: Dimensões reais e virtuais de um pífano. Adaptada de Hopkins (1993).

As características da embocadura permitem ao músico, além de atingir as diversas frequências de ressonância em uma mesma digitação, variar tais frequências em unidades ou até dezenas de *Hertz*. Esse procedimento é bastante utilizado na afinação de instrumentos de sopro, e pode ser também explicado pela impedância de radiação: variando a posição dos lábios ou a direção do jato, varia-se também a impedância de radiação no orifício de embocadura que, por sua vez, varia o comprimento efetivo do duto.

### 2.4.3 Orifícios Tonais

A princípio, considera-se que com a abertura de um orifício tonal cria-se na região um nó de pressão acústica. O nó de fato é criado, pois a comunicação entre o interior e o exterior do instrumento equilibra as pressões. Porém, devido à impedância de radiação, o nó de pressão é deslocado do plano transversal que corta o orifício. A confecção de um pífano, portanto, deve levar em consideração a denominada correção para o orifício tonal, também ilustrada na Figura 2.5.

#### 2.4.4 Impedância Acústica dos Pífanos

Para se entender o comportamento da impedância de entrada dos pífanos, analisa-se as características da embocadura. Por ser constituída de um orifício que liga o interior do instrumento ao ambiente externo, a oscilação da pressão na embocadura é baixa. Por outro lado, a instabilidade adquirida pelo jato de ar implica em velocidades volumétricas altas. Portanto, de acordo com a definição  $Z = p/U$ , os pífanos operam em frequências próximas ou iguais às frequências dos mínimos da impedância. A análise do espectro, que é obtido de maneira objetiva (independente da ação do músico), fornece informações próprias do instrumento: quão estáveis são as ressonâncias e quais são as respectivas frequências.

Os gráficos da Figura 2.6 mostram a diferença entre as impedâncias de diversos tipos de elementos. Os círculos tracejados apontam para a frequência fundamental que pode ser excitada em cada um dos exemplos. Nota-se que a região de atuação de uma flauta dá-se no mínimo da curva de impedância, ao contrário dos instrumentos de sopro da família das palhetas (como o saxofone e o clarinete). Nesses últimos, o fechamento da embocadura pela palheta acarreta em altas oscilações de pressão e baixas velocidades volumétricas, implicando em atuações nos máximos da impedância.

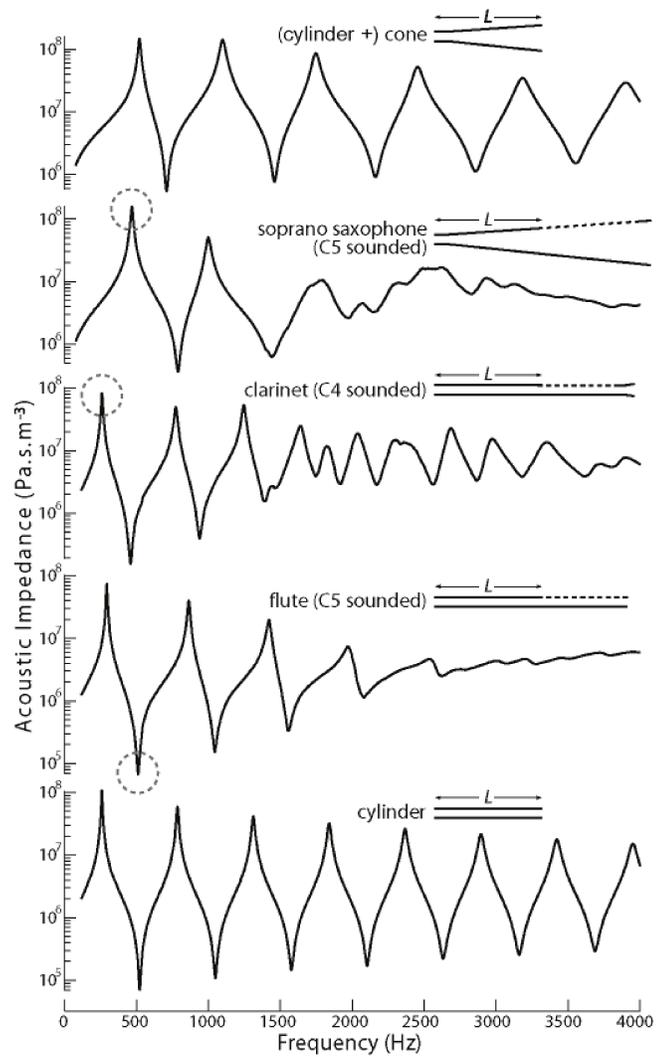


Figura 2.6: De baixo para cima: curvas de impedância acústica de um cilindro simples, uma flauta, um clarinete, um saxofone soprano e um composto de cilíndrico + cone. Extraída de Chen et al. (2009).

## Capítulo 3

### Medidores de Impedância

Existem diversas variações de medidores de impedância. A escolha não só depende das características do objeto a ser analisado, mas também das características dos resultados esperados e da acessibilidade aos requisitos práticos. Os aparatos experimentais se diferem pelas características técnicas (como tipos de transdutores utilizados) e pelos métodos matemáticos utilizados. Procurou-se na pesquisa bibliográfica levantar os métodos experimentais aptos à investigação da impedância acústica das flautas e, conseqüentemente, dos pífanos.

Segundo Dickens et al. (2007), quaisquer dois transdutores com respostas que são funções lineares de pressão e velocidade volumétrica podem ser usados para a construção do aparato experimental destinado à obtenção da impedância acústica. Com isso, muitas alternativas de métodos são possíveis. Segundo Dalmont (2001a), os valores de pressão sonora geralmente são obtidos com o uso de microfones, sendo que esses métodos variam de acordo com a maneira com que a velocidade volumétrica é determinada ou controlada. Exceto pelos métodos que utilizam anemômetros, que permitem a aferição direta da velocidade volumétrica, todos outros baseiam-se na ferramenta matemática de decomposição de onda. A Figura 3.1 ilustra de forma esquemática e simplificada a montagem do aparato. A impedância é medida no plano de referência, e a fonte de energia acústica é convenientemente simbolizada por um alto-falante. Os transdutores  $t_n$  possuem número e disposição variáveis, de acordo com o método utilizado.

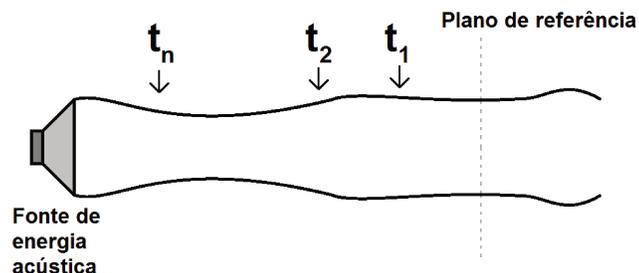


Figura 3.1: Representação esquemática de um aparato destinado à aquisição da impedância acústica. Adaptada de Dickens et al. (2007).

Dickens et al. (2007) classificam as montagens experimentais dividindo-as em sete grupos: *fonte de velocidade volumétrica*; *reflectômetro de pulso*; *dois microfones*; *fonte de velocidade volumétrica com microfone anterior*; *dois anemômetros*; *microfone e anemômetro*; e *vários microfones*. Nesse artigo de revisão, os autores apontam as singularidades de cada montagem, tal como as vantagens e desvantagens.

Segundo Wolfe et al. (2001), para se determinar experimentalmente a impedância das flautas com qualidade que permita a análise de seus mínimos, são necessárias medidas com um grande intervalo dinâmico (intervalo entre os máximos e mínimos da curva). Smith et al. (2000) comentam ainda que plotar curvas de impedância em escala linear é um artifício suficiente para a análise dos máximos, porém inapropriado para o estudo das flautas, já que assim nenhuma informação expressiva dos mínimos pode ser obtida.

Wolfe et al. (2001) desenvolveram um método que atende a exigência dos grandes intervalos dinâmicos, uma adaptação de um medidor originalmente destinado ao estudo do trato vocal. Por conta da dificuldade de se medir a velocidade volumétrica com alta precisão ao longo de um grande intervalo dinâmico, o método se baseia na comparação entre impedâncias teóricas e experimentais. Uma desvantagem desse método é que em uma das etapas de calibração são exigidas medidas acústicas com um duto cilíndrico de aço não-oxidável de 7.8 mm de diâmetro interno e 42 m de comprimento, chamado de *semi-infinite wave guide* e usado para simular a impedância característica. A justificativa para o uso dessa impedância de referência é a independência da frequência, fator que melhora a razão sinal-ruído e exclui a necessidade do uso de mais de um microfone.

No método TMTC (*Two Microphones Three Calibration method*) de Gibiat and Laloe (1990), ao invés do uso de um duto cilíndrico semi-infinito para a simulação da impedância característica, o plano de referência é fechado por uma superfície rígida. Os autores não discutem sobre a independência da frequência da impedância nessa simulação, porém afirmam que o uso de três ou quatro microfones é útil, se não indispensável, para certas correções nas aquisições de dados. Além disso, os autores concluem que a técnica de calibração empregada resolve o problema dos grandes intervalos dinâmicos. Tirando a recomendação do uso de pelo menos três microfones, o aparato experimental é bastante semelhante ao desenvolvido por Wolfe et al. (2001). Os autores apontam que, tomadas algumas precauções na montagem do aparato, o método TMTC atende às necessidades impostas pela investigação da acústica dos instrumentos de sopro. van Walstijn et al. (2005), porém, apontam que o método TMTC possui a desvantagem de exigir o conhecimento preciso acerca da constante de propagação. Essa constante é dependente da frequência e de algumas outras constantes como a velocidade do som, a densidade do ar e o coeficiente de viscosidade. Essas últimas são dependentes da temperatura, e a obtenção precisa de seus valores pressupõe um ambiente experimental devidamente controlado.

Bruneau (1987) e Dalmont (2001b) propuseram uma técnica de calibração na qual eram usados dois dutos cilíndricos, um longo (1 ou 2 m) e um curto (menos de 10 cm), ambos com extremidades fechadas, na qual a constante de calibração não necessitava ser precisamente conhecida. Porém, para van Walstijn et al. (2005), especificamente o método de Dalmont (2001b) depende de certas suposições acerca dos coeficientes de calibração cuja precisão ainda deve ser avaliada. Dickens et al. (2007) apontam que ambos os métodos possuem o problema de limitação de análise em baixas frequências, de acordo com o comprimento dos dutos de calibração.

Afim de resolver esses problemas apontados, van Walstijn et al. (2005) desenvolveram o método TMFC (*Two-Microphones-Four-Calibration method*). O método abrange o requerido intervalo dinâmico grande para a investigação das flautas, e o aparato é similar aos previamente apresentados. A calibração é baseada em relações matemáticas simples acerca da impedância de quatro dutos cilíndricos curtos fechados, não necessita do conhecimento acerca da constante de propagação, é completamente geral para uma conhecida temperatura constante e é relativamente insensível ao ruído de fundo. Porém, os próprios autores apontam que o método e o aparato descritos foram projetados para o estudo experimental em altas frequências, cobrindo a faixa entre 1 e 20 kHz, sendo que para frequências

abaixo de  $1\text{ kHz}$  não foram testadas. Para tal, o aparato deve consistir de quatro dutos cilíndricos muito longos. Hendrie and Campbell (2005) comentam que é praticamente inviável a adequação do método TMFC para baixas frequências com o uso desses dutos e, com isso, apresentam o método TMFC parcial. Nele, algumas informações exigidas pelas equações matemáticas são preenchidas com dados provenientes da teoria de ondas planas. Apesar dos resultados apresentarem boa compatibilidade com a teoria, a desvantagem do duto semi-infinito reaparece nesse método.

Outro método que adota a calibração usando um duto cilíndrico semi-infinito é o método proposto por Dickens et al. (2007). Nele, são propostas três etapas para a correção dos principais erros enfrentados na aquisição da impedância  $e$ , conseqüentemente, para o aumento da precisão dos resultados. A primeira etapa minimiza os problemas de ressonância; a segunda reduz os problemas das indeterminações experimentais; e a terceira controla a distribuição de erros.

Dickens et al. (2007), além de classificar as montagens experimentais, revisam também as técnicas de calibração, classificando-as em quatro grupos (todos aqui já citados): (a) "TMTC", englobando os métodos propostos por Gibiat and Laloe (1990) e van Walstijn et al. (2005); (b) "análise da ressonância de tubos compridos", englobando os métodos propostos por Bruneau (1987) e Dalmont (2001b); (c) "tubo semi-infinito", com referência ao método de Wolfe et al. (2001); e (d) "cavidades livres de ressonância", método proposto pelos autores da revisão. Essa classificação resume as vantagens e desvantagens de cada um das técnicas, servindo como base comparativa para esta pesquisa. As Tabelas 3.1 e 3.2 agrupam a classificação dos autores de acordo com as montagens experimentais e os métodos de calibração, respectivamente.

Tabela 3.1: Classificação das montagens experimentais dos medidores de impedância acústica mais comuns, com as singularidades e algumas notas. Adaptada de Dickens et al. (2007).

Cabeça de Impedância	Singularidades	Notas
(a) fonte de velocidade volumétrica	$kd = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• computacionalmente simples</li> <li>• requer calibração da fonte</li> <li>• suscetível a erros para elevados valores de <math> Z </math></li> </ul>
(b) reflectômetro de pulso	espectro de frequências limitado pela largura do pulso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• usa o mesmo microfone para ondas incidentes e refletidas; calibração desnecessária</li> <li>• precisão limitada pelo comprimento do duto</li> </ul>
(c) dois microfones	$kd = (n - 1)\pi$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• requer poucas hipóteses simplificadoras</li> <li>• computacionalmente intensivo</li> </ul>
(d) fonte de velocidade volumétrica com microfone anterior	$kd = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sinal do microfone anterior proporcional à velocidade (para um atenuador com impedância alta se comparada com a do objeto)</li> </ul>
(e) dois anemômetros	$kd = (n - 1)\pi$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• computacionalmente similar à (c)</li> <li>• sensores de velocidade podem apresentar características meramente similares</li> </ul>
(f) microfone e anemômetro	$kd = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pressão e velocidade medidas diretamente</li> <li>• necessária correção para obter a velocidade volumétrica a partir da velocidade de partícula</li> </ul>
(g) vários microfones	varia com o espaçamento entre microfones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maior precisão</li> <li>• vasto espectro de frequências</li> </ul>

Legenda: fonte sonora; atenuador; microfone; sensor de velocidade

Tabela 3.2: Classificação dos métodos de calibração, com algumas notas. Adaptada de Dickens et al. (2007).

Cavidades de calibração	Notas
<p>(a) TMTC</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• calibração completa com três cavidades de referência</li> <li>• necessárias diversas cavidades para análise de ampla faixa do espectro de frequências</li> <li>• número de onda não precisa ser conhecido se uma quarta cavidade for usada</li> </ul>
<p>(b) análise da ressonância de tubos compridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• após medição com tubo longo, parâmetros de calibração obtidos das oscilações de <math>\alpha</math> e <math>k</math></li> <li>• número de onda não precisa ser conhecido se uma cavidade extra for utilizada</li> <li>• dados obtidos apenas nas ressonâncias do tubo longo - limite das baixas frequências determinado pelo comprimento do tubo</li> </ul>
<p>(c) tubo semi-infinito</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cavidade quase puramente resistiva - impedância insensível ao número de onda</li> <li>• usado para calibração de fontes de velocidade</li> </ul>
<p>(d) cavidades livres de ressonância</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• calibração completa como em (a)</li> <li>• válida para todas frequências, devido a ausência de ressonâncias</li> <li>• a calibração com o flange pode ser omitida se o modelo da cabeça de impedância é disponibilizado</li> </ul>

A revisão bibliográfica apresentada, que envolveu os métodos experimentais utilizados na obtenção da impedância acústica de instrumentos de sopro, permitiu a seleção das possibilidades aptas à investigação do objeto de estudo: o pífano. A primeira característica determinante para a escolha do método mais adequado refere-se à uma particularidade dos instrumentos de sopro da família das flautas: a exigência de um grande intervalo dinâmico nos resultados das medições. As principais características que diferem os métodos remanescentes referem-se a questões práticas do processo de calibração e às suas implicações.

Excluindo a necessidade do uso de um duto cilíndrico semi-infinito (devido às dificuldades práticas), restam os métodos cujas técnicas de calibração se enquadram nos grupos (a) e (b) da revisão de Dickens et al. (2007). Dentre esses métodos, o único que se enquadra na investigação experimental do pífano, devido à possibilidade de análise em baixas frequências, é o TMTC (Two Microphones Three Calibrations), proposto por Gibiat and Laloe (1990), cujo problema prático se resume à necessidade

do conhecimento preciso acerca da constante de propagação. Optou-se nessa pesquisa pelo uso desse método, sendo que o controle e as implicações do problema prático serão discutidos no Capítulo 4.

# Capítulo 4

## Metodologia

Neste capítulo, são apresentadas as etapas correspondentes ao desenvolvimento da pesquisa, a saber: descrição geral e fundamentação teórica do método; construção do aparato; características do objeto de estudo e procedimento experimental.

### 4.1 Descrição Geral do Método

Basicamente, o método TMTC (*Two Microphones Three Calibrations Method*) usa como transdutores dois microfones instalados na chamada ‘cabeça de impedância’, um duto cilíndrico e base do aparato, como esquematizado pela Figura 4.1. Na extremidade inicial da cabeça é conectado um alto-falante, e na extremidade final a impedância a ser medida. Os microfones e o alto-falante são ligados à uma interface de áudio, que por sua vez é conectada a um *software* de análise de sinais. O *software* gera e envia um sinal para o alto-falante, e recebe a resposta desse sinal captada pelos microfones. Os sinais são processados e, através de manipulações matemáticas, extrai-se informações desejadas (no caso, valores de impedância acústica).

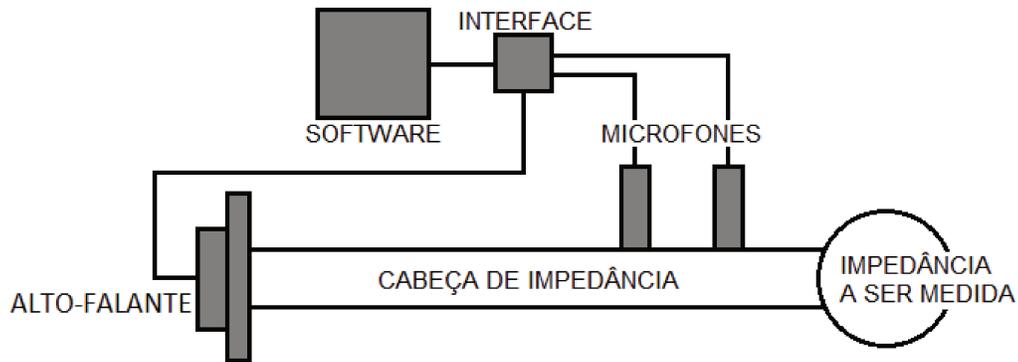


Figura 4.1: Representação esquemática do aparato utilizado no método TMTC. Adaptada de Gibiat and Laloe (1990).

## 4.2 Fundamentação Teórica do Método

### 4.2.1 Aquisição da Impedância Acústica

Pode-se considerar que os sinais  $s_1$  e  $s_2$  dos dois microfones são ambos funções lineares da pressão  $p$  e da velocidade volumétrica  $u$ , conforme representado pelas Equações 4.1 e 4.2.

$$s_1 = \alpha p + \beta \rho_0 c u \quad (4.1)$$

$$s_2 = \varepsilon p + \delta \rho_0 c u \quad (4.2)$$

Os parâmetros desconhecidos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  e  $\delta$  são dependentes da geometria do sistema e do ganho dos microfones,  $\rho_0$  é a densidade média do ar e  $c$  a velocidade do som.  $s_1$  e  $s_2$  são vetores cujos elementos representam a intensidade de cada sinal para cada frequência analisada (espectros em frequência). Manipulando matematicamente as Equações 4.1, 4.2 e  $Z = p/u$ , pode-se obter a relação  $\tau$  entre os

sinais dos microfones em função da impedância do objeto a ser medido, como mostra a Equação 4.3 (Gibiat and Laloe (1990) afirmam que a equação  $z = p/u$  pode ser usada desde que as condições de contorno exigidas na definição de impedância acústica sejam obedecidas pela onda sob estudo, que é o caso para ondas criadas apenas por um alto-falante e emitidas por um dos orifícios do objeto sob estudo).

$$\tau = \frac{s_2}{s_1} = \frac{\varepsilon Z + \delta \rho_0 c}{\alpha Z + \beta \rho_0 c} \quad (4.3)$$

Defindo  $A = -\beta/\alpha$ ,  $B = \delta/\alpha$  e  $\tau_0 = \tau/\alpha$ , obtém-se a Equação 4.4, na qual a impedância é explicitada.

$$Z = \rho_0 c \frac{A\tau + B}{\tau - \tau_0} \quad (4.4)$$

Com base na Equação 4.4, pode-se notar que o problema da obtenção da impedância a ser medida se resume à quantificar os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $\tau_0$ , já que a densidade do ar e a velocidade do som são assumidos como conhecidos. Isso pode ser feito por meio de um procedimento de calibração, no qual o objeto de estudo é substituído em etapas por três sistemas de características acústicas conhecidas (calculadas teoricamente).

O primeiro sistema caracteriza uma admitância nula (ou impedância infinita), que pode ser obtida através da inserção de um material rígido no plano de referência. Gibiat and Laloe (1990) apontam que na prática, devido as condições isotérmicas de contorno presentes em um plano sólido, essa configuração gera uma admitância não exatamente nula, porém a correção para o fenômeno é insignificante. Analisando a Equação 4.4, nota-se que para uma impedância infinita no plano de referência, o coeficiente  $\tau_0$  pode ser obtido diretamente igualando-o à razão entre os sinais dos microfones. Os outros dois sistemas baseiam-se na substituição do objeto de estudo por cavidades de referência, cujas impedâncias  $Z'$  e  $Z''$  são conhecidas (calculadas teoricamente). Os sinais medidos com o uso de

tais cavidades fornecem as razões  $\tau'$  e  $\tau''$  entre os sinais dos microfones, e a partir da Equação 4.4 obtém-se as Equações 4.5 e 4.6, onde  $\bar{Z} = Z/\rho_0c$  é a impedância adimensional (ou normalizada).

$$\bar{Z}'(\tau' - \tau_0) = A\tau' + B \quad (4.5)$$

$$\bar{Z}''(\tau'' - \tau_0) = A\tau'' + B \quad (4.6)$$

Resolvendo o sistema formado pelas Equações 4.5 e 4.6, obtém-se as Equações 4.7 e 4.8, que fornecem os coeficientes remanescentes  $A$  e  $B$ , respectivamente.

$$A = \frac{\bar{Z}'(\tau' - \tau_0) - \bar{Z}''(\tau'' - \tau_0)}{\tau' - \tau''} \quad (4.7)$$

$$B = \frac{\bar{Z}''\tau'(\tau'' - \tau_0) - \bar{Z}'\tau''(\tau' - \tau_0)}{\tau' - \tau''} \quad (4.8)$$

Voltando às relações  $A = -\beta/\alpha$ ,  $B = \delta/\alpha$  e  $\tau_0 = \tau/\alpha$ , obtém-se finalmente a Equação 4.9, que é capaz de fornecer os valores de impedância do objeto de estudo a partir dos valores de  $\tau$  adquiridos na medição.

$$Z = \rho_0c \frac{\bar{Z}'(\tau' - \tau_0)(\tau - \tau'') + \bar{Z}''(\tau'' - \tau_0)(\tau' - \tau)}{(\tau - \tau_0)(\tau' - \tau'')} \quad (4.9)$$

O uso da razão  $\tau$  entre os sinais adquiridos pelos microfones na obtenção da impedância exclui

a necessidade de uma reprodutibilidade do sinal inserido no sistema. O método também exclui a necessidade de se trabalhar com microfones casados e os resultados independem do modo como eles são conectados ao campo acústico do interior da cabeça de impedância (o acoplamento dita a fase e a amplitude da pressão sonora captadas pelos microfones). Ambas as características podem ser comprovadas através da análise da Equação 4.9. Por outro lado, durante um bloco de medições (que engloba também as três etapas de calibração) os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $\tau_0$  devem permanecer constantes. Para isso, as características acústicas da cabeça de impedância, que incluem as características dos microfones e o modo com que eles se conectados ao campo acústico devem manter-se invariantes. Outras duas exigências são que as ondas sonoras devem se propagar ao longo do aparato em um regime puramente linear, e que os sinais adquiridos devem ser exclusivamente provenientes da vibração da coluna de ar do interior da cabeça. A primeira é testada ao se proceder medições com diferentes níveis de pressão sonora gerados pela fonte de energia acústica, obtendo os mesmos valores de impedância; e a segunda é assegurada na montagem do aparato.

### **Caso Ideal**

A relação matemática que descreve a impedância medida em condições ideais depende apenas das distâncias dos microfones ao plano de referência, e pode ser usada para se prever o comportamento acústico geral do aparato e dos resultados. A sua obtenção baseia-se no desenvolvimento apresentado no capítulo da fundamentação teórica, no qual foram considerados fluidos invíscidos, ondas planas e dutos de diâmetros constantes.

A partir das Equações 2.1 e 2.2, levando em consideração que os microfones são sensíveis apenas à pressão, pode-se obter a relação  $\tau_t$  entre os sinais e a impedância acústica  $Z$  no plano de referência, como mostrado nas Equações 4.10 e 4.11, respectivamente. Aqui, troca-se o nome das constantes  $A$  e  $B$  das Equações 2.1 e 2.2 por  $C$  e  $D$  respectivamente, para não haver possibilidade de confusão com os coeficientes  $A$  e  $B$  das Equações 4.7 e 4.8.

$$\tau_t = \frac{p_2}{p_1} = \frac{Ce^{-ikL_2} + De^{ikL_2}}{Ce^{-ikL_1} + De^{-ikL_1}} \quad (4.10)$$

$$Z = \frac{p(x=0)}{u(x=0)} = \rho_0 c \frac{C+D}{C-D} = \rho_0 c \frac{(C/D)+1}{(C/D)-1} \quad (4.11)$$

$L_1$  e  $L_2$  são as distâncias dos microfones ao plano de referência, como ilustrado pela Figura 4.2.

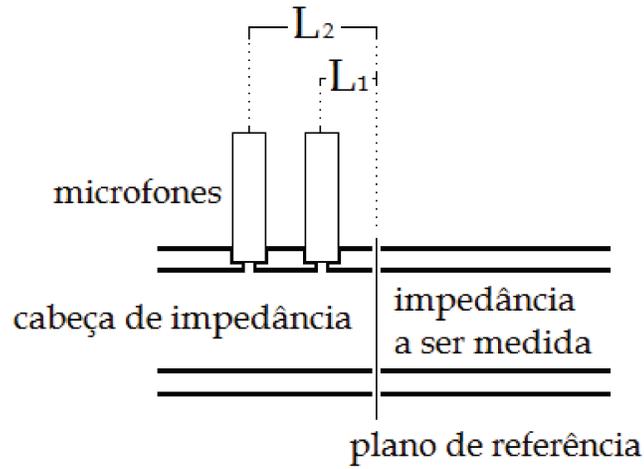


Figura 4.2: Cabeça de impedância com legenda para as distâncias  $L_1$  e  $L_2$  dos microfones ao plano de referência.

Invertendo a Equação 4.10, pode se obter a razão entre  $C$  e  $D$  em função de  $\tau_t$ , o que por sua vez possibilita a obtenção da Equação 4.12, que é a impedância acústica em função da razão entre os sinais dos microfones e a distâncias desses ao plano de referência.

$$Z = \rho_0 c \frac{\tau_t(e^{-ikL_1} - e^{ikL_1}) - (e^{-ikL_2} - e^{ikL_2})}{(e^{ikL_2} + e^{-ikL_2}) - \tau_t(e^{ikL_1} + e^{-ikL_1})} \quad (4.12)$$

A Equação 4.12 pode ser escrita na forma da Equação 4.13, o que possibilita a obtenção das novas Equações 4.14, 4.15 e 4.16 para os coeficientes  $C$ ,  $D$  e  $\tau_{0t}$ .

$$Z(\omega) = i\rho_0c \frac{\tau_r \text{sen}(kL_1) - \text{sen}(kL_2)}{\tau_r \text{cos}(kL_1) - \text{cos}(kL_2)} \quad (4.13)$$

$$C = i \frac{\text{sen}(kL_1)}{\text{cos}(kL_1)} \quad (4.14)$$

$$D = -i \frac{\text{sen}(kL_2)}{\text{cos}(kL_1)} \quad (4.15)$$

$$\tau_{0r} = \frac{\text{cos}(kL_2)}{\text{cos}(kL_1)} \quad (4.16)$$

## 4.2.2 Impedância Teórica para Validação e Calibração

Afim de se obter uma validação eficaz do aparato e do método, são feitas medidas com dutos cilíndricos fechados de diferentes comprimentos, e as impedâncias obtidas são comparadas com as impedâncias calculadas teoricamente. Esses cálculos teóricos, portanto, devem fornecer precisão maior do que a idealização descrita pela Equação 2.10. Neste trabalho, foi utilizado o modelo descrito por Caussé et al. (1983), desenvolvido para prever as consequências que mudanças estruturais em instrumentos de sopro causam nas respectivas impedâncias. Segundo os autores, o modelo descreve bem o comportamento acústico de objetos complexos pois se baseia na união entre a teoria de ondas planas e a teoria de perdas visco-termais em dutos. A matriz de transmissão obtida para dutos cilíndricos é descrita pela Equação 4.17.

$$\begin{bmatrix} p_{in} \\ u_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\Gamma L & \zeta \sinh\Gamma L \\ \frac{1}{\zeta} \sinh\Gamma L & \cosh\Gamma L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{out} \\ u_{out} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Nela,  $L$  é o comprimento do duto,  $\Gamma$  é a constante de propagação dependente dos efeitos viscoso, e  $\zeta$  é a impedância características dependente dos efeitos térmicos. Detalhes do desenvolvimento do métodos são apresentados no Apêndice C.

Neste trabalho, o modelo foi também utilizado para o cálculo de  $Z'$  e  $Z''$ , que são as impedâncias das cavidades de referência utilizados na etapa de calibração. Ou seja, todas as cavidades cuja impedância foi calculada pelo modelo de Caussé et al. (1983) são constituídas de dutos cilíndricos fechados, nos quais a impedância de radiação  $p_{out}/u_{out}$  tende à infinito. Consequentemente, da matriz de transmissão da Equação 4.17 pode-se obter a relação da impedância de entrada, Equação 4.18.

$$Z_{in} = \zeta \frac{\cosh(\Gamma L)}{\sinh(\Gamma L)} \quad (4.18)$$

Ainda, a aplicação do modelo de Caussé et al. (1983) requer o conhecimento da temperatura do ambiente experimental. Por isso, em todas etapas de medição foi utilizado um termômetro digital, e os dados de temperatura foram registrados. Procurou-se manter a temperatura do ambiente o mais estável possível, utilizando o ar-condicionado presente na sala experimental. A dependência da temperatura nos cálculos das impedâncias teóricas resume a necessidade de controle do ambiente para aplicação do método TMTC, ressaltada por van Walstijn et al. (2005) como o problema prático do método.

### 4.3 Construção do Aparato

A Figura 4.3 ilustra de maneira um pouco mais detalhada o aparato experimental apropriado para a aplicação do método TMTC.

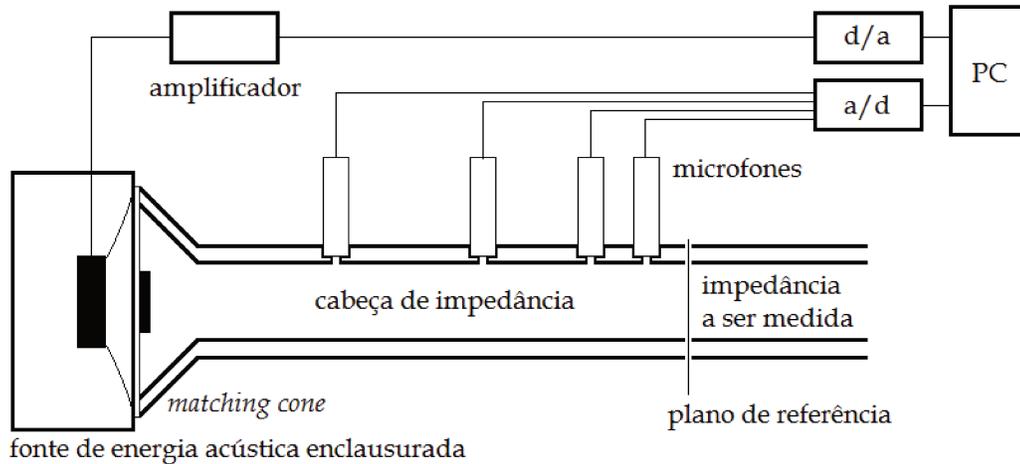


Figura 4.3: Representação detalhada do aparato experimental usado no método TMTc. Adaptada de Gibiat and Laloe (1990).

### 4.3.1 Cabeça de Impedância e Cavidades de Referência

O duto da cabeça de impedância deve ser cilíndrico, de material rígido e espesso o suficiente para se reduzir vibrações mecânicas. No trabalho de Gibiat and Laloe (1990) foram usados dutos cilíndricos de latão, com  $7\text{mm}$  de espessura e  $15\text{mm}$  de diâmetro interno. Devido à questões práticas (facilidade de corte, furação, acabamento e acesso), optou-se neste trabalho pelo uso de eletrodutos de  $2\text{mm}$  de espessura e  $17\text{mm}$  de diâmetro interno, que são constituídos por um tipo de *PVC* relativamente rígido. A extremidade inicial (oposta ao plano de referência) possui rosca externa para a conexão com sistema que compõe o alto-falante.

Os orifícios que conectam os microfones à cabeça foram feitos com brocas manuais de  $2\text{mm}$  de diâmetro. Através de uma reflexão qualitativa, pode-se concluir que se dois microfones forem posicionados a uma distância muito menor do que o comprimento  $\lambda$  da onda a ser medida, os sinais adquiridos terão valores praticamente iguais, sendo que a razão entre eles não trará informações relevantes. Tratando do comportamento acústico no interior de um duto, esse fenômeno ocorre não só quando a distância entre os microfones for quase nula, mas também quando ela for um múltiplo da metade do comprimento da onda<sup>1</sup> em questão, o que pode ser notado com a Equação 2.13.

<sup>1</sup>Para uma distância entre os microfones igual a metade do comprimento de onda, os sinais adquiridos serão opostos

Pode-se chegar as mesmas conclusões analisando quantitativamente as Equações 4.9 e 4.12. Na Equação 4.9, se os valores de  $\tau$ ,  $\tau'$  e  $\tau''$  forem iguais, tanto o numerador quanto denominador da equação se anulam, e como consequência o valor de  $Z$  passa a ser indeterminado. Experimentalmente, pequenas variações nos valores de  $\tau$ ,  $\tau'$  e  $\tau''$  tornam o cálculo de  $Z$  possível porém impreciso. Da mesma maneira, analisando a Equação 4.12, quando as distâncias entre os microfones forem nulas ou distantes de um comprimento de onda ( $e^{ik(L_1 - L_2)} = 1$ ), e quando  $\tau_t$  for igual a 1, o valor de  $Z$  é indeterminado. Com isso, quando dois microfones estiverem posicionados à distâncias próximas de múltiplos inteiros do comprimento de onda, o cálculo de  $Z$  se torna impreciso. Ainda, quando a distância entre os microfones for um múltiplo de meio comprimento de onda ( $e^{ik(L_1 - L_2)} = -1$ ),  $\tau_t$  pode assumir apenas o valor  $-1$ , e novamente o cálculo de  $Z$  se torna impreciso. A Figura 4.4 ilustra essa situação.

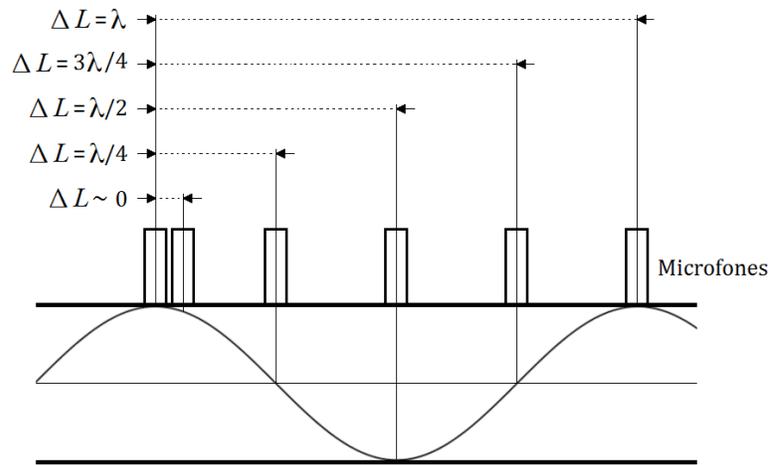


Figura 4.4: Distância  $\Delta L$  entre os microfones e diferença entre os sinais captados.

Conclui-se que a distância ideal entre microfones deve ser em torno de  $\lambda/4$ . Como a faixa de frequência a ser analisada pelo medidor é larga (de 50 a 2500 Hz), para se atender completamente essa condição devem ser utilizadas mais de uma distância entre microfones.

Da mesma maneira, na etapa de calibração, para cada faixa de frequência deve ser utilizado um par de cavidades de referência com comprimentos específicos. Se a cavidade apresentar um comprimento perto de  $\lambda/2$ , a ressonância criada representará uma alta impedância acústica, e a relação entre os

sinais adquiridos pelos microfones ( $\tau'$  ou  $\tau''$ ) terá valores próximos daqueles obtidos na medição feita com o fechamento rígido no plano de referência ( $\tau_0$ ). Assim, ambas calibrações trazem informações dependentes, tornando o processo ineficaz. Pode-se verificar essas constatações matematicamente analisando as Equações 4.5 e 4.6, nas quais os produtos dos ramos esquerdos ficariam entre valores infinitos e valores nulos, o que as torna indeterminadas. Experimentalmente, o produto entre valores relativamente distantes torna os cálculos imprecisos. Ainda, se a diferença entre os comprimentos das cavidades for próximo de um múltiplo inteiro de  $\lambda/2$ , as respectivas impedâncias terão valores próximos, o que torna as calibrações via cavidades ineficazes.

Por fim, se o comprimento das cavidades for próximo à  $\lambda/4$ , as variações relativas entre os valores de impedância se tornam grandes na vizinhança do espectro. Apesar dessas variações serem compensadas na teoria (grandes variações entre os valores de  $\tau$  na Equação 4.9), na prática elas geram problemas quando é feita a comparação com as impedâncias teóricas  $Z'$  e  $Z''$ . A partir de tais considerações, Gibiat and Laloe (1990) concluem que as melhores dimensões  $L'$  e  $L''$  das cavidades de referência devem ser da ordem de  $\lambda/3$  e  $\lambda/6$ , respectivamente.

Tendo em vista todos esses requisitos para os valores de  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L'$  e  $L''$ , Gibiat and Laloe (1990) propõem o uso das Tabelas 4.1 ou 4.2 como guia para as medições.

Tabela 4.1: Primeira proposta para posições dos microfones e tamanhos das cavidade de referência, para cada faixa de frequência.

Faixa de Frequência (Hz)	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$L'$ (cm)	$L''$ (cm)
50-200	2,5	12,5	100,0	50,0
200-800	2,5	12,5	20,0	10,0
800-2500	2,5	5,5	6,0	3,0

Tabela 4.2: Segunda proposta para posições dos microfones e tamanhos das cavidade de referência, para cada faixa de frequência.

Faixa de Frequência (Hz)	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$L'$ (cm)	$L''$ (cm)
50-200	1,0	31,0	100,0	50,0
200-800	1,0	11,0	20,0	10,0
800-2500	1,0	4,0	6,0	3,0

O uso de uma posição de microfone adicional (proposta mostrada pela Tabela 4.2) torna o método mais eficiente, segundo Gibiat and Laloe (1990). No trabalho dos autores, foram instalados em posições estratégicas quatro microfones ao longo da cabeça de impedância (situação bem representada na Figura 4.3). Assim, para cada faixa de frequência é utilizado um par de microfones, mantendo os dois remanescentes desativados.

No presente trabalho, devido ao acesso à apenas dois microfones, adotou-se o uso de diferentes cabeças de impedância, cada qual com o par de orifícios de conexão nas posições que atendem aos quesitos da medição nas respectivas faixas de frequência. De acordo com a Tabela 4.1, nota-se que as posições dos microfones para as faixas de 50 a 200Hz e de 200 a 800Hz são iguais, o que implica na necessidade de duas cabeça de impedância no total. Já o uso dos valores propostos pela Tabela 4.2 implicaria no uso de uma terceira cabeça de impedância. Esse motivo e a dificuldade de se posicionar o microfone à 1cm do plano de referência culminaram no uso apenas da Tabela 4.1 como referência.

A Figura 4.5 mostra as fotos dos detalhes das cabeças de impedância confeccionadas.

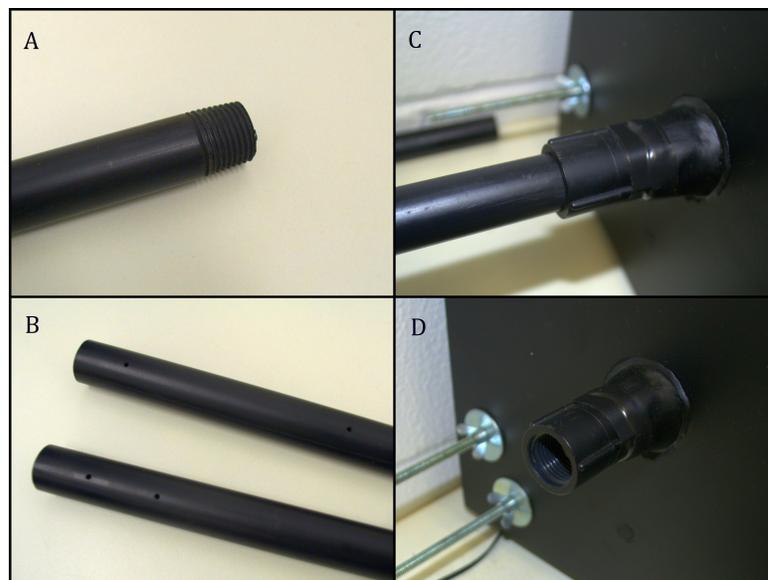


Figura 4.5: Fotos dos detalhes das cabeças de impedância confeccionadas: (a) Rosca para conexão com a caixa acústica; (b) Orifícios de conexão dos microfones; (c) e (d) Conexão com a caixa acústica.

A mesma especificação de eletroduto foi utilizada para a confecção das cavidades de referência e

de validação, que possuem diferentes comprimentos e são todas fechadas em uma das extremidades. Para os fechamentos, foi utilizada resina epóxi e tampinhas de garrafa, que garantem uma superfície plana, lisa e rígida na terminação. A Figura 4.6 mostra as fotos das cavidades confeccionadas para referência e validação.

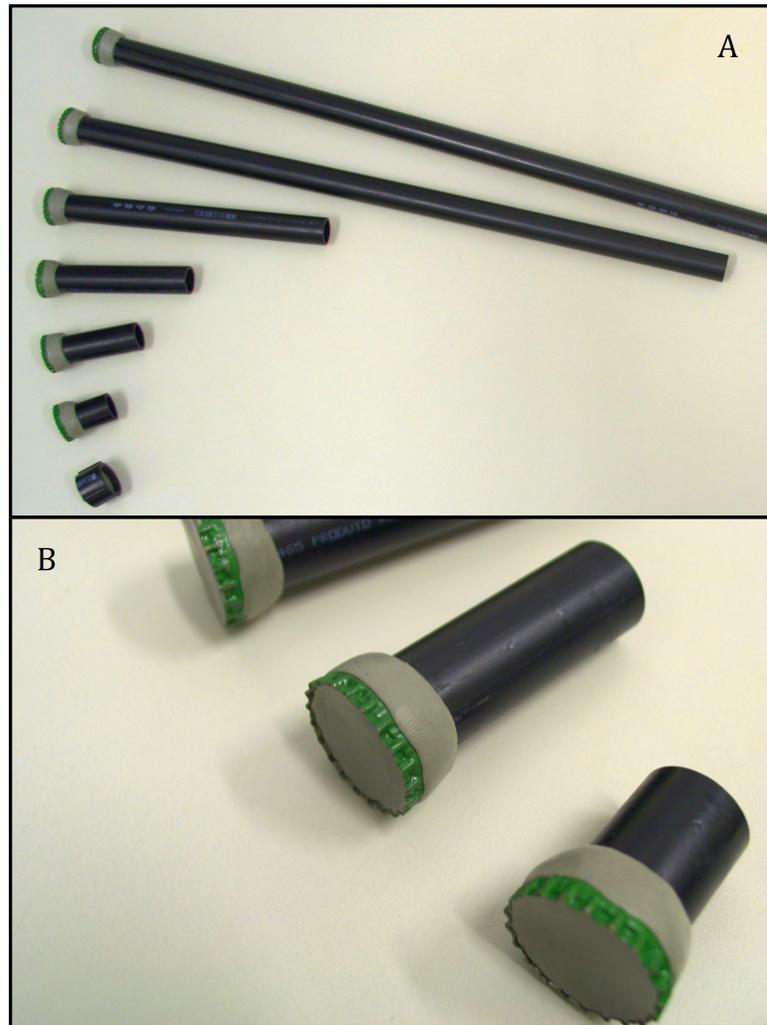


Figura 4.6: Fotos das cavidades confeccionadas para referência e validação: (a) Todas as cavidades; (b) Detalhes das terminações.

### Conexão de Microfones e Cavidades

Foi confeccionado, para cada um dos microfones, um mecanismo de conexão. A maior exigência para o mecanismo é a garantia de que nenhum som externo à cabeça de impedância seja captado pelo microfone. Buscou-se tal propriedade pelo uso de borrachas entre as partes, que podem ser pressionadas com o aperto dos parafusos. A Figura 4.7 mostra as fotos dos mecanismos confeccionados.

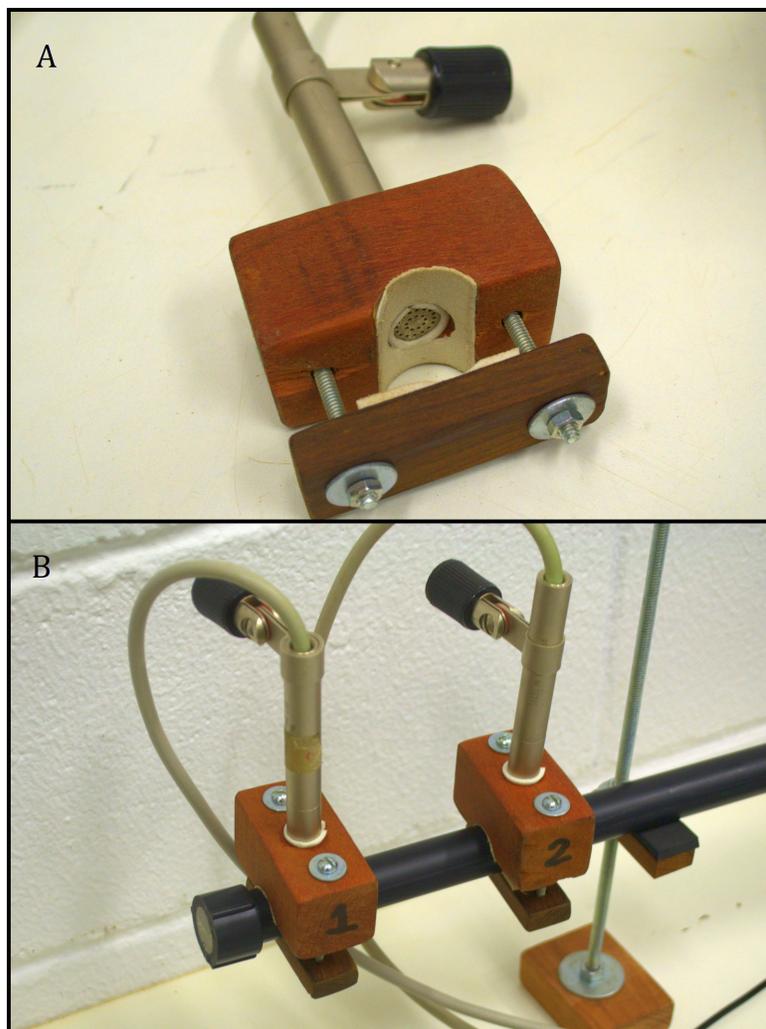


Figura 4.7: Fotos do mecanismo de conexão entre os microfones e a cabeça de impedância: (a) Visão geral; (b) Microfones conectados.

Outro ponto de conexão é entre a cabeça de impedância e as cavidades de referência e de validação. Como são todas constituídas do mesmo material da cabeça de impedância (eletroduto), foi utilizado

para a conexão um tipo de luva específica para encaamentos. Esse tipo de luva tem a característica de ficar suficientemente justa ao duto para qual é fabricada, garantindo o isolamento acústico. A Figura 4.8 mostra a foto da luva sendo utilizada.

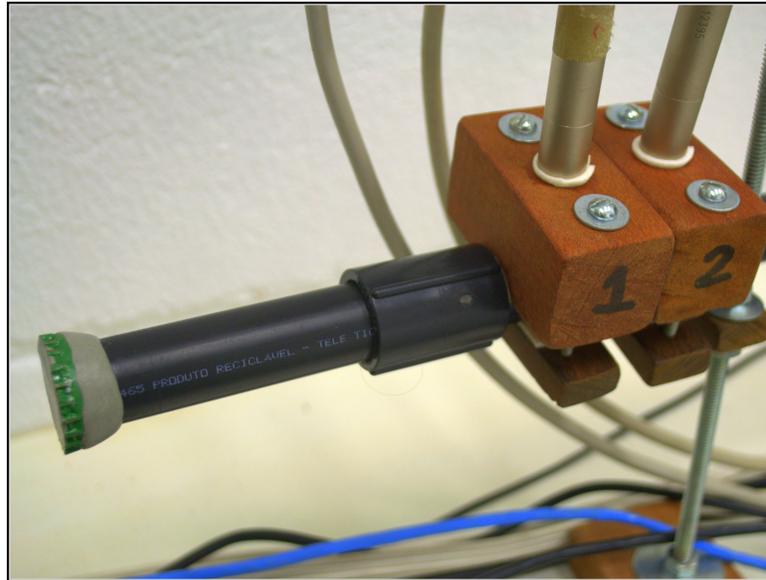


Figura 4.8: Foto da conexão entre uma das cavidades de referência e a cabeça de impedância.

Por fim, existe a conexão entre os pífanos e a cabeça de impedância. Ao contrário das cavidades de referência, cujo orifício da extremidade aberta é um corte transversal no duto, os pífanos são constituídos de orifícios de embocadura (por onde deve ocorrer a conexão) longitudinais, como mostra a Figura 2.1. Com isso, garantindo o isolamento acústico pelo uso de borrachas e pressão por parafusos, foi construído um mecanismo de conexão que suporta pífanos de diferentes diâmetros (ajustável). A Figura 4.9 mostra algumas fotos do mecanismo.

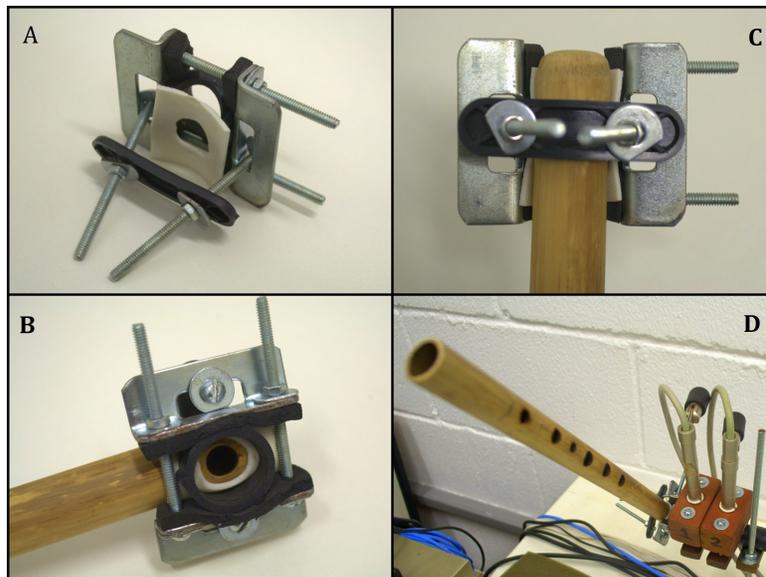


Figura 4.9: Fotos do mecanismo de conexão entre o pífano e a cabeça de impedância: (a) Visão geral; (b) e (c) Mecanismo conectado à um pífano; (d) Pífano conectado à cabeça de impedância.

### 4.3.2 Enclausuramento da Fonte e Casamento de Diâmetros

O alto-falante, alimentando por sinais devidamente amplificados, deve ser enclausurado para que as ondas emitidas por sua parte anterior não interfiram nos sinais a serem adquiridos pelos microfones. Além disso, como o diâmetro do alto-falante é menor que o do duto que compõe a cabeça de impedância, para uma melhor conexão entre os sistemas utiliza-se o denominado *matching cone*, que torna gradual a mudança entre as geometrias. Deve-se também cuidar para que possíveis ressonâncias criadas na cavidade do enclausuramento (caixa acústica) não produzam pressões sonoras de nível dependente da frequência. Pode-se garantir essa restrição atenuando moderadamente o nível de pressão sonora na cabeça de impedância.

A construção do enclausuramento foi dividida em duas caixas: uma voltada para o alto-falante e outra voltada para o *matching cone*. A Figura 4.10a mostra a foto dessa construção, onde já se pode notar os parafusos cuja função é pressionar as tampas das caixas e uma caixa à outra. Para aumentar a capacidade de isolamento acústico, foi utilizada borracha entre as estruturas móveis, que são comprimidas pelo aperto dos parafusos. As outras paredes das caixas foram aparafusadas, coladas

e vedadas com resina epóxi e massa de calafetar madeira, também para garantir um bom isolamento. As paredes são constituídas de madeira compensada, adquiridas em depósitos de reciclagem. Na parte traseira da caixa referente ao alto-falante foi inserido um painel para saída da fiação que transmite os sinais, detalhe mostrado na foto da Figura 4.10b.

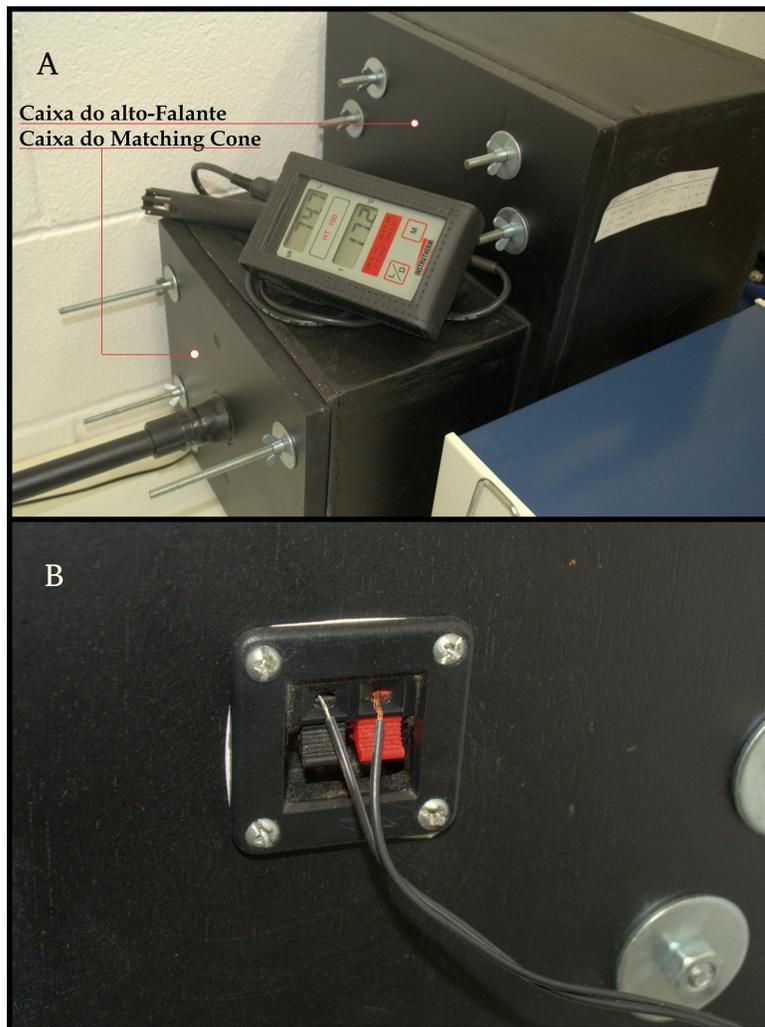


Figura 4.10: Fotos das caixas acústicas: (a) Visão geral, com legenda e vista para o termômetro utilizado; (b) Detalhe do painel para saída da fiação.

A Figura 4.11 mostra a foto do interior da caixa acústica voltada para o alto-falante, na qual pode-se notar o emborrachamento aplicado para vedar as entre-partes.



Figura 4.11: Foto do interior da caixa acústica voltada para o alto-falante, com vista para a borracha que veda as entre-partes.

O *matching cone* foi construído utilizando como base um funil de plástico, na extremidade do qual foi montado de maneira devidamente vedada um conector que serve de encaixe para a cabeça de impedância. Com isso, o cone fica preso à tampa da caixa. A outra extremidade é apoiada ao fundo da caixa (que também é a tampa da caixa do alto-falante), onde foi colada uma folha de borracha. Ao se pressionar as caixas, o cone fica vedado. Com esses detalhes, garante-se que as ondas sonoras propaguem direto do alto-falante para a cabeça de impedância, sem interferência significativa do ruído externo ao sistema.

A Figura 4.12 mostra as fotos do interior da caixa acústica voltada para o cone, com detalhe da

folha de borracha que veda o sistema.



Figura 4.12: Fotos da caixa acústica voltada para o cone: (a) Visão geral; (b) Detalhe da folha de borracha que veda o sistema.

A Figura 4.13 mostra a foto do *matching cone*, que é conectado à tampa da caixa acústica.

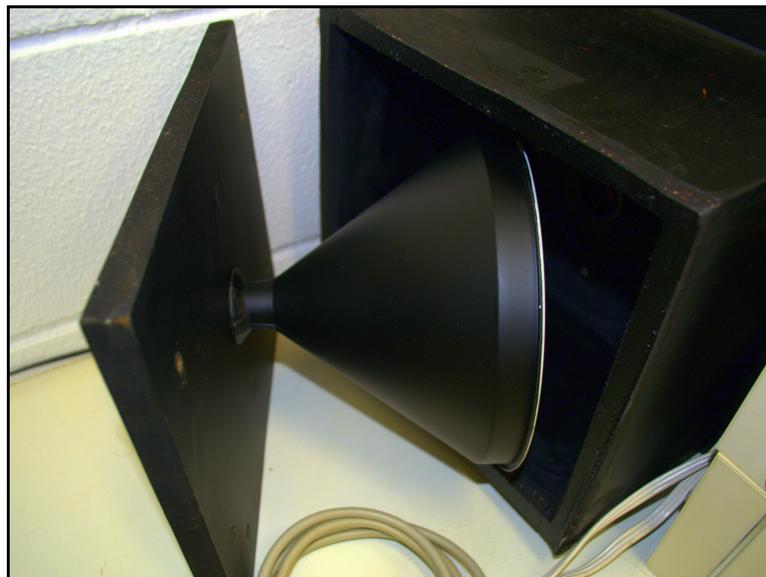


Figura 4.13: Foto do *matching cone* preso à tampa da caixa acústica.

### 4.3.3 Sistema de Aquisição de Dados

#### Microfones

Gibiat and Laloe (1990) apontam que o ganho dependente da frequência ou a diferença entre os ganhos dos microfones não acarretam erros. As únicas exigências para os mesmos são a linearidade (baixa distorção do sinal) e a reprodutibilidade (invariância da resposta em diferentes medidas). Os microfones são conectados ao campo acústico do interior da cabeça de impedância através de pequenos furos, de modo que o sistema representa um ressonador de Helmholtz de alta frequência. As amplitudes dependentes da frequência e os problemas de fase que implicam do ressonador são corrigidos pelo método.

Para este trabalho, foram resgatados antigos microfones, juntamente com os respectivos pré-amplificadores e analisadores, pertencentes ao Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF). O sistema da fabricante *MESSELEKTRONIK* foi desenvolvido para medições acústicas de alta-precisão, ficando garantidas as únicas exigências do método (linearidade e reprodutibilidade). As cápsulas da série *MK 202* (de 1/2") funcionam conectadas aos pré-amplificadores da série *MV 201*. Devido ao padrão não usual dos conectores desses pré-amplificadores, fez-se necessário o uso de analisadores das séries *ROBOTRON 00 023* e *ROBOTRON 00 017*. Apesar de tais analisadores apresentarem diversas opções de controle dos sinais, foram utilizadas apenas suas saídas, cujos conectores do tipo BNC são mais comuns e de fácil acesso. A Figura 4.14 mostra a foto dos analisadores.



Figura 4.14: Foto dos analisadores utilizados para conectar os microfones à interface de áudio.

### Interface de Áudio e Software

O sistema de aquisição deve contar com uma interface analógico/digital. Assim, o sinal que alimenta o alto-falante e os sinais que são captados pelos microfones podem ser manipulados e analisados em um microcomputador.

Existem diversos *softwares* que podem ser usados para esse tipo de experimentação. O sinal a ser gerado deve ser de varredura, percorrendo crescente ou decrescentemente as bandas na faixa de frequência escolhida. A esse tipo de sinal dá-se o nome de *chirp*. O *software* (ou conjunto de *softwares*) deve então armazenar a resposta desse sinal obtida pelos microfones, efetuar a transformada de *Fourier* com o auxílio de um algoritmo de *FFT* (*Fast Fourier Transform*), computar com os dados adquiridos os valores de  $\tau$ ,  $Z'$  e  $Z''$  e plotar gráficos de  $|Z|$  em função da frequência, além de fornecer informações de fase.

Durante uma breve pesquisa sobre *softwares* destinados à análise de sinais de áudio, foi descoberto o *software* livre MATAA ((Brennwald, 2007), (Brennwald, 2011)), ferramenta desenvolvida para ser usada concomitantemente ao também *software* livre de computação numérica GNU Octave. Por ser capaz de executar todas funções exigidas pelo método TMTC, e por ser um *software* livre munido de código aberto e editável, o par MATAA-Octave foi adotado para a pesquisa.

Para as medições, os *chirps* utilizados emitem exponencial e linearmente a faixa de frequência de 50 a 2500Hz ao longo de 0,5s, como sugerido por Gibiat and Laloe (1990). A escolha da faixa de frequência se baseou no alcance prático de um pífano padrão G (aproximadamente 390 – 2350Hz). A taxa de amostragem utilizada foi de 44,1kHz. Detalhes da programação desenvolvida para a aquisição e manipulação dos sinais encontram-se no Apêndice A.

Para os cálculos de  $Z'$  e  $Z''$  foi elaborado um programa direto, utilizando apenas o GNU Octave, cujas entradas basearam-se nas informações do modelo de Caussé et al. (1983). Além disso, o próprio GNU Octave é constituído de ferramentas que possibilitaram a construção dos gráficos necessários.

Apesar de existirem meios de execução em outros sistemas operacionais, o par MATAA-Octave apresenta melhor desempenho em microcomputadores dotados de sistemas linux. No presente trabalho foi utilizada a versão 12.10 do sistema UBUNTU. Essa escolha restringiu a escolha da interface de áudio, já que nem todos fabricantes oferecem produtos compatíveis com sistemas linux. Além dessa restrição, a escolha da placa baseou-se na necessidade de no mínimo dois canais de entrada em linha, um canal de saída pré-amplificado, comunicação com o micro-computador via USB, resolução de no mínimo 12bits e taxa de amostragem de no mínimo 10kHz. Dentre as possibilidades, devido à acessibilidade e recomendações, optou-se pela interface *MobilePre* da fabricante *M-AUDIO*, com quatro canais de entrada (sendo dois pré-amplificados), dois canais de saída, resolução de 24bits e taxa de amostragem de 48kHz.

Apesar dos canais de saída da interface serem pré-amplificados, a intensidade de amplificação não é suficiente para excitar devidamente o alto-falante utilizado. Por isso foi utilizado um amplificador de sinais do laboratório, da fabricante GRADIENTE, modelo *DS – 40*. O alto-falante utilizado foi o da fabricante N.A.R, modelo *RX50.01*, diâmetro de 5,25”, coaxial, com potência de 50W, impedância elétrica de entrada de 4Ω e duas vias (*twitter* e *subwoofer*). Todo o cabeamento, tirando os próprios dos microfones, foi confeccionado no laboratório. Foram utilizados conectores e cabos de alta-qualidade.

A Figura 4.15 mostra as fotos da visão geral do aparato experimental.

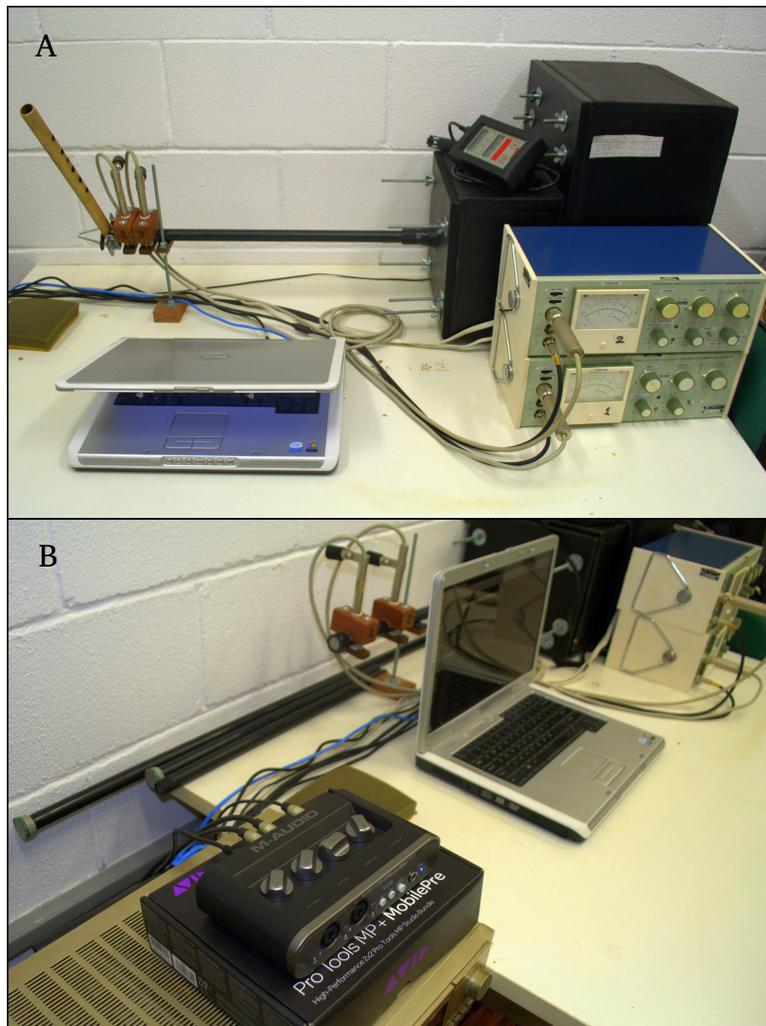


Figura 4.15: Fotos da visão geral do aparato: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral, com detalhe da interface e o amplificador de áudio utilizados.

## 4.4 Características do Objeto de Estudo (Pífano)

Como aplicação do medidor de impedância, escolheu-se como objeto de estudo os pífanos. Para a análise das impedâncias obtidas experimentalmente com os instrumentos, serão considerados alguns dos fenômenos acústicos que interferem na prática musical. Portanto, faz-se necessário introduzir alguns termos e padrões que não são usuais na linguagem científica.

Os pífanos estudados foram confeccionados para atuar na escala maior. As frequências de cada nota dessa escala obedecem o "temperamento igual", e podem ser consultadas na Tabela B.1 do Apên-

dice  $B$ . Nesta seção, é utilizada a expressão "padronizada" para tratar dessas frequências. Foram feitas medidas com três variações do pífano, e eles são aqui denominados de acordo com a respectiva afinação:  $D$ ,  $G$  ou  $A$ . São utilizados também os símbolos  $X$  e  $O$  para indicar a condição do orifício tonal: fechado ou aberto, respectivamente - sendo que a concatenação desses símbolos determinam a condição da digitação.

Para exemplificar, toma-se o caso do pífano afinado em  $G$ . A nota mais grave que pode ser excitada com esse pífano é a  $G_4$ , cuja frequência padronizada, de acordo com a Tabela B.1, equivale a  $392,00Hz$ . Essa nota é a fundamental produzida com todos orifícios tonais fechados, cuja digitação é representada por  $XXXXXX$ . Abrindo-se o primeiro orifício tonal (contando à partir da extremidade oposta à embocadura), cuja digitação é representada por  $OXXXXX$ , pode-se produzir a segunda nota da escala maior, a fundamental  $A_4$ , cuja frequência padronizada equivale a  $440,00Hz$ . Segue-se até a digitação com todos orifícios tonais abertos,  $OOOOOO$ , cuja nota fundamental,  $F_5$ , possui frequência padronizada em  $698,46Hz$ . Cada uma das digitações da sequência entre  $XXXXXX$  e  $OOOOOO$ , cujos orifícios tonais são abertos um a um, é denominada "direta".

## 4.5 Procedimento

Com o aparato montado, pôde-se dar início às etapas de medição, que compreenderam a validação e a aplicação do medidor. Em ambas etapas, a medição foi iniciada com a calibração do sistema, momento no qual foram obtidos os coeficientes de calibração  $A$ ,  $B$  e  $\tau_0$ .

A validação foi feita através de medições com cavidades cujas impedâncias são conhecidas (calculadas teoricamente). Uma análise comparativa entre os valores medidos e calculados forneceu as informações necessárias para concluir se o aparato estava ou não apto à aplicação almejada: aquisição das impedâncias do objeto de estudo, o pífano. Esse procedimento teve de ser repetido até que todos os problemas que surgiram, cujas naturezas foram diversas (mecânica, elétrica e computacional) fossem sanados.

## Aquisição da Impedância

Descreve-se aqui as etapas da aquisição de cada impedância. Primeiramente, os microfones foram posicionados de acordo com o requerido pela faixa de frequência a ser medida, conforme a Tabela 4.1. Ou seja, foi instalada a cabeça de impedância com os orifícios de conexão de microfones nas posições pertinentes. Feito isso, iniciou-se o processo de calibração com a medição da impedância infinita, simulada pelo uso de um material rígido fechando a cabeça de impedância no plano de referência. Essa medição retornou o espectro do coeficiente  $\tau_0$ .

O procedimento seguinte baseou-se na aquisição dos coeficientes remanescentes,  $A$  e  $B$ . Para isso, foram obtidos os valores de  $\tau'$ ,  $\tau''$ ,  $Z'$  e  $Z''$ . Os valores de  $\tau'$  e  $\tau''$  (relações entre os sinais adquiridos pelos microfones) foram adquiridos pela medição com as cavidades de referência, que foram também conectadas, uma a uma, à cabeça de impedância no plano de referência. Os valores de  $Z'$  e  $Z''$  são as impedâncias de tais cavidades calculadas teoricamente.

Para dar-se início às medidas finais (aplicação do medidor), acoplou-se à cabeça de impedância os objetos de estudo. A relação entre os sinais dos microfones retornou os valores de  $\tau$  que são usados para o cálculo da impedância final.

Esse procedimento se repetiu para a medição com cada objeto e para cada faixa de frequência. Especificamente para os pífanos, esse procedimento se repetiu para cada digitação selecionada, sendo que as medições com o pífano padrão G contaram com a ajuda de um músico profissional do instrumento, que auxiliou na execução de digitações.

# Capítulo 5

## Resultados e Discussão

### 5.1 Validação

A validação do medidor foi feita através da aquisição das impedâncias de dutos cilíndricos de 0,5 e 1,0m, constituídos pelo mesmo tipo de eletroduto utilizado para a confecção das cabeças de impedância e para as cavidades de referência (PVC, 2mm de espessura e 17mm de diâmetro interno). Os resultados foram comparados com as impedâncias calculadas teoricamente. As curvas de impedância foram plotados em escala logarítmica, e foram utilizados para tal os valores normalizados (adimensionais),  $Z/(\rho_0 c)$ .

#### 5.1.1 Duto cilíndrico de 0,5m

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram as impedâncias téorica e experimental normalizadas, obtidas com o duto de 0,5m, para as faixas de frequência de 50 – 200, 200 – 800 e 800 – 2500Hz, respectivamente.

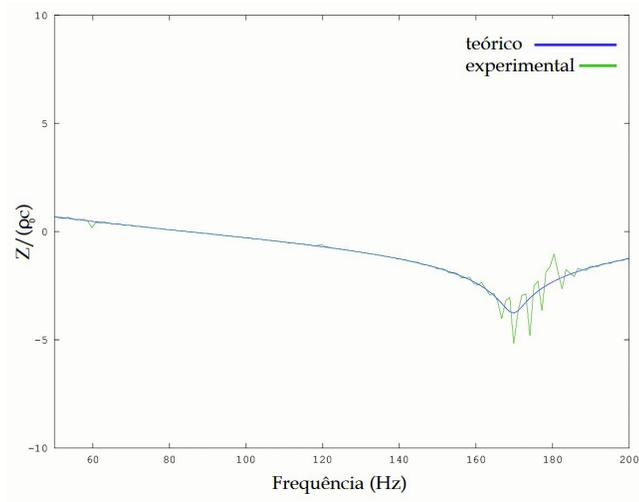


Figura 5.1: Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de 0,5m, na faixa de 50 a 200Hz.

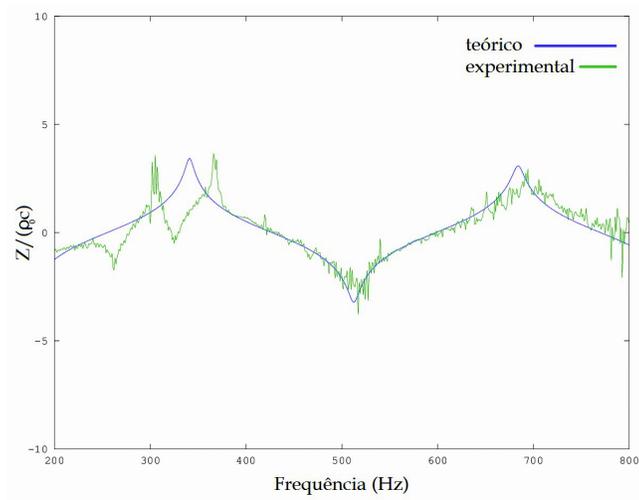


Figura 5.2: Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de 0,5m, na faixa de 200 a 800Hz.

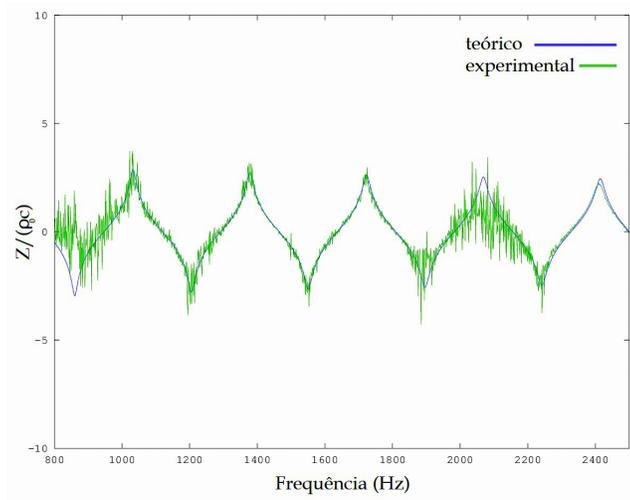


Figura 5.3: Impedâncias teórica e experimental obtidas com o duto de  $0,5m$ , na faixa de  $800$  a  $2500Hz$ .

Nota-se que as curvas teórica e experimental se assemelham, tanto no formato geral quanto nas frequências e amplitudes dos mínimos e máximos, para toda a faixa do espectro analisada, sinal de que o aparato atende os quesitos de uma análise ao menos qualitativa da impedância acústica dos objetos sob estudo. Os mínimos e máximos do espectro se apresentam bem definidos para a maior parte das frequências, e essa informação é a mais importante para a investigação objetiva da acústica dos pífanos. Isso não exclui a necessidade de uma reflexão acerca dos possíveis fenômenos que implicam na incongruência entre as curvas em determinados pontos do espectro, principalmente no pico entre  $200$  e  $500Hz$ . Para isso, analisa-se também os resultados obtidos com o duto cilíndrico de  $1,0m$ .

### 5.1.2 Duto cilíndrico de $1,0m$

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as impedâncias teórica e experimental normalizadas, obtidas com o duto de  $1,0m$ , para as faixas de frequência de  $50 - 200$ ,  $200 - 800$  e  $800 - 2500Hz$ , respectivamente.

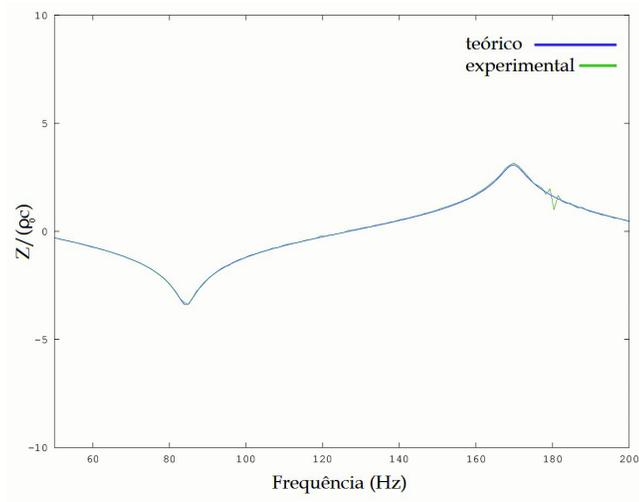


Figura 5.4: Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de 1,0m, na faixa de 50 a 200Hz.

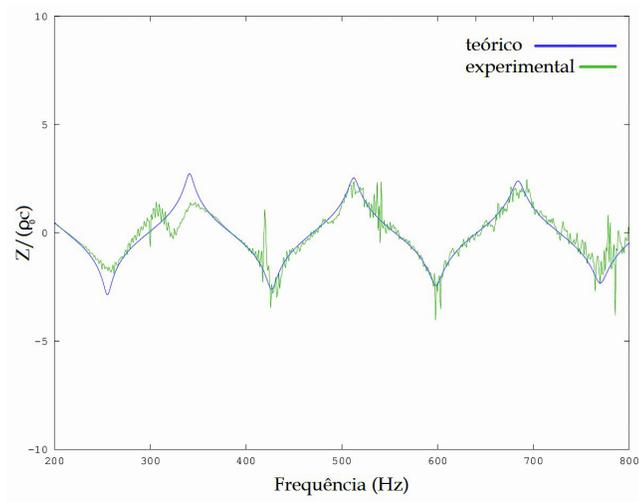


Figura 5.5: Impedâncias téorica e experimental obtidas com o duto de 1,0m, na faixa de 200 a 800Hz.

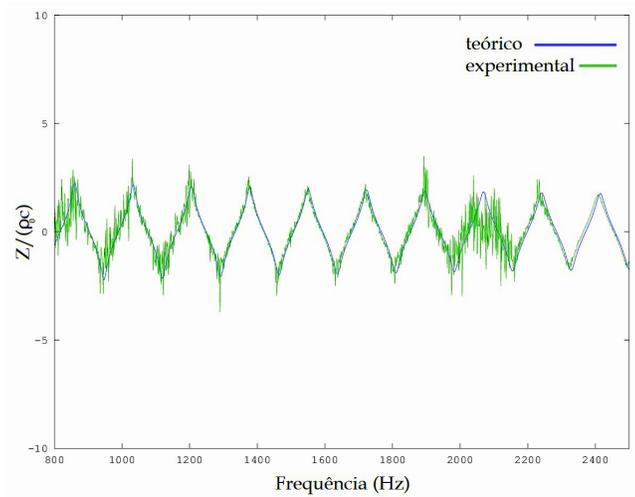


Figura 5.6: Impedâncias teórica e experimental obtidas com o duto de 1,0m, na faixa de 800 a 2500Hz.

Nota-se que para esse caso, em comparação aos resultados com o duto de 0,5m, a qualidade das curvas experimentais foi mantida. Mantiveram se também incongruências entre curvas em algumas frequências, fato facilmente notado nas regiões de 180, 340, 900 e 2100Hz, mas não suficiente para se excluir a possibilidade de alguma influência dos objetos estudados. Com isso, torna-se conveniente a análise dos gráficos comparativos entre as curvas teórica e experimental do coeficiente  $\tau_0$ , que é a relação entre os sinais dos microfones quando a cabeça de impedância é fechada no plano de referência. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os espectros teórico e experimental de  $\tau_0$  para os dois pares de configuração entre microfones.

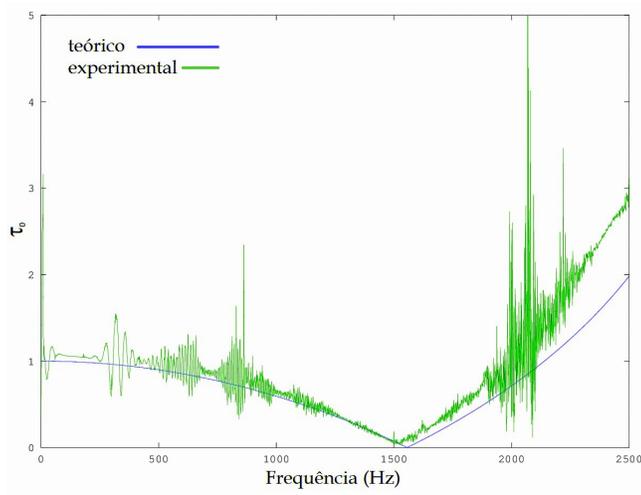


Figura 5.7: Espectros teórico e experimental do coeficiente  $\tau_0$  para  $L_1 = 2,5\text{cm}$  e  $L_2 = 5,5\text{cm}$ .

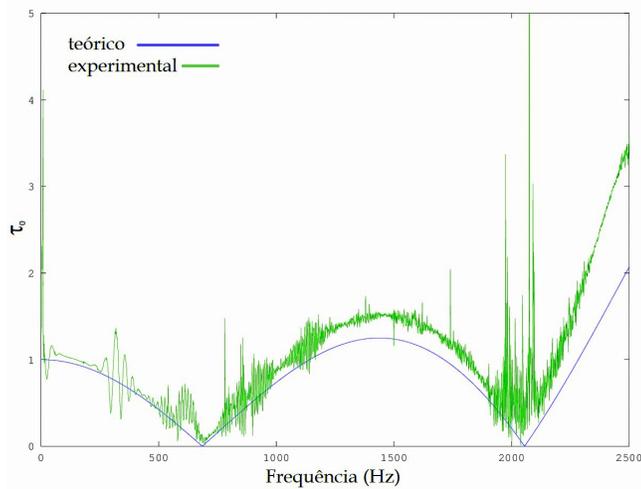


Figura 5.8: Espectros teórico e experimental do coeficiente  $\tau_0$  para  $L_1 = 2,5\text{cm}$  e  $L_2 = 12,5\text{cm}$ .

Nota-se que apesar de equivalerem na forma geral, as curvas teórica e experimental de  $\tau_0$  apresentam diferenças nas amplitudes. Isso provavelmente ocorre pois as curvas teóricas foram calculadas através da Equação 4.16, que descreve o caso ideal onde perdas visco-termais não são contabilizadas. Além disso, e mais importante, o comportamento ruidoso em algumas regiões do espectro verificado com as cavidades é mantido.

Dentre as possíveis fontes de erro do método apontadas por Gibiat and Laloe (1990), julga-se que as únicas que podem contribuir para tal comportamento estão relacionadas com as ressonâncias da caixa acústica (caixa enclausuradora do alto-falante) e com os modos de vibração estrutural da cabeça de impedância.

As ressonâncias da caixa acústica tem potencial para criar pressões sonoras com níveis dependentes da frequência no interior da cabeça de impedância. Gibiat and Laloe (1990) sugerem o uso de algum tipo de espuma que, posicionada entre o alto-falante e os microfones, funciona como um atenuador e diminui os efeitos indesejáveis do fenômeno. Tal artifício foi testado nesta montagem, porém as tentativas culminaram ou em sinais demasiadamente fracos para a sensibilidade dos microfones, ou em resultados iguais aos que foram obtidos com a ausência do atenuador. Ou seja, o controle da atenuação não permitiu a obtenção de sinais expressivos e independentes da frequência. Uma das sugestões de continuidade do trabalho refere-se a aplicação de outras tentativas de controle, como o tratamento acústico na própria caixa. Testes acerca da resposta em frequência do alto-falante podem guiar as tentativas de controle.

Por outro lado, para evitar que os modos naturais de vibração estrutural da cabeça de impedância interfiram nos resultados, Gibiat and Laloe (1990) sugerem o uso de materiais rígidos e espessos. A princípio, julga-se que o PVC constituinte do eletroduto utilizado é apto para a finalidade. Essa hipótese (ou seja, atribuir os erros ou parte deles aos fenômenos provocados pela vibração da cabeça de impedância) só poderia ser testada com a troca do material utilizado, o que implicaria em uma mudança quase completa na construção do aparato. A aplicação desse procedimento e a análise de outras alternativas de atenuação da vibração estrutural, como o uso de materiais visco-elásticos na união da caixa com a cabeça de impedância, formam outras sugestões de continuidade do trabalho. Estas também podem ser guiadas por testes acerca da resposta em frequência do alto-falante.

Conclui-se que tais discrepâncias entre os resultados teórico e experimental podem ter origem em ambos os fenômenos discutidos, concomitantemente ou individualmente. Esses problemas devem ser sanados quando resultados mais precisos são almejados, porém eles não inviabilizam análises, no mínimo qualitativas, das impedâncias adquiridas. As informações adquiridas nesta etapa de validação formam uma base fundamental para a análise dos resultados obtidos com os pífanos.

## 5.2 Medidas com Pífanos

A Figura 5.9 mostra a foto com os três pífanos utilizados nas medições, com legenda para as respectivas afinações.



Figura 5.9: Foto dos três pífanos utilizados nas medições, com legenda para as respectivas afinações.

Apesar da riqueza de fenômenos que governam o comportamento acústico dos pífanos, nessa seção serão discutidos apenas aqueles passíveis de análise perante as impedâncias medidas. Com isso, verificar-se-á a capacidade investigatória do aparato experimental e do método empregado. Aqui também as curvas de impedância foram plotados em escala logarítmica, e foram utilizados para tal os valores normalizados (adimensionais),  $Z/(\rho_0 c)$ .

### 5.2.1 Pífano afinado em $G$

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os resultados da medição da impedância com o pífano afinado em  $G$ , com todos os orifícios tonais fechados (XXXXXX), relativos às faixas  $200 - 800\text{Hz}$  e  $800 - 2500\text{Hz}$ , respectivamente.

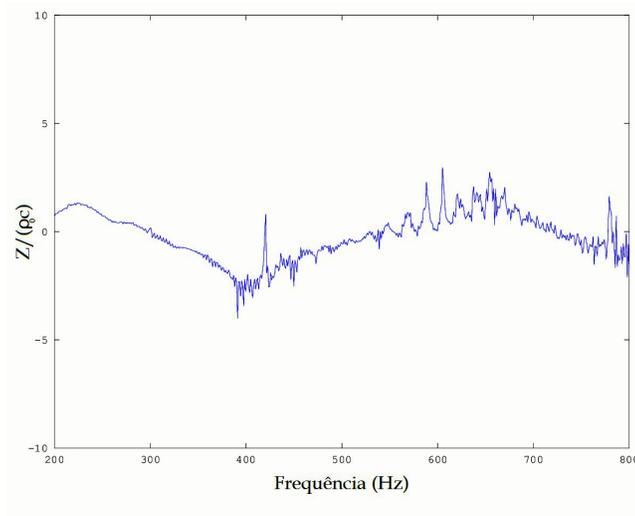


Figura 5.10: Impedância obtida com o pífano afinado em  $G$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 200 a 800Hz.

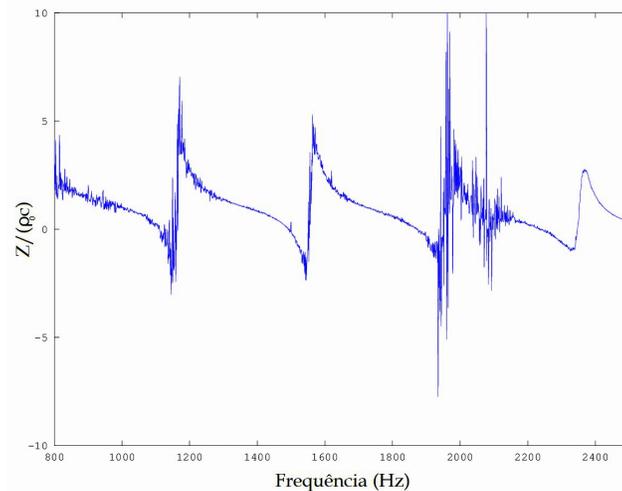


Figura 5.11: Impedância obtida com o pífano afinado em  $G$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 800 a 2500Hz.

Nota-se que mesmo com as perturbações indesejadas, os resultados experimentais trazem informações sobre os mínimos dos espectros, que são as regiões de atuação do pífano. Na Figura 5.10 pode-se notar mínimos nas regiões de 400 e 800Hz. Já na Figura 5.11 nota-se mínimos próximos de 1200, 1600, 2000 e 2400Hz. Na prática musical, esses mínimos representam quais notas (harmônicos)

podem ser produzidas ao se excitar o pífano na referida digitação.

Exemplificando com o caso em questão, para excitar a nota referente ao primeiro mínimo do espectro da Figura 5.10 (fundamental -  $G_4$ ), a interação jato-embocadura-ressonador deve produzir uma frequência próxima de  $400Hz$ . Alterando as características do jato (velocidade, direção e espessura) sem mudar a digitação, o músico é capaz de excitar a nota referente ao segundo mínimo do espectro (segundo harmônico -  $G_5$ ). Esse fenômeno segue sucessivamente para todos os mínimos do espectro, sendo que na prática o limite depende das características do instrumento e da ação do músico.

Vale lembrar que quando uma frequência é excitada, os outros harmônicos também o são, porém com intensidades menores. A resposta do instrumento às excitações suaves tem caráter próximo do puramente senoidal, no qual a intensidade do primeiro harmônico predomina fortemente sobre as intensidades dos próximos, que no caso são desprezíveis. Para excitações mais fortes, as intensidades dos próximos harmônicos passam a ser expressivas, e a resposta se distancia da característica puramente senoidal. Curvas de impedância, porém, não trazem esse tipo de informação, já que as medições são objetivas: independem das características da excitação.

A Equação 2.13 prediz quais são as frequências de ressonância possíveis para um duto aberto-aberto e de espessura nula, dependendo do seu comprimento e seu raio interno. Essa equação, que conta com a correção de terminação, é válida apenas para o limite de baixas frequências ( $ka \ll 1$ ). Porém, para  $2500Hz$  (limite do espectro analisado),  $ka \cong 0,40$ . Analisando o gráfico da Figura 2.4, nota-se que para esse valor, a correção  $\Delta/a$  é muito próxima de 0,6. Ou seja, em toda faixa do espectro analisada, a Equação 2.13 deve retornar valores relativamente precisos para as frequências de ressonância de um duto aberto-aberto e de espessura nula. Compara-se agora as predições da equação com os resultados experimentais. O instrumento apresenta um comprimento de aproximadamente  $384mm$ , medidos da metade do orifício de embocadura até a extremidade final. Seu diâmetro interno é de aproximadamente  $20mm$ . Com esses valores, sabendo que  $\omega = 2\pi f$  e utilizando  $c = 344m/s$ , a Equação 2.13 retorna, para  $n = 1$  (frequência fundamental ou primeiro harmônico), uma frequência de aproximadamente  $441Hz$ . Esse valor é consideravelmente distante dos  $400Hz$  referentes ao primeiro mínimo do espectro medido. De fato, segundo a Tabela B.1, os  $441Hz$  estão mais próximas da nota  $A_4$  ( $440Hz$ ), um tom acima da nota relativa à frequência medida. Sabe-se que esse desvio não tem origem na correção de terminação, pois para  $400Hz$ ,  $ka \cong 0,07 \ll 1$ . Porém, em instrumentos como a flauta e

o pífano, além de apresentarem espessura (diferentes valores de correção  $\Delta$ ), a abertura da extremidade inicial é constituída pelo orifício de embocadura, sendo que existe um espaço entre tal orifício e a real terminação do instrumento, que é fechada. O comportamento acústico resultante dessa configuração faz com que haja uma correção de tamanho também na extremidade inicial, como ilustrado pela Figura 2.5. Portanto, a Equação 2.13 descreve bem o comportamento das ressonâncias do pífano desde que seja levada em consideração as correções adequadas ou que seja tomado um valor de frequência como referência. Essa constatação vale, porém, apenas para digitações com todos orifícios tonais fechados. Como discutido na fundamentação teórica, a abertura de tais orifícios implica em outra correção, que será analisada com o pífano afinado em  $D$ .

Perante às ressonâncias, o comportamento do ar presente no espaço entre o orifício de embocadura e a extremidade fechada do pífano implica ainda em outros fenômenos<sup>1</sup> que ditam a qualidade acústica do instrumento. Esses fenômenos, porém, possuem respostas em frequências acima do limite analisado, fato que inviabiliza concluir se o aparato e o método são ferramentas capazes de investigá-los.

Na execução musical, o controle das características de embocadura permite ao músico também variar em unidades ou até dezenas as frequências excitadas, ação bastante usada na afinação de instrumentos de sopro. Para isso, o músico varia a posição da boca perante a embocadura, fator que altera a impedância de radiação e, conseqüentemente, o comprimento efetivo do duto e as frequências de ressonância. Portanto e objetivamente, um instrumento pode apresentar uma impedância cujos mínimos não são exatamente os valores padronizados, e mesmo assim ser praticável perante à escala musical pretendida. Deve-se se atentar, porém, que para um pífano afinado em  $G$ , contando apenas as digitações diretas, a distância entre os dois tons mais graves corresponde à  $48Hz$  ( $G_4$  e  $A_4$ ), e entre os dois tons mais agudos à  $256,32Hz$  ( $C_7$  e  $D_7$ ). Essas distâncias, extraídas dos valores padronizados da Tabela B.1, podem ser verificadas através dos gráficos das Figuras 5.10 e 5.11. Generalizando, a análise da impedância deve levar em consideração que, tratando da qualidade musical, diferenças na região dos graves são mais expressivas do que as mesmas diferenças na região do agudos.

---

<sup>1</sup>Informações detalhadas acerca desses fenômenos, analisados para a flauta transversal, podem ser encontradas no trabalho de Wolfe et al. (2003)

### 5.2.2 Pífano afinado em $D$

A Figura 5.12 mostra os resultados da medição com o pífano afinado em  $D$ , com todos os orifícios tonais fechados, relativo à faixa de 200 a 800 $Hz$ .

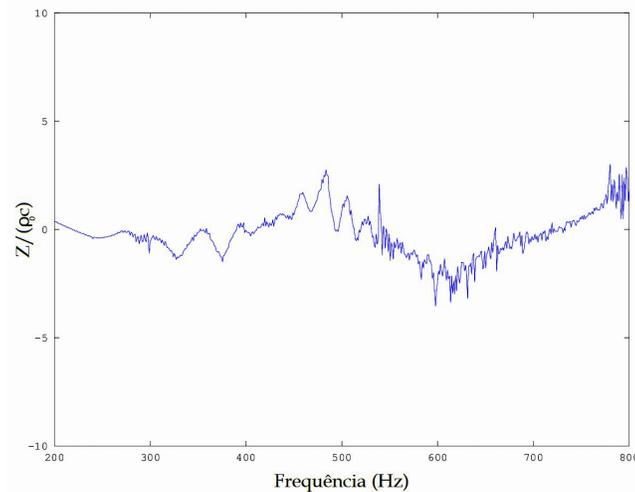


Figura 5.12: Impedância obtida com o pífano afinado em  $D$ , para todos os orifícios tonais fechados, medida na faixa de 200 a 800 $Hz$ .

Tal instrumento foi confeccionado para que, com todos orifícios tonais fechados, fosse possível excitar a frequência relativa ao  $D_4$ , que é a fundamental padronizada em 293,66 $Hz$ . Porém, analisando o gráfico da Figura 5.12, nota-se que o mínimo nessa região do espectro é pouco expressivo. O mínimo mais expressivo se encontra na região de 600 $Hz$ . Indagando-se a um músico profissional a respeito da "tocabilidade" do instrumento, concluiu-se que, para a digitação em questão, o segundo harmônico (padronizado em 587,33 $Hz$ ) é mais fácil de se excitar do que a própria fundamental. De fato, a teoria acústica prediz que frequências relacionadas a mínimos mais expressivos caracterizam maior facilidade de execução do que frequências relacionadas a mínimos menos expressivos, porém o ruído na referida região do espectro medido não permite a certeza dessa comparação. Ainda para o instrumento em questão, a diferença entre a região do espectro referente ao mínimo do segundo harmônico (um pouco acima de 600 $Hz$ ) e a respectiva frequência padronizada (587,33 $Hz$ ) é considerável, tendo em vista que saltos de 30 $Hz$  nessa região do espectro representam variações de semitons (salto em frequência entre uma nota e sua vizinha). Isso exige correções agudas na embocadura, por

parte do músico, para se atingir a nota padronizada.

Conclui-se que esse instrumento não é uma opção para aplicações em que se espera facilidade de execução dos graves e maior fidelidade às frequências padronizadas. Isso não implica em considerá-lo de baixa qualidade, já que, mesmo apresentando respostas com frequências fora do padrão de temperamento proposto na Tabela B.1, pode-se com ele produzir melodias. Essa porém é uma questão subjetiva da estética e prática musicais, e não cabe ser discutida neste trabalho.

Até aqui foram feitas análises das respostas de pífanos com todos orifícios tonais fechados. A abertura desses orifícios, porém, implica em um importante fenômeno da acústica de dutos. Os gráficos das Figuras 5.13 e 5.14 mostram as impedâncias medidas com o pífano afinado em  $D$ , para a digitação  $OXXXXX$ , nas faixas de  $200 - 800Hz$  e  $800 - 2500Hz$ , respectivamente.

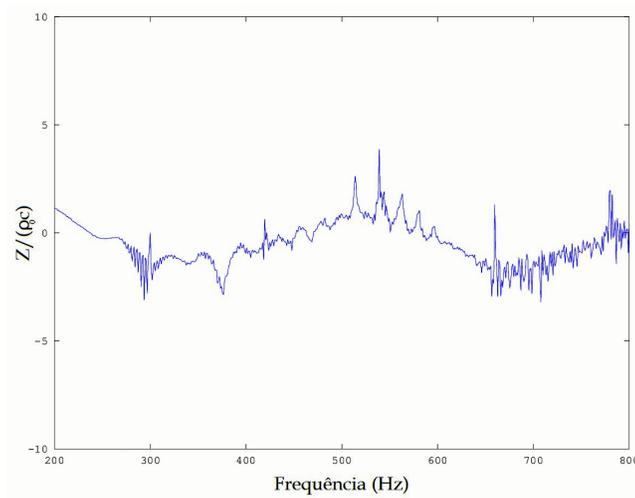


Figura 5.13: Impedância obtida com o pífano afinado em  $D$ , para a digitação  $OXXXXX$ , medida na faixa de 200 a  $800Hz$ .

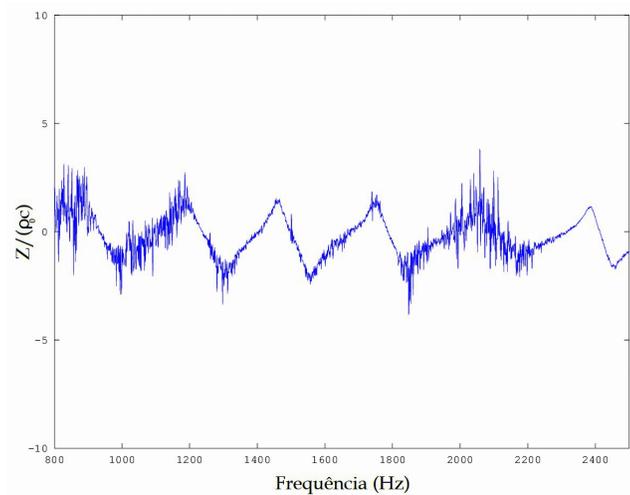


Figura 5.14: Impedância obtida com o pífano afinado em  $D$ , para a digitação  $OXXXXX$ , medida na faixa de 800 a 2500Hz.

Nota-se que novamente o mínimo referente ao primeiro harmônico da digitação (padronizado em  $329,63\text{Hz} - E_4$ ) é menos expressivo do que o referente ao segundo harmônico. De fato, segundo opinião do músico profissional, para a digitação em questão, também o segundo harmônico é mais fácil de se excitar do que a própria fundamental. Apesar disso, o músico percebe que, comparado com a digitação anterior ( $XXXXXX$ ), a fundamental para esse caso é mais fácil de ser excitada. Isso pode ser verificado comparando os gráficos das Figuras 5.12 e 5.14: a acentuação do primeiro mínimo para  $OXXXXX$  é mais expressiva do que para  $XXXXXX$ . Novamente, essas análises não permitem a certeza da comparação devido ao ruído na referente região do espectro.

O mais importante, porém, é o comportamento do gráfico da Figura 5.14: ao contrário do descrito pela Equação 2.13, a distância entre os mínimos varia consideravelmente com a frequência, fenômeno não verificado com a digitação  $XXXXXX$ . Através do gráfico da Figura 5.13, toma-se como base o valor aproximado do segundo mínimo,  $650\text{Hz}$ , já que o primeiro não fornece informações quantitativas aproximadas. Nesse caso, a Equação 2.13 prediz que os mínimos devem corresponder à múltiplos inteiros de  $325\text{Hz}$ , o que implica em harmônicos correspondentes a 975, 1300, 1625, 1950, 2275 e 2600. O que se observa do resultado, porém, são mínimos deslocados cada vez mais para a esquerda desses valores, chegando até a uma diferença de aproximadamente  $150\text{Hz}$ . Isso ocorre pois a impedância de radiação aumenta com o aumento da frequência. Como o aumento da impedância de

radiação implica em um aumento do comprimento efetivo do duto, tem-se que para altas frequências os mínimos do espectro se localizam afastados das frequências previstas pela Equação 2.13.

Vale notar que esse fenômeno é mais expressivo para orifícios menores, nos quais a impedância de radiação é maior. Como visto com o pífano afinado em  $G$  (Figuras 5.10 e 5.11), com a digitação  $XXXXXX$  a radiação ocorre na extremidade final do instrumento, cujo diâmetro é grande o suficiente para que o fenômeno seja desprezado. Ou seja, para aquela configuração, as posições dos mínimos no espectro são bem descritas pela Equação 2.13 (desde que sejam feitas as correções da extremidade inicial efetiva, que por sinal ocorrem, em partes, devido à impedância de radiação no orifício de embocadura). Já para os orifícios tonais, cujos diâmetros são relativamente menores que o diâmetro do duto, o fenômeno é expressivo o suficiente para ser observado nos resultados.

### 5.2.3 Pífano afinado em $A$

Para um pífano afinado em  $A$ , as notas e as respectivas frequências (padronizadas) de cada digitação direta seguem as informações mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Digações diretas e respectivas notas e frequências padronizadas para um pífano afinado em  $A$ .

Nota	Frequência Fundamental (Hz)	Digitação
$A_4$	440,00	XXXXXX
$B_4$	493,88	OXXXXX
$C_{sus5}$	554,37	OOXXXX
$D_5$	587,33	OOOXXX
$E_5$	659,26	OOOOXX
$F_{sus5}$	739,99	OOOOOX
$G_{sus5}$	830,61	OOOOOO

De acordo com a Tabela 5.1, observa-se que o intervalo entre as frequências relativas à  $C_{sus5}$  e  $D_5$ , como era de se esperar, é menor quando comparado com os demais. Espera-se portanto que, contando à partir da extremidade final do instrumento, o terceiro orifício deve ser posicionado mais próximo do segundo, em comparação à distância entre os outros orifícios. Porém, devido aos efeitos

da impedância de radiação, diminuindo o tamanho do terceiro orifício pode-se posicioná-lo mais afastado do segundo sem alterar as características de ressonância. Assim, as distâncias entre todos orifícios se tornam equivalentes, o que facilita a execução do instrumento. Esse artifício é de fato utilizado na construção dos pífanos, e pode ser notado nas fotos das Figuras 2.1 e 5.9. Os gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 mostram as impedâncias obtidas com mesmo pífano, na faixa de 800 a 2500Hz, para as digitações *OOXXXX* e *OOOXXX*, respectivamente.

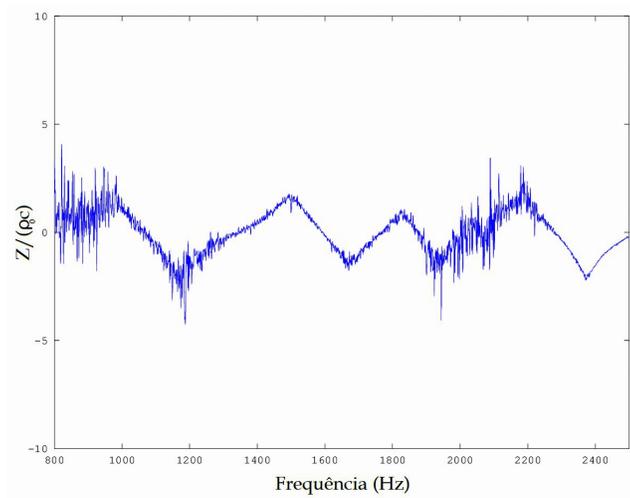


Figura 5.15: Impedância obtida com o pífano afinado em *A*, para a digitação *OOXXXX*, medida na faixa de 800 a 2500Hz.

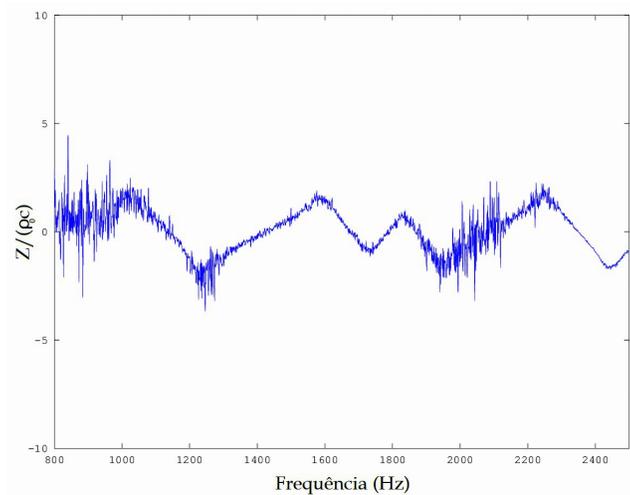


Figura 5.16: Impedância obtida com o pífano afinado em *A*, para a digitação *OOOXXX*, medida na faixa de 800 a 2500Hz.

Pode-se notar pelos espectros que a abertura do terceiro orifício tonal desloca os mínimos para a direita, salva a exceção daquele situado entre 1900 e 2000Hz. A posição quase constante de tal mínimo em ambos os gráficos é um fenômeno não esperado, e como ele acontece em uma das regiões de incongruências entre as curvas teórica e experimental, não é possível fazer suposições de suas possíveis causas.

### 5.3 Considerações Finais

As impedâncias obtidas experimentalmente com dutos simples (etapa de validação) condizem com as predições do modelo teórico utilizado (Caussé et al., 1983). As poucas discrepâncias entre os resultados teóricos e experimentais têm origem provável em fenômenos consequentes da geometria do aparato: ressonâncias acústicas das caixas enclausuradoras e ressonâncias mecânicas da cabeça de impedância. Uma das sugestões de continuidade do trabalho refere-se à tentativa de atenuação dessas discrepâncias, testando a hipótese através do controle de tais ressonâncias. Esse procedimento pode ser efetuado com base na resposta em frequência do alto-falante e na análise da parte imaginária das impedâncias, que fornece informações acerca da fase das ondas. Por outro lado, essas discrepâncias não inviabilizaram as medições com pífanos e a análise dos respectivos resultados.

Das impedâncias obtidas com os pífanos, pôde-se investigar diversas características acústicas do instrumento, fato que permitiu qualificá-los diante às expectativas musicais. Os mínimos dos espectros obtidos fornecem informações de quais notas podem ser produzidas em cada digitação, e quão fáceis são as respectivas execuções.

Além de permitir a qualificação dos instrumentos, medidas de impedância possuem potencial para auxiliar no processo confecção desses instrumentos. O simples entendimento dos fenômenos pode orientar o artesão na solução de possíveis problemas da execução do instrumento, e a análise dos espectros permitem guiá-los nas escolhas das medidas estruturais.

É importante atentar-se à algumas diferenças entre as investigações efetuadas neste trabalho e as propostas por Gibiat and Laloe (1990). Os autores utilizaram como um objeto de estudo, além de dutos cilíndricos simples, um clarinete. Além de apresentar um diâmetro interno semelhante ao da cabeça de impedância utilizada, o clarinete é constituído de um orifício de embocadura em corte transversal. Com isso, a mudança geométrica na conexão entre o instrumento e o aparato experimental é suave, o que é importante para manter ao máximo as características de ondas planas. No caso do presente trabalho, como os pífanos apresentam orifício de embocadura situado longitudinalmente no corpo do instrumento, a mudança geométrica é brusca, e as reflexões acústicas que podem ser geradas por essa mudança devem de alguma forma interferir nos resultados experimentais. Gibiat and Laloe (1990) comentam que os problemas das medições com dutos de diâmetros expressivamente diferentes aos da cabeça de impedância são corrigidos pelo método TMTC, desde que às cavidades de referência sejam semelhantes a tais dutos. Porém os autores não comentam sobre a eficácia do método para diferentes tipos de conexão, como o utilizado no presente trabalho. A investigação dos fenômenos acústicos consequentes da conexão aparato-objeto, portanto, é outra sugestão de continuidade do trabalho. Nesse grupo de investigação podem ser inseridas as consequências da distâncias entre os microfones e o plano de referência e entre os microfones e o alto-falante, já que esses transdutores precisam estar posicionados em regiões onde é assegurada a propagação de ondas planas.

Os pífanos, por serem constituídos de bambu, não possuem geometria e textura totalmente axi-simétricas. Na prática, tampouco os instrumentos clássicos possuem essas características, porem esses são confeccionados de modo a apresentarem geometrias e texturas mais bem comportadas. A investigação das consequências dessas características na qualidade dos instrumentos é outro ponto que

pode ser incorporado à pesquisa.

Outras sugestões de continuidade baseiam-se no estudo detalhado dos fenômenos consequentes do ar contido na região anterior à embocadura, dos tamanhos dos orifícios (tonais, de extremidade e de embocadura), do diâmetro interno, da espessura, das digitações cruzadas e das reais correções de comprimento efetivo. Além disso, com a possibilidade de uso de mais microfones e o desenvolvimento de sistemas de conexão que permitam o posicionamento de um microfone à  $1\text{ cm}$  do plano de referência, pode-se adquirir e comparar as impedâncias através de medidas baseadas nos valores de  $\Delta L$  da Tabela 4.2.

Gibiat and Laloe (1990) apontam ainda a possibilidade de outras aplicações do método TMTC, como a obtenção de funções de reflexão e estudos acerca do coeficiente de absorção de materiais. O aparato construído, portanto, pode ser facilmente adaptado para esses outros objetivos, mostrando-se uma ferramenta útil, versátil, de baixo custo e acessível para laboratórios de acústica.

Na etapa de aplicação, foi possível analisar e extrair conclusões científicas acerca dos fenômenos que governam a produção sonora do pífano, além de se apontar benefícios que o tipo de investigação pode proporcionar na sua confecção. A motivação, porém, não partiu de necessidades apresentadas por músicos e artesãos, mas sim de uma curiosidade científica cujos resultados no mínimo agregam na área específica do conhecimento ou nas áreas correlatas. O pífano e toda arte envolvida caminham sem precisar de qualquer suporte vinculado à metodologia científica, principalmente por depender apenas da tradição popular e da estética envolvida.

É conveniente, portanto, discutir o papel da acústica musical, área do conhecimento que foca, entre outros assuntos, no entendimento físico dos instrumentos musicais. Segundo Fletcher and Rossing (1998), séculos de tradição proporcionaram aos artesãos habilidades e conhecimentos profundos acerca dos instrumentos musicais, tornando-os capazes até de dominar detalhes da acústica envolvida que podem passar despercebidos pela instrumentação e conhecimento científicos atuais. Com isso, os autores afirmam que é difícil apontar caminhos na construção de instrumentos musicais a não ser que problemas ou oportunidades sejam identificados pelos artesãos. Os autores por fim concluem que o principal papel da acústica musical é o de entender todos os detalhes do mecanismo de produção sonora dos instrumentos, e ele só será completo quando for possível apontar as causas físicas que distinguem a qualidade dos instrumentos.

# Capítulo 6

## Conclusões

O medidor de impedância construído, referente ao método TMTTC, mostrou-se adequado para a investigação da impedância acústica de dutos cilíndricos simples e complexos. Baseando-se na comparação com valores teóricos, as impedâncias obtidas com os dutos cilíndricos simples foram satisfatórias, validando o procedimento experimental. As impedâncias obtidas com os pífanos forneceram informações significantes, possibilitando a análise de boa parte dos fenômenos acústicos que governam a produção sonora dos instrumentos. As poucas discrepâncias, provavelmente consequentes de fenômenos característicos da montagem experimental, impuseram a necessidade de atenção extra para a análise dos espectros nas respectivas regiões, sendo que em alguns casos impossibilitaram a extração de informações relevantes, sequer qualitativas.

A construção do aparato contou com materiais acessíveis, de baixo custo e de fácil montagem pois as etapas de calibração do método empregado simplificam as exigências técnicas. Foi possível efetuar todas as medições e manipulações de dados utilizando programas elaborados com *softwares* livres. Tais programas, além de serem gratuitos e permitirem a manipulação do código-fonte, são mantidos por uma comunidade que proporciona resoluções rápidas, eficientes e diversificadas para a maioria dos problemas propostos.

A sugestão de continuidade do trabalho baseia-se na possibilidade de atenuação das discrepâncias experimentais, no potencial de investigação de outros fenômenos da acústica dos pífanos por parte do método, e no potencial de outras aplicações por parte do aparato experimental.

# Referências Bibliográficas

- ANDO, Y. On the sound radiation from semi-infinite circular pipe of certain wall thickness. *ACTA Acustica* 22 (1969), 219 – 225.
- BRENNWALD, M. S. Mataa - a free computer-based audio analysis system. *audioXpress* 7 (2007), 36 – 41.
- BRENNWALD, M. S. *MATAA - Mat's Audio Analyzer*. GNU General Public License, Feb. 2011.
- BRUNEAU, A. M. An acoustic impedance sensor with two reciprocal transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 81, 4 (1987), 1168–1178.
- BUTKOV, E. *Física Matemática*. Editora Guanabara Dois, 1968.
- CAUSSÉ, R., KERGMARD, J., AND LURTON, X. Input impedance of brass musical instruments - comparison between experiment and numerical models. *The Journal of the Acoustical Society of America* 75, 1 (1983), 241 – 254.
- CHEN, J.-M., SMITH, J., AND WOLFE, J. Saxophone acoustics: Introducing a compendium of impedance and sound spectra. *Acoustics Australia* 37, 1 (2009), 18 – 23.
- DALMONT, J.-P. Acoustic impedance measurement, part i: A review. *Journal of Sound and Vibration* 243, 3 (2001), 427 – 439.
- DALMONT, J.-P. Acoustic impedance measurement, part ii: A new calibration method. *Journal of Sound and Vibration* 243, 3 (2001), 441 – 459.

- DICKENS, P., SMITH, J., AND WOLFE, J. Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution. *The Journal of the Acoustical Society of America* 121, 3 (2007), 1471–1481.
- FLETCHER, N., AND ROSSING, T. *The Physics of Musical Instruments*. Springer Verlag, 1998.
- GIBIAT, V., AND LALOE, F. Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration (tmtc) method. *The Journal of the Acoustical Society of America* 88, 6 (1990), 2533–2545.
- HENDRIE, D., AND CAMPBELL, M. Musical wind instrument analysis. *Forum Acusticum* (2005).
- HENRIQUE, L. L. *Acústica Musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2009.
- HOPKINS, B. Wind instrument tone holes, part 1. *Experimental Musical Instruments* 8 (1993).
- KINSLER, L., FREY, A., COPPENS, A., AND SANDERS, J. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, 1982.
- LEVINE, H., AND SCHWINGER, J. On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical Review* 73 (1948), 383 – 406.
- SMITH, J., FRITZ, C., AND WOLFE, J. A new technique for the rapid measurement of the acoustic impedance of wind instruments. *Seventh International Congress on Sound and Vibration* (2000).
- SUITS, B. H. Frequencies of musical notes, jun 2013.
- VAN WALSTIJN, M., SHARP, D., KEMP, J., CAMPBELL, D., AND SHARP, D. Wideband measurement of the acoustic impedance of tubular objects. *Acta Acustica united with Acustica* (2005), 590 – 604.
- WOLFE, J., SMITH, J., AND GREE, M. The effects of placement of the head joint stopper on the impedance spectra of transverse flutes. *The Eighth Western Pacific Acoustics Conference* (2003).
- WOLFE, J., SMITH, J., TANN, J., AND FLETCHER, N. Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes. *Journal of Sound and Vibration* 243, 1 (2001), 127 – 144.

# Apêndice A

## Programação para Aquisição e Manipulação de Sinais

As linhas de comando apresentadas a seguir foram desenvolvidas com o *software* GNU Octave e a extensão MATAA, e referem-se ao processo de gerar, adquirir e manipular os sinais do sistema. Os *chirps* utilizados emitem exponencial e linearmente a faixa de frequência de 50 a 2500Hz ao longo de 0,5s. A taxa de amostragem utilizada foi de 44,1kHz. Devido à problemas de latência, fez-se necessário o uso da ferramenta *padarray*, que adiciona zeros ao começo e ao final do *chirp* gerado. Assim, com a transformada de Fourier, os problemas de latência são sanados.

```
% Gerar sinal de entrada
[s,t] = mataa_signal_generator('sweep_lin',44100,0.5,[50 2500])
% Correção de latência
sp = padarray(s,[10000,0])
% Medir a resposta com ambos os microfones
[h,sp,t] = mataa_measure_signal_response(sp,44100,0,0)
% Separar as respostas
h1 = h(:,1)
h2 = h(:,2)
% Aplicar a transformada de Fourier nas respostas
[H1,f] = mataa_realFT0(h1,44100)
[H2,f] = mataa_realFT0(h2,44100)
% Obter a razão entre as respostas transformadas
y = H2./H1
```

## **Apêndice B**

### **Frequências das Notas Musicais**

Temperamento é o método utilizado pelos músicos para contornar o problema das inarmonicidades que ocorrem ao longo do espectro das notas musicais. Os diversos tipos de temperamento são diferenciados pelo modo com que as frequências acústicas são atribuídas à essas notas. O padrão mais utilizado atualmente, ao menos no ocidente, segue o dito "temperamento igual", cujas relações entre notas e frequências são expostas na Tabela B.1.

Tabela B.1: Frequências das notas musicais com padrão referente ao temperamento igual e base em  $A_4 = 400\text{Hz}$ . Adaptada de Suits (2013).

Nota	Frequência (Hz)	Nota	Frequência (Hz)
C0	16,35	D4	293,66
Csus0/Db0	17,32	Dsus4/Eb4	311,13
D0	18,35	E4	329,63
Dsus0/Eb0	19,45	F4	349,23
E0	20,60	Fsus4/Gb4	369,99
F0	21,83	G4	392,00
Fsus0/Gb0	23,12	Gsus4/Ab4	415,30
G0	24,50	A4	440,00
Gsus0/Ab0	25,96	Asus4/Bb4	466,16
A0	27,50	B4	493,88
Asus0/Bb0	29,14	C5	523,25
B0	30,87	Csus5/Db5	554,37
C1	32,70	D5	587,33
Csus1/Db1	34,65	Dsus5/Eb5	622,25
D1	36,71	E5	659,26
Dsus1/Eb1	38,89	F5	698,46
E1	41,20	Fsus5/Gb5	739,99
F1	43,65	G5	783,99
Fsus1/Gb1	46,25	Gsus5/Ab5	830,61
G1	49,00	A5	880,00
Gsus1/Ab1	51,91	Asus5/Bb5	932,33
A1	55,00	B5	987,77
Asus1/Bb1	58,27	C6	1046,50
B1	61,74	Csus6/Db6	1108,73
C2	65,41	D6	1174,66
Csus2/Db2	69,30	Dsus6/Eb6	1244,51
D2	73,42	E6	1318,51
Dsus2/Eb2	77,78	F6	1396,91
E2	82,41	Fsus6/Gb6	1479,98
F2	87,31	G6	1567,98
Fsus2/Gb2	92,50	Gsus6/Ab6	1661,22
G2	98,00	A6	1760,00
Gsus2/Ab2	103,83	Asus6/Bb6	1864,66
A2	110,00	B6	1975,53
Asus2/Bb2	116,54	C7	2093,00
B2	123,47	Csus7/Db7	2217,46
C3	130,81	D7	2349,32
Csus3/Db3	138,59	Dsus7/Eb7	2489,02

## Apêndice C

# Modelo Numérico para Impedância Acústica de Dutos

O modelo numérico desenvolvido por (Caussé et al., 1983) para o cálculo teórico da impedância acústica de dutos é definido pela matriz de transmissão da Equação C.1

$$\begin{bmatrix} p_{in} \\ u_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \Gamma L & \zeta \sinh \Gamma L \\ \frac{1}{\zeta} \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{out} \\ u_{out} \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

Nela,  $L$  é o comprimento do duto,  $\Gamma$  é a constante de propagação e  $\zeta$  é a impedância características.  $\Gamma$  e  $\zeta$  são definidos de acordo com as Equações C.2 e C.3, respectivamente.

$$\Gamma = \sqrt{Z_v Y_t} \quad (\text{C.2})$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{Z_v}{Y_t}} \quad (\text{C.3})$$

$Z_v$  é a impedância por unidade de comprimento consequente dos efeitos de viscosidade, e  $Y_t$  é a ad-

mitância por unidade de comprimento consequente dos efeitos térmicos. Ambos fatores são definidos de acordo com as Equações C.4 e C.5, respectivamente.

$$Z_v = i\omega\rho \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{r_v}(1-i) - \frac{3i}{r_v^2} \right) \quad (\text{C.4})$$

$$Y_t = \frac{i\omega}{\rho c^2} \left[ 1 + (\gamma - 1) \left( \frac{\sqrt{2}}{r_t}(1-i) + \frac{i}{r_t^2} \right) \right] \quad (\text{C.5})$$

Onde:

$\omega$  é a frequência angular de oscilação acústica;

$\rho$  é a densidade do ar;

$\gamma = C_p/C_v$ , onde  $C_p$  e  $C_v$  são os calores específicos do ar à pressão e volume constantes, respectivamente;

$r_v = r\sqrt{(\omega/c)(1/l_v)}$  e  $r_t = r\sqrt{(\omega/c)(1/l_t)}$ , onde  $c$  é a velocidade do som no ar,  $l_v = \mu/\rho c$  e  $l_t = \lambda/\rho c C_p$ , sendo  $\mu$  e  $\lambda$  o coeficiente de viscosidade e o coeficiente de condutividade térmica, respectivamente.

Considerando  $T_0 = 273.16K$ ,  $T$  a temperatura absoluta do ambiente experimental e  $t$  essa mesma temperatura na escala Celsius, utiliza-se os seguintes valores para os termos do método:

Velocidade do som no ar:  $c = 331.45\sqrt{T/T_0}$  (m/s);

Densidade do ar:  $\rho = 1.2929 T_0/T$  (kg/m<sup>3</sup>);

Coeficiente de viscosidade:  $\mu = 1.708 \cdot 10^{-5}(1 + 0.0029t)$  (N s/m)

Coeficiente de condutividade térmica:  $\lambda = 5.77 \cdot 10^{-5}(1 + 0.0033t)$  (cal/cm s °C);

Calor específico à pressão constante:  $C_p = 0.24$  (cal/g °C)

Razão dos calores específicos:  $\gamma = C_p/C_v = 1.402$